



HAL
open science

Évolution des socio-écosystèmes des grands lacs alpins et leurs services écosystémiques à l'épreuve des pollutions.

Yoann Baulaz

► **To cite this version:**

Yoann Baulaz. Évolution des socio-écosystèmes des grands lacs alpins et leurs services écosystémiques à l'épreuve des pollutions.. Géographie. Université Savoie Mont-Blanc, 2020. Français. NNT : . tel-03211075

HAL Id: tel-03211075

<https://univ-smb.hal.science/tel-03211075v1>

Submitted on 28 Apr 2021

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **Géographie**

Arrêté ministériel : 25 Mai 2016

Présentée par

Yoann BAULAZ

Thèse dirigée par **Jean-Marcel DORIOZ**
et codirigée par **Véronique PEYRACHE-GADEAU**
préparée au sein des laboratoires **UMR CARTEL** et
UMR EDYTEM
dans l'École Doctorale **SISEO**

Evolution des socio- écosystèmes des grands lacs alpins et leurs services écosystémiques à l'épreuve des pollutions

Thèse soutenue publiquement le **27 janvier 2020**,
devant le jury composé de :

M. Laurent TOUCHART

Professeur des Universités, Orléans, Rapporteur

M. Guy RICHARD

Directeur de Recherche, Orléans, Rapporteur

Mme. Sandra LAVOREL

Directrice de Recherche, Grenoble, Examinatrice

Mme. Géraldine PFLIEGER

Professeure agrégée, Genève (CH), Examinatrice

M. Jérôme DUPRAS

Professeur agrégé, Montréal (CA), Examineur

M. Michel MEYBECK

Directeur de Recherche Emérite, Paris, Examineur

M. Jean-Marc BAUDOIN

Chargé de Recherche OFB, Aix-en-Provence, Membre invité

Résumé

Ma thèse traite de l'évolution des relations grands lacs alpins / bassins versants / société, depuis les années 1930. Cette thématique est abordée en se référant au champ disciplinaire de la géographie, à partir des questions suivantes : Comment et où les impacts des polluants sur les lacs ont-ils affecté les activités humaines liées ? De quelles manières les dégradations et les diverses pressions responsables ont-elles été révélées ? Quelles réponses de la société ces impacts ont-ils généré ? Comment ont été mises en place les actions de restauration de la qualité de l'eau et des milieux lacustres ?

Les réponses qui sont apportées à l'ensemble de ces questions reposent sur une analyse croisée de l'évolution des socio-écosystèmes (SSE) lacustres, des services écosystémiques (SE) produits par ces systèmes et des pressions qu'ils subissent. La perspective opérationnelle ouverte par cette étude est de réfléchir à l'extension des systèmes d'observations actuels des grands lacs aux composantes territoriales associées à ceux-ci.

De longue date, la qualité des ressources fournies par les grands lacs alpins est associée au développement des sociétés humaines installées à leurs périphéries immédiates. Pendant des millénaires cette cohabitation s'effectue sans exercer de pressions majeures sur l'écosystème dans son ensemble. Cependant, à partir des années 1950 émerge la problématique de l'eutrophisation, une pollution généralisée des milieux aquatiques. Les relations grand lac / bassin versant / société deviennent alors une préoccupation majeure qui suppose la mise en place d'une gestion globale des plans d'eau et d'une coordination entre les acteurs politiques, scientifiques et les représentants d'usagers.

Depuis la fin du XX^{ème} siècle, les usages des grands lacs sont menacés par un ensemble de micropollutions. Quatre domaines d'enjeux majeurs sont actuellement impliqués dans ces problématiques de gestion : **le tourisme, la pêche, la ressource en eau et la biodiversité**. Ces enjeux sont très dépendants de la qualité de l'écosystème et de ses ressources naturelles, qualités retrouvées (Léman, Bourget) ou sauvegardées (Annecy), grâce à des actions de maîtrise des pollutions provenant des bassins versants (BV). Menées depuis ces 60 dernières années, ces actions ont permis d'enrayer les processus de dégradation observés dès le début du 20^{ème} siècle, période à partir de laquelle les flux transférés aux lacs depuis leurs BV se sont accrus sous l'effet du développement urbain, agricole et industriel.

Dans un futur proche, de nouvelles menaces se profilent (urbanisation accrue des BV, microplastiques, changement climatique, changement d'usages et sur-fréquentation des lacs et des littoraux). **Un débat sur ces perspectives inquiétantes va très probablement s'engager d'ici peu**. Ce débat, amené à mobiliser un panel d'acteurs, mérite d'être anticipé et préparé par un retour sur expérience concernant l'évolution des relations lacs – BV – société. Par cette analyse rétrospective se dégageront des connaissances et des modèles susceptibles de faciliter le dialogue entre science et société et de cadrer des prospectives.

Notre réflexion est une contribution à créer une nouvelle approche d'étude géographique des territoires lacustres, mobilisant les concepts de SE et de SSE en tant qu'outils pouvant aider à la gestion durable et intégrée des grands lacs. Pour ce faire, (1) un des modèles les plus utilisés pour caractériser les SE, le modèle en cascade (de Haines-Young and Potschin, 2010), a été

adapté à l'étude des grands lacs alpins et (2) un cadre conceptuel original appliqué à l'étude de ces lacs de référence en tant que SSE a été produit.

Sur le plan scientifique, des méthodologies sont proposées pour rendre applicable les concepts de SE et de SSE à des approches rétrospectives et aux spécificités des écosystèmes lacustres, répondant ainsi à des manques bien identifiés dans la littérature. Les points forts de cette recherche sont (1) de proposer des typologies adaptées à l'étude des interactions entre processus écologiques et/ou sociaux, (2) de définir le rôle et les limites des SE de régulation de la qualité de l'eau dans la fourniture de presque tous les SE des lacs, (3) de démontrer que l'évolution des pratiques et techniques d'exploitation des SE conditionnent l'accessibilité de ces SE et doivent être prises en compte dans les suivis des lacs pour une application à la gestion.

D'un point de vue opérationnel, le couplage de ces deux concepts nous permet de caractériser les processus moteurs des relations grands lacs / BV / société structurant de ce fait la réponse aux menaces des pollutions. Ces concepts invitent alors à borner le système à gérer et à questionner les observatoires actuels de suivi des grands lacs centrés sur des indicateurs biophysiques (bioindication et flux hydrochimiques) pour qu'ils évoluent vers 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.

Abstract

My thesis deals with the evolution of the relationships between large alpine lakes, watersheds, and society since the 1930s. By referring to the discipline of geography, the topic was addressed through the following questions: How have pollutants that affect lakes also impacted related human activities? How have human activities been affected by the impacts of pollutions on the state of the lakes and where? How have the degradations and various pressures been revealed? What responses from society arose following these impacts? How have actions been implemented to restore the quality of lakes?

The study aims at answering all these questions based on a cross analysis of the evolution of the lacustrine social-ecological systems (SES), associated ecosystem services (ES) and pollutions. The operational perspective is to consider extending the current observation systems of great lakes to the territorial components they are associated to.

For the longest time, the resources supplied by great alpine lakes have been associated with the functioning of human societies, which develop at their boundaries. This cohabitation occurred for millennia without exerting major pressures on ecosystems as a whole. However, eutrophication, a generalized pollution of aquatic environments, emerged in the 1950s. Large lake / watershed / society relationships then became a major concern, thus requiring the establishment of a global management of water bodies and the coordination of political and scientific stakeholders, and human activities.

Since the end of the 20th century, large lakes uses have been threatened by a series of micropollutions. Four societal challenges are at the core of aquatic ecosystem management issues: tourism, fisheries, water resource and biodiversity. These issues depend on the quality of the ecosystem and its natural resources, quality which can be preserved (Annecy) or recovered (Geneva lake, Bourget) owing to watershed pollution management actions. Carrying out these actions over the past 60 years have allowed to curb the degradation processes observed from the beginning of the 20th century, a period from which the flows transferred to the lakes from their watershed increased under the effects of urban, agricultural and industrial development.

On the short term, new threats are arising (e.g. increased urbanization of watershed, micro-plastics, climate change, changes in uses and over-frequentation of lakes and coastlines). These worrying perspectives will engage a new debate that will lead to the mobilization of a large body of stakeholders, and ought to be anticipated and prepared by a feedback on the evolution of the lake – watershed – society relationships. Through this retrospective analysis, novel knowledge and models will emerge and will likely facilitate the dialogue between science and society and frame prospects.

Our reflection is a contribution to the creation of a new approach to the geographical study of lake territories, mobilizing the concepts of ES and SES as tools that can help the sustainable and integrated management of large lakes. To achieve this goal, one of the most widely used models for characterizing ES (the cascade model, Haines-Young and Potschin 2010) has been adapted to the study of large alpine lakes, and a conceptual framework applied to the study of large lakes SES has been produced.

On the scientific level, methodologies are proposed to make the concepts of SE and SSE applicable to retrospective approaches, and to take into account the specificities of lake ecosystems, thus responding to the shortcomings well identified in the literature. The strengths of this research are that it (1) proposes well-suited typologies to the characterization of the interactions between ecological and social processes, (2) defines the roles and limits of the ES involved in water and environment quality regulation in the provision of almost all of the lakes ES, (3) demonstrates that the evolution of practices and techniques of ES exploitation shape up the access to ES and must be considered in lake monitoring to management applications.

From an operational point of view, the coupling of these two concepts allows us to characterize the driving processes of the Great Lakes / BV / society relationships and thereby to structure the response to pollution threats. These concepts then invite to define the limits of the system, and to question the current observatories for monitoring of large lakes, which are centered on biophysical indicators (bioindication and hydrochemical flows). According to us, these observatories should evolve into a more systemic and integrative approach, which would be better suited to respond to challenges at the crossroads of global warming and micropollutants impacts, and to anticipate future societal changes.

Remerciements

Cette thèse est pour moi une véritable aventure scientifique et humaine, un voyage au cœur de la limnologie, domaine qui m'était totalement inconnu il y a encore trois ans, ponctué de nombreuses étapes sur le pourtour, sur les hauteurs, mais également en profondeur des grands lacs Léman, d'Annecy et du Bourget, et d'un court séjour en région québécoise. Cette thèse est loin d'être un travail solitaire, elle est le fruit d'une co-construction, de multiples rencontres et collaborations avec une grande diversité de personnes, dont je me réjouis d'exprimer ici toute ma gratitude.

Mes remerciements vont en premier lieu aux membres du jury qui ont pris le temps d'évaluer ce manuscrit. C'est un honneur pour moi de disposer d'un jury représentant autant de disciplines, et je remercie tout particulièrement Guy Richard et Laurent Touchart d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Merci Jean-Marcel pour ta confiance, ton accompagnement et ta disponibilité au quotidien, merci d'avoir partagé toutes tes connaissances, les moult anecdotes aussi ! Je te remercie aussi pour tous les bons moments que l'on a partagés ensemble. Véronique, merci pour les conseils avisés, d'avoir toujours su prendre du recul sur mon sujet, ton attention et ta bienveillance, tes éclairages et enrichissements et de m'avoir donné les « *billes* » pour faire valoir mon attachement à la géographie. Vos apports à tous les deux ont été extrêmement complémentaires, et à vos côtés, j'ai découvert des domaines immenses de réflexion et renforcé au jour le jour mon attachement, ma curiosité, le goût et mon intérêt pour les grands lacs et la recherche en général.

Je remercie ensuite Rémi Wirtz—Susini et Capucine Duclos, pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée au cours de leurs stages l'année dernière. Les cartes, synthèses, enquêtes et analyses effectuées ont été d'une aide très précieuse lors de la rédaction de ce manuscrit. Il s'agissait également d'une première expérience d'encadrement très enrichissante pour moi que je n'oublierai pas.

Je n'aurais pas pu conduire cette étude sans les financements dont j'ai bénéficié : un contrat doctoral à l'Université Savoie Mont-Blanc (USMB), des financements de fonctionnement par le Métaprogramme ECOSERV de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA), du programme AlpineLakes issu de l'appel à projet Montagne de l'USMB, une bourse de mobilité octroyée par l>IDEX Université Grenoble Alpes de l'Université de Grenoble Alpes pour me rendre au Québec, des enseignements au sein du master Sciences de l'Environnement Appliqué à la Montagne (SEAM).

J'ai eu la chance de faire partie de deux laboratoires : UMR CARTEL (INRA) et UMR EDYTEM (CNRS), que je remercie pour leur accueil, le cadre de travail, la parfaite intégration et les multiples aides techniques et financières. Merci à Jérôme Dupras de m'avoir accueilli dans son laboratoire d'économie écologique à Montréal pendant six semaines, et à Ann Lévesque, car tous les deux vous m'avez fortement aidé à préparer mon étude sur le lac Saint-Pierre, dans les délais impartis. Merci à Diane Dussupt pour les retranscriptions d'entretiens, à Paul Henderson pour la traduction d'article en anglais.

Outre les personnes que je viens de mentionner, je remercie l'ensemble des experts scientifiques de mes deux laboratoires d'appartenance, les membres du projet AlpineLakes, des chercheurs à l'USMB, de l'Université de Grenoble, les experts de mon comité de pilotage de thèse, les anciens chercheurs de l'UMR CARTELE, toutes ces personnes qui ont partagé avec moi leurs mémoires des grands lacs alpins et leurs expertises, merci M.Prigent, ancien médecin au bord du Léman qui m'a éclairé sur les questions de « *lacs et santé* », et les scientifiques de toutes disciplines et tous azimut que j'ai interrogés. Je remercie ensuite les techniciens, élus, directeurs de services aux collectivités (assainissement, eau potable, tourisme), rencontrés en entretien ou dans le cadre des stages de Rémi et Capucine. Je remercie ensuite les membres impliqués dans la gestion des grands lacs alpins : la DDT, la CIPEL, le SILA, le CISALB, la CCLA, le CEN pour les informations et données fournies. Je remercie également tous les usagers, représentants d'usagers des lacs rencontrés, les pêcheurs professionnels et de loisir qui ont accepté de partager avec moi leurs histoires de pêche, l'ASL enfin et M.Gagnaire notamment pour les différents échanges que nous avons eus et l'accès aux archives de l'association. Je remercie profondément toutes les personnes qui ont souhaité échanger avec moi et qui ont fourni la base de mes réflexions et les données d'enquête de cette étude.

Je remercie enfin tous mes amis, à la fois ceux que cette thèse m'a permis de rencontrer, ceux que cette thèse m'a donné la chance de recroiser. Je remercie particulièrement Charlène, sans qui je n'aurai jamais pu postuler à cette thèse ou encore partir au Canada. Merci à mes collègues du bureau des docs à EDYTEM, merci notamment à P.A., Céline et Léna pour les nombreux hébergements à Chambéry et les bons moments partagés, merci aux collègues du bureau des docs et post-docs du CARTELE, vous êtes un peu mes « *grand frères et sœurs doctorants et doctorantes* », merci pour le soutien les derniers mois, les petits mots sur mon tableau, les ballades et les « *mini-concerts* » de soutenance qui m'ont permis de ne pas trop oublier la musique. Merci Liz pour les relectures attentives de mes petits textes en anglais. Une spéciale dédicace à Valentin d'avoir été un collègue de bureau précieux et pour avoir fourni le carburant essentiel à cette thèse : les milliers de litres de café que nous avons partagés ensemble ces trois années ! Merci aussi à Sinzi, à Lolli, à Julie, à Laura et autres compagnons des sorties sportives (et moins sportives !), des virées nocturnes à Thonon et dans toute la région. Merci à mes amis de longue date, qu'ils soient bretons, lyonnais, ou d'ailleurs et qui suivent mes aventures à distance. Merci aussi à tous ceux que j'ai rencontrés indirectement grâce à la thèse, à Titou, sa famille et les amis qui m'ont soutenu, parfois inspiré et avec qui j'ai largement pratiqué les grands lacs alpins pour le plaisir et en tant qu'usager !

Mes dernières pensées vont à mes parents et à ma famille, pour toute leur aide, leur soutien, les encouragements, sans jamais douter de moi, les relectures efficaces de ma maman, qui maîtrise maintenant l'histoire des grands lacs alpins mieux que personne ! Merci de m'avoir toujours poussé à donner le meilleur de moi-même ; vos apports à cette thèse ont commencé il y a déjà de nombreuses années.

Merci à tous !

Sommaire

<i>Résumé de thèse</i>	2
<i>Abstract</i>	4
<i>Remerciements</i>	6
<i>Sommaire</i>	8
<i>Glossaire des acronymes</i>	133
<i>Préambule</i>	144
<i>Introduction</i>	155

Chapitre 1. Apports disciplinaires à la définition du système grand lac – bassin versant - société

233

1.1 Croisement des apports de la limnologie et de la géographie à l'étude d'un objet fondamentalement interdisciplinaire : les grands lacs

244

1.1.1 *Approches géographique et limnologique pour définir les grands lacs*

244

1.1.2 *Les propriétés écosystémiques des grands lacs et leurs influences sur la société*

311

1.1.3 *Les fonctions écosystémiques des grands lacs*

399

1.2 Le couple lac - bassin versant

444

1.3 Le système grand lac – BV – société.....

488

1.3.1 *Définition du « territoire lacustre »*.....

499

1.3.2 *Dégradation et dysfonctionnement des lacs à l'anthropocène*

511

1.3.3 *Les trajectoires de réponse aux pollutions : la gestion de l'eau et des lacs*

655

Chapitre 2. Les grands lacs alpins : des objets qui font territoire

74

2.1 Les grands lacs alpins observés à différentes échelles

76

2.1.1 *Des grands lacs alpins carrefours de flux biophysiques, démographiques et socio-économiques et pôles de développement*

76

2.1.2 *... alimentés par des BV très urbanisés et périurbanisés*.....

81

2.2 La multifonctionnalité des grands lacs alpins	89
2.2.1 Les ressources en eau des grands lacs alpins	91
2.2.2 Les bio-ressources des grands lacs alpins	95
2.2.3 Les ressources minérales des grands lacs alpins	99
2.2.4 Les paysages lacustres des grands lacs alpins	99
2.3 Les parties prenantes de la gestion des grands lacs alpins	103
2.3.1 Les acteurs « producteurs de l'espace lacustre »	105
2.3.2 Les acteurs « consommateurs de l'espace lacustre »	106
2.3.3 Les acteurs observateurs (scientifiques et de la conservation des milieux naturels)	107
2.3.4 Les structures de coordination de la gestion	108
2.4 Le lac Saint-Pierre : un site d'étude des territoires lacustres hors du contexte alpin	111
Chapitre 3. Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société	115
3.1 L'émergence des concepts de service écosystémique et de système socio-écologique.	118
3.1.1 Pour quelles « valeurs » protéger la Nature et les lacs ?	118
3.1.2 L'évolution des paradigmes de la protection de la Nature et l'émergence des concepts de SE et de SSE.....	122
3.1.3 Diffusion du concept de service écosystémique dans les sphères scientifiques et politiques	125
3.1.4 Plus-values et verrous des concepts de SE et de SSE appliqués aux grands lacs alpins	129
3.2 Les bases théoriques des concepts	131
3.2.1 Les Services écosystémiques : un concept clé pour explorer le fonctionnement des socio-écosystèmes	132
3.2.2 Le concept de système socio-écologique : les bases théoriques	142
3.3 Application des concepts de SE et de SSE au système grand lac – BV – société : choix d'une démarche	149
3.3.1 La co-évaluation de la fourniture et la demande en SE : un défi de l'évaluation des SE	151

3.3.2	<i>Choix d'un cadre conceptuel d'application du concept de SSE à l'étude</i>	157
3.3.3	<i>Synthèse des choix conceptuels effectués et modalités de couplage des modèles de SE et de SSE</i>	161
	Chapitre 4. Démarche, informations et analyses	164
4.1	La démarche : modélisation, analyses rétrospectives et opérationnalisation	168
4.1.1	<i>Les enjeux de l'étude du système grand lac – BV - société et verrous de leur analyse</i>	168
4.1.2	<i>Les choix des terrains d'étude</i>	172
4.1.3	<i>La dynamique de construction pluridisciplinaire de l'étude du système lac – BV – société</i>	174
4.2	Les méthodes de récolte et d'analyse des informations	178
4.2.1	<i>Les différents types d'informations</i>	178
4.2.2	<i>Les méthodes de récolte d'informations</i>	180
4.2.2.1	<i>Les entretiens semi-directifs</i>	180
4.2.2.2	<i>Les récits de vie : une technique d'enquête sociologique adaptée à l'étude des relations société - grands lacs</i>	184
4.2.2.3	<i>Les ateliers participatifs</i>	188
4.2.2.4	<i>Les données complémentaires</i>	195
4.2.3	<i>Les méthodes de tri et de synthèse des informations</i>	197
	Conclusion du chapitre	200
	Chapitre 5. Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires	202
5.1	Caractérisation et inventaire général des services écosystémiques des grands lacs alpins	204
5.1.1	<i>Inventaire des services écosystémiques des grands lacs alpins</i>	204
5.1.2	<i>Analyse comparée de la fourniture et de la demande en SE des trois grands lacs alpins</i>	209

5.1.3 Variabilité spatio-temporelle des SE des grands lacs alpins et relations avec les qualités de l'eau et des milieux	211
5.2 Modélisation de la relation avec les qualités de l'eau et des milieux et les SE des grands lacs alpins	223
5.2.1 Adaptation de la cascade des SE aux grands lacs alpins.....	223
5.2.2 Zoom : application de la cascade à l'analyse de la fourniture en SE	226
5.2.3 Zoom : application de la cascade à l'analyse de la demande en SE.....	228
5.2.4 Modélisation de la cascade des SE des grands lacs soumis aux problèmes de pollution.....	230
5.3 Chroniques des SE des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : le rôle des services de régulation	232
5.3.1 Les SE du passé	233
5.3.2 L'eutrophisation, la grande affaire des grands lacs au XXème siècle	237
5.3.3 Les pollutions aux micropolluants	254
5.3.4 La fourniture en SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux sous contraintes des pollutions	260
Conclusion du chapitre.....	261
Chapitre 6. Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des services écosystémiques à l'épreuve des pollutions.....	263
6.1 Structure et composantes du SSE SOALP	265
6.1.1 La structure du modèle.....	267
6.1.2 Les limites du système	270
6.1.3 Les productions du SSE : les SE et les actions de gestion.....	270
6.2 Applications du modèle SOALP	270
6.2.1 Modélisation des trajectoires sociales représentation – action.....	271
6.2.2 Application rétrospective : construction du socio-écosystème du Léman sous contrainte des pollutions	273
6.2.3 Comparaison des trajectoires sociales représentation/action des trois grands lacs alpins	284

6.2.4 SOALP : Application à l'étude du SSE du Lac Saint-Pierre, un lac fortement soumis aux pollutions diffuses de son BV	287
6.2.5 Composantes du SSE associées aux activités de pêche et élaboration de compromis entre fourniture et demande en SE	301
6.3 Synthèse : Les modalités de changement d'état du SSE des grands lacs	312
6.3.1 Les facteurs du changement d'état	312
6.3.2 Modes d'action des facteurs de changement et rôles des fonctions clés	314
Conclusion du chapitre.....	320
Chapitre 7. Discussion générale et opérationnalisation	321
7.1 Critiques et limites de la démarche interdisciplinaire intégrée.....	324
7.1.1 Analyse critique de l'approche pluridisciplinaire.....	324
7.1.2 Une application du concept de SE en géographie.....	327
7.1.3 Critique de l'application des concepts de SE et de SSE à l'étude des territoires lacustres	331
7.1.4 Perspectives d'application du modèle SOALP.....	335
7.2 Variabilité spatio-temporelle du SSE des grands lacs	338
7.3 Relations multiples entre qualités de l'eau et des milieux et SE	344
7.3.1 Les pollutions révèlent les SE et les SE révèlent les pollutions.....	345
7.3.2 Qualités de l'eau et des milieux et SE des grands lacs	348
7.4 Opérationnalisation du modèle et prospective	352
7.4.1 Approche par la prospective stratégique	352
7.4.2 Quelques pistes pour un « observatoire socio-écosystémique ».....	360
Conclusion	368
Table des illustrations	371
Annexes	378
Bibliographie et sitographie	467

Glossaire des acronymes

ALP : Association Léman Passion

ASL : Association pour la Sauvegarde du Léman

BV : Bassin Versant

CIPEL : Commission Inter-gouvernementale pour la Protection des eaux du Léman

CISALB : Comité Intersyndical pour l'Assainissement du Lac du Bourget

CNR : Compagnie Nationale du Rhône

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

DDT : Direction Départementale des Territoires

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunal

ETM : Eléments Trace Métalliques

FRAPNA : Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique (devenu INRAE – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement au 1^{er} janvier 2020)

LPO : Ligue Protectrice des Oiseaux

LSP : Lac Saint-Pierre

MAPAQ : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

MELCC (ancien : MDDEFP) : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques

MES : Matières en suspension

MFFP : Ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs

MUS : Modes d'Usages des Sols

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SE : Service écosystémique

SHL : Station d'Hydrobiologie Lacustre – UMR CARRETEL (Unité Mixte de Recherche Centre Alpin sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques)

SIG : Services Industriels de Genève

SILA : Syndicat Intercommunal du Lac d'Annecy

SSE : Socio-écosystème / système socio-écologique

STEP : Station d'Épuration

TCRLSP : Table de Concertation Régionale du Lac Saint-Pierre

Préambule

L'Ode aux grands lacs alpins

Les grands lacs alpins, lacs majestueux, infiniment plus petits que les océans, beaucoup plus grands que les étangs, à fleur de fleuve, à fleur de montagnes, lacs de plaines et de piedmonts, lacs glaciaires, grands lacs d'eaux froides et de limons, d'un bleu azur, vert, turquoise, argenté dans leur écrin de verdure, lieu de sédimentations, lieu d'histoires, de vies, d'échanges, de développements et d'innovations, toutes choses dont témoignent des paysages majestueux, étendus, paisibles, délicats et fragiles, des montagnes verdoyantes ou enneigées, à la fois forestières, agricoles, pastorales et sauvages, aux étendues d'eaux douces calmes et malmenées, au cœur de la route des Alpes, au carrefour de l'Europe, et à ce titre, zone frontière et de partages, de guerres et de paix, lacs balayés par les embarcations de plaisance, barques des pêcheurs, navires de transport ou encore des sportifs de nature, territoire récréatif donc, mais aussi trésor écologique, véritables mers intérieures, vivier pour les faunes aviaire, aquatique, amphibie qu'elles soient permanentes ou de passage et aussi haut-lieu de contemplation de la nature, de défouloir et de dépaysement, de ressourcement et de détente, d'art, d'histoire et de spiritualité.

Territoires multicolores, territoires composites ; tantôt territoires aimés, territoires rêvés, territoires de riverains, d'acteurs de la conservation et d'artistes ; tantôt territoires de ressources, territoires exploités, territoires de pollutions passées, d'énigmes en cours et de perturbations à venir, à la fois territoires convalescents et territoires d'espoirs : autant de mots et de messages pour décrire les forces et fragilités de ces grands lacs à préserver.

Inspiré de la quatrième de couverture de De Koninck 2000



Introduction

Les lacs contiennent 90% des eaux douces de surface de la planète. Ils représentent l'une des plus importantes sources d'eau domestique, constituent des lieux de production de ressources alimentaires, d'implantation des sociétés, de bien-être, spiritualité et sont considérés comme vitaux (Steinman et al. 2017). Leur contribution à l'économie mondiale selon Costanza et al. (2014) représente plusieurs trillions de dollars US par an. Les lacs ont également une place historique importante en sciences de l'environnement étant donné qu'ils ont inspiré le concept d'écosystème (Drouin 1987).

La plupart des bénéfices lacustres est liée plus ou moins directement à la **biodiversité**. Plus ces écosystèmes sont étendus, volumineux et riches en biodiversité, plus les bénéfices qu'en tire la société sont diversifiés et importants (IPBES 2018a). C'est pourquoi les grands lacs sont tout particulièrement **investis par les populations humaines. Ils sont aussi emblématiques** du fait de leur importance identitaire et culturelle.

Au cours du XIX^e siècle, un processus historique majeur entraîne le basculement d'une société à dominante agricole et artisanale vers une ère industrielle et commerciale. La révolution industrielle s'accroît au XX^e siècle et s'accompagne d'un accroissement rapide de la population et de son empreinte écologique, qui se traduit, pour les grands lacs, par une **accumulation de pressions** avec des flux de polluants, pour l'essentiel issus de leur bassin versant (BV). Depuis le début du XX^e siècle, pour l'ensemble des grands lacs, la charge polluante entrante se compose notamment d'un excès de phosphore qui provoque un phénomène d'eutrophisation et de désoxygénation des eaux profondes (Jenny et al. 2020). Ces dégradations imposent une gestion globale des milieux lacustres dont les modalités se mettent en place de manière empirique face aux pressions et qui reposent sur des observatoires limnologiques.

Gérer un grand lac suppose d'intégrer une diversité de facteurs et composantes associés au lac et relevant autant des fonctionnements biophysiques et des flux qui en résultent (eau, matières, énergie), que du fonctionnement de structures sociales, économiques et institutionnelles, et de leurs relations (sous forme d'informations, d'échanges commerciaux, de perceptions...). Pour prendre la mesure du système à gérer, **un effort de conceptualisation** est nécessaire pour disposer d'un modèle de la dynamique du plan d'eau, de son BV et de ses usages.

Cette perspective interroge la science. Les grands lacs sont **des objets pluridisciplinaires** ; ils nécessitent une étude à l'échelle du **système grand lac – BV – société**, considérant les interactions et imbrications entre les composantes physiques, écologiques et sociétales qui déterminent son état (Carpenter et al. 2007) et son évolution sous contraintes du développement humain, des pollutions et depuis peu des exigences nouvelles sur la transition écologique. Une analyse en termes de **trajectoire d'évolution et de modélisation de ce système** doit être menée, avec l'ambition d'aider à la prise de décision et à l'action des gestionnaires des milieux lacustres.

Les grands lacs alpins français fournissent des exemples pertinents de trajectoires grands lacs – BV – société qui prennent part autour d’une succession de problématiques de pollutions – essais de restaurations. Au cours du XX^{ème} siècle, **les lacs Léman, d’Annecy et du Bourget** ont connu plusieurs crises de pollutions qui ont fortement dégradé la qualité de ces écosystèmes et leurs usages, au point de nécessiter la mise en place d’actions de gestion visant à restaurer un état satisfaisant pour les activités humaines. De nos jours, l’évolution de notre société et des modes de vie entraînent un accroissement de l’attrait général pour ces lacs qui, en conséquence, sont de plus en plus investis par les acteurs du territoire et font figure de nouvel axe de développement à l’échelle régionale (en atteste notamment la politique “Grands Lacs” développée en Savoie par les acteurs du tourisme). Cet intérêt social et économique pour les grands lacs alpins est dû en partie à la qualité des eaux et des milieux lacustres retrouvée (le Léman, lac du Bourget) ou maintenue (lac d’Annecy), fruit des investissements passés.

Le succès de la restauration des grands lacs alpins reste fragile et **de nouvelles menaces se profilent** : changement climatique, espèces invasives, polluants émergents, micropolluants plastiques, intensification des loisirs nautiques, périurbanisation galopante, perte et manque de ressources en eau, etc. (Montuelle and Clémens 2015). Ces problématiques affectent la plupart des grands lacs dans le monde et font partie des principaux enjeux globaux des écosystèmes aquatiques (Aznar-Sánchez et al. 2019). Elles surviennent dans un contexte d’écosystèmes probablement affaiblis par les effets cumulés des perturbations passées, un contexte historique et culturel spécifique mais aussi d’évolutions des usages des lacs dont les impacts et les besoins en matière de qualité et quantité d’eau sont difficiles à prévoir mais néanmoins toujours en croissance (Wu and David 2002, Pahl-Wostl 2007, Parrott 2010).

Ces nouvelles problématiques entraînent la nécessité de redéfinir les conditions de la restauration durable de ces écosystèmes et de la prévention des perturbations à venir. La tâche est complexe car elle amène à mobiliser un panel d’acteurs institutionnels, scientifiques, usagers et populations riveraines dont les perceptions et enjeux sont divergents. Afin de développer une gestion plus adaptative et préventive, il est nécessaire de se munir **d’un corpus d’observations et d’analyses passé - présent et avenir** pour soutenir la gouvernance des grands lacs et reconfigurer les observatoires des grands lacs, leur permettant d’assurer des alarmes précoces des perturbations. En conséquence, les diagnostics d’impact et d’état doivent évoluer et tendre à mieux combiner caractérisation écologique, caractérisation des relations lacs – BV, avec celle des usages et des composantes sociales et institutionnelles liées.

Le questionnement à renouveler est vaste : *Quelles sont les spécificités du système « grand lac – BV – société » ? Quelles relations les grands lacs entretiennent-ils avec la société et comment ont-elles évolué ? A partir de quelle(s) évolution(s) les usages peuvent remettre en cause le fonctionnement et l’état des écosystèmes lacustres ? Où les impacts des polluants sur l’état des lacs se manifestent-ils et comment affectent-ils les activités humaines ? De quelles manières les dégradations et les diverses pressions responsables sont-elles révélées ? Puis une fois révélées, comment sont mises en place les actions de restauration de la qualité des lacs ? Et quels ont été les signes de la restauration de ces écosystèmes lacustres par le passé ?*

De telles questions ont à peine été posées par les limnologues et gestionnaires ; pourtant, la restauration durable des grands lacs doit être en mesure d’y répondre et d’identifier les causes

sociales et économiques de la dégradation des écosystèmes, ainsi que leurs conséquences bio-physiques, pour mieux anticiper les risques à venir.

Notre recherche s'inscrit dans ce double contexte scientifique et opérationnel. **Notre but est de caractériser et d'étudier l'évolution des territoires des grands lacs, de modéliser et comprendre comment leurs composantes interagissent sous contrainte des pollutions et de répondre à la question suivante :**

**En quoi le système grands lacs - BV - société se construit
autour des trajectoires de pollution – restauration de
l'écosystème lacustre et sous influence de l'évolution des
usages des lacs ?**

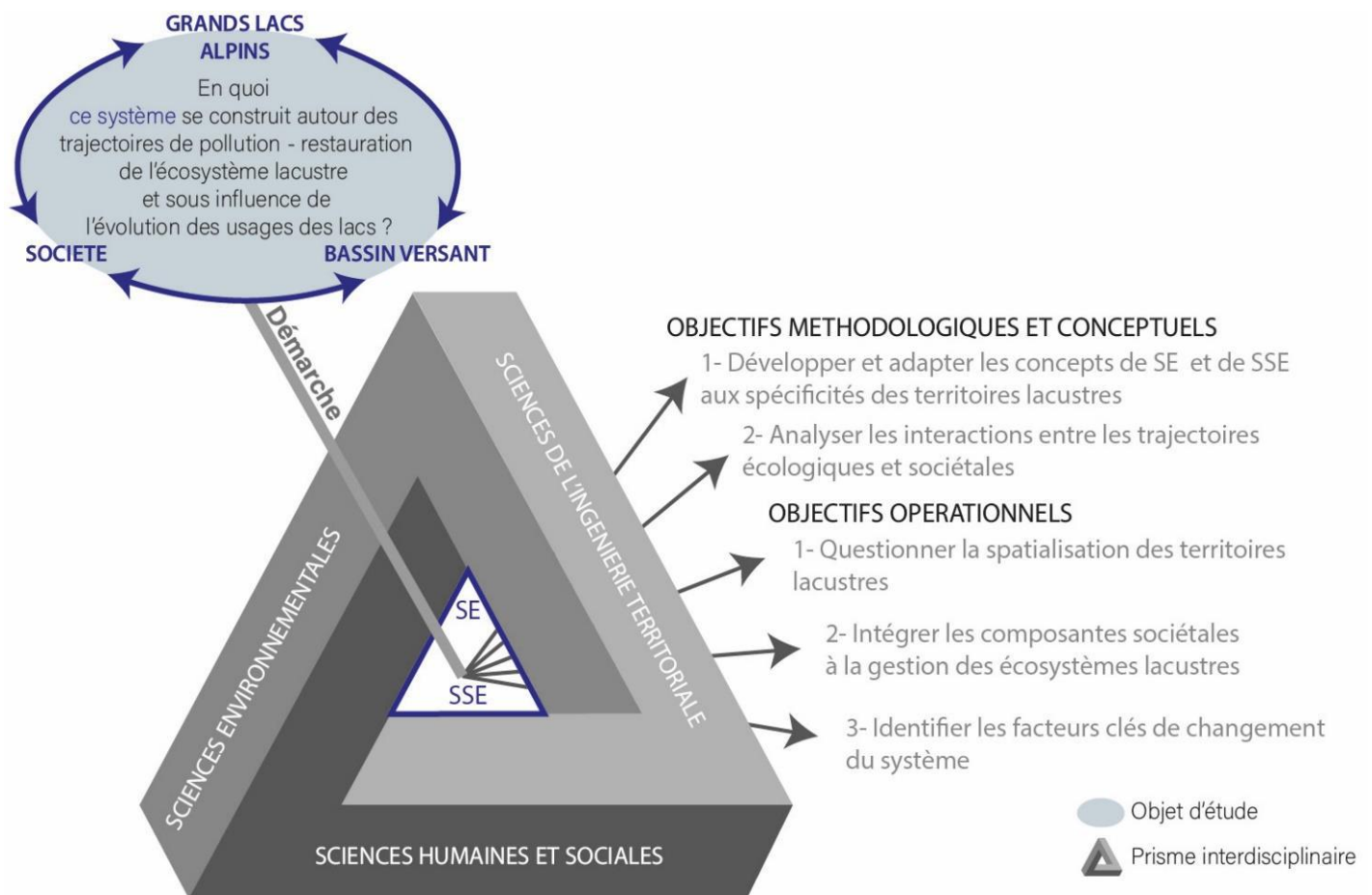
L'ambition est d'abord méthodologique : **proposer un modèle conceptuel** des relations grands lacs – BV – société et en discuter la portée générale en tant qu'outil d'analyse de l'état du système en l'appliquant **rétrospectivement** à l'historique des pollutions et des conditions de leur remédiation. L'autre ambition est de se servir de cet outil pour une **analyse prospective d'anticipation** des évolutions et des enjeux de gestion futurs avec la mise au point d'un observatoire du système grand lac – BV – société. Notre recherche consiste donc à analyser un cas particulier des relations nature – société.

Face à la prise de conscience de la dégradation des ressources naturelles, différents concepts et outils interdisciplinaires sont diffusés depuis les années 2000, tant dans les sphères scientifiques que politiques pour penser de manière globale les relations Homme – nature. Le but de ces concepts est d'analyser les crises environnementales et d'aider à la décision en décrivant les relations fonctionnelles entre les compartiments biologiques et physiques des écosystèmes anthropisés et les bénéfices que les sociétés humaines tirent de ceux-ci (Gómez-Baggethun et al. 2010). Dans cette perspective, notre approche vise à décrire le fonctionnement intégré du système grand lac – BV - société grâce à deux concepts transdisciplinaires actuels, **celui de service écosystémique (SE) et celui de système socio-écologique (SSE)** (Liu et al. 2007b, Morán-Ordóñez et al. 2013). Notre analyse s'appuie sur les trois cas concrets **des grands lacs alpins français** et le **lac Saint-Pierre**, grand lac fluvial du Saint-Laurent au Canada (Québec).

Il n'existe pas aujourd'hui de cadre conceptuel spécifique permettant de comprendre les interactions entre les sociétés et les lacs (Liu et al, 2007 ; Carpenter et al, 2007). Adapter un cadre conceptuel mobilisant les SE nous permettra **d'explorer la capacité « d'auto-épuration » des écosystèmes lacustres, l'importance de ces processus pour la société et leurs déterminants**. Cependant, nous souhaitons également analyser la gestion des SE, modéliser la transmission des phénomènes de pollution dans le système grand lac – BV – société et prendre en compte l'ensemble des facteurs qui modifient son fonctionnement. Il sera ainsi nécessaire de faire appel à un deuxième concept, plus large, compatible avec le concept de SE : le concept de système socio-écologique (SSE) et de réfléchir à la possibilité de coupler ces deux concepts.

Divers savoirs disciplinaires vont être mobilisés dans cette étude, issus des sciences biologiques, de l'écologie, de l'hydrologie, des sciences humaines et sociales, des sciences de

la gestion, de l'ingénierie, ainsi que des savoirs d'usages. Tout ceci justifie une étude géographique qui étudie les phénomènes de société associés aux grands lacs et qui s'intéresse aux dynamiques spatiales et temporelles des interactions et imbrications entre les composantes écosystémiques et sociétales. Telle que définie par Forel (1904), la limnologie d'ailleurs est une science géographique qui étudie les lacs dans leur globalité, prenant en compte leur contexte territorial. Cette étude vise alors à rapprocher la géographie physique (par la limnologie) et la géographie sociale dans une **démarche globale d'étude transdisciplinaire des territoires lacustres soumis aux pollutions**. Les résultats de cette démarche permettront de mieux comprendre le fonctionnement des relations société - grands lacs, en modélisant le système et la co-évolution de ses composantes dans la perspective d'une gestion adaptative des grands lacs (Figure 1).



Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 1 : Représentation schématique de la démarche et objectifs. La démarche transdisciplinaire associe les sciences environnementales, les sciences humaines et sociales et les sciences de l'ingénierie territoriale pour étudier le système grands lacs alpins – bassin versant – société. La mobilisation de deux concepts partagés par ces différentes disciplines, les concepts de service écosystémique et de système socio-écologique, offre une approche, une terminologie, des notions et des méthodes pour mobiliser ces contenus disciplinaires et les combiner pour analyser, modéliser ou évaluer l'état des relations société – écosystème. Cette démarche nous permet de répondre aux objectifs spécifiques de la thèse

Deux hypothèses organisent notre démarche. Elles partent de l'observation que les écosystèmes lacustres réagissent aux perturbations qu'ils subissent et que des actions de gestion sont instaurées pour réguler les impacts anthropiques et maintenir les usages.

- **Hypothèse 1** : Les services écosystémiques rendus par les grands lacs ne sont pas invariants dans le temps. Ils se sont construits, ont évolué en réponse à l'évolution des usages des lacs, de la qualité de l'eau et de ses impacts sur la société et des réponses apportées par la société pour y répondre.
- **Hypothèse 2** : Le système socio-écologique des grands lacs s'est construit et complexifié autour de la gouvernance des impacts des pollutions sur les SE. L'exploration fonctionnelle de ce SSE et sa modélisation permettent de disposer d'un outil opérationnel à la gestion adaptative.

Plusieurs tâches sont articulées autour de ces deux hypothèses de recherche (figure 1) :

- **Mettre à l'épreuve les concepts interdisciplinaires de SE et de SSE** en tant qu'outils d'analyse et d'aide à la gestion des territoires lacustres.
- **Représenter et fournir un outil conceptuel** d'analyse de l'état de ce système qui puisse s'appliquer aux analyses rétrospectives et prospectives
- Analyser les interactions entre les trajectoires écologiques et sociétales au cours des phases de pollution/restauration des grands lacs alpins et comment s'est **construit le SSE** en réaction à ces évolutions.
- Questionner la spatialisation des territoires lacustres en mobilisant le concept de service écosystémique
- **Proposer un observatoire** d'analyse intégrée de l'état et du fonctionnement du SSE permettant de considérer les composantes sociétales à la gestion des écosystèmes lacustres et d'identifier les facteurs clés de changement de ce système.

La thèse est organisée en sept chapitres différents. Les trois premiers posent le cadre théorique et conceptuel, le quatrième présente la trajectoire méthodologique et les trois derniers présentent, analysent et discutent les résultats en mobilisant les apports théoriques exposés précédemment (Figure 2).

Le chapitre 1 questionne les approches disciplinaires de l'étude des interactions Homme - grand lac et présente les spécificités biophysiques et sociétales qui déterminent **les relations grand lac – BV – société**.

Le chapitre 2 s'attache à la présentation des objets d'étude **des grands lacs alpins** et du lac Saint-Pierre en mettant en avant leurs caractéristiques biophysiques, territoriales et en quoi il s'agit de terrains d'étude représentatifs de la complexité des systèmes grand lac – BV – société.

Le chapitre 3 apporte les connaissances théoriques et pratiques à l'application des concepts de SE et de SSE pour l'étude du **territoire lacustre**. Il pose notamment les bases pour une évaluation pluridisciplinaire des SE et la construction de cadres conceptuels visant à modéliser le fonctionnement et l'évolution du SSE des grands lacs. Ce chapitre présente les choix conceptuels réalisés.

Le chapitre 4 fait état de la démarche pluridisciplinaire menée dans cette étude et expose les nombreuses méthodologies employées pour recourir à la collecte d'informations de différentes natures sur les grands lacs alpins et leur synthèse.

Les cinquième et sixième chapitres exposent et analysent les résultats de l'étude du **socio-écosystème des grands lacs**, selon deux échelles imbriquées :

Le chapitre 5 analyse l'évolution des SE des grands lacs alpins, leurs composantes clés et interactions avec les qualités de l'eau et des milieux.

Le chapitre 6 élargit le point de vue pour considérer le système dans son ensemble et analyser les facteurs de production des SE et des actions de gestion des pollutions.

Enfin, le dernier chapitre présente la *discussion générale de l'étude*, et questionne spécifiquement l'apport des concepts de SE et de SSE à l'étude des grands lacs et à la géographie, analyse et cherche à définir les qualités de l'eau et des milieux lacustres par le prisme des SE et envisage des applications prospectives aux modèles conceptuels développés dans le cadre de cette étude et leur opérationnalité.

Les figures 2 et 3 présentent les questionnements théoriques ainsi que le plan de thèse et les mots clés associés à chacun des chapitres. Ils peuvent être utilisés en tant que fil rouge pour la lecture de ce manuscrit.

QUESTIONNEMENT ET STRUCTURE DE L'ETUDE

CADRAGE THEORIQUE ET CONCEPTUEL

Chapitre 1

En quoi les grands lacs sont des objets interdisciplinaires ?
 Quelles relations entretiennent-ils avec la société ?
 Quelles sont les spécificités de fonctionnement du système grand lac - BV - société ?

Chapitre 2

En quoi les grands lacs alpins sont de bons sites d'étude de l'évolution des relations grand lac - BV - société ?
 Quelles sont les composantes et propriétés biophysiques et sociales de ces sites d'étude ?

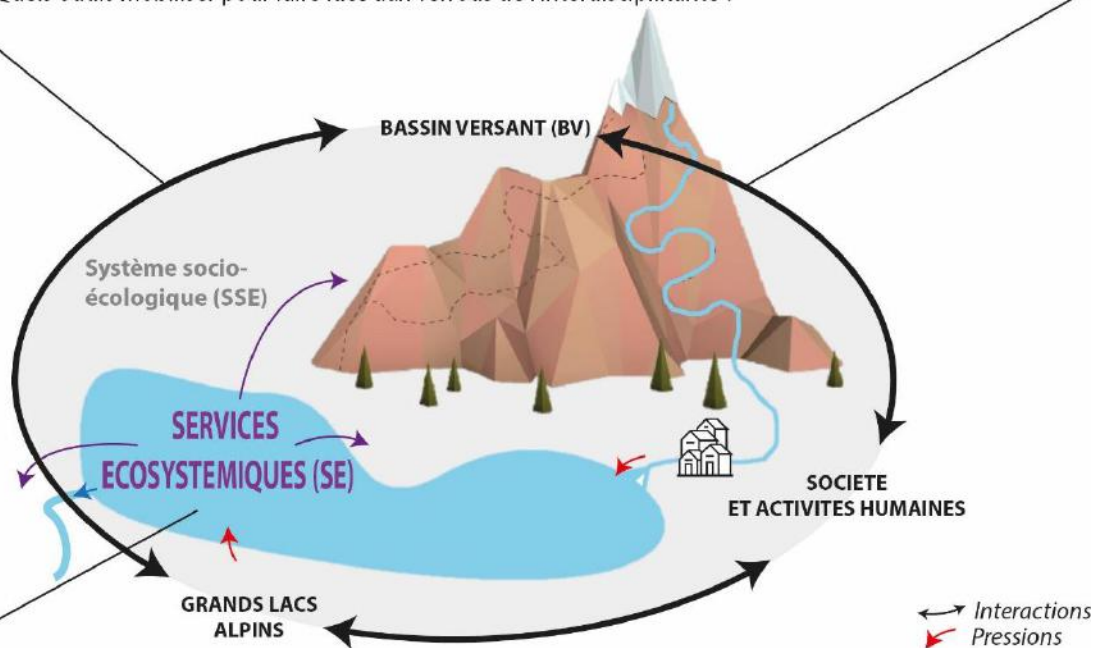
Chapitre 3

Comment appliquer les concepts de SE et de SSE au système grand lac - BV - société ?
 En quoi les concepts de SE et de SSE sont des outils interdisciplinaires permettant de modéliser les interactions Homme - grands lacs ?

DEMARCHE METHODOLOGIQUE

Chapitre 4

Comment développer une démarche interdisciplinaire à l'étude du système grand lac - BV - société ?
 Quels outils mobiliser pour faire face aux verrous de l'interdisciplinarité ?



RESULTATS : MODELISATIONS ET TRAJECTOIRES

Chapitre 5

Comment l'impact des pollutions sur l'état biophysique des lacs a-t-il affecté les activités humaines ?
 Comment ont évolué les SE des grands lacs alpins au cours de la phase de dégradation puis de restauration de l'état des lacs ? et quels sont les facteurs qui ont modifié leur dynamique ?

Chapitre 6

Comment se sont construites les réponses aux perturbations sur les SE ?
 Comment modéliser le système grand lac - BV - société pour qu'il réponde aux enjeux de la gestion ? et comment tester un tel modèle ?
 Quelles sont les variables et interfaces qui composent le SSE des grands lacs ?

DISCUSSION, OPERATIONNALISATION ET PORTEE GENERALE

Chapitre 7

Quels sont les avantages et limites de l'approche pluridisciplinaire à l'étude des territoires lacustres ? Comment définir les qualités de l'eau et des milieux par le prisme des SE ?
 Le cadre conceptuel d'étude du SSE des grands lacs peut-il aider à identifier des pistes pour la création d'un observatoire socio-écossystémique ?

Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 2 : Schéma général des questionnements associés à chacun des chapitres de la thèse

PLAN DE THESE ET MOTS CLES

Chapitre 1 : Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

Géographie et limnologie ;
Ecosystème lacustre et fonctions écosystémiques
Pollution et restauration

Chapitre 2 : Les grands lacs alpins : des objets qui font territoire

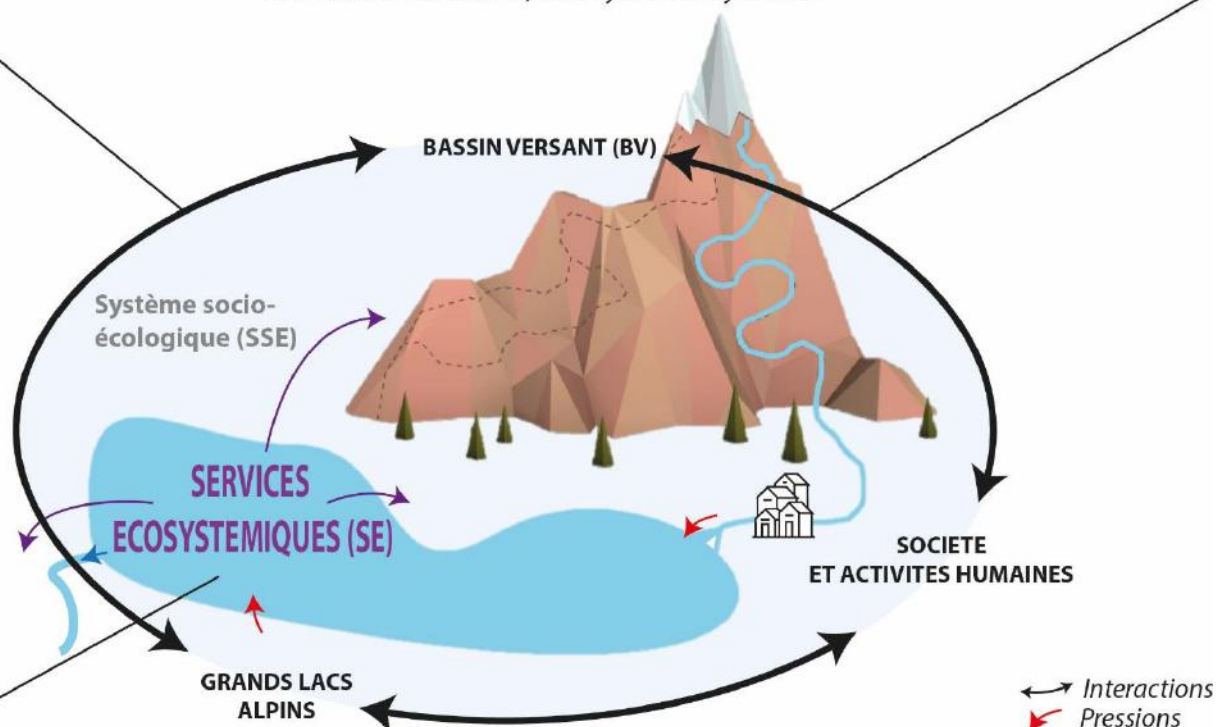
Présentation des sites d'étude
Territoire et ressources lacustres
Pratiques et techniques
Réseau d'acteurs et gouvernance

Chapitre 3 : Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

Les concepts de service écosystémique et de socio-écosystème
Choix théoriques pour l'application des concepts

Chapitre 4 : Démarche, informations et analyses

Enjeux et verrous de la démarche
Les données et informations
Les méthodes de récolte, d'analyses et de synthèses



Chapitre 5 : Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

Inventaire, caractérisation des SE et aires d'influences des grands lacs
Adaptation du modèle en cascade des SE
Trajectoires d'impact et de réponse écologique aux pollutions
Fiches descriptives des SE

Chapitre 6 : Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des services écosystémiques à l'épreuve des pollutions

Construction et composantes du SSE des grands lacs alpins et facteurs de changement d'état
Le modèle SOALP, application à la pêche et au SSE du lac Saint-Pierre (Québec)
Les trajectoires de réponses sociétales aux pollutions

Chapitre 7 : Discussion générale et opérationnalisation

Analyses critiques des concepts de SE et de SSE
Les relations entre SE et les qualités de l'eau et des milieux
Prospective stratégique et observatoire socio-écosystémique

Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 3 : Fil rouge : plan de thèse et mots clés par chapitres

Chapitre 1. Apports disciplinaires à la définition du système grand lac – bassin versant - société



Le lac d'Annecy depuis la Tournette (photographie personnelle)

Les grands lacs sont à la fois des plans d'eau colonisés par une biodiversité et renfermant un fonctionnement hydrologique spécifique, des écosystèmes donc, mais également investis par les activités humaines, source d'eaux, de produits alimentaires, d'émerveillement, d'adoration et de crainte, vecteur d'une culture et structurants pour les sociétés humaines qui vivent autour. Il s'agit d'un objet hybride où les phénomènes écologiques sont intimement associés aux phénomènes sociétaux, dont l'étude géographique permet une **approche interdisciplinaire**.

Les usages sont plus que jamais au cœur du fonctionnement des écosystèmes lacustres : pêche, tourisme, navigation ; les pollutions, l'urbanisation du littoral ; ce qu'ils engendrent depuis les territoires à l'amont des lacs sont autant de composantes sociétales qui transforment par contrecoups les caractéristiques lacustres. Pourtant, les lacs sont définis uniquement en tant qu'entité biophysique, sans mention de leurs usages. Cette définition ne rend pas compte des spécificités de développement socio-économique autour des lacs et est insuffisante pour l'étude des composantes territoriales associées à cet **objet géographique**.

Pour ces raisons, la géographie doit questionner les définitions des lacs et développer une approche critique des notions de la limnologie pour comprendre ce que sont les grands lacs et leurs caractéristiques biophysiques et territoriales.

Un état de l'art, qui mobilise les concepts des différentes disciplines qui s'intéressent aux grands lacs, permettra d'exposer les caractéristiques de l'écosystème lacustre et du territoire associé dans les parties 1 et 2 de ce chapitre respectivement. Les notions de limnologie mobilisées dans le reste de l'étude sont définies et présentées ici, elles serviront notamment à clarifier le fonctionnement des services écosystémiques des grands lacs dans les chapitres résultats de cette thèse. La troisième partie de ce chapitre expose les contraintes posées par le développement socio-économique sur le fonctionnement des lacs et les outils réglementaires existants pour réguler ces impacts.

1.1 Croisement des apports de la limnologie et de la géographie à l'étude d'un objet fondamentalement interdisciplinaire : les grands lacs

1.1.1 Approches géographique et limnologique pour définir les grands lacs

- ❖ Atouts de la géographie pour étudier les grands lacs

A la fin du XIX^{ème} siècle, le chercheur suisse François-Alphonse Forel (Figure 1-1) s'intéresse aux lacs de son pays, tout particulièrement le Léman, et invente la **limnologie**, la discipline qui étudie les lacs. Forel surnomme cette science "*l'océanographie des lacs*" de par les rapprochements méthodologiques et conceptuels entre ces deux disciplines : l'une s'intéressant aux milieux océaniques, la seconde aux eaux continentales (ou « *eaux intérieures* ») et tout

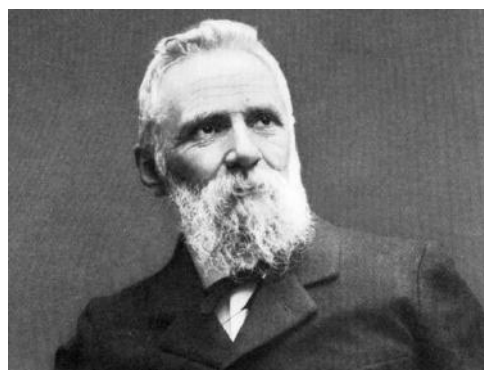


Figure 1-1 : François-Alphonse Forel, inventeur de la limnologie

particulièrement les eaux dormantes qu'elles soient d'origine naturelle (lacs, étangs) ou artificielle (retenues de barrages), par opposition aux eaux coulantes des fleuves et rivières.

La limnologie a beaucoup évolué depuis et ne correspond plus à l'approche de Forel (Encadré 1-1) qui souhaitait "faire pour les lacs ce que la géographie et la géologie représentent pour la terre", ou encore "appliquer à l'étude des choses du lac les méthodes de la géographie" (Forel 1892, VIII et IX). Pour Forel, la limnologie s'apparente d'avantage à la « **géographie des lacs** » qu'à la « *biologie des lacs* », telle que définie par Thienemann (Touchart et al. 2014). Ce n'est que 70 ans plus tard avec la création de la géographie limnologique (Touchart 1993) que les lacs redeviennent un objet d'étude pour la géographie (Touchart et al. 2014).

Encadré 1-1 : Une autre approche de la limnologie

D'autres définitions de la limnologie sont données par Dussart (1966) puis Thienemann qui considèrent la limnologie comme une branche de l'écologie permettant l'étude des organismes vivants qui colonisent les eaux supérieures continentales, ainsi que leurs relations entre eux et avec leur environnement (Touchart et al, 2014).

Cette vision est aujourd'hui dominante et a été reprise par de nombreuses associations scientifiques de limnologie et d'hydrologie (ex: International Society of Limnology, Association Française de Limnologie, International association of hydrological sciences).

Touchart et ses collaborateurs (2014) dressent une liste des atouts de la géographie pour l'étude des lacs. Ils mettent en avant qu'il s'agit d'une science de synthèse qui permet d'étudier les lacs dans leur globalité, considérant le lac dans sa relation avec son bassin d'alimentation, avec l'atmosphère, avec son environnement régional occupé par les Hommes et investi par les sociétés. La géographie étudie les processus lacustres qui relient les lacs aux Hommes à toutes les échelles spatiales et temporelles. La géographie considère les interactions entre ces espaces et temporalités pour étudier le fonctionnement des lacs et en tirer des conclusions qui peuvent renseigner **la gestion des plans d'eau**.

❖ Définition des objets lac et « grands lacs »

Les lacs sont des îles d'eau au milieu des continents terrestres (Forel, 1904, p7)

Du petit lac profond (ex : lac Pavin en Auvergne – superficie : 0.44 km², profondeur : 92m) au grand lac superficiel (le lac Balaton en Hongrie - superficie : 592 km², profondeur : 12,5 m), à la forme circulaire (de nombreux lacs volcaniques) aux morphologies plus abstraites (le lac Manicouagan au Québec en forme d'anneau), de couleur bleu turquoise (le lac d'Aiguebelette en Savoie, France) à la couleur rouge sang (lac Laguna Colorada en Bolivie), remplis d'eaux salées (la mer Morte au Proche-Orient), d'eaux douces comme la majorité des lacs ou bien secs une partie de l'année (le Lost Lake en Oregon, USA), ou encore le lac de barrage (également nommé "retenue d'eau"), le lac fluvial (comme le lac St-Pierre que nous

présenterons au deuxième chapitre), le lac isolé ou "en grappe" (de nombreux exemples dans le nord du Canada), etc. Il existe une variabilité marquée de plans d'eau définis en tant que "lacs", ce qui questionne la nature de cet objet géographique.

La définition de lac a fait longtemps débat en limnologie et reste une question complexe (Timms 1992). Dans le langage courant, un lac est une *nappe d'eau stagnante plus ou moins profonde et plus ou moins étendue, entourée de terre de tous côtés* (Dictionnaire Larousse). Cette définition très générale du dictionnaire ne nous permet pas de différencier un lac d'un étang, d'un marais, d'une lagune ou même d'une "mer". L'étymologie (« *lakkos* », déchirer en grec) considère par ailleurs un lac comme une dépression fermée, une déchirure dans la couche terrestre et n'englobe pas les retenues d'eaux qu'elles soient naturelles (issues d'un glacier, éboulement, coulée de lave) ou d'origine anthropique (lacs de barrages), bien qu'elles soient souvent prises en compte en tant que lacs pour une majeure partie de la communauté scientifique (Touchart 2006). Ces manques nous imposent de creuser davantage les propriétés et spécificités des milieux lacustres pour veiller à bien les définir.

Dès les prémices de la limnologie, les lacs sont avant tout des entités biophysiques. La première définition de lac, donnée par (Forel 1904, p 11) en témoigne : *"un lac est une masse d'eau stagnante, réunie dans une dépression du sol, sans continuité avec la mer"*. Cette définition met en avant les propriétés de l'élément liquide, la géomorphologie des cuvettes lacustres et fait la distinction entre le lac et la mer. La définition du géographe limnologue L. Touchart (2000 p. 320) conserve une entrée biophysique mais vient préciser la définition de Forel. Cette définition présente le lac comme **« un plan d'eau continental (séparé de la mer, dominé par son bassin d'alimentation et développant une personnalité propre), dont la profondeur, la superficie ou le volume sont suffisants pour provoquer un étagement, une zonation ou une régionalisation des processus limniques »**.

Analysons plus en détail cette définition pour comprendre ce qui est considéré comme un lac dans la littérature scientifique.

Sur le plan géomorphologique, les lacs représentent une **dépression du sol**, une cuvette naturelle ou artificielle entourée de terre et remplie d'eau, avec le plus souvent un exutoire qui est généralement une rivière, mais qui peut également être la mer ou l'océan dans le cas des lacs côtiers ou bien des sorties d'eau souterraines et non visibles depuis la surface. Les lacs peuvent être isolés, associés à d'autres lacs ou des cours d'eau, sans connexion directe observable avec des entrées d'eau et parfois sans sorties directes (Thomas et al. 1996).

Dans un lac, la plupart des caractéristiques biotiques, sédimentaires, hydrologiques résultent des flux d'eau et de matériaux issus des eaux continentales à l'amont (Ruttner, 1963). Le fonctionnement d'un lac est dominé par les eaux continentales issues de son **bassin d'alimentation**, ce qui le distingue des lagunes où des échanges d'eau importants existent avec le milieu marin et déterminent leur biologie et fonctionnement : un lac peut ainsi se jeter dans la mer, mais la mer ne peut pas emplir le lac d'eau. Cela ne veut pas dire pour autant qu'un lac est nécessairement composé d'eaux douces et il existe de par le monde de nombreux exemples de lacs d'eaux saumâtres, voire salées (dû à l'origine des sédiments, ce sont souvent des lacs isolés - Thomas et al. 1996). Les organismes biologiques au sein de ce type de lac ne sont pas pour autant de type marin. L'effluent peut également avoir une influence sur le fonctionnement d'un lac (ex : espèces de poissons migratrices), mais de manière moins importante que le bassin d'alimentation.

Sur le plan hydrologique, les courants et le déplacement des **masses d'eau internes** au lac ne sont pas unidirectionnels, ce qui différencie les lacs des fleuves et rivières régis par des déplacements des eaux d'amont vers l'aval. Par ailleurs, les mouvements lacustres n'entraînent pas de déplacements de l'ensemble de la colonne d'eau du lac (hormis en période de brassage hivernal, voir 1.1.2), et sont le résultat de dynamiques essentiellement verticales. Les déplacements horizontaux des masses d'eau sont malgré tout possibles mais non régis par la pente (action du vent, apports ou sorties d'eaux), comme dans le cas des lacs de barrages ou des plans d'eau fluviaux qui possèdent des caractéristiques à la fois fluviales (la traversée d'une masse d'eau fluviale au sein du lac) et lacustres (des eaux stagnantes et brassages verticaux) (Pourriot and Meybeck 1995).

La relative stabilité des masses d'eau d'un lac entraîne un fonctionnement spécifique, ce que L.Touchart nomme une "**identité propre**" qui le distingue de tous les autres milieux aquatiques. Il en résulte un étagement des processus limniques et une stratification des masses d'eau (voir 1.1.2). C'est-à-dire que le volume, la profondeur et la superficie ou l'un de ces trois paramètres vont entraîner des contrastes spatiaux durables entre les propriétés physico-chimiques des différentes masses d'eau du lac, au moins pendant une partie de l'année (Touchart 2006). Cette spécificité lacustre différencie le lac des **marais et étangs**, ces derniers pouvant être considérés comme des lacs de si faible profondeur qu'ils ne possèdent pas d'étagement dans leur fonctionnement. En conséquence, la flore littorale submergée peut prendre pied dans l'ensemble de l'étang ; les marais sont des étangs peu profonds qui peuvent être envahis par les végétaux présents sur les berges comme les herbiers, roseaux et carex (Touchart 2000). Les zonations vont également avoir une incidence sur la biologie et se traduisent par un cycle de biosynthèse - biodégradation qui s'effectue dans la dimension verticale et non d'amont en aval : les déchets organiques se déposent au fond du lac par exemple. En fonction du milieu dans lequel est situé le lac, les étagements des processus limniques prennent à une profondeur comprise entre 5 et 7m (Touchart 2000). Cela ne veut pas pour autant dire qu'un lac de moins de 5m de profondeur est un étang, l'exemple type est le "lac-étang" Balaton en Hongrie (profondeur moyenne : 3,2 m et superficie : 596 km²) qui possède malgré tout des processus bio-géo-chimiques typiquement lacustres du fait de sa superficie (Papon and Touchart 2008). Ce dernier point peut être soumis à critique et l'on considère la présence d'une **stratification thermique stable**, ne pouvant être modifiée ni par convection, ni par forçages externes tels que le vent ou les précipitations comme la marque de "*vrais lacs*" (Touchart 2000).

Enfin, il est à noter que les lacs **s'adaptent aux conditions de leur environnement** (Montuelle 2015) et toutes les propriétés qui définissent un lac peuvent évoluer de manière naturelle ou artificielle. Il en résulte que certains lacs ont par le passé été des mers (ex : mer Caspienne), que le comblement des plans d'eau par les sédiments peut les faire évoluer vers des systèmes marécageux ou que certains lacs côtiers sont ouverts sur le large avec la construction d'un chenal de navigation par exemple.

La surface terrestre couverte par les lacs naturels ou artificiels est estimée à 4.2 millions de km², ce qui correspond à plus de 300 millions de lacs dans le monde dont la plupart sont petits à très petits (< 1 km²) (Downing and Duarte 2009). Les zones boréales et arctiques (45° 0 75° N) sont les régions du monde avec la plus forte concentration de lacs, et 85% d'entre eux sont situés à une altitude inférieure à 500 m (Verpoorter and Tranvik 2014). L'International Association for Great Lakes Research (IAGLR) a produit une base de données mondiale de tous

les grands lacs dans le monde et considère les lacs de plus de 500 km² (www.iaglr.org). Ensemble, ces lacs représentent près de 90% de la surface et du volume des lacs dans le monde et 20% de l'eau douce disponible est contenue dans les grands lacs américains, ce qui justifie une attention particulière envers ces lacs par la communauté scientifique. Par ailleurs, 88 d'entre eux dépassent les 1000 km² dont la plupart sont situés dans l'hémisphère nord en Asie et en Amérique du Nord, et 19 ont une surface qui dépasse les 10 000 km². Une étude récente (Jenny et al. 2020) **fixe une limite inférieure à la superficie d'un grand lac à 100 km²** permettant d'avoir une représentativité des grands lacs à l'échelle de tous les continents et de pouvoir les étudier au titre de sentinelles des changements globaux. Il existe ainsi 1709 grands lacs dont la superficie est supérieure à 100 km² (Jenny et al. 2020) et parmi les grands lacs alpins français, seul le Léman peut être considéré comme un grand lac à l'échelle mondiale (voir Encadré 1-2).

Il n'existe pas à notre connaissance de définition spécifique des grands lacs. En conséquence, nous considérerons ici que la définition de « lac » s'applique à celle des grands lacs. Cependant, les caractéristiques bio-physiques et territoriales des grands lacs génèrent des spécificités de fonctionnement qui justifieraient de réfléchir à l'utilisation d'une définition différente.

Encadré 1-2 : les grands lacs alpins sont-ils des grands lacs ?

En tenant compte de cette limite de 100 km², parmi nos sites d'étude (chap 2), seul le Léman, avec plus de 500 km², est considéré comme un grand lac à l'échelle mondiale, les lacs d'Annecy et du Bourget ayant une superficie inférieure à 100 km². Dans la présente étude, ces trois lacs seront considérés comme des « *grands* » lacs à l'échelle géographique de la France et de la chaîne Alpine (Magni et al, 2008), mais ne peuvent pas l'être (sauf le Léman) à l'échelle mondiale.

❖ Les spécificités biophysiques et territoriales des grands lacs

Pour autant, du fait de leur superficie et leur volume, les grands lacs possèdent un bassin d'alimentation plus important, ce qui engendre des effets écologiques et sociétaux qu'il est intéressant de mentionner ici (Tableau 1-1).

Leur taille leur confère tout d'abord une **surface pélagique plus étendue** que les lacs de taille plus réduite, ce qui les rend plus sensibles à l'action du vent qui se traduit par un hydrodynamisme plus élevé. Dans un grand lac, l'hydrographie est soumise à la déviation de Coriolis, une force qui dévie les mouvements à la surface du globe terrestre en raison de sa rotation, vers la droite dans l'hémisphère nord et la gauche dans l'hémisphère sud (Brunet et al. 1992). L'effet de Coriolis va venir s'ajouter à celui de la thermie et du vent pour construire un hydrodynamisme complexe, marqué par la présence de grands courants tourbillonnants dans différentes directions (Kalff 2002).

Les grands lacs possèdent un **volume et des entrées d'eau et de matériaux importants**, ce qui engendre un temps de renouvellement des masses d'eau plus élevé (voir chap 1.1.2 pour détails du processus) et leur confère une caractéristique d'autonomie face aux changements (Touchart 2000, Jenny et al. 2020). Ces lacs seront moins sensibles aux écarts de température et en conséquence pourront connaître des mélanges des eaux moins réguliers, tout

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

particulièrement sur les lacs profonds. Le **temps de résidence des eaux** plus long entraîne une résistance aux changements plus importante et les effets visibles des pressions apparaissent, de ce fait, plus tardivement. Cette résistance est active face aux dégradations, mais également au cours de la restauration de leur état, dont les bénéfices se feront ressentir plus tardivement. En conséquence, l'alerte et la prise en compte des pollutions peuvent être moins rapides par rapport à un lac plus petit, et retarder l'action.

Les grands lacs possèdent généralement **un bassin d'alimentation plus grand, peuplé, aménagé et en conséquence des sources de pollutions plus variées et fortes en intensité**. Aussi, plus un lac est étendu et plus il peut satisfaire des usages multiples et divers, avec une plus grande population d'usagers, ce qui peut également engendrer un **développement démographique et urbain accru** sur son littoral (Carpenter et al. 2007, Jenny et al. 2020). Ces usages peuvent nécessiter des caractéristiques biophysiques uniques présentes en quelques lieux spécifiques du lac et entraîner une zonation de l'aménagement autour du lac et de la répartition des usagers sur le plan d'eau et son littoral. **Des espaces de spécialisation des pratiques lacustres peuvent s'organiser**, associés à certains types d'acteurs, d'enjeux et de perturbations. Par ailleurs, le nombre et types d'acteurs sont plus importants, ce qui entraîne des prises de décision concertées parfois plus longues et difficiles à mettre en œuvre. Cette variabilité spatiale des usages s'accroît dans le cas des lacs frontaliers où des différences culturelles, sociales, politiques viennent augmenter la variabilité des pratiques et des points de vue ; situation peu courante dans les petits et très petits lacs, souvent mono-usages.

Aussi, les grands lacs participent activement à la lutte contre les changements globaux car ils possèdent une capacité accrue de **séquestration du carbone** (Jenny et al. 2020). **Les archives lacustres**, résultat de l'accumulation des couches de sédiments provenant des bassins d'alimentation des lacs, sont plus volumineuses dans les grands lacs. A ce titre, ces lacs intéressent beaucoup la paléolimnologie car ils possèdent de longues durées d'enregistrements des interactions Homme - grand lac. Etudier les « *carottes sédimentaires* » peut nous informer sur l'évolution passée de l'environnement géographique du lac, l'implantation et l'évolution des populations autour du lac, ainsi que sur le climat régional. Les grands lacs sont ainsi des sentinelles des changements régionaux à long terme (Carpenter et al. 2007), voire globaux (Jenny et al. 2020).

Tableau 1-1 : Effets de la taille du plan d'eau sur l'écosystème et la société (adapté d'après Jenny et al. 2020)

Paramètres biophysiques	Effets sur l'écosystème lacustre	Effets sur la société
Surface du plan d'eau	<ul style="list-style-type: none">• Plus sensibles à l'action du vent et hydrodynamisme plus fort• Soumis à la déviation de Coriolis• Milieux benthiques et littoraux plus important• Longueur du rivage	<ul style="list-style-type: none">• Paysages étendus• Opportunités pour le tourisme• Importance pour la navigation commerciale et le transport de personnes• Nombre et diversité plus importants d'usages et d'usagers• Développement littoral

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

<p><i>Volume des masses d'eau</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur plus importante • Milieu pélagique plus important • Temps de séjour de l'eau plus important • Moindre sensibilité aux écarts de température et retournement des masses d'eau moins fréquent 	<ul style="list-style-type: none"> • Autonomie et résistance plus fortes face aux changements • Des ressources plus abondantes • Potentiel hydroélectrique plus fort
<p><i>Surface du Bassin d'alimentation</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Apports d'eau plus importants • Apports de matériaux plus importants 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus fort potentiel de développement démographique et d'aménagement du BV • Sources et apports de polluants plus importants et variés • Archives sédimentaires pour la paléolimnologie • Nombre potentiel de parties prenantes de la gestion plus important

❖ Classer les lacs selon leur origine, formes et répartition

En raison de la grande variabilité de lacs à travers le monde, les classer est une tâche difficile. Le critère de **leur origine** a été l'un des tous premiers objets de classification (Pourriot and Meybeck 1995). Ce sujet a dominé les études sur les plans d'eau dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle et a conduit à la classification de près de 200 pages de George Evelyn Hutchinson (Touchart 2000), scientifique anglais qui a influencé de nombreux domaines de recherche sur les lacs au cours du XX^{ème} siècle et notamment la limnologie avec l'écriture d'un traité de limnologie en 4 volumes entre 1957 et 1993 et des recherches pionnières sur le phosphore dans les lacs et les relations entre espèces (Slobodkin 1993). La *classification de Hutchinson* comporte 11 catégories principales de lacs (et 76 subdivisions) en fonction de l'origine principale ayant abouti à leur formation. Certains lacs naturels possèdent des origines multiples, et à l'échelle des temps géologiques, ces écosystèmes sont éphémères car la plupart des lacs se comblent de sédiments et disparaissent en quelques milliers ou dizaines de milliers d'années. Le tableau en Annexe 1-1 présente neuf catégories principales de plans d'eau, énumère quelques caractéristiques de chacune avec des exemples.

L'origine des lacs, leur âge et le type de substrat dans lesquels ils sont creusés vont déterminer la géomorphologie des lacs, la taille et le volume des cuvettes lacustres (Pourriot and Meybeck 1995). La morphologie du lac et son âge vont par ailleurs avoir des incidences sur sa biologie, et notamment sur la présence d'espèces endémiques (Martens et al. 1994). Aussi, les lacs de plaine peuvent être organisés en plusieurs « **sous-lacs** » ou « **sous-bassins** » (comme le lac Champlain à la frontière entre le Canada et les Etats-Unis) et présenter une variabilité des populations d'espèces au sein de chacun des sous-lacs et dans leur hydrologie. L'action anthropique peut également être différente d'une portion de lac à une autre et induire des différences de qualité d'eau et d'usages qui peuvent modifier le fonctionnement écologique (Gril and Dorioz 2004). L'histoire géologique et l'évolution de nombreux lacs sont cependant peu renseignées et mériteraient une attention plus importante entre les relations morphologie - âge - origine et biodiversité.

Pour ces spécificités géomorphologiques, **la géographie physique** s'est beaucoup intéressée aux lacs. Les outils de cette approche de la géographie sont les relevés topographiques,

géologiques et l'étude de l'occupation du sol. L'observation de terrain est également une composante importante de tous les travaux en géographie, qui permet au géographe d'analyser l'espace sous forme de cartes (Maleval 2018). Cette approche est tout particulièrement utile pour étudier les lacs et grands lacs car ces milieux sont régis par l'hydrologie et les flux liquides et de matériaux issus des territoires à l'amont.

L'intérêt de l'analyse géographique est l'analyse intégrale du milieu, qui se traduit en géographie limnologique par l'étude du **limnosystème** (Maleval 2018), défini par L.Touchart et P.Bartout (2018, p 52) ainsi : « *le limnosystème est l'ensemble des interactions naturelles (...) et socioculturelles (...) se produisant sur un territoire centré sur un plan d'eau, ce dernier se conduisant à la fois comme un aval collecteur et un amont moteur* ». Ce concept fait le lien entre la géographie physique et la **géographie dite sociale** qui enquête auprès des acteurs et usagers d'un territoire pour comprendre les actions, les valeurs et perceptions de l'Homme sur son environnement.

En définitive, les outils et diverses approches de la géographie permettent de considérer l'ensemble des emboîtements d'échelles dans les processus qui associent les écosystèmes lacustres aux sociétés et de mobiliser des connaissances et concepts issus de diverses disciplines, notamment de la limnologie et l'écologie, pour les analyser.

1.1.2 Les propriétés écosystémiques des grands lacs et leurs influences sur la société

L'écosystème recoupe à la fois un biotope, c'est-à-dire un milieu géographique physiquement délimité, caractérisé par des conditions climatiques et physico-chimiques homogènes et un ensemble complexe dynamique d'organismes vivants organisés au sein de différents niveaux d'organisation, à savoir une biocénose (MEA 2005, Roche et al. 2016, Rolland 2018). **Les écosystèmes lacustres sont ainsi des objets géographiques par nature**, soumis à des processus dynamiques qui prennent part à différentes échelles spatiales et temporelles. La distribution de l'eau à la surface terrestre permet d'identifier visuellement les limites superficielles des lacs (le biotope), c'est notamment pourquoi ces écosystèmes ont depuis toujours particulièrement intéressé l'écologie (Encadré 1-3).

Une critique fréquemment exposée de cette discipline est d'avoir étudié pendant longtemps les écosystèmes "*sans*" l'Homme. Initialement considérée comme un forçage externe qui ne participerait pas à la dynamique des écosystèmes, l'influence humaine est de plus en plus considérée dans les études écosystémiques (MEA 2005). Les activités humaines qui bénéficient des ressources fournies par les lacs modifient largement leur structure et leur fonctionnement. Il est alors important de bien comprendre les processus limnologiques pour étudier les relations Homme – grands lacs, ce qui implique des éclairages pluridisciplinaires.

C'est pourquoi cette partie est dédiée à la présentation des propriétés écosystémiques des grands lacs et leurs influences sur la société, en mobilisant différents concepts de l'écologie, de l'hydrologie ou encore de la biologie. Nous regarderons en premier lieu les principales propriétés du biotope qui ont un rôle dans les relations Homme – grands lacs, puis celles associées à la biodiversité lacustre.

Encadré 1-3 : L'écologie et la limnologie : des origines communes

Si l'écologie est issue historiquement des sciences naturelles de la botanique et de la zoologie, son champ de compétence s'élargit considérablement avec l'émergence du concept d'écosystème qui constitue un concept unificateur entre les différentes disciplines qui étudient la Nature, permettant de coordonner l'étude du vivant et de ses interdépendances avec le monde non vivant (Drouin 1987, Lévêque 2013).

Le concept d'écosystème apparaît à une époque de grands questionnements sur la place de l'Homme dans le monde, une époque qui suit la conquête coloniale du globe et des grandes expéditions naturalistes, pendant laquelle les sociétés occidentales commencent à se questionner sur les conséquences de l'exploitation de la Nature, et durant laquelle se multiplient les moyens d'observation des phénomènes naturels (Deléage 2010). Forbes en 1887, Tansley en 1935 et Lindeman en 1942 sont considérés comme les "pères fondateurs" de l'écologie et des approches écologiques. Il est intéressant de noter que deux d'entre eux sont aussi des pionniers de la recherche limnologique bien que leurs conceptions de "l'écosystème lacustre" soient sensiblement différentes : pour Forbes le "microcosme" est avant tout un assemblage de populations d'espèces en interdépendances, alors que Lindeman considère l'écosystème lacustre comme une chaîne trophique associée à des flux de matières et d'énergie, comme un organisme qui croît, qui vieillit et atteint sa maturité (Drouin 1987). On peut remarquer que ces deux auteurs illustrent deux grands courants de l'écologie : les recherches de Forbes peuvent être associées à celui de *l'écologie des populations* qui s'intéresse aux populations - animales, végétales ou microbiennes - à leurs dynamiques et interactions et les travaux de Lindeman se rapprochent davantage de *l'écologie des écosystèmes*, une écologie plus systémique qui intègre les paramètres abiotiques dans la compréhension du fonctionnement de la Nature (Barbault 2000). Ces rapprochements épistémologiques entre l'écologie et la limnologie suggèrent que les lacs sont des systèmes idéaux pour l'étude des interactions multiples entre espèces et environnement à l'échelle d'un écosystème (Carpenter, 1988 a pp 4-5 in Carpenter and Kitchell 1993). Certains prétendent que la limnologie est la plus populaire des sciences de l'écologie (Kalff, 2002).

❖ Les propriétés du biotope qui intéressent la société

L'élément liquide constitue un environnement unique pour la biodiversité. Les propriétés de l'eau engendrent des processus qui font la variabilité de ces écosystèmes. Les vagues, les courants, la stratification des eaux, le gel de surface, le transport de l'oxygène, la pénétration de la lumière, la productivité, la dissolution et le transport de substances, la régulation thermique, etc. sont autant de processus provoqués ou influencés par l'élément liquide et qui déterminent les caractéristiques biotiques et vont conditionner les usages (Kalff 2002, Olivaux 2007). Par ailleurs, l'eau possède des propriétés esthétiques et tient une place forte dans la culture de toutes les civilisations et à toutes les époques (Olivaux 2007).

1. La couleur de l'eau des lacs et son importance pour les pratiques touristiques

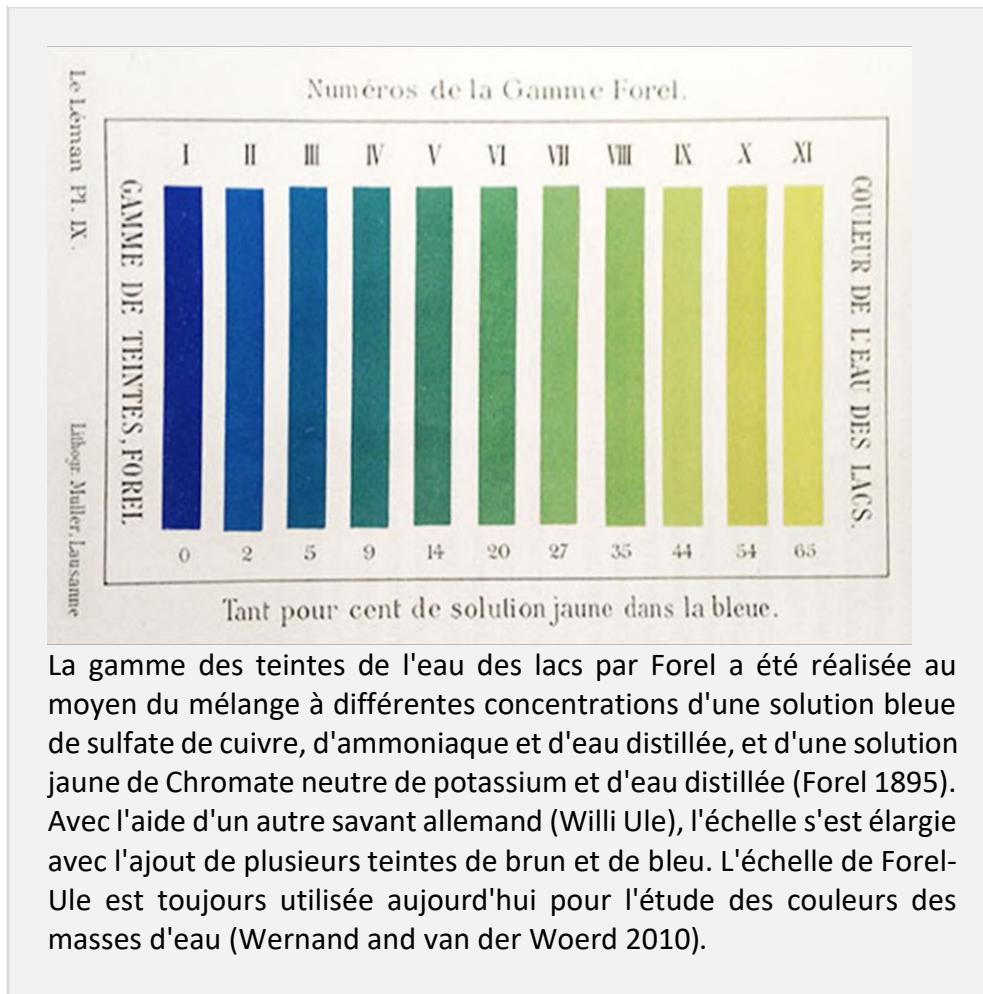
Forel a été le premier limnologue à s'intéresser à la couleur des lacs et proposa une gamme de teintes entre le bleu et le vert pour la catégoriser (Encadré 1-4). La couleur de l'eau tient une place importante dans le **paysage lacustre** et peut être un **facteur d'attractivité** pour le

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

tourisme – certains lacs sont reconnus du fait de leur couleur caractéristique. La couleur dépend de processus physiques (absorption de la lumière, réverbération de la couleur du ciel), des propriétés physico-chimiques de l'eau, de la présence de particules et des teneurs en sédiments ou encore de phénomènes de coloration des eaux par les organismes planctoniques. Certains de ces organismes peuvent entraîner des **difficultés d'usages** (colmatage de tuyaux, rendre visibles les filets des pêcheurs), voire engendrer des **restrictions** s'ils sont toxiques pour la biodiversité et les Hommes (certaines cyanobactéries).

Encadré 1-4 : La gamme des teintes de l'eau des lacs

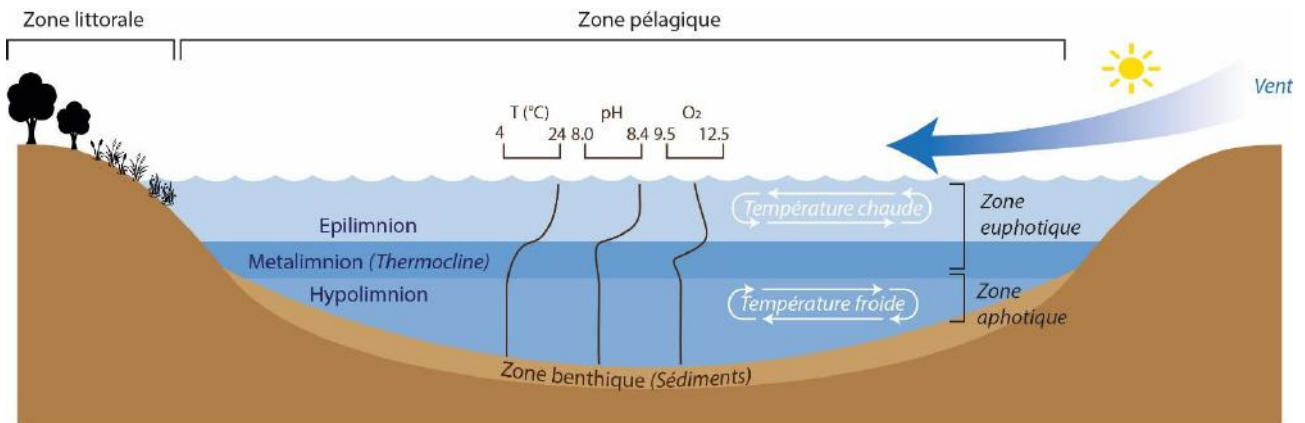


2. Le brassage des masses d'eau

L'étagement et la régionalisation des processus limniques est l'une des spécificités des écosystèmes lacustres qui le différencie des autres milieux aquatiques. Un lac profond possède différentes masses d'eau qui ne se mélangent pas et qui se déplacent les unes par rapport aux autres sous l'influence de différents phénomènes physico-chimiques. Chacune de ces masses d'eau possède des caractéristiques avec des conditions biogéochimiques spécifiques pour la biodiversité et le fonctionnement de l'écosystème.

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société



Sources : Kalff, 2002 ; Pourriot & Meybeck, 1995

Figure 1-2 : Etagement des lacs profonds et propriétés physico-chimiques

L'un des premiers paramètres qui provoque une stratification des eaux est la **température**. La température d'un lac, dépendant de celle de l'air, va avoir un effet sur la densité des différentes masses d'eau, si bien que dans les lacs profonds il est possible de trouver plusieurs masses d'eau distinctes de différentes températures à différentes profondeurs (phénomène appelé étagement hydrophysique - Figure 1-2). C'est à 3.98°C exactement que l'eau est la plus dense, ce qui signifie que, par gravité, les masses d'eau froides se trouvent au-dessous des masses d'eau plus chaudes. La masse d'eau la plus profonde est appelée l'hypolimnion, elle est toujours froide à température peu variable, généralement peu agitée et n'est pas en contact avec l'atmosphère (en fonction des saisons, elle se situe entre 15 et 30m sous la surface). Cette zone est peu éclairée, avec une faible disponibilité des rayonnements solaires pour la photosynthèse, l'hypolimnion est alors dominé par les processus de respiration des plantes qui utilisent la matière organique générée depuis la couche de surface, l'épilimnion. Cette deuxième zone est en contact direct avec l'atmosphère, la photosynthèse algale y est supérieure à la respiration du fait de son éclairage par le soleil. Cette couche est agitée par le vent, ce qui permet une homogénéisation partielle de la température (Kalff 2002, Loizeau et al. 2015). Entre les deux zones se situe la thermocline, dans laquelle la température diminue avec l'augmentation de la profondeur ; son épaisseur est généralement de l'ordre de 10 à 15 m en fonction de la saison (Loizeau et al. 2015).

La température, le vent, la déviation de Coriolis et les marées dans les grands et très grands lacs, les entrées d'eau vont modifier les mouvements des masses d'eau et en générer de nouveaux, provoquer des grands tourbillons tournant dans des sens différents, mais aussi des mouvements de plus faible intensité, des déplacements internes qui inclinent et font osciller la thermocline, des vagues et ondes de surface qui font de l'hydrodynamisme d'un lac un **processus complexe**.

Les différences de température (et surtout de densité) entre l'épilimnion, la thermocline et l'hypolimnion vont entraîner un autre type de brassage, qui confère à l'écosystème lacustre une de ces principales spécificités : **le retournement des masses d'eau**. La variation de la température des masses d'eau entre les saisons s'effectue selon un gradient de température entre l'épilimnion et l'hypolimnion, de fait qu'à certains moments, la température de surface est inférieure à celle du fond du lac. Les eaux de surface, plus froides et plus denses, s'enfoncent alors dans l'hypolimnion, ce qui crée un brassage important des masses d'eau, connu sous le nom de retournement. Comme l'eau est la plus dense autour de 4°C, ce

retournement se produit dès lors que la couche de surface se maintient autour de cette température pendant quelques temps, le phénomène peut être favorisé par l'action du vent. Le retournement a un rôle très important pour l'écologie du lac car les eaux froides de surface et riches en oxygène (zone euphotique, éclairée, zone de production via la photosynthèse) vont ré-oxygéner l'ensemble de la colonne d'eau, jusque dans la zone benthique, tandis que les masses d'eau de l'hypolimnion, devenues plus riches en éléments nutritifs (zone aphotique, non éclairée et zone de consommation ; sédimentation) vont redistribuer ces matériaux dans toute la colonne d'eau.

En fonction de la profondeur du lac et de la latitude à laquelle il est positionné, le retournement des masses d'eau va être plus ou moins fréquent. La fréquence du retournement est un autre type de classification des lacs (Annexe 1-2). En conséquence, nous voyons que la notion d'étagement est très importante pour le fonctionnement d'un lac, avec un seuil de réalisation de tous ces étagements en général situés à une profondeur entre 5 et 7m qui le distingue des autres objets aux eaux stagnantes (s'ils sont inférieurs à cette profondeur et sans étagement, ils sont considérés comme des étangs). L'étagement thermique est le phénomène le plus important qui va conditionner de nombreux phénomènes hydrologiques : le retournement des lacs, la pénétration lumineuse dans l'eau, la densité des eaux, la rétention et la diffusion en oxygène, le piégeage et la remontée en surface des nutriments. Ces paramètres jouent notamment un rôle important pour la biodiversité car ils contrôlent la production primaire et les peuplements des lacs (Touchart 2000).

Nombre d'activités lacustres dépendent de l'hydrodynamisme, de la température et de la répartition de la biodiversité. Les mouvements des masses d'eau participent à l'oxygénation du lac, à l'enrichissement et au déplacement du plancton et des poissons qui le consomme, au transport des matériaux, mais également à la dissémination des polluants et organismes pathogènes. La compréhension de ces phénomènes permet d'analyser **la variation spatio-temporelle** des usages (pêche par exemple) et des impacts des perturbations sur les lacs (Jenny et al. 2013, Loizeau et al. 2015).

3. Le temps de séjour des eaux

Le temps de séjour moyen des eaux d'un lac est le temps moyen théorique nécessaire pour renouveler les eaux d'un lac dans une zone climatique déterminée. Ce paramètre est une composante clé qui permet de connaître la capacité naturelle d'un lac à se purger ou à se renouveler (Pourriot and Meybeck 1995, Kalff 2002). Ce paramètre est lié à la surface des bassins d'alimentation des lacs et la profondeur du plan d'eau.

Le temps de séjour conditionne certains aspects du fonctionnement physique, chimique et biologique d'un lac, notamment la circulation des nutriments, des sédiments et des organismes planctoniques (Loizeau et al. 2015). C'est une donnée importante qui donne une indication sur la sensibilité d'un lac à une pollution : avec un temps de séjour court, les apports externes de polluants seront vite évacués, avec un temps de rétablissement de l'écosystème plus court. Ce facteur est déterminant pour la résilience de l'écosystème lacustre : avec un temps de séjour long, le lac sera plus résistant, c'est à dire qu'il fluctuera moins sous l'influence de la variabilité des contraintes externes. La capacité de résilience des écosystèmes lacustres retarde certains effets visibles des processus bio-géo-chimiques et peut entraîner des retards dans la prise de conscience des pollutions pour la gestion. Seule une anticipation précoce permet de restaurer rapidement l'écosystème. La valeur moyenne du temps de séjour d'un

grand lac étant comprise entre 1 et 10 ans, on peut considérer un laps de temps de retard minimum correspondant à cet intervalle entre le moment des impacts, leurs conséquences perçues, et entre le début des actions de gestion et leurs effets.

Un lac avec un temps de séjour inférieur à un mois est considéré comme ayant un très court temps de séjour qui possède de ce fait des caractéristiques fluviales ; le temps de séjour est court s'il est inférieur à 1 an, ce qui signifie que le lac reçoit une grande quantité d'eau par rapport à son volume ; il est long entre 10 et 100 ans et très long au-delà, ce qui indique des profondeurs de lac importantes et/ou de faibles apports depuis le bassin d'alimentation (Pourriot and Meybeck 1995).

Enfin, il existe une variabilité spatiale et temporelle des temps de séjour des eaux pour tous les lacs stratifiés (temps de séjour supérieur à 1 an). Celui-ci diffère à proximité de l'embouchure et de l'exutoire, suivant la morphologie de la cuvette lacustre, en fonction de la profondeur et des masses d'eau, également en fonction du régime des flux d'eau entrant dans le lac (Pourriot and Meybeck 1995).

❖ Les propriétés de la biocénose lacustre qui intéressent la société

Zonation lacustre et formes de peuplement

Dans les lacs profonds, trois zones fonctionnelles se distinguent. Sur les contours des lacs se trouve le **littoral**, fortement éclairé, soumis à l'énergie des vagues et l'érosion des berges. La zone littorale est définie comme la zone marquant la limite entre les biotopes continentaux et lacustres. Elle est particulièrement soumise aux dégradations anthropiques du fait de l'urbanisation et de la concentration des usagers, notamment les touristes (Ramade 1993). La position des écosystèmes littoraux, à l'interface terre-lac, suggère l'existence d'un nombre important d'interconnexions entre les écosystèmes terrestres et lacustres, associés à une biodiversité spécifique (écotone) qu'il est nécessaire de conserver pour optimiser le potentiel des services que rendent ces milieux (Barbier 2012). Les limites de la zone littorale sont parfois difficiles à définir, surtout dans les très grands lacs où le phénomène de marnage entraîne une évolution du trait de côte et une extension-réduction de cette zone. On considère généralement qu'elle s'étend de la limite de la rive soumise à l'action des vagues jusqu'à la limite de colonisation des macrophytes enracinés en profondeur. Les écosystèmes littoraux comportent des herbiers immergés de macrophytes (désigne l'ensemble des végétaux visibles à œil nu et inféodés au milieu aquatique) et des roselières (macro-végétaux immergés et palustres). Ces végétations créent un habitat spécifique qui permet d'accroître la capacité d'accueil du milieu, fournis de l'oxygène, de la nourriture, un refuge et un lieu de reproduction pour de nombreuses espèces, y compris pour l'avifaune (Pourriot and Meybeck 1995). Ces milieux participent également à la lutte contre l'érosion et les inondations.

A l'interface entre l'eau et le substrat se situe le **milieu benthique**, qui représente l'écosystème spécifique développé au fond du lac. La zone benthique abrite une grande diversité d'espèces, avec une forte redondance fonctionnelle, qui permet d'assurer la dynamique de dégradation, le recyclage et le transfert de la matière organique aux interfaces des différents milieux de la colonne d'eau et du sous-sol. Cette zone est par ailleurs un lieu de stockage du carbone, de polluants et d'informations sous forme d'archives sédimentaires (Giguët-Covex et al. 2010, Dubois et al. 2018). Ces archives sédimentaires permettent de

reconstituer l'histoire des lacs, de leur environnement géographique et des relations Homme-lac sur le long terme (jusqu'à plus de 10 000 ans dans les lacs alpins - Bajard et al. 2017)

Une surcharge en nutriments organiques dans la zone benthique peut conduire à l'anoxie du milieu, ce qui provoque une accumulation de produits métaboliques toxiques tels que des sulfures et le relargage du phosphore stocké dans les sédiments (charge interne en phosphore), avec des risques d'amplification et d'autonomisation du phénomène d'eutrophisation (Barroin, 1990). La biodiversité benthique est ainsi fortement dépendante de l'état trophique.

La troisième zone d'importance fonctionnelle dans un lac est le **milieu pélagique**. *"Il qualifie la zone de pleine eau, éloignée des rives et du fond, et par extension les organismes qui y vivent [...] [et qui] se distinguent des [peuplements] des zones benthiques et littorales par leur aptitude de se déplacer et à se développer en l'absence d'un support solide (sédiment, herbier)"* (Pourriot and Meybeck 1995). On y retrouve le plancton et des organismes filtreurs qui ont une action sur la régulation de la qualité de l'eau, la transformation de la matière organique et des nutriments, la production de l'oxygène grâce à la photosynthèse. Ces organismes sont à la base du réseau trophique, ils sont consommés par une partie des poissons pêchés. De nombreux usages prennent part en surface, notamment la navigation (commerciale et de plaisance), ou les activités récréatives et de loisir en contact avec l'eau.

Il existe de nombreuses interactions entre les zones littorale, benthique et pélagique :

- La biodiversité du milieu benthique s'alimente essentiellement de la matière organique, déchets et détritiques, générés dans la zone pélagique.
- Le développement des poissons pélagiques est souvent corrélé à la production secondaire benthique. Certains poissons se nourrissent du benthos que ce soit de manière temporaire ou par préférence de régime alimentaire, directement sur le fond des lacs ou bien quand le benthos migre dans la colonne d'eau (certains invertébrés migrent entre les zones pélagiques et benthiques). Aussi, le régime alimentaire et les habitats des poissons évoluent au cours de leur cycle de vie : les jeunes, planctonophages, se retrouvent généralement dans la zone littorale et les adultes en zone pélagique sont davantage benthonophages et/ou ichtyophages.
- Il existe des échanges entre le milieu terrestre littoral et le milieu aquatique : certains organismes migrent d'un milieu à un autre, certains oiseaux aquatiques se nourrissent d'invertébrés et algues benthiques du littoral.
- Les berges peuvent également constituer une source notable de matériaux qui viennent enrichir le domaine pélagique et la zone benthique profonde.

Ces trois milieux sont donc **en interaction permanente**, si bien que les atteintes de l'une de ces zones lacustres peuvent avoir des répercussions sur les autres et affecter les usages, même éloignés des zones dégradées.

La biodiversité lacustre et son organisation

La biodiversité, d'un milieu lacustre y compris, désigne la variabilité entre les organismes vivants d'un écosystème et la complexité écologique dont ils font partie ; cela inclut la diversité au sein des espèces, des relations entre les espèces et les écosystèmes, à savoir l'abondance des espèces les unes par rapport aux autres : l'équitabilité ou à l'inverse la dominance d'une

espèce au sein d'une communauté (d'après Science for environment policy, 2015 ; Barbault 2000). La biodiversité se mesure en général par le nombre total d'espèces vivantes que renferme un milieu donné, ce que l'on qualifie de richesse spécifique, mais également de diversité spécifique. En complément, on différencie aussi la diversité génétique, taxonomique et fonctionnelle (Barbault 2000).

Quand on parle de biodiversité dans le langage courant, on pense souvent à des espèces remarquables ou à des espèces d'intérêt patrimonial, c'est-à-dire associées à des valeurs socio-culturelles et liées à l'affect et la sensibilité humaine, ou bien à des espèces « *clés de voute* », d'importance reconnue pour l'intégrité de l'écosystème lacustre. Cependant, l'ensemble des êtres vivants interviennent dans les processus qui assurent le fonctionnement d'un lac et permettent les usages (Pourriot and Meybeck 1995, Lods-Crozet et al. 2015).

Les espèces appartiennent à différents compartiments des **réseaux trophiques** (Encadré 1-5), c'est-à-dire la structure générale des relations trophiques existant dans une biocénose. Ces relations trophiques régulent la circulation des nutriments, les dynamiques des populations de chaque espèce de l'écosystème et permettent la fourniture des fonctions écologiques. Au sein d'un lac, on trouve différents réseaux trophiques pélagique, benthique et littoral.

Les écosystèmes sont soumis à des **forçages environnementaux** comme le climat, ou liés aux activités anthropiques (comme les pollutions) qui modifient la dynamique interne à l'écosystème. Les impacts de l'Homme sur la biodiversité des milieux lacustres peuvent avoir plusieurs origines différentes avec différents niveaux d'impacts depuis le dérangement de la faune, l'intrusion d'espèces invasives, le réchauffement climatique, à une pollution chimique, l'eutrophisation ou la destruction des habitats. Ces pressions peuvent impacter de deux manières la biodiversité : (1) se traduire par l'augmentation considérable de la dominance d'une espèce et conduire à raréfier les populations de la plupart des autres espèces du milieu, (2) favoriser un tout petit nombre d'espèces opportunistes (Ramade 1993). Ces effets se manifestent par une modification des réseaux trophiques. Caractériser le fonctionnement d'un écosystème, c'est donc étudier l'ensemble des processus qui modifient la composition physico-chimique du biotope et la biocénose qu'il héberge, sous l'influence des changements environnementaux (Montuelle 2015).

L'ensemble des processus bio-physiques décrits ci-avant sont affectés par les pollutions et sont inter-dépendants. Cela est dû aux jeux d'inter-dépendances entre les différents compartiments biophysiques lacustres, ce qui signifie que les impacts d'une perturbation peuvent affecter successivement les différents processus biophysiques et altérer à terme l'ensemble des fonctions écosystémiques des lacs. Nous verrons dans le chapitre 5 combien ces relations sont importantes pour le fonctionnement d'un lac et sa fourniture en services écosystémiques. Aussi, l'ensemble des liens (naturels ou anthropiques) entre écosystèmes terrestres du BV et lacustres déterminent les types d'apports au lac, leur composition en matières, ce qui a des conséquences fortes sur le métabolisme des lacs. C'est pourquoi l'étude du fonctionnement d'un lac ne se limite pas à l'analyse des processus biophysiques du plan d'eau mais nécessite de regarder également au-delà du rivage (Likens 1984).

Encadré 1-5 : Les compartiments du réseau trophique des lacs

Le réseau trophique des lacs comprend quatre catégories fonctionnelles d'êtres vivants (Carpenter and Kitchell 1993, Barbault 2000, Lods-Crozet et al. 2015) :

- Les **producteurs primaires** : végétaux autotrophes, macrophytes, algues et phytoplancton utilisent l'énergie solaire pour la photosynthèse de substances organiques complexes à partir de substances inorganiques simples. Ces organismes participent à la production de la matière organique et permettent l'assimilation de sels minéraux, ce qui régule certains aspects de la composition chimique des eaux.
- Les **consommateurs primaires** : ensemble des organismes hétérotrophes, essentiellement des animaux (le zooplancton, avec un rôle clé de filtreurs), des producteurs de second niveau (ou producteurs secondaires), qui se nourrissent de producteurs primaires et sont donc herbivores. Les consommateurs participent aux processus de transfert de la matière organique.
- Les **consommateurs secondaires et de rang supérieur** : les consommateurs secondaires se nourrissent de consommateurs primaires (ce sont des mangeurs d'herbivores), et les consommateurs tertiaires consomment les consommateurs secondaires et des niveaux précédents. On retrouve dans ces compartiments du zooplancton carnivore (microcrustacés), des poissons planctonophages, des poissons ichtyophages, et en haut du réseau trophique les oiseaux et les pêcheurs (pas toujours considérés dans les réseaux trophiques). Le zooplancton est un type d'organisme très important dans le réseau trophique des lacs car il apporte de la nourriture aux consommateurs de niveaux plus élevés et régule la population des producteurs primaires.
- Les **décomposeurs** : invertébrés, champignons et bactéries qui se nourrissent de la matière organique morte (cadavres, litière, excreta, fécès). Ces organismes interviennent dans les processus de décomposition ou minéralisation et de recyclage de la matière. Par ces processus, les décomposeurs provoquent la disparition de certains composants chimiques dans les eaux et peuvent lutter contre des pollutions. Ils fournissent également de nouveaux éléments minéraux utilisables principalement par les producteurs primaires.

1.1.3 Les fonctions écosystémiques des grands lacs

Il n'est pas possible de décrire uniquement un écosystème par la simple énumération de sa composition en espèces ou encore par ses caractéristiques physiques. Chaque écosystème possède un fonctionnement spécifique qu'il est possible d'analyser à travers l'étude des processus **et fonctions écosystémiques** qui résultent d'interactions entre espèces et espèces - milieu. Les processus écosystémiques représentent tous les changements ou réactions qui surviennent dans les écosystèmes, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques (MEA 2005), tandis que les fonctions sont des processus ayant un rôle spécifique pour l'écosystème, que ce soit pour maintenir son fonctionnement global (vision éco-centrée) ou pour procurer des bénéfices aux sociétés humaines (vision anthropo-centrée) (d'après le CGDD 2010).

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

D'après la classification de De Groot et collaborateurs (2002), les fonctions écosystémiques peuvent être classées en quatre catégories : (1) les **fonctions de régulation des perturbations**, tel que le contrôle biologique des perturbations qui assurent un rôle important dans la dégradation de certains polluants qui entrent dans un lac et donc dans « *l'auto-épuration* » éventuelle des eaux, (2) les **fonctions de production**, qui participent à la production de bio-ressources, à la productivité de l'écosystème lacustre, (3) les **fonctions d'habitat** qui régissent les relations trophiques et interactions biotiques et permettent le maintien des cycles de vie, habitats et le patrimoine génétique des espèces et (4) les **fonctions d'information**, qui produisent les caractéristiques influant la perception d'une eau avenante et de paysages agréables qui participent au cadre de vie. Ce dernier type de fonctions relie les aux caractéristiques bio-physiques aux représentations des lacs et aux valeurs socio-culturelles associées à ces objets.

L'ensemble des fonctions écosystémiques sont décrites sous forme de « *fiches* » dans les pages suivantes. Y sont décrites chacune des fonctions associées aux catégories de De Groot et al. (2002) pour les grands lacs, comprenant une définition de la fonction et des exemples de processus écosystémiques associés. Quelques indicateurs de suivi des fonctions sont renseignés. Ces fiches ont été produites à partir de la bibliographie et d'un atelier participatif avec des chercheurs écologues en charge du suivi des grands lacs alpins. Les descriptifs des fonctions seront utiles pour la bonne compréhension du chapitre 5.

FONCTIONS DE REGULATION DES PERTURBATIONS

Contrôle biologique des perturbations

Définition : 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.

Exemples de processus biophysiques :

Parasitisme, commensalisme, phoresie, contrôle des maladies au sein des populations à travers les relations trophiques, oxydation, réduction, absorption.

Décomposition et minéralisation de la matière organique, nutriments et polluants par les décomposeurs. Filtration de l'eau par les daphnies (groupe dominant du zooplancton des eaux douces) ; transferts des polluants au sein des réseaux trophiques, bioconcentration ; bioturbation ; assimilation des polluants dans les organismes et élimination. Régulation des populations d'organismes pathogènes, parasites et espèces envahissantes par les interactions biotiques. Dans la zone littorale et benthique les bactéries, archées et champignons dégradent en partie les micropolluants et pesticides ; dans l'ensemble du lac, les bactéries, archées et champignons participent au recyclage des matières détritiques en éléments dissous et les rendent utilisables par les végétaux. Certaines espèces végétales dans les roselières, comme le *scirpus* peuvent se nourrir de composants chimiques polluants, matières en suspension, nitrates, et de nombreux oligo-éléments et sont capables de détruire des germes bactériens sévères comme les salmonelles, les *escherichia coli*.

Contrôle physico-chimique des perturbations

Définition : 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.

Exemples de processus biophysiques :

Dilution, décantation des polluants, sédimentation des polluants, dispersion, minéralisation de la matière organique, calcification des produits polluants et de la matière organique, dissolution de l'oxygène, de l'azote, la turbidité, contrôle thermodynamique des réactions en solutions, contrôle cinétique des réactions à l'interface de milieux hétérogènes : eau/atmosphère, eau/sédiments, eau/organismes, fermentation, nitrification, chemosynthèse.

Il est une erreur fondamentale, que de croire que les éléments nocifs génèrent essentiellement des impacts dans le voisinage immédiat du point de rejet, et de penser que les substances polluantes et toxiques se dilueront rapidement dans l'eau, de sorte que leurs concentrations tomberont spontanément au-dessous des seuils de nocivité pour les écosystèmes et pour l'Homme. Ce processus peut être long, associé aux conditions hydrologiques du plan d'eau (temps de séjour, hydrodynamisme, retournement). Ces processus peuvent aussi entraîner une diffusion des impacts des polluants nocifs à faible concentration dans l'écosystème lacustre.

Sources : Servettaz 1977, Ramade 1993, Pourriot and Meybeck 1995, Barbault 2000

Indicateurs possibles de fonction de régulation des perturbations : Concentration en polluants, nutriments, organismes pathogènes, espèces invasives dans les eaux, dans les sédiments, dans les organismes.

FONCTIONS DE PRODUCTION

Production et recyclage des nutriments (production et charge interne)

Définition : Transformation, dégradation et transport de la matière (nutriments, oxygène et carbone) à travers des processus biogéochimiques au sein des compartiments biotiques et abiotiques des écosystèmes (à partir de Fletcher et al. 2011, Schoenn et al. 2013)

Exemples de processus biophysiques :

Changements dans les formes chimiques des éléments et mouvements spatiaux des éléments des cycles de l'azote, du carbone, de l'oxygène, des nutriments. De nombreuses transformations de l'azote, du soufre, du fer, du manganèse, du carbone, du phosphore et d'autres produits chimiques se produisent dans les milieux lacustres du fait des conditions aérobiques et anaérobiques qui y sont présentes simultanément. Ces transformations permettent d'assurer certains processus, tels que la dénitrification ou la séquestration du carbone, la charge interne en phosphore.

Production primaire

Définition : 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 and Meybeck 1995)

Exemples de processus biophysiques :

Photosynthèse et respiration. A l'exception de quelques biotopes particuliers favorables au développement de bactéries autotrophes, la production primaire des lacs est assurée par les végétaux photo-autotrophes du plancton (phytoplancton) et du benthos (phytobenthos). Dans les lacs peu profonds, elle est assurée essentiellement par la végétation benthique tandis que dans les lacs plus profonds, le phytoplancton réparti dans toute la zone pélagique assure l'essentiel de la production. Fonction intervenant dans les cycles biogéochimiques de nombreux éléments, elle est source de matière et d'énergie pour les organismes hétérotrophes.

Production secondaire

Définition : Quantité de matière organique animale produite par les consommateurs primaires d'un écosystème (organismes hétérotrophes qui se nourrissent de 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.

Exemples de processus biophysiques :

Transferts de matières et d'énergie au sein du réseau trophique (alimentation - assimilation - excrétion). Les poissons peuvent contrôler la composition, biomasse et productivité des niveaux trophiques inférieurs. Le régime alimentaire d'une espèce peut être varié et évoluer au cours de son cycle de développement, suivant les saisons ou les sites étudiés. Une même espèce peut donc être herbivore, détritivore, voire carnivore, ce qui rend difficile l'identification d'une espèce en tant que producteur secondaire. L'efficacité productive de la biomasse est plus faible dans les eaux très froides et très chaudes. L'intensité de la production secondaire est fonction des caractéristiques du consommateur (taille, poids, état physiologique), les quantités de ressources alimentaires disponibles, et les conditions abiotiques du milieu.

Sources : Fletcher et al. 2011, Schoenn et al. 2013, EFSE 2019 ; Carpenter and Kitchell 1993, Pourriot and Meybeck 1995

Indicateurs possibles de fonction de production : Production primaire ; abondance et diversité du phytoplancton, zooplancton, transparence, chlorophylle a, concentrations en P, N, indice trophique, carbone organique particulaire, O₂ dissous

FONCTIONS D'HABITAT

Relations trophiques et interactions biotiques

Définition : Interactions entre les espèces reliées par les réseaux alimentaires et transmission de l'énergie dans les réseaux trophiques : contrôle top-down (cascades trophiques), contrôle bottom-up. La notion de flux d'énergie est indissociable de celle de relation trophique.

Exemples de processus biophysiques :

Compétition intra- et inter-spécifique, prédation, mutualisme, migration, parasitisme. A partir de l'énergie solaire utilisée par les producteurs primaires, l'énergie se transmet de niveau trophique en niveau trophique du fait des processus de prédation, consommation. Elle diminue à chaque transfert d'un chaînon à un autre. Les interactions entre espèces permettent la bio-amplification, phénomène par lequel une substance naturelle ou un contaminant présent dans un biotope connaît un accroissement de sa concentration au fur et à mesure qu'il circule vers les maillons supérieurs du réseau trophique (Ramade, 1993). Les relations trophiques sont déterminées par la nutrition des espèces depuis l'acquisition de leur nourriture dans l'environnement, son assimilation dans l'organisme sous forme de matière organique et son utilisation pour la croissance et la reproduction. Les compétitions interspécifiques limitent le nombre et l'abondance des espèces, la prédation permet la coexistence d'un grand nombre d'espèces ainsi que la régulation des populations.

Diversité spécifique et génétique

Définition : Diversité du nombre d'espèces occupant un habitat et diversité génétique infraspécifique au sein d'une espèce.

Exemples de processus biophysiques :

Composition en espèces déterminée par les interactions biotiques, les stratégies de reproduction, la dispersion larvaire, migrations, mutations, la dérive et sélection naturelle. Des changements dans la composition en espèces peuvent altérer les processus bio-physiques et chimiques d'un lac et modifier son état. La diversité génétique d'une espèce la rend plus résistante aux changements écosystémiques.

Structure et état physico-chimique des habitats

Définition : Formation des propriétés physiques et chimiques des habitats nécessaires à la survie des espèces et au bon fonctionnement de l'écosystème.

Exemples de processus biophysiques :

Fonction déterminée par la géomorphologie et les processus de sédimentation, décantation de l'eau, bioturbation, hydrodynamisme, stratification lacustre, cycles de l'oxygène et du carbone, par les espèces ingénieurs, la température, la charge solide entrante dans le lac. Considère la formation de zones frayères, nourricières, de repos pour la biodiversité. Le maintien d'un bon état physico-chimique des habitats est essentiel au maintien de la biodiversité et des usages.

Sources : Barbault 2000 ; Lacroix and Danger 2008 ; Keeler et al, 2012 ; Pourriot and Meybeck 1995 ; IPBES, 2018

Indicateurs possibles de fonction d'habitat : Surface des herbiers à macrophytes, frayères à poissons, roselières ; diversité et abondance des taxons dominants, groupes fonctionnels, rotifères, microcrustacés ; concentration en O₂ dissous

FONCTIONS D'INFORMATION

Contribution à une eau avenante et des paysages agréables

Définition : 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 bio-physique 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.

Exemples de processus biophysiques :

Diversité des paysages, présence d'habitats remarquables et espèces d'intérêt patrimonial, de paysages perçus comme attrayant et donnant accès aux activités ludiques, sociales. Ces pratiques peuvent se pratiquer sur le lac, dans le lac, sur le littoral, ou bien de manière plus éloignée en hauteur dans les zones de vue sur le lac. Les effets de mode, les valeurs sociales individuelles déterminent l'intérêt socio-culturel d'un milieu pour la société et donc les caractéristiques biophysiques lacustres attractives visuellement.

Qualité environnementale perceptible des milieux écologiques

Définition : 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.

Exemples de processus biophysiques :

Présence d'archives lacustres pour la paléolimnologie et la reconstitution de l'histoire du lac, de son BV voire d'un espace plus vaste. Présence de réserves naturelles d'intérêt pour la conservation, la sensibilisation à l'environnement et la connaissance. Les lacs sont des cuvettes fermées, des lieux d'expérimentation.

Sources : Vernex, 1985

Indicateurs possibles de fonction d'information : abondance et diversité des espèces patrimoniales et habitats remarquables, couleur et transparence de l'eau, présence de nuisances visuelles, olfactives, gustatives, potentiel de recherche paléolimnologique, diversité des habitats

Figure 1-3 : Fiches descriptives des fonctions écosystémiques des grands lacs alpins. Elles sont réparties par types de fonctions : fonctions de régulation des perturbations, de production, d'habitat et d'information

1.2 Le couple lac - bassin versant

Les lacs ne sont pas des systèmes isolés : la compréhension de leur état et de leur fonctionnement nécessite de prendre en compte les flux provenant de leur environnement, notamment ceux émis ou modifiés par les sociétés humaines qui vivent dans leur bassin versant et/ou qui utilisent et vivent avec le lac. **Le bassin versant (BV) est en général une composante indissociable du système lacustre.**

Le BV est une zone géographique correspondant à la superficie totale de l'aire de capture et de drainage des précipitations vers le lac, soit par écoulement de surface (ruissellements, cours d'eau), soit par écoulement souterrain (infiltration, sources sous-lacustres) (Ramade 1993, Pourriot et Meybeck 1995). On peut le définir comme un « *système géographique qui assemble roches, pentes, sols, végétations, qui collecte les précipitations, détermine la distribution spatiale de l'eau et organise les écoulements dans un réseau de cours d'eau convergeant vers un exutoire, le cas échéant un lac.* » (Loizeau et al. 2015: 16).

Le BV peut être délimité en surface (BV hydrographique ou topographique) par ses lignes de crête. Ses limites souterraines (BV hydrogéologique), plus difficiles à établir, correspondent aux lignes de crêtes piézométriques. Dans certains cas, la délimitation spatiale exacte du BV est très délicate à établir, comme pour le cas des lacs fluviaux, alimentés par leur propre BV et par celui du fleuve qui les traverse (le lac Saint-Pierre au Canada, traversé par le fleuve Saint-Laurent), ou pour les milieux karstiques où les apports souterrains peuvent provenir d'au-delà de la ligne de crête (Pourriot and Meybeck 1995). En fonction de l'objet d'étude et du niveau de précision nécessaire à la recherche, est pris en compte soit le **BV topographique** ou soit le **BV réel** (BV topographique + BV hydrogéologique) (Assad 2014). Seul le BV topographique sera pris en compte dans cette étude.

L'écosystème lacustre reçoit en général la majorité de ses apports en eau (la part issue des précipitations directes est faible) et en matières de son BV via des affluents. C'est le cas des grands lacs alpins. Ces apports sont des forçages majeurs pour la dynamique écosystémique du lac : ils conditionnent le temps de séjour de l'eau dans le lac, régulent la température et les courants, déterminent sa composition physico-chimique, sa trophie, sa thermie ou encore modifient sa biologie. De nombreux processus lacustres sont pilotés par la nature et l'intensité des flux transférés depuis le BV. La géomorphologie de celui-ci joue un rôle très important dans cette régulation BV - lac : par exemple la forme du BV influence la vitesse des courants, ou encore la géologie du BV détermine en grande partie la nature des matériaux particuliers et dissouts qui composent l'eau du lac. Le BV peut également être la cause de perturbations, telles que des apports excessifs de nutriments, de polluants qui respectivement sur-fertilisent ou empoisonnent les écosystèmes aquatiques, voire d'espèces invasives.

L'une des caractéristiques les plus déterminantes de l'influence d'un BV sur son lac dépend du rapport de la surface de l'un par rapport à l'autre. Plus un BV est grand par rapport à la surface du lac, plus il influencera le fonctionnement hydrochimique de ce dernier. Ce rapport varie de moins de 10 pour les lacs de cratère par exemple (généralement inférieur à 3) à plus de 1000 pour les lacs situés sur des grands fleuves. Sa valeur la plus courante est comprise entre 10 et 25. Au-delà de 100, le lac présente des caractéristiques de milieu fluvial : le temps de séjour des eaux décroît en dessous du mois et des zones d'absence de dépôts liées à des courants presque permanents se forment (Pourriot and Meybeck 1995).

Le BV se caractérise donc par un ensemble de traits biophysiques, géomorphologiques (surface du bassin, taille, pente, élévation, orientation, végétalisation), géologiques (types de roches, lithologie, porosité, densité, etc.), climatiques interagissant avec un mode d'occupation du sol (MOS). Cette géographie contrôle les types et les taux de transfert des matières transportées par les écoulements vers le récepteur lacustre. Le MOS est couramment utilisé comme indicateur des sources ponctuelles potentielles des flux de pollutions produits dans un BV. Les MOS sont identifiés par des observations du paysage. Chaque type de MOS représente un risque d'émission qui se matérialise plus ou moins selon les pratiques qui lui sont appliquées, en d'autres termes selon le mode d'usage des sols (MUS – Encadré 1-6).

Encadré 1-6 : Les modes d'occupation et d'usages des sols

Le Mode d'occupation du sol (MOS) représente la couverture biophysique d'un territoire géographique (Pelte et al, 2015). Le MOS d'un BV se constitue d'une mosaïque d'étendues naturelles (forêts, zones humides...), d'espaces agricoles (prairies, cultures ...) et de zones habitées (zones urbaines, péri-urbaines, industrielles...). L'étude du MOS fournit des informations importantes sur les interactions entre les lacs et leur BV et plus largement sur les relations entre les activités humaines et les écosystèmes aquatiques (Pelte et al. 2015). Le Mode d'usage des sols (MUS) est un indicateur similaire mais plus fin car il ajoute une composante « usage » et « types de pratiques et techniques d'utilisation des terres ». Le MUS permet d'intégrer des informations complémentaires sur les sources d'émissions des polluants et d'envisager les « zones sources critiques » des pollutions des pollutions.

En fonction de la proportion de zones urbanisées par rapport aux zones agricoles d'un BV, on distingue des bassins à dominante rurale, où les MOS agricoles sont majoritaires et des bassins urbains et péri-urbains avec un MOS marqué par de grandes zones habitées. En pays développé, une grande part des polluants issus des territoires urbains est collectée et traitée dans les systèmes d'assainissement des eaux, avec des performances plus ou moins fortes en fonction des techniques utilisées. La situation est différente dans les bassins ruraux où la charge prépondérante est générée et transférée par écoulement sur et dans les sols, en général et de ce fait est impossible à canaliser et épurer.

❖ Pollutions diffuses et pollutions ponctuelles

On différencie parfois un peu arbitrairement deux grands types de pollutions en fonction du fonctionnement de leurs sources et de leurs relations avec les MOS et les MUS : les pollutions ponctuelles et les pollutions diffuses. Cette distinction repose sur un ensemble de critères qui *in fine* déterminent le mode de maîtrise de ces flux. Bien entendu, il existe des cas intermédiaires, difficiles à classer, notamment les fuites à partir des points de stockage, les accidents... Pour notre étude des grands lacs, nous proposons ici de nous référer aux travaux de Novotny dont la classification se prête bien aux polluants que nous aurons à traiter.

La pollution ponctuelle : elle provient de sources dont la localisation spatiale est bien définie, constante, souvent facile à identifier et matérialisée par des aménagements permettant un rejet (canalisations, autres...). Le cas type est une évacuation d'égout d'eaux usées urbaines. Les émissions de ce type de pollution sont, indépendamment de leurs flux, beaucoup plus concentrées en polluants que celles produites par la pollution diffuse. Le flux est émis en premier lieu au rythme d'activités humaines et donc en général indépendamment des conditions hydrométéorologiques. Ces caractéristiques font que **ces sources de pollution sont collectables et traitables par des technologies** (cas type : stations d'épuration des eaux usées). Depuis des décennies, des programmes gouvernementaux et des décrets de lois ont été mis en place afin de diminuer ces rejets de ces pollutions dans l'environnement.

La pollution diffuse : La pollution diffuse est liée à une multitude de micro-sources réparties sur l'ensemble d'un territoire (Bonn 2003) mais avec des zones critiques plus contributives. Elle est produite en période de pluie à partir des sols naturels agricoles ou imperméabilisés (parkings, routes...) par des écoulements de surface (ruissellements) ou des lessivages. Son origine spatiale est difficile à définir et variable d'un épisode d'écoulement à un autre (Jordan Meille et al. 1998). Les pollutions diffuses sont transmises aux milieux aquatiques associés à de forts volumes d'eau et souvent à de fortes charges de matières en suspensions, et donc dilués et parfois dispersés entre phase solide et dissoute. En raison de ces caractéristiques, la maîtrise des flux *diffus* relève très généralement d'une gestion du territoire (limitation des intrants, pratiques agricoles, par exemple et aménagements de zones tampons). Les politiques de l'eau légifèrent moins ce type de pollution. L'épandage de produits chimiques ou fertilisants en agriculture ou encore l'érosion sont les sources principales de pollution diffuse mais la pollution diffuse urbaine (écoulements sur les chaussées, les toits...) tend à s'accroître et représente autour de lacs récents et réservoirs, des flux non négligeables. Pour Dorioz and Trevisan (2007) ce type de pollution "*constitue un enjeu particulier en raison de la complexité des structures et processus en cause*". Les sources de pollutions diffuses d'un territoire sont multiples, ce qui complique la problématique (d'après Bonn 2003).

- ❖ Le chemin de l'eau depuis le BV jusqu'au lac et acquisition de la charge polluante

Lors d'une pluie, les écoulements suivent dans le BV deux cheminements principaux : l'eau, soit ruisselle sur les terres et roches, soit s'infiltré dans le sol par percolation pour rejoindre les cours d'eau ou parfois s'écouler directement dans les lacs. Sur son passage, l'eau dissout certains constituants du sol, érode les roches et acquiert en conséquence une charge en matières particulaires dissoutes qui reflète son interaction avec les milieux du BV. L'ensemble de ces matériaux et flux hydrochimiques constituent la **charge externe** qui entre dans un lac. Dès que le BV est cinq à six fois plus grand que le lac, la charge externe du lac provient majoritairement de ses tributaires.

De nombreux composants de la charge externe dépendent des MUS du BV et de l'implantation des sociétés humaines. Les activités anthropiques génèrent des polluants qui se retrouvent dans la charge externe du lac et construisent des aménagements hydrauliques qui modifient le degré de connectivité entre le BV et le lac (intensité et vitesse des écoulements). Ainsi, les surfaces terrestres artificialisées (routes, zones urbanisées, goudronnées, bétonnées), en plus de produire une pollution spécifique des écoulements de surface, notamment à base d'hydrocarbures (Touchart 2007) **imperméabilisent globalement le BV, facilitent la propagation des ruissellements et de ce fait court-circuitent l'effet filtrant des sols et limitent la capacité de rétention des zones tampons (zones humides, ripisylves...)**. Le cocktail de polluants du BV s'écoule plus rapidement et en quantité plus importante vers les milieux aquatiques. Ce qui en fait des zones artificialisées, des **zones critiques** pour les pollutions des lacs.

Les zones tampons évoquées ci-dessus peuvent intercepter dans une certaine mesure, stocker, filtrer et transformer les polluants contenus dans les eaux et participent à la résistance aux pollutions du couple lac - BV (Dorioz et al. 2006). Elles sont capables de résister aux changements bio-physico-chimiques qu'elles subissent. Les milieux qui possèdent ces propriétés sont les sols naturels, les zones de couvert végétal permanent, les milieux humides, les fossés enherbés, les haies et forêts, marais et tourbières ou encore les prairies.

L'Homme peut accroître la capacité tampon de ces zones par des aménagements visant à augmenter leur taille et leur capacité filtrante (ex : favoriser le développement des espèces filtrantes, accroître la densité du couvert végétal ou limiter le comblement des zones humides). A noter que cet effet tampon s'effectue jusqu'à l'atteinte d'un seuil au-delà duquel le stockage et la dégradation des polluants n'est plus possible. La zone tampon saturée peut alors devenir une source en rejetant des matériaux et composés stockés sans avoir été décomposés. Dans un BV agricole, les zones tampons sont une des mesures préférées de lutte contre les pollutions diffuses agricoles, mesure nécessaire mais rarement suffisante (Dorioz et al. 2006).

Différents composés issus de la charge externe peuvent, après un séjour réalisé dans la colonne d'eau du lac, souvent accompagnés de transformations biogéochimiques, sédimenter plus ou moins rapidement et s'accumuler dans le milieu benthique. Les composés accumulés d'années en années au fond des lacs forment des couches superposées de matériaux qui stockent une partie des contaminants provenant pour l'essentiel du BV. Il existe donc une **charge interne en polluants** dans le fond des lacs. Celle-ci, à la faveur de certaines situations (en premier lieu d'hypoxie benthique) est susceptible de relarguer certains composés, notamment le phosphore, vers la colonne d'eau (Jenny et al. 2014).

Il devient alors évident que la qualité de l'eau d'un lac est déterminée par son BV, directement via la charge externe et indirectement et de façon différée, par la charge interne : l'impact de la charge externe sur un lac dépend de la composition des flux hydrochimiques et des régimes hydrologiques du BV. Ces caractéristiques sont liées étroitement aux propriétés géographiques, et bio-physiques du BV, et bien sûr des MUS, capables de modifier l'ensemble de ces paramètres (Pelte et al. 2015). La charge interne dépend des mêmes paramètres de flux, mais dans le cadre d'interactions complexes avec l'hydrodynamique du lac.

1.3 Le système grand lac – BV – société

Les limnologues n'ignorent pas, bien entendu, le poids des activités humaines (exploitation des lacs, artificialisation du BV, rejets polluants, etc.) mais celles-ci sont considérées souvent comme des **facteurs externes**, des forçages à gérer, et non pas comme une composante à part entière du système lacustre (Gril and Dorioz 2004). L'espace lacustre est essentiellement appréhendé à l'échelle micro (celle du lac stricto sensu en tant que masse d'eau et écosystème) et méso (échelle du bassin versant - lac) avec un focus sur la ressource en eau (qualité et quantité) (Meybeck 2002). Or de telles conceptions du lac et plus largement du système lac – BV, **minorent les dynamiques liées aux activités humaines**, les fonctions sociales, culturelles et économiques des lacs, les usages non liés au BV (ex : la pêche) et les dynamiques de développement associées.

En conséquence, les fonctionnements socio-économiques, notamment ceux, structurants dus à la proximité d'un lac, sont quasi absents du concept de BV, tout comme ils le sont de l'objet lac. Les effets en retour du lac, de son état et de ses ressources sur le développement socio-économique du littoral, du BV et plus largement sur son « *aire d'influence* » (entendu au sens large, à la fois de l'influence du lac sur les activités socio-économiques et de la société sur le lac) ne sont pas non plus pris en compte. Ces effets contrôlent pourtant à terme la dynamique écosystémique dont ils dépendent. A l'inverse, les sciences humaines et sociales considèrent la relation lac - BV sous l'angle des valeurs religieuses, culturelles et des ressources

économiques associées à ce système sans toutefois les rapprocher des caractéristiques physiques ou écologiques des lacs et de leur BV (Meybeck 2002, Brunet 2016). Ce jeu d'interactions subtiles entre état du lac, valeurs socio-économiques et écologiques associées et développement territorial est pourtant au cœur des enjeux de gestion. Des constats analogues peuvent être faits pour d'autres problématiques environnementales où l'on aborde les écosystèmes sans vraiment les associer aux systèmes sociaux qui les utilisent ou les gèrent (Liu et al. 2007b, Collins et al. 2011).

Bien comprendre et modéliser la dynamique d'un grand lac et de son BV à des fins de gestion, suppose en fait de comprendre autant le fonctionnement des structures sociales, économiques et institutionnelles et les modèles de relations qui les associent (informations, économies, perception des parties prenantes, distributions spatiales), que les fonctionnements biophysiques et les flux qui en résultent (eau, matières, énergie). Cela signifie en bref de s'intéresser au **système "grand lac – BV – société"**, à sa spatialisation et aux interactions entre ses composantes physiques, écologiques, socio-économiques, culturelles et juridiques. La communauté scientifique impliquée dans la gestion environnementale, soit des ressources associées à des objets comme les lacs, soit de grandes problématiques (changement climatique, biodiversité...) est demandeuse de ce type d'intégration entre sciences sociales et science de l'écologie (Redman et al. 2004, Liu et al. 2007a). Pour de nombreux auteurs, c'est même une condition impérative du succès des mesures de gestion environnementale (Folke 2006, Young et al. 2006, Carpenter et al. 2007, Ostrom 2007, 2009, Collins et al. 2011).

Pour intégrer le point de vue des sciences humaines et sociales à celle des sciences de l'environnement et de l'écologie, il convient de parler géographiquement du « **territoire lacustre** ». Cette sous-partie cherche à proposer une définition de cet espace.

1.3.1 Définition du « territoire lacustre »

" Les Hommes ne font pas que vivre en société, ils produisent de la société pour vivre" (Godelier 1982).

Il existe de nombreuses conceptions de « territoire », nous considérerons ici le territoire en tant qu'espace muni de ressources et approprié par une société. Les Hommes sur un territoire produisent de l'histoire, inventent des moyens matériels et immatériels pour exploiter, selon leurs besoins, certaines ressources. Les écosystèmes de ce territoire sont donc le support d'entreprises humaines et des rapports sociaux, des valeurs sociales et culturelles qui leur servent de moyens ou cadres à leurs actions.

Ainsi formalisé, un territoire est une portion de l'espace sur laquelle une société déterminée revendique et garantit à tout ou partie de ses membres des droits stables d'accès, de contrôle et d'usage portant sur tout ou partie des *ressources qui s'y trouvent et qu'elle est désireuse et capable d'exploiter*" (Godelier 1982 p. 112). Nous ajoutons que le territoire est associé, d'une manière ou d'une autre, à un attribut de possession ou d'identification (Lévy and Lussault 2013). Les composantes « *ressource* » et « *identité* » sont au centre de cette conception de territoire.

Nous adoptons cette conception du territoire qui nous semble être pertinente à l'étude des relations humains – grands lacs. Ces relations configurent un espace géographique qualifié de

« territoire lacustre ». Le territoire lacustre est composé **de ressources matérielles**, à savoir les ressources aquatiques, les bio-ressources (végétaux et animaux), les paysages co-produits par le système écologique lacustre et des systèmes écologiques terrestres à l'amont et à l'aval investis par la société. Le territoire lacustre est également fait de rapports entre les Hommes et **de ressources immatérielles** : relations sociales, connaissances partagées de l'histoire, des pratiques et valeurs héritées, savoir-faire, traditions et culture. Dans le cas des territoires lacustres, **l'espace est composite et multicolore**, avec la présence d'une étendue d'eau, surplombée de terres associées à une mosaïque paysagère et d'un espace aérien. Les ressources extractives (eau, animaux, végétaux, granulats) de ce territoire sont prélevées à la surface du plan d'eau, en profondeur, dans le sable et les sédiments, en sous-sol et sur les pourtours du lac et s'utilisent localement. Les ressources non extractives (eau pour la navigation, beauté paysagère, valeurs sociales ...) se consomment sur place, depuis la surface, la profondeur, le littoral ou avec un peu de hauteur depuis les airs ou les reliefs autour. Ces différentes ressources s'exportent, par voie terrestre, fluviale, ou aérienne pour les ressources extractives et par la voie de l'image photographique ou l'image cognitive véhiculée par le discours et les écrits (ex : promotion de l'image d'un lac pour le tourisme).

Le patrimoine matériel et immatériel naturel et culturel du territoire nécessite **une gestion et des aménagements** les préservant et les valorisant. Des institutions **productrices d'espace** (administrations, syndicats, et leurs dispositifs de réglementation, normes, lois, etc...) définissent les limites de l'exploitation des ressources et cherchent à éviter les conflits sur leurs usages et à maintenir de manière pérenne les biens et atouts du territoire et leur partage équitable entre les usagers. La gestion veille également depuis le début du XX^{ème} siècle à être durable et à s'assurer que cette identité du territoire puisse être conservée et transmise aux générations futures.

Depuis deux siècles et demi, la mondialisation a changé les rapports des humains aux territoires et a ouvert leurs frontières, si bien que chaque territoire est aujourd'hui défini par ses propriétés intrinsèques (ressources, culture spécifique, pratiques, valeurs) et d'autres exogènes véhiculées d'ailleurs mais qui s'incorporent à leur identité et à leur économie (Arnauld de Sartres & Gagnol 2020). Les territoires lacustres n'échappent pas à ce phénomène (ex : le paddle – sport de glisse nautique où le pratiquant se tient debout sur une planche et se propulsant à l'aide d'une pagaie – est à l'origine un moyen de déplacement sur l'eau en Polynésie ; il est devenu une activité ludique aujourd'hui pratiqué sur les littoraux du monde entier).

Les lacs ne fournissent pas uniquement des moyens de subsistance, ce sont des territoires de travail et de production, mais également des lieux de vie, supports matériels aux rapports sociaux (ex : lieu de détente, de rencontres, de cultes ...) autour desquels se sont construites des sociétés.

L'eau est également à la fois un support de biodiversité et le milieu de vie de nombreuses espèces, le support des activités nautiques, un matériel pour le jeu, la détente et le plaisir, et c'est aussi un élément attaché à des images, mythes et symboles forts et ancrés dans toutes les sociétés et religions du monde (Olivaux 2007) et donc le support aussi de l'imaginaire, des valeurs, des apprentissages et des traditions des territoires lacustres : l'eau, un élément central du **patrimoine naturel** (valeurs que les sociétés humaines attachent à un élément de biodiversité et qui conduisent à lui attribuer un statut particulier en raison de son caractère remarquable ou de sa dimension culturelle et identitaire - EFESE 2016) **et culturel**. Les

territoires lacustres sont alors un type de territoire de l'eau, où l'élément liquide assure des fonctions et véhicule une dimension culturelle, des représentations singulières qui déterminent les pratiques de la société et la gestion des lacs (Bravard & Pourtier 2003 ; Alexandre & Arrus 2006 ; Ghiotti 2005).

Les territoires lacustres sont également des lieux de **production et d'accumulation d'informations**. Pour certains physiciens, l'information est un constituant de base de l'univers au même titre que l'énergie et la matière (Hidalgo 2015). Il est également possible d'élever l'information au rang de constituant de base des territoires qui s'accumule et est véhiculée dans la société au travers des connaissances et des représentations. Les informations nous apprennent à interagir avec le milieu lacustre, à l'utiliser et l'exploiter avec d'autres usagers, à nous souvenir de l'histoire, des traditions, de la culture et autant d'éléments du patrimoine mais également elle nous apprend à le préserver. La connaissance est une richesse des territoires.

La plupart des grands lacs sont des **espaces de concentration des sociétés humaines** (Vernex 1998). Ces territoires sont soumis à une double dépendance entre d'une part le plan d'eau et son BV, à savoir que le lac peut engendrer un surcroît de développement économique pour le territoire lacustre auquel il appartient (Cristofini et al. 1989, Vernex 1998), ce qui impacte notamment l'occupation des sols de leurs BV et en conséquence la qualité des eaux que ceux-ci leur transfèrent (Barroin 1990). Le développement socio-économique dépend d'autre part également en partie de l'état du lac et on peut émettre l'hypothèse, parfois avancée dans les travaux de géographie et d'économie environnementale, que c'est sur cet « *équilibre dynamique* » subtil entre état du lac et développement humain que se construit la valeur socio-écologique et économique du territoire lacustre.

En définitive, le territoire lacustre est un **espace géographique multiscalaire**, à la fois composé d'entités biophysiques (le lac, le BV, l'aval, la biodiversité, les milieux écologiques ...), et sociétales (populations, usages, pratiques, institutions...) imbriquées. La notion de territoire correspond à la **vision intégrée** que l'on cherche à développer dans cette thèse, en considérant notamment les relations réciproques entre les humains et les grands lacs. Cette notion est associée à l'idée sous-jacente **d'appropriation** des sociétés, ce qui permet d'appréhender les références socio-culturelles associées aux éléments naturels. **Nous utiliserons donc la notion de « territoire lacustre », en synonyme de « système grand lac – BV – société »,** le territoire lacustre apportant une idée « *d'appropriation* », absente de la deuxième expression, davantage orientée sur les relations biophysiques et socio-économiques entre les différents espaces qui associent les Hommes aux grands lacs.

Enfin, nous n'utiliserons pas le terme d'**hydrosystème**, dont l'usage est préconisé par (Amigues and Chevassus-au-louis 2011), qu'ils définissent comme « *un système composé de l'eau et des milieux aquatiques associés dans un ensemble géographique délimité* ». La dimension sociale est peu présente dans la notion d'hydrosystème, c'est pourquoi nous n'avons pas choisi ce terme.

1.3.2 Dégradation et dysfonctionnement des lacs à l'anthropocène

En moins de deux siècles, **l'Homme a modifié les lacs plus qu'à tout autre moment de l'histoire** et est devenu une véritable "*force géologique majeure*" capable de modifier l'ensemble des grands cycles bio-géo-chimiques. Cette caractéristique de l'époque actuelle

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

qui débute avec l'industrialisation au XIX^e siècle a poussé certains scientifiques à identifier une nouvelle ère géologique, marquée par la capacité de l'entreprise humaine à modifier l'ensemble du système terrestre : l'ère de l'anthropocène (voir Annexe 1-3 pour plus de détails) (Crutzen 2002, Steffen et al. 2007).

Les lacs font partie des écosystèmes les plus sensibles aux perturbations anthropiques (nous utiliserons ce terme en synonyme de "*pressions sur les écosystèmes*"). Plusieurs études concluent que les espèces d'eau douce sont plus sensibles aux changements planétaires que dans tous les autres milieux (Cumberlidge et al. 2009, Collen et al. 2014, IPBES 2018b). En atteste le déclin de 81% des populations suivies dans les écosystèmes d'eau douce entre 1970 et 2012 (soit une baisse moyenne de 3.9% par an), contre 58% tous écosystèmes confondus (WWF 2016). L'ensemble des atteintes qui affectent les lacs peuvent être considérées comme des « *perturbations* », c'est-à-dire des altérations provoquant des dysfonctionnements, voire l'effondrement des systèmes écologiques (Ramade 1993). Pour les écosystèmes lacustres, nous retrouvons cinq types de perturbations (Tableau 1-4).

Tableau 1-2 : Les grands types de perturbations des écosystèmes lacustres (d'après Dubois et al. 2018)

Perturbation	Définition	Impacts sur les lacs
<i>L'érosion des sols du BV</i>	Phénomène résultant de l'action de l'eau ou des vents, qui provoque l'enlèvement des couches supérieures des sols (Ramade 1993)	L'érosion augmente la charge externe en sédiments, le transfert de contaminants et de nutriments ce qui favorise le processus d'eutrophisation. Les conséquences peuvent s'étendre à l'ensemble du réseau trophique et des usages.
<i>Les modifications d'habitats</i>	Actions anthropiques conduisant à une modification d'une partie ou de la totalité de la surface d'un habitat, qu'elle soit directe par des changements de la structure et l'état physico-chimique des habitats ou indirecte liée aux changements dans les flux d'eau et de la charge externe (d'après Ramade 1993, Dubois et al. 2018).	Les modifications de la charge externe du lac (composition, débit, volume), les aménagements littoraux et l'urbanisation, la navigation et les activités portuaires, les pratiques de loisirs nautiques et de plage, les pollutions, l'agriculture littorale sont les principales sources de modifications d'habitats. Les changements d'habitats lacustres dépendent en partie des changements dans les MUS du BV (Carpenter and Cottingham 1997).
<i>L'introduction d'espèces</i>	Désigne le fait d'amener une espèce végétale ou animale dans un lac, éloignée de son aire d'origine et dont elle est totalement étrangère. Celles-ci peuvent pulluler ou s'approprier l'habitat, la nourriture d'une autre	De nombreuses espèces ont été introduites dans les lacs du monde entier pour les activités de pêche, mais l'introduction d'espèces peut provoquer d'importants changements dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes ; les

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

	espèce, jusqu'à porter atteinte à l'abondance et la diversité des espèces inféodées au milieu.	écosystèmes d'eau douce sont considérés comme particulièrement vulnérables aux invasions biologiques.
<i>Les changements climatiques (d'après Ramade 1993)</i>	Changements dans les caractéristiques météorologiques d'une région où se trouve un lac sur le long terme.	Les changements climatiques entraînent des modifications des flux hydriques avec le risque de crues et de sécheresses. Ils peuvent modifier (Jenny et al. 2020) : la température de l'eau ; la couverture de glace ; modifier l'abondance, la distribution des poissons et leur diversité ; diminuer la concentration en oxygène benthique ; changer le niveau de l'eau ...
<i>Les pollutions (souillure au sens étymologique)</i>	Il s'agit de l'ensemble des perturbations apportées à l'environnement par les déchets de la vie quotidienne et de l'activité productive (Brunet et al. 1992). Cela regroupe les effets des composés, de nature physique, chimique ou biologique susceptibles d'affecter le fonctionnement et les usages des écosystèmes aquatiques (mais aussi l'air, les sols, le sous-sol, les nappes profondes).	Les pollutions peuvent avoir des effets néfastes sur la santé des usagers, modifier le fonctionnement des milieux naturels, créer des conditions de vie néfastes et engendrer de la mortalité, des migrations, voire des mutations génétiques.

Les activités humaines exercent des pressions croissantes sur les écosystèmes lacustres, modifiant leur intégrité, parfois de manière irréversible. Ces pressions s'exercent directement sur les habitats, se manifestent à l'échelle globale comme le **réchauffement climatique** ou sont véhiculées par des flux liquides ou atmosphériques, mais la plupart sont issues des modifications d'usage des sols dans les BV. En Europe, 75% des BV des lacs et rivières sont sujets à de multiples pressions. L'étendue de leurs zones humides a diminué de 50% depuis 1970 (IPBES 2018b). **L'agriculture**, qui occupe 40% de la surface terrestre (Alexandratos and Bruinsma 2012), provoque la perte de nombreux habitats aquatiques sensibles. La modernisation agricole a conduit à l'utilisation de grandes quantités de fertilisants et de pesticides qui génèrent des pollutions aux nitrates, phosphates, pesticides et matières organiques qui asphyxient ou eutrophisent les milieux aquatiques (Keeler et al. 2012). Les **problèmes d'érosion** sont une autre conséquence de l'évolution des pratiques agricoles. Par ailleurs, 80% des eaux usées municipales et industrielles sont libérées dans l'environnement sans traitement approprié et près de 65 millions de **substances chimiques** sont enregistrées, avec 100 000 d'entre elles produites (ou l'ont été), de manière industrielle (ONEMA 2014). Certaines constituent des **micropolluants** dont on ignore les effets individuels ou en cocktail sur les écosystèmes et la santé humaine (Touraud et al. 2011). La forte dépendance des humains à la ressource en eau le rend vulnérable à toutes ces pressions causées aux milieux lacustres.

L'eau douce est un attracteur des Hommes et des activités : environ 40% de la population humaine vit dans ou à proximité d'un bassin fluvial ou lacustre (IIASA 2016). Les lacs représentent des stocks d'eau douce de qualité plus facilement disponible que l'eau présente dans les aquifères et procurent des opportunités d'usages facilités par la présence d'un plan d'eau (navigation, tourisme, hydroélectricité). La majorité de cette eau lacustre (environ 70% à 90% de la demande annuelle en eau) est utilisée pour l'irrigation en agriculture, et seulement 10% pour des usages domestiques (IPBES 2018b). Les lacs et écosystèmes aquatiques détiennent une capacité de résilience face aux stress environnementaux mais ce potentiel demande à être préservé pour ne pas dépasser les valeurs seuils des changements environnementaux et risquer la perte des usages de ces milieux.

La dégradation de la qualité de l'eau et des milieux est devenue ou en passe de devenir un **problème commun fondamental** pour l'ensemble des grands lacs. Les conséquences pour les territoires associés sont **le manque d'eau et de ressources alimentaires** en quantité, mais aussi en qualité, avec des **risques sanitaires** importants : eaux et poissons contaminés aux produits toxiques ; les eaux transportant des maladies et parasites ; les espèces aquatiques toxiques (cyanobactéries, animaux dangereux, plantes vénéneuses) et les problèmes d'hygiène (microorganismes fécaux). Ces impacts sur les lacs réduisent la capacité de résilience des sociétés humaines face aux changements globaux, peuvent provoquer des crises sociales et conflits (Nicholls and Crompton 2018).

Pour les anthropologues, l'une des principales variables qui déclenche ces crises est ce que certains appellent la "*désacralisation de l'être de l'eau et le déni collectif des problèmes de l'eau*" (Olivaux 2007). Depuis l'anthropocène on observe une perte de contact avec la nature (Soga and Gaston 2016), qui va de pair avec un changement de perception des milieux naturels (Encadré 1-7), avec un véritable oubli de l'importance que joue la nature pour notre bien-être. Dans les territoires lacustres, les enjeux autour de la qualité de l'eau ont une place très forte car cette substance constitue un élément essentiel pour notre corps, nos usages, notre économie mais aussi nos valeurs, coutumes et symboles. L'eau constitue la spécificité et est au cœur de l'image de ces territoires.

Encadré 1-7 : Les représentations de l'eau et des lacs

L'eau, les plans d'eau et milieux aquatiques sont des éléments structurant pour notre imaginaire car ils sont associés à de nombreuses représentations, mythes et légendes. Le philosophe Bachelard (1942) associe l'eau, et par extension les lacs et étendues d'eaux, tantôt à des **symboles de craintes** (les lacs abritent les monstres et créatures mythiques, ils sont associés aux tempêtes, aux crues et catastrophes, aux noyages et naufrages, aux abysses), tantôt des **symboles de purification** (les eaux qui soignent, les eaux sources de vie, l'eau maternelle, les eaux thermales), ou encore des **symboles de transformations** et de combinaison avec d'autres substances (impressionnantes étendues d'eau stagnantes qui peuvent être déchirées par les vents, qui peuvent diluer les polluants, dissoudre les matériaux des bassins versants, dissimuler les secrets et objets dont on ne veut plus, évoluer d'un état liquide à gazeux, rouiller le fer et oxyder les matériaux, s'imprégner des couleurs, odeurs, saveurs, matières, lumières ...). Ces différentes visions de l'eau lui donnent une valeur particulière par rapport à d'autres ressources et participent à **l'identité des territoires lacustres**. Abbott et collaborateurs (2019) mettent en avant combien l'Homme n'apparaît pas dans la majorité des représentations schématiques du **cycle de l'eau** et expliquent que repenser ces représentations est une étape importante vers la gouvernance équitable de l'eau et le développement durable.

❖ Les effets des pollutions dans les lacs

Bien que l'on retrouve des traces de pollution depuis plus de 3 000 ans (Dubois et al, 2018), la plupart d'entre elles sont une caractéristique contemporaine et lié à l'évolution des modes de vie. Les impacts des pollutions sont notamment apparus massivement et rapidement depuis le début du XXème siècle et ont évolué de manière exponentielle jusqu'à se généraliser à l'échelle du globe, si bien **qu'il n'existe pas un lac sur la Terre qui ne contient pas de traces de polluants** (Olivaux 2007). Du fait de leur développement récent dans l'histoire, les effets de ces pollutions, surtout les effets cumulés, sont encore mal connus. De plus, la plupart des polluants n'étant pas visibles dans l'eau et il faut bien souvent attendre les premiers impacts avant de s'apercevoir de leur présence.

Dans un lac, la trajectoire d'impact et de réponse aux pollutions résultent des étapes suivantes (Meybeck 2002) :

1. Une pollution généralement un cocktail de polluants, entre dans le lac,
2. Au-delà d'un seuil, des réactions écosystémiques à ce ou ces polluants surviennent,
3. Une alerte et un diagnostic de la pollution (effets et origines) sont émis,
4. Une prise de conscience sociétale et partagée de cette pollution s'opère progressivement,
5. Des prises de décisions entre acteurs de la gestion des lacs sont réalisées,
6. Des moyens financiers, techniques, humains sont alloués,
7. Les actions de gestion sont mises en place,

8. Enfin, une réponse de l'écosystème lacustre aux actions de corrections entreprises permet progressivement le retour du lac à un état restauré.

Un grand nombre de variables interviennent dans les problèmes de pollution d'un lac et la trajectoire décrite ci-avant peut être ponctuée par différents **seuils d'impacts** dont le dépassement rend l'action restauratrice de plus en plus difficile. Si des retards à l'action sont trop importants, certains effets de la pollution peuvent devenir quasi irréversibles. Les risques sont amplifiés si la pollution est un cocktail amplifiant les impacts et les difficultés de maîtrise (IPBES 2018), ce qui est courant dans les grands lacs.

La lutte contre les pollutions dans les écosystèmes est devenue l'une des tâches majeures des collectivités territoriales et gouvernements, elle suscite la mise en place de mesures réglementaires, d'installation de systèmes de traitements des eaux, de suivis des milieux naturels et le développement de nouvelles industries et entreprises spécialisées dans la dépollution (Brunet et al, 1992).

Si l'on agit rapidement face à une pollution, alors un niveau limité de dégradation est atteint (Meybeck 2002). Limiter les impacts des polluants demande 1/ **une bonne connaissance** et un suivi régulier de l'écosystème lacustre pour détecter la pollution, 2/ **une organisation et une coordination** efficace des acteurs socio-économiques et politiques impliqués, 3/ **une rapidité de décision et d'action**. Il faut toutefois garder à l'esprit que certains retards pourront difficilement être empêchés du fait de la présence « **d'invariants** », liés aux propriétés de l'écosystème lacustre ou aux caractéristiques sociétales. Avoir conscience de ces invariants en amont des impacts et du délai de mise en place des actions représente une nécessité pour anticiper au mieux les évolutions.

Les deux grands types de pollutions qui seront étudiées dans la suite de cette étude : l'eutrophisation et les micropolluants, sont représentatifs de ces trajectoires et problématiques.

❖ Le processus d'eutrophisation dans les lacs

L'eutrophisation est une dégradation reconnue comme universelle depuis Vollenweider (1968) et qui tend actuellement à se généraliser à l'échelle planétaire prenant donc les dimensions d'un **changement global des écosystèmes lacustres**. L'eutrophisation est une pathologie de l'écosystème entier provoquée par une augmentation artificielle jusqu'à un excès de nutriments (le phosphore pour les écosystèmes d'eau douce et l'azote pour les écosystèmes marins) en provenance du BV (Pinay et al. 2013).

Il est possible de classer les divers types écosystèmes aquatiques en fonction de leur état trophique en considérant la productivité végétale (chl a, transparence) et la concentration en nutriments (phosphore et/ou azote). Les masses d'eau riches en éléments nutritifs sont qualifiées *d'eutrophes* et celles qui ont de faibles teneurs *d'oligotrophes*. Le terme de *mésotrophe* est appliqué aux eaux moyennement nourries (voir Tableau 1-3).

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

L'augmentation des nutriments dans les eaux de surface¹ provoque une élévation du niveau trophique. L'eutrophisation désigne une situation ou une évolution au cours de laquelle les végétaux (algues, macrophytes) s'accumulent et prolifèrent dans les eaux de surface. Malheureusement dans les milieux limniques, comme le souligne de longue date Barroin (1992), ce mot recouvre deux phénomènes bien différents : (1) un phénomène naturel qui s'échelonne sur les temps géologiques, due à l'accumulation de matières organique et de sédiments dans la cuvette lacustre ; le vieillissement naturel des lacs ne pose pas de problèmes d'usages, (2) un phénomène artificiel anthropique incontrôlé de prolifération végétale, principalement algale avec des blooms provoqués par des apports de phosphore. Cette évolution se manifeste en quelques années ou décennies. Dans la suite, nous employerons le mot « eutrophisation » uniquement pour désigner ce second phénomène anthropique. A noter que l'eutrophisation est la seule problématique actuelle liée au phosphore.

Tableau 1-3 : Caractéristiques lacustres permettant de définir le niveau trophique des milieux lacustres, fluviaux et océaniques (Smith et al. 1999)

Average characteristics of lakes (Nürnberg, 1996), streams (Dodds et al., 1998), and coastal marine waters (Håkanson, 1994) of different trophic states^a

	Trophic state	TN (mg m ⁻³)	TP (mg m ⁻³)	chl <i>a</i> (mg m ⁻³)	SD (m)
Lakes	Oligotrophic	< 350	< 10	< 3.5	> 4
	Mesotrophic	350 650	10 30	3.5 9	2 4
	Eutrophic	650 1200	30 100	9 25	1 2
	Hypertrophic	> 1200	> 100	> 25	< 1
				Suspended chl <i>a</i> (mg m ⁻³)	Benthic chl <i>a</i> (mg m ⁻²)
Streams	Oligotrophic	< 700	< 25	< 10	< 20
	Mesotrophic	700 1500	25 75	10 30	20 70
	Eutrophic	> 1500	> 75	> 30	> 70
				chl <i>a</i> (mg m ⁻³)	SD (m)
Marine	Oligotrophic	< 260	< 10	< 1	> 6
	Mesotrophic	260 350	10 30	1 3	3 6
	Eutrophic	350 400	30 40	3 5	1.5 3
	Hypertrophic	> 400	> 40	> 5	< 1.5

^a The terms oligotrophic, mesotrophic, and eutrophic correspond to systems receiving low, intermediate, and high inputs of nutrients. Hypertrophic is the term used for systems receiving greatly excessive nutrient inputs. TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; TIN, total inorganic nitrogen; chl *a*, chlorophyll *a*; SD, Secchi disk transparency.

Du point de vue écologique, on peut analyser le processus d'eutrophisation au travers de la **loi du facteur limitant** (ou loi de Liebig), qui expose que l'abondance des organismes est proportionnelle à la quantité de l'élément nutritif assimilable présent en moins grande quantité, relativement aux besoins de ces organismes (Vivier 1961). Le P est un élément naturel rare relativement aux besoins des végétaux, ce qui fait qu'il est fortement capté par la biomasse et joue ce rôle clé de contrôle de la productivité des lacs (Dorioz and Trevisan 2007).

¹ En milieu terrestre ce phénomène est plus rare

CHAPITRE 1

Apports disciplinaires à la définition du système grand lac - bassin versant - société

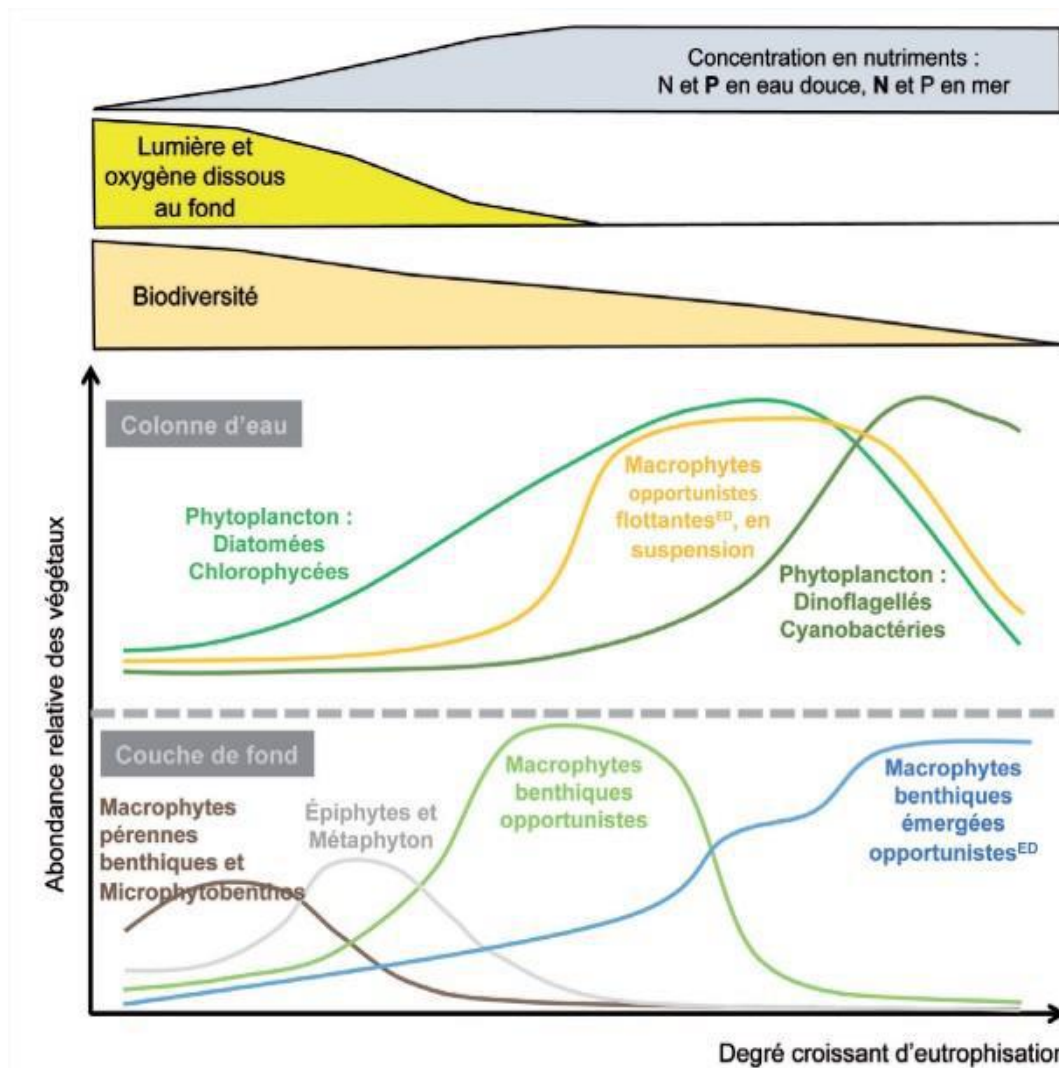


Figure 1-4 : Changements des paramètres physico-chimiques et de l'abondance relative de la biomasse végétale en fonction du degré d'eutrophisation en milieu aquatique (Pinay et al, 2013 in ESCo Eutrophisation)

Des accroissements dans les quantités assimilables et les proportions relatives de P dans un lac entraînent la chaîne causale suivante (voir Figure 1-4) :

1. Une **augmentation de la biomasse végétale** qui génère progressivement une diminution de la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau,
2. **Un manque de lumière** qui favorise le développement d'espèces végétales opportunistes (parfois toxiques pour l'Homme et la biodiversité) adaptées à ces nouvelles conditions environnementales. Celles-ci viennent remplacer les espèces présentes initialement,
3. Une sur-consommation de l'oxygène induit par ces proliférations conduisant à un appauvrissement du milieu, puis progressivement à **l'anoxie** des zones benthique et peu à peu du milieu pélagique et l'émission de gaz toxiques.

Le phosphore qui entre dans l'écosystème peut être consommé par la biomasse végétale dans la colonne d'eau ou/et alors se déposer sur le fond du lac (formes particulières). Quand les

niveaux de phosphore sont élevés, la production d'algues pélagiques est forte et leur décomposition dans le milieu benthique consomme tout l'oxygène présent, ce qui provoque une « **désoxygénation benthique** ». En condition anoxique, une part du phosphore piégé au fond (liée au fer) peut être relarguée sous forme dissoute, créant un flux qui peut soutenir la croissance des algues pélagiques et donc amplifier ou entretenir l'eutrophisation de l'écosystème (Jenny et al. 2013). Ce phénomène, appelé « **relargage de la charge interne en phosphore** » représente un verrou important à la restauration (Carpenter et al. 2001).

L'eutrophisation se manifeste aux usagers des lacs (Figure 1-5) par des baisses de transparence, des accumulations de biomasse et des modifications des réseaux trophiques. Les données paléo-limnologiques montrent cependant que la désoxygénation benthique représente l'une des **premières réactions mesurables de l'écosystème** lacustre à sa contamination par le phosphore (Jenny et al. 2013). Les manifestations les plus impactantes sont des proliférations massives d'algues, dont certaines peuvent être toxiques, provoquant une mortalité importante d'organismes aquatiques et la perte de biodiversité associée. Les activités en contact avec l'eau sont impactées, la qualité visuelle de l'eau, l'approvisionnement en eau potable et la pêche. L'eutrophisation est une menace pour l'environnement, l'économie et la santé, avec des risques majeurs sur le bien-être humain, l'image et l'attractivité des territoires lacustres (Pinay et al. 2013).

Le processus d'eutrophisation est progressif et les impacts peuvent ne pas être visibles tout de suite, mais il est possible d'y remédier si le phénomène est traité suffisamment tôt en maîtrisant les flux de nutriments issus des sources ponctuelles et diffuses. On observe alors une « **ré-oligotrophisation du lac** », c'est-à-dire une baisse des concentrations de P dans le lac qui conduisent à un retour vers un niveau trophique oligotrophe (Barroin 1990). Les efforts pour maîtriser les flux de P en cause ont permis quelques succès spectaculaires sur des « *grands* » ou relativement grands lacs (Carpenter and Cottingham 1997).

Effects of eutrophication on lakes and reservoirs (modified from Smith, 1998)

Increased biomass of freshwater phytoplankton and periphyton
 Shifts in phytoplankton species composition to taxa that may be toxic or inedible (e.g. bloom-forming cyanobacteria)
 Changes in vascular plant production, biomass, and species composition
 Reduced water clarity
 Decreases in the perceived aesthetic value of the water body
 Taste, odor, and water supply filtration problems
 Possible health risks in water supplies
 Elevated pH and dissolved oxygen depletion in the water column
 Increased fish production and harvest
 Shifts in fish species composition towards less desirable species
 Increased probability of fish kills

Figure 1-5 : Impacts de l'eutrophisation sur les lacs et réservoirs (Smith et al. 1999)

❖ Les micropolluants

Définition. Les micropolluants sont des substances inorganiques (ex : « métaux lourds »), organiques (Polychlorobiphényles - PCB, produits phytosanitaires, médicaments) ou organométalliques (organoétain) présentes en très **faibles concentrations** dans l'environnement, mais ayant des effets nocifs pour les organismes vivants (Loizeau et al. 2013). Parmi les substances que l'on regroupe sous le terme général de « *micropolluants* », on retrouve :

- Les métaux lourds (Cuivre, plomb, cadmium, zinc, mercure, etc... - pour les chimistes Eléments Traces Métalliques - ETM)
- Les hydrocarbures
- Les matières plastiques
- Les pesticides et autres composés organiques de synthèse
- Les PCB
- Les fluorures

La Micropollution. La problématique des micropollutions est relativement récente, apparue dans les années 1960 pour le cas spécifique des métaux lourds, puis dans les années 1990 pour les micropolluants organiques PCB (Meybeck 1990). Les années 2000 voient apparaître à l'échelle mondiale de nouvelles problématiques de micropolluants, liés aux plastiques et médicaments, principalement dans les grands lacs. Certains micropolluants sont présents depuis bien avant la fin du XX^{ème} siècle, mais n'ont pas été détectés plus tôt par manque de techniques d'analyse permettant de le faire (Loizeau et al. 2013, Lestel et al. 2017).

La micropollution est une problématique complexe caractérisée par une très grande diversité de substances chimiques en cause, avec l'apparition chaque année de milliers de nouvelles molécules, une grande diversité de voies d'entrées, à la fois issues de sources ponctuelles et diffuses, des propriétés particulières de grande persistance, bioaccumulation, bioamplification et de stockage (dans les corps adipeux des animaux pour certains micropolluants) et un manque de connaissances des impacts sur l'environnement, la santé et les actions de gestion à mettre en place.

Si les sources de pollution n'ont fait que croître en nombre et en importance depuis l'apparition des premières cités au Néolithique, depuis la moitié du XX^{ème} siècle, la croissance de la pollution est exponentielle, notamment du fait des micropolluants (concentrations, diversité des molécules, généralisation spatiale). La plupart des micropolluants sont issus de l'industrie chimique et des activités spécifiques comme le minage, l'agriculture intensive, la production d'énergie ou les transports. On retrouve une quantité de plus en plus importante de micropolluants d'origine plastique et médicamenteuse, véhiculés par les déchets solides rejetés dans l'environnement.

Les métaux dits « lourds » sont des types de micropolluants utilisés par l'Homme depuis l'antiquité et sont parmi les formes les plus anciennes perturbations anthropiques sur les lacs qu'il est possible de détecter aujourd'hui (Dubois et al, 2018). On retrouve des traces de métaux lourds dans les sédiments lacustres vieux de 3000 à 4000 ans en Europe, Asie ou Amérique du Sud grâce à la paléolimnologie, avec des niveaux élevés de cuivre, plomb ou mercure mais toutefois à des concentrations beaucoup moins importantes que celles mesurées depuis le début de l'époque industrielle (Dubois et al, 2018). Ces métaux ont des

propriétés intéressantes pour l'industrie et l'agriculture, ce qui explique leur large utilisation à travers l'histoire et à travers le monde (OCDE 1974).

La plupart des micropolluants ont des effets non visibles mais qui peuvent engendrer de lourdes conséquences sur la santé humaine et l'état des écosystèmes lacustres. La plupart des micropolluants se dispersent facilement dans l'environnement par le jeu de la circulation atmosphérique et/ou du cycle de l'eau, ce qui leur permet de contaminer des zones totalement exemptes de sources de pollutions (Ramade 1993). Facteurs aggravants, ces composés (1) ne peuvent pas être filtrés et traités dans les stations d'épuration avec les traitements classiques, (2) nombreux micropolluants sont persistants dans l'environnement et donnent lieu à des phénomènes de bioconcentration et de bioamplification. La bioconcentration en polluants désigne la capacité d'un contaminant présent dans un biotope à s'accumuler dans un organisme exposé à des concentrations supérieures à celles auxquelles il se rencontre dans le milieu externe. La bioamplification en polluants engendre une augmentation de la concentration d'un contaminant dans les êtres vivants d'un même réseau trophique au fur et à mesure que l'on s'élève dans les chaînes alimentaires (Ramade 1993).

Selon l'importance et la nature des micropollutions, les effets sur les écosystèmes peuvent être variés et se manifester généralement au niveau de quelques populations d'espèces végétales et/ou animales, ou bien sur l'ensemble du réseau trophique. De par leurs propriétés biochimiques, ces contaminations peuvent rester localisées au niveau benthique ou en surface, alors que d'autres se retrouvent sur l'ensemble de la colonne d'eau. Certains micropolluants, selon Carpenter et Cottingham (1997) sont également à l'origine de pluies acides qui viennent augmenter la transparence aux rayonnements ultraviolets dans l'atmosphère au-dessus des lacs, et générer des impacts sur les organismes sensibles aux UV.

Les problèmes de micropollutions n'ont pas encore fait l'objet de normes réglementaires individuelles coordonnées à l'échelle européenne ou nationale (communication personnelle). La détection de micropolluants s'effectue principalement par bioindication (présence des contaminants dans les organismes d'espèces bio-indicatrices), ainsi que par l'analyse des carottes sédimentaires.

Les effets sur la santé humaine des micropolluants ne sont pas tous connus, mais il est possible de décrire les impacts des plus graves pour l'Homme. **Le mercure** est un cas type sur lequel nous reviendrons. Le mercure méthylé (CH_3HgCl , CH_3HgCH_3 ...) s'infiltré au travers des membranes biologiques grâce à leur petite taille et expose à des symptômes neurologiques, sensoriels et moteurs graves chez les animaux et l'Homme : réduction du champ visuel, altération de l'audition, troubles de la sensibilité, altération de la parole, perte de coordination des membres (ataxie), convulsions et tremblements, troubles mentaux légers, notamment chez les enfants nés de mères contaminées. A forte exposition, la contamination au mercure peut entraîner la mort. Ces symptômes ont été observés lors de la crise mondiale sur les impacts du mercure survenue à la suite des contaminations du village de Minamata au Japon (Encadré 1-8).

Les composés organochlorés (PCB - DDT et autres pesticides) sont des composés organiques de synthèse comportant au moins un atome de chlore. Ces produits chimiques sont (ou étaient en Europe) utilisés comme solvants, pesticides, insecticides, fongicides ou réfrigérant. Certains de ces composés dans les années 1950 - 1980 ont contaminé l'ensemble du réseau trophique de certains écosystèmes aquatiques, jusqu'aux oiseaux et l'Homme. Ils sont

caractérisés avec une très grande stabilité dans l'environnement, une grande toxicité et sont bio-accumulables et facilement stockés dans les graisses (Carpenter and Cottingham 1997). Les PCB par exemple, bien que interdits depuis 1975 en Europe, peuvent être mesurés dans les sédiments des grands lacs à des concentrations similaires à celles présentes avant leur interdiction (Lestel et al. 2017). Les conséquences de ces produits sur la santé peuvent être graves : ce sont des perturbateurs endocriniens, responsables de cancers, de malformations à la naissance, de troubles à la reproduction.

Encadré 1-8 : Une alerte mondiale : la pollution du village de Minamata (Japon)

En avril 1956 dans le village de Minamata dans le sud du Japon, une fillette de six ans souffre de symptômes de paralysie cérébrale dû à une maladie inconnue et le mois suivant ce sont huit autres personnes qui présentent les mêmes symptômes dans la région, ce qui alerte d'une possible épidémie ; **un diagnostic est lancé.**

La fin de la même année est signalée la présence d'un métal lourd dans les produits de la pêche qui serait probablement responsable de la maladie inconnue que l'on attribue à un empoisonnement. **Une mise en garde** contre les dangers de la consommation des produits de pêche de la baie de Minamata est émise.

Quatre années plus tard, les cas de malades affectés de paralysies cérébrales chez les enfants nés dans la région se multiplient et l'on identifie la responsabilité du mercure dans cet empoisonnement, sans que toutefois la source de la pollution ne soit détectée (mais les effluents industriels sont suspectés) ; **l'activité de pêche dans cette région est interdite.**

En 1960, on identifie le méthylmercure comme l'agent coupable de l'empoisonnement de Minamata, capable de se concentrer dans les réseaux trophiques. On retrouve ce produit dans les mollusques aquatiques, les poissons, dans les sédiments et dans les boues de déchets d'une usine de production d'acétaldéhyde, rejetés sous forme d'effluents. En 1960, **l'usine met en place un traitement** de l'effluent mercuriel et plus aucun phénomène d'empoisonnement n'a eu lieu.

La contamination au mercure du village de Minamata est l'exemple de pollution chimique parmi les plus graves de la planète qui a conduit à la mort de 48 habitants du village de Minamata, mais des cas similaires se reproduisent à plusieurs endroits du Japon, Suède, Canada, Etats-Unis avec des symptômes d'empoisonnements sur l'Homme, sur des chats, chiens, oiseaux et mammifères. En 1967, l'OCDE lance une alerte mondiale sur les causes, risques, conséquences et émet des recommandations pour lutter contre les pollutions mercurielles.

Au début du XXI^{ème} siècle, on évalue le nombre de victimes directes et indirectes à la pollution au mercure de Minamata à plus de 2 265 (dont 1 790 mortes) (universalis-edu.com)

Source : OCDE, 1974

❖ Modification du cycle de l'eau par la société

Les questions soulevées par l'eau sont des problématiques transversales qui touchent de nombreux aspects du bien-être et de la gestion des territoires. Les Hommes ont appris au fil du temps à domestiquer cette ressource et à détourner son fil pour l'apporter aux populations qui en avaient besoin, à construire des réseaux d'assainissement et des stations d'épuration pour réinjecter les eaux usées traitées dans l'environnement. Cependant, le fait d'amener l'eau à l'Homme, notamment au début du XX^{ème} siècle avec la construction de nombreux barrages à travers le monde, bouleversa complètement les rapports entre les Hommes et la ressource et a conduit à des modifications majeures du cycle de l'eau, qu'il serait possible de renommer "**le cycle domestiqué de l'eau**". Par ailleurs, depuis, la construction de barrages a conduit à l'augmentation importante du nombre de plans d'eau dans le monde (Vörösmarty et al. 2004). L'eau douce ne représente que 2.5% de la quantité d'eau présente sur terre et la plupart de cette eau est très difficilement exploitable, la majorité des stocks se situant dans les glaciers et calottes polaires ou profondément enfouie dans le sol (Shiklomanov and Rodda 2003). Les lacs représentent alors une quantité d'eau douce facilement exploitable et renouvelable (contrairement à l'eau des aquifères profonds), c'est pourquoi ils constituent l'essentiel des ressources en eau utilisées, dont seulement 10% est utilisée pour l'eau potable (l'agriculture et l'industrie sont les deux premiers secteurs d'activité consommateurs d'eau dans le monde - Olivaux 2007). Un dépassement de la demande en eau douce par rapport à l'offre est à prévoir à partir de 2030 (Olivaux 2007) du fait du développement démographique, de l'agriculture, couplé au réchauffement climatique, si bien que les activités humaines seront de plus en plus dépendant des ressources en eau douces contenues dans les lacs et réservoirs. A ce titre, les grands lacs sont associés à de forts enjeux de la protection de la ressource en eau car les 21 très grands lacs fournissent 68% de l'eau douce disponible (Sterner et al. 2020).

Deux cycles de l'eau sont généralement différenciés : le « **grand cycle de l'eau** » et le « **petit cycle de l'eau** ». Le premier correspond au cycle planétaire dit « *naturel* » de l'eau, impliquant les continents et océans, bien que l'on sait aujourd'hui qu'il est largement modifié par l'activité humaine à chacune de ses grandes étapes (Abbott et al. 2019). Le petit cycle de l'eau correspond à son utilisation pour les usages domestiques, il se découpe en 3 phases (Olivaux 2007) : 1/ la potabilisation de l'eau prélevée dans les milieux naturels, 2/ son acheminement jusqu'aux consommateurs, 3/ la collecte des eaux usées et son assainissement avant d'être restituées dans le milieu naturel. La gestion du petit cycle ne s'intéresse qu'aux questions de disponibilité et qualité de la ressource en eau.

❖ Les grands lacs alpins sous pression

Depuis le début du XX^{ème} siècle, période à partir de laquelle les flux transférés aux lacs depuis leurs BV se sont accrus et diversifiés sous l'effet du développement urbain (infrastructures, urbanisme, démographie), agricole (intensification agricole) et industriel (intensification, diversification, construction de zones industrielles), divers **processus de dégradation des écosystèmes lacustres se sont succédés et généralisés** (Vörösmarty et al. 2004). Artificialisation des berges, transferts massifs de nutriments et contaminants des BV aux lacs, pressions accrues sur les ressources halieutiques, sur-fréquentation des lacs, destructions d'habitats naturels, dérangement de la faune, etc. sont autant de perturbations dont souffrent ou ont souffert les grands lacs alpins étudiés. Une telle évolution est observée sur toute la planète (Vitousek et al. 1997, Chapin et al. 2010) et se traduit par des baisses de qualité des eaux et des milieux, associées à des pertes de ressources ou des difficultés d'usages qui, plus

ou moins rapidement, provoquent des réponses techniques (en terme de gestion) visant à maîtriser les impacts (ex : soutien des populations de poissons) et/ou les causes (lutte contre les rejets de polluants) (Anneville and Pelletier 2000, Jacquet et al. 2012).

En réponse aux évolutions du MOS dans le BV, un ensemble de pollutions apportées principalement par les affluents et par des rejets directs aux lacs se sont succédées en 60 ans (Figure 1-6). Dans l'ordre d'occurrence pour les grands lacs alpins : (1) **contamination microbienne**, (2) **eutrophisation**, (3) **métaux lourds** (pour le Léman), (4) **pesticides et PCB**, (5) **résidus de médicaments, micro-plastiques** (les lacs d'Annecy et du Bourget sont préservés de cette pollution) et (6) le **réchauffement climatique** qui inquiète de plus en plus les gestionnaires des lacs.

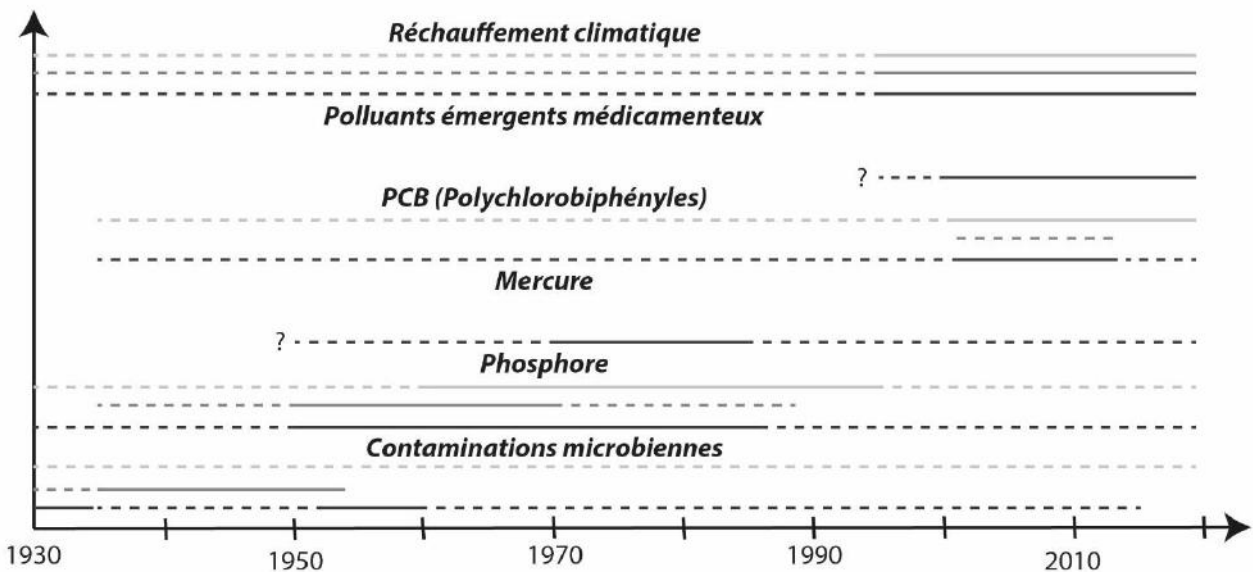
Le Léman est soumis à la plus grande variabilité de pressions des trois terrains d'étude. Toutes les principales pressions qui affectent les grands lacs depuis le début de l'anthropocène (eutrophisation, métaux lourds, micropolluants, réchauffement climatique), ont généré des impacts sur les usages des lacs. Certaines de ces pressions sont « invisibles » et décelables uniquement par des diagnostics spécifiques. C'est le cas des micropolluants comme les PCB, qui peuvent engendrer des risques élevés pour la santé humaine mais dont les effets ne sont pas observables visuellement, d'où une perception contrastée entre scientifiques, gestionnaires qui réalisent et connaissent les diagnostics d'état des lacs et certains usagers, qui éprouvent des difficultés à prendre conscience d'une pollution qu'ils ne voient pas (Lestel et al. 2017).

Le lac d'Annecy est le plus préservé des trois. La société a su identifier les pollutions dès les premiers signes et les acteurs scientifique, politique, usagers se sont mobilisés rapidement, autour de messages sur l'importance du lac et de la nécessité de le préserver, ainsi qu'à mettre en place des actions de lutte efficace contre les pollutions. Il en résulte que ce lac est un exemple localement et nationalement en matière de protection de la qualité des eaux des plans d'eau (Servettaz 1977, Barroin 1990).

Sur le **lac du Bourget**, les actions de lutte contre les pollutions ont été mise en place plus tardivement, faute d'alertes précoces des pollutions. Aujourd'hui encore, des atteintes aux usages du lac peuvent survenir, héritées des pollutions passées (désoxygénation benthique, prolifération de cyanobactéries toxiques). C'est un lac qui est impacté par les pollutions aux PCB (un autre héritage), avec des restrictions de pêche qui perdurent depuis le début des années 2000.

Chacun de ces lacs ont connu dans les années 1970 - 80 plusieurs épisodes simultanés de pollutions et de nombreuses actions ont été menées pour "*restaurer*" les lacs. Néanmoins, des impacts ponctuels hérités des pressions passées subsistent aujourd'hui (Anneville and Pelletier 2000, Jacquet et al. 2005). Les chapitres 5 et 6 visent à analyser en profondeur les impacts des pollutions sur les lacs et sur le territoire lacustre associé.

Trajectoires des perturbations des grands lacs : émergence, action, restauration



Les trois étapes de la prise en compte des perturbations :

1 - Emergence, 2- action de lutte, 3- restauration

1 - - - - 2 - - - - 3 - - - - Lac du Bourget

1 - - - - 2 - - - - 3 - - - - Lac d'Annecy

1 - - - - 2 - - - - 3 - - - - Le Léman

D'après Servettaz, 1991 ; Lestel & Meybeck, 2017 ; ateliers experts

Réalisé par : Yoann Baulaz, INRA, CNRS, USMB, 2019

Figure 1-6 : Trajectoires de prise en compte des perturbations des grands lacs alpins, depuis leur émergence, l'alerte et mise en place d'actions, puis la restauration

1.3.3 Les trajectoires de réponse aux pollutions : la gestion de l'eau et des lacs

L'anthropocène et son lot de menaces est aussi une ère de prise de conscience des impacts de l'Homme sur la nature, de changements profonds de nos rapports aux milieux naturels où s'affrontent la recherche de croissance économique à la nécessaire atténuation des perturbations qu'elle provoque. Cette période voit l'apparition de la **protection de la nature organisée et conduite par les gouvernements**, des innovations techniques majeures dans le champ du diagnostic des contaminants, la lutte contre les pollutions, dans l'assainissement urbain, la collecte de ressources naturelles, la recherche scientifique en environnement. En conséquence, la conservation de l'environnement et la protection de la biodiversité et des ressources naturelles sont également des **marques importantes de l'anthropocène**.

Cette dernière partie de chapitre explore les trajectoires sociétales de prise en compte des problèmes de pollution à l'échelle nationale et questionne la question de la gestion des lacs et des outils réglementaires existants pour le faire.

❖ Les trajectoires sociales de réponse aux pollutions

Dans le cadre de l'étude de l'évolution du système grand lac – BV – société, nous aurons besoin de nous référer à des cadres d'analyse pour comprendre la succession des étapes de prise en compte et d'action des problématiques de pollutions. En effet, face à une perturbation, différentes phases de réponse sociétale se succèdent : elles sont liées aux niveaux de

connaissance sur le phénomène de pollution et sur la prise de conscience de la problématique par les populations locales et parties prenantes de la gestion. Lestel et al. (2017) définissent les différentes étapes de cette construction :

1. La pollution n'est **pas perçue** par la société : le phénomène se manifeste par des **symptômes précoces non visibles**, à moins de disposer de suivis réguliers et de moyens techniques pouvant identifier le phénomène. Aucune action de gestion ne peut être mise en place pour prévenir des impacts de la pollution.
2. **Le problème est identifié** par une alerte scientifique (le phénomène est observé ou mesuré scientifiquement) ou profane (des effets visibles de la pollution sur le lac et ses usages sont identifiés). A ce stade, plus l'alerte est précoce, plus l'action sera rapidement mise en place.
3. **Un diagnostic scientifique des causes, impacts et remèdes est organisé.**
4. Vient ensuite le moment de la **prise de conscience sociétale du phénomène de pollution**. Sans prise de conscience, l'action ne peut pas être engagée.
5. Des **effets retards** dans l'action sont fréquemment causés par un manque de prise de conscience partagée du problème ou un manque de connaissance. D'autres effets retards dans l'action peuvent surgir, liés à la résilience de l'écosystème, à des retards dans la prise de décision (retards politiques, financiers, techniques, de diagnostics)
6. **La mise en place des actions de réponse** et de lutte contre les problèmes de pollution.

Ces étapes de la trajectoire de réponse sociétale sont à prendre en compte dans la planification de la lutte contre les pollutions.

Il convient également de noter que dans le domaine de la conservation, beaucoup d'efforts sont engagés pour tenter de « *conserver l'ancien* » et obtenir un nouvel état écosystémique identique à l'époque précédent la perturbation. Cependant, l'obtention d'une « *restauration complète* » d'un écosystème est vaine : chaque perturbation induit des changements dans un écosystème qui le font évoluer vers un nouvel état, et il est nécessaire de concentrer la gestion sur le maintien des caractéristiques fondamentales au fonctionnement du système, plutôt que sur la seule protection des ressources. Cela revient à mobiliser des efforts pour conserver les fonctions écosystémiques des lacs : leur structure caractéristique (physique et trophique, sociale et institutionnelle), les interconnexions entre écosystème et société et dans une large mesure, ce qui sous-tend la résilience du territoire lacustre (Moss 2008).

A partir des différentes étapes de prise en compte des problèmes de pollution, Lestel et al. (2017) définissent trois types de trajectoires sociales « *perception – action* » des phénomènes de pollution à partir de l'histoire des pollutions dans les fleuves (Figure 1-7 – les niveaux de perception figurent en abscisse et les niveaux d'action en ordonnée) :

1. **Les trajectoires d'alerte**, caractérisées par la mise en place de traitements précoces, parfois avant la mise en place du monitoring et suite à un diagnostic scientifique, un accident majeur et un consensus rapide. Cette trajectoire est représentative des problématiques de micropolluants et métaux lourds.
2. **Les trajectoires d'acceptation publique**, associées à un changement de vision de l'écosystème qui remet en cause les pratiques d'aménagement ou d'usages passés. Les politiques de restauration des écosystèmes tentent alors de compenser a posteriori les effets provoqués il y a 50 ou 100 ans. Exemple : les PCB

3. **Les trajectoires d'indécision politique**, ou de décision par étape, marquée par une perception progressive du phénomène, dans laquelle on retrouve une succession de retards associés à des étapes successives de prises de conscience et de connaissance du phénomène, des problèmes techniques, politiques ou financiers. Il s'agit de la trajectoire typique des problématiques d'eutrophisation.

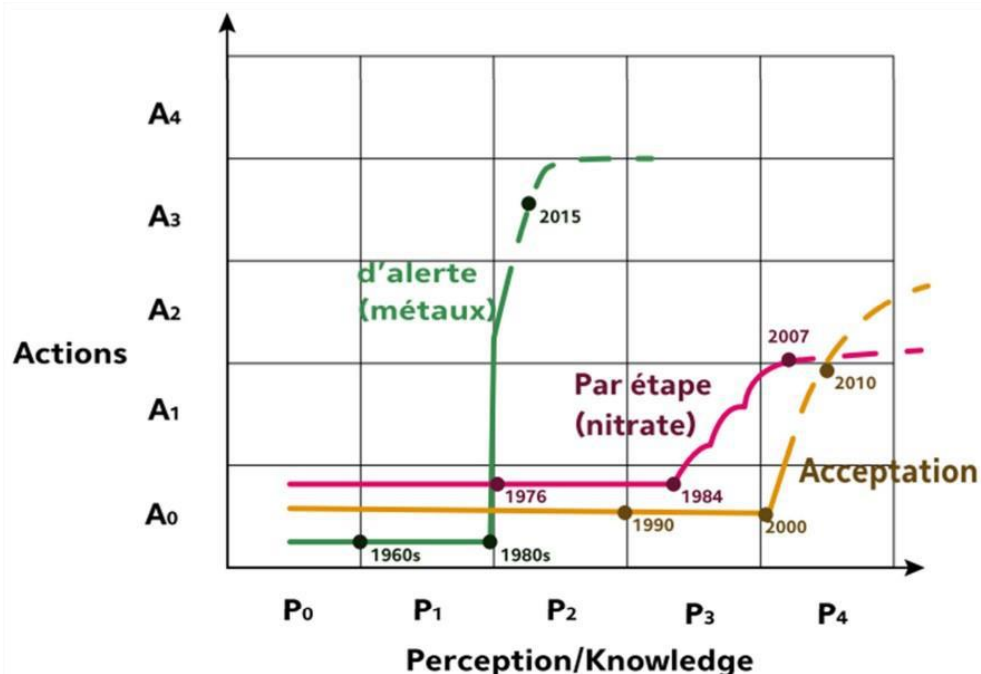


Figure 1-7 : Représentation des trajectoires « perception/action » face à différents problèmes environnementaux. A0 à A4 : formes d'actions de gestion, P0 à P4, niveaux de perception et de connaissance des problèmes (Lestel et al. 2017)

Ces différents éléments nous montrent que la construction des réponses face aux pollutions se fait généralement par étapes et qu'elle est plus ou moins soumise à différentes formes de retards. Dans le chapitre 6 de cette étude, nous reprendrons les apports de Lestel et al. (2017) pour les appliquer aux cas des grands lacs alpins et comprendre comment ce sont construites les actions de gestion sur nos terrains d'étude.

- ❖ Evolution de la vision et protection de la qualité de l'eau en France et dans le monde

Les modalités de gestion de l'eau évoluent. Ces évolutions sont les conséquences des changements sociétaux, la diversification des usages de l'eau et la nécessaire prise en compte progressive de la protection des milieux aquatiques. Historiquement, l'eau est principalement gérée de manière communautaire autour des principaux usages que sont l'irrigation, la navigation, l'énergie mécanique et l'alimentation en eau potable. L'eau a d'abord été gérée en tant que ressource et de manière très sectorielle. La prise en compte de la préservation des milieux aquatiques et la coordination des différents usages de l'eau apparaissent tardivement. La prise en compte des lacs, en tant que milieux biophysiques spécifiques est récente et encore peu présente, essentiellement au niveau de la Directive Cadre sur l'eau (DCE), mais qui reste à ce titre critiquable (Bartout and Touchart 2017).

Ce paragraphe présente donc l'évolution de la prise en compte des problématiques de pollution des qualités de l'eau et des milieux de manière générale dans la réglementation sur

l'eau. Ces informations seront utiles pour cadrer les analyses autour des questions d'assainissement et d'approvisionnement en eau potable.

Au XIX^{ème} siècle apparaît l'usage **hydroélectrique** qui va profondément transformer le paysage de l'eau : d'abord essentiellement produite « *au fil de l'eau* » avec des petites centrales (l'invention de la turbine en 1827 en France permet l'apparition de « *la petite hydraulique* », des centrales de production électrique inférieure à 10 MW), peu à peu remplacées à partir des années 1930 par les retenues d'eau, grosses turbines, barrages (« *la grande hydraulique* », production > 10 MW) et conduites pour acheminer l'eau de l'amont vers l'aval, endiguement des fleuves et cours d'eau, etc. Les fleuves sont traités comme des objets de production énergétique (Brun 2009) et la gestion de l'eau repose essentiellement sur des questions de quantités et sur **une organisation sectorielle de la ressource**. A l'issue de la seconde guerre mondiale, le fleuve Rhône par exemple sera l'objet de nombreux investissements (avec 2% du plan Marshall attribué à la France investit dans les infrastructures hydrauliques sur le Rhône - Pflieger and Brethaut 2012) et deviendra un véritable outil de production hydroélectrique participant à l'objectif d'autonomie énergétique de la France (Bossuat 1986).

A partir des années 1970 s'observe une **diversification des usages de l'eau**, avec l'apparition de nouveaux usages liés à la construction de retenues d'eau (ex: usages touristiques, pêche...) et surtout le développement du nucléaire (Bréhaut and Pflieger 2017). La multifonctionnalité des ressources en eau entraîne une diversification des acteurs, l'apparition de nouveaux besoins et des pressions accrues (Bréhaut and Pflieger 2017). Chaque nouvel usage apporte des modalités d'exploitation, des temporalités d'usages nouvelles et en contrepartie réduit la capacité d'usage des autres utilisateurs (partage de l'eau entre un nombre plus élevés de bénéficiaires ; risques de dégradation accrues de la ressource). Par exemple, la production de la grande hydroélectricité nécessite un stockage de l'eau avec la construction d'infrastructures qui mettent en péril la continuité écologique des cours d'eau, si importante pour la biodiversité aquatique, la reproduction des poissons migrateurs et les activités de pêche (ONEMA 2013). L'eau est donc indispensable et difficilement substituable, ce qui impose un partage de la ressource entre utilisateurs au travers de la réglementation. En conséquence, on observe une **complexification de la gestion de l'eau** et une **remise en cause de son organisation sectorielle** : « *comment et à quelle échelle gérer durablement un stock d'eau utilisé par un nombre important d'acteurs, qui répondent à des besoins de quantité, qualité, débits, propriétés de la ressource, etc. différents et parfois contradictoires ?* »

Pour répondre à ce dilemme, la loi de 1964 (Loi n°64-1245) relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution crée les **agences financières et comités de bassin, le système des redevances** et introduit le principe de « **pollueur-payeur** » qui vont profondément transformer la gouvernance de l'eau.

Cette loi introduit le bassin versant comme l'unité de gestion de l'eau en France. Six grands bassins hydrographiques sont délimités, possédant chacun un organisme consultatif, le comité de bassin et une agence financière (qui deviendront plus tard les agences de l'eau) dédiée à la gestion de l'eau et aux problèmes de qualité de l'eau (Richard and Rieu 2008 ; www.légifrance.gouv.fr). Cette loi inspirera les directives européennes sur l'eau et **le BV s'imposera également dans de nombreux pays** au cours du XX^{ème} siècle comme une échelle de gestion permettant de s'affranchir de la compartimentation sectorielle et permettant de réunir tous les acteurs-usagers d'un même stock disponible sur un bassin hydrographique.

Le périmètre du BV est intéressant à plusieurs titres : il peut être identifié en fonction de l'hydrographie et ne suit pas les frontières des pays ce qui permet de délimiter l'échelle de la gestion de l'eau entre deux Etats limitrophes et dépasser ainsi les cadres légaux qui encadrent la gestion de la ressource en eau (Bréhaut and Pflieger 2017). Cependant, deux critiques peuvent être avancées sur cette échelle : comme précisé plus haut, le BV ne constitue pas une échelle de gestion pertinente de certains usages de l'eau qui dépassent ce périmètre et dans les faits, on observe que les limites de la circonscription administrative du bassin s'étendent aux limites des communes qui composent le BV, et n'épousent donc pas exactement les frontières physiques du BV (Amigues and Chevassus-au-louis 2011)

En 1970, la gestion des services de l'eau est déléguée aux communes et peu à peu en France, la gestion de la ressource évolue d'une gestion centralisée, vers **une situation décentralisée**, où **sont inclus tous les acteurs de l'eau dans les processus de décision** (Notte 2013). Par ailleurs, le principe de pollueur-payeur implique que les frais de prévention, de réduction et de lutte contre les pollutions doivent être supportés par le pollueur (Article L110-1 du code de l'environnement). Cette loi marque le début de la reconnaissance de la dimension « **eau milieu** » à côté de celle « **eau ressource** » dans le droit français et amorce un virage des politiques de l'eau avec la **considération des impacts anthropiques sur les ressources aquatiques** (Richard and Rieu 2008).

Plusieurs lois, structures et règlements en faveur de la protection de l'environnement émergent à cette époque (Encadré 1-9).

A partir des années 1990 vont être instaurés dans le droit international de l'eau des outils légaux et principes de la **gestion durable** des eaux transfrontalières (Convention d'Helsinki de 1992²). A l'échelle européenne sont spécifiées des dispositions pour gérer les pollutions diffuses et ponctuelles (en 1991 la Directive Eaux Résiduaires Urbaines -DERU et la Directive Nitrates Agricoles - DNA). La première directive sera traduite dans le droit français dans la deuxième loi sur l'eau de 1992 (n°92-3) qui oblige les villes à collecter, épurer les eaux usées urbaines, industrielles et à éliminer les boues produites. Cette loi crée des outils pour planifier et programmer les actions : les **Schémas d'aménagement et de gestion des eaux** (SAGE) à l'échelle des sous-bassins versants et **Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux** (SDAGE) à l'échelle des six grandes unités hydrographiques délimitées lors de la loi de 1964. Ces documents fixent la réglementation en matière d'usages de l'eau et viennent concrétiser les mesures incitatives définies dans les contrats de rivières. Ensemble, ces outils priorisent et planifient les actions dans les BV, en cohérence avec les besoins des acteurs et les problématiques locales. Concernant les pollutions diffuses, plusieurs textes de loi, rédigés dans les années 1990, visent à retranscrire la DNA dans le droit français.

² Au niveau des lacs internationaux, la convention d'Helsinki de 1992 vise à cadrer et protéger l'utilisation des eaux transfrontalières du point de vue quantitatif et qualitatif par la mise en place d'outils légaux et d'instaurer des principes de gestion durable de la ressource, avec notamment l'obligation pour les Etats concernés de coopérer autour d'organismes interétatiques.

Encadré 1-9 : Evolution des mesures réglementaires qui interviennent dans la gestion des lacs (www.vie-publique.fr)

Mesures réglementaires générales de prise en compte de l'environnement dans l'aménagement du territoire :

- 1971 : création du Ministère de l'Environnement
- 1976 : loi sur la protection de la nature (loi n°76-629) qui reconnaît la protection des espaces naturels et espèces contre les causes de dégradation qui les menacent comme d'intérêt général
- 1983 : loi Defferre (n°83-8) de décentralisation, relative à la répartition de compétences entre les collectivités territoriales et l'Etat français qui permet à toutes les collectivités territoriales d'intervenir dans l'organisation des services d'eau et d'assainissement

Mesures réglementaires de protection des milieux face à l'urbanisation littorale :

- 1975 : création du Conservatoire du littoral, un établissement public dont la mission est d'acquérir des avoirs fonciers en zone côtière menacés de disparition par l'urbanisation, dégradés ou d'intérêt écologique et patrimonial important (zones humides littorales, dunes, roselières et autres habitats fragiles) pour en faire des sites restaurés, aménagés, accueillants dans le respect des équilibres naturels (Ramade 1993)
- 1986 : loi littoral qui vise à encadrer l'aménagement de la côte et limiter l'urbanisation du littoral et permettre le libre accès aux sentiers littoraux. Sont considérés par cette loi les communes littorales maritimes, ainsi qu'en bordure d'un plan d'eau de plus de 1 000 ha, ce qui est le cas des grands lacs alpins.

Mesures réglementaires spécifiques aux questions de qualité et quantité d'eau :

- 1980 : directive européenne 80/788 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine qui incite à la fixation de normes de qualité auxquelles doivent satisfaire les eaux destinées à la consommation humaine
- 1981 : création des contrats de rivière, un outil visant à rassembler tous les acteurs de l'eau sur un territoire hydrographique autour d'un programme d'actions réparties sur 5 ans portant sur la qualité des eaux, l'aménagement et la protection des berges, du lit des rivières, du milieu aquatique et du paysage. Ce dispositif incitatif est devenu un modèle de négociation territoriale, avec la moitié du territoire français couvert par ces contrats.

Les agences de l'eau deviennent alors un acteur global de la gestion de l'eau avec leur participation dans la coordination de la gestion des pollutions ponctuelles, mais également des pollutions diffuses³. A ces enjeux s'ajoute la prise en compte de la qualité écologique des eaux et des milieux naturels associés, amorcée par la loi sur l'eau de 1992 et renforcée par la loi Barnier de 1995 (cette loi n° 95 - 101, institue les principes généraux du droit de l'environnement et des dispositions relatives à la prévention des risques naturels) qui permettent une prise en compte de **l'importance des habitats naturels, des corridors écologiques et zones humides situés dans les BV**. La gestion de l'eau ne repose plus

³ la prise en compte des relations activités agricoles / ressources en eau pose également la question de la gestion des quantités d'eau au travers de l'irrigation.

uniquement sur des logiques de solidarité amont-aval autour de la ressource en eau ou la recherche de responsables « *pollueurs* » et de sanctions juridiques (les « *payeurs* ») mais intègre désormais les dynamiques entre écosystèmes au sein de cet espace géographique. Et ce faisant, la gestion de l'eau devient plus préventive et adaptée à des mesures de conservation de milieux encore en bon état, ce que certains auteurs résument par le passage du « *petit* » au « *grand* » cycle de l'eau. Cette évolution majeure consiste à prendre en compte le cycle naturel de l'eau à l'échelle d'un BV dans la gestion de l'approvisionnement en eau potable et assainissement de l'eau. Cela impose des défis techniques (compétences techniques d'ingénierie écologique, connaissances des écosystèmes et mise en place de diagnostics d'état des milieux naturels ; prise en compte du temps d'évolution des écosystèmes) et organisationnels profonds (définition d'espaces de gestion pertinents tant du point de vue écologique que socio-économique ; associer l'ensemble des acteurs, usagers et citoyens concernés par la problématique de l'eau à l'échelle d'un territoire) pour les acteurs de la gestion de l'eau en France (Amigues and Chevassus-au-louis 2011).

❖ La directive cadre sur l'eau et la prise en compte des plans d'eau

Peu à peu, le droit Européen se « *verdit* » et va devenir le fondement des législations nationales des Etats membres en matière de gestion de l'eau au travers de la **Directive Cadre Européenne (DCE)** (Clarimont 2009). La DCE est le résultat d'un processus de co-construction entre Etats membres de l'Union Européenne (UE), représentants de secteurs économiques et d'organisations non gouvernementales de protection de l'environnement qui vont chercher à produire un ensemble d'instruments opérationnels pour guider la gestion de l'eau des Etats (Assad 2014). On assiste alors à une évolution vers une **gestion globale de la ressource en eau par bassins hydrographiques**, avec l'apparition d'un acteur aujourd'hui incontournable : **l'Union Européenne (UE)**, ainsi qu'un ensemble d'organisations internationales.

La DCE, adoptée en octobre 2000 (transposée dans le droit français en 2004) va poser le cadre politique d'une gestion globale des eaux à l'échelle de toute l'UE, telle qu'elle est développée en France depuis la première loi sur l'eau dans les années 1960 (Notte 2013). Cette directive innovante vise à faire de **la ressource en eau un bien commun** et à intégrer les principes du développement durable (Barraqué 2011). Cela se traduit par trois principes majeurs : 1/ l'atteinte du **bon état écologique** de tous les milieux aquatiques en 15 ans, 2/ le **financement par les bénéficiaires** des coûts des politiques de l'eau, 3/ la **participation des usagers** à l'élaboration de la gestion de la ressource et des milieux aquatiques.

La nouvelle réglementation européenne soumet ainsi les Etats membres au respect de normes strictes et variées de qualité de l'eau, avec de nouvelles catégories d'indicateurs quantitatifs biologiques et d'éléments hydro-morphologiques qui complètent le suivi physico-chimique traditionnel. La directive s'accompagne également d'objectifs de réduction/suppression de rejets de substances dangereuses, d'une interdiction de dégradation supplémentaire des eaux de surface et eaux souterraines et du respect des objectifs de gestion des zones protégées déjà soumises aux règlements communautaires dans le domaine de l'eau. Dans le cadre de la DCE, un calendrier précis est imposé aux Etats membres dans l'atteinte de leurs objectifs de gestion durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques fixé à 2015 pour la première vérification de l'atteinte des objectifs et 2027 en tant que dernière échéance. Les politiques de gestion de l'eau de tous les pays européens vont se transformer avec cette directive car il s'agit de la première directive qui impose **des obligations de résultats sur des critères écologiques** (Richard and Rieu 2008, Clarimont 2009).

La DCE est le premier outil réglementaire qui invite à une organisation de la gestion de l'eau à l'échelle des « **masses d'eau** », qu'elle différencie uniquement en termes de « *cours d'eau* » et de « *plans d'eau* ». Cependant, dans les faits on se rend compte que les **spécificités des plans d'eau** sont difficilement prises en compte dans la gestion et que la gestion des masses d'eau (lacs, étangs, réservoirs ...) telles que définies par la DCE ne diffèrent guère de la gestion des cours d'eau (Bartout & Touchart, 2017).

En conséquence, les SDAGE seront révisés en 2005 pour appliquer les principes de la DCE, et un programme de surveillance de l'état des eaux est mis en place à partir de 2006 (Assad 2014). Plus tardivement en 2014 apparaît en France la loi GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondations) qui permet de clarifier les responsabilités des communes et intercommunalités en matière de gestion des eaux et protection contre les risques naturels liés aux inondations et intégrer ces enjeux dans l'aménagement du territoire et les documents d'urbanisme. Cette loi vient regrouper les attendus de la DCE, avec celles associées à la prévention des inondations pour les communes (Ferraton 2017).

A l'issue du bilan de 2015, on observe que la majorité des rivières et lacs à l'échelle européenne ont atteint le bon état écologique tel que défini par la DCE (53%), mais il reste encore beaucoup à faire pour maintenir ce bon état et progresser encore dans l'atteinte de cet objectif (IPBES 2018b).

L'eau est une ressource aux propriétés particulières complexe à gérer à l'échelle d'un territoire. Les chroniques de la politique de l'eau en France et dans l'UE qui viennent d'être exposées montrent une véritable **compétition entre les différentes territorialités et modalités de gestion de la ressource**. Cette histoire montre que l'échelle du territoire de gestion de l'eau, au départ très locale, communautaire, s'est élargie à une échelle régionale, des bassins hydrographiques, puis nationale et internationale en réponse à la **multifonctionnalité grandissante** de la ressource au fil du temps et de l'émergence de nouveaux enjeux. Ces changements d'échelles ne réduisent pas les conflits autour de la ressource, exacerbés par une multifonctionnalité de la ressource, qui ne diminue au final jamais, mais aussi par des pressions globales qui épuisent les stocks d'eau brute disponible. Les enjeux autour de la ressource en sont devenus innombrables et l'on remarque que leur prise en compte a évolué en réponse aux diagnostics scientifiques de l'état des milieux et de l'évolutions des problématiques.

On peut interpréter les évolutions réglementaires autour de la gestion des pollutions de l'eau de la manière suivante : les acteurs de l'eau ont cherché au début du XXème siècle à contrôler les **nuisances des pollutions** (principe de pollueur-payeur), puis les causes de **pollutions ponctuelles** et plus tard celles des **pollutions diffuses** pour aujourd'hui se tourner vers une **vision globale et territoriale** des milieux écologiques avec l'intégration des principes de la gestion intégrée de la ressource en eau et des milieux (Encadré 1-10).

Malgré ces évolutions, on se rend compte que le fonctionnement propre des plans d'eau est difficilement pris en compte dans la réglementation sur l'eau, ce qui a poussé les grands lacs alpins à développer très tôt **leur propre gestion concertée de l'écosystème lacustre** et à développer un **monitoring de suivi écologique spécifique** à ces écosystèmes. Ces éléments seront abordés en détails dans les chapitres 5 et 6.

Encadré 1-10 : La gestion intégrée des ressources en eau et des milieux

D'après le Global water Program (2000), la gestion intégrée de la ressource en eau repose sur l'optimisation du bien-être économique et social et la conservation des écosystèmes au travers de la coordination entre le territoire et ses besoins. Cela impose que la ressource n'atteigne jamais un niveau de dégradation trop important pour ne pas désintéresser les usagers de sa protection. En effet, la dégradation de la ressource conduit à la perte des bénéfices qu'elle procure et à terme un désintérêt de la part des bénéficiaires à vouloir préserver cette ressource. La gestion intégrée nécessite ainsi des méthodes et indicateurs de suivi de l'état de la ressource, voire des services qu'elle nous rend, afin de prévenir d'une pollution ou surexploitation du stock disponible et fournir les arguments nécessaires à la protection éclairée et optimale des milieux. La durabilité de la ressource et l'assurance d'une quantité et d'une qualité de l'eau suffisante pour les générations à venir est un objectif de ce mode de gestion ; cela passe par une anticipation des problématiques futures de la ressource ainsi que de l'évolution du territoire. Enfin, la gestion intégrée des ressources en eau suppose de bien définir les limites du périmètre de gestion de la ressource, qui repose sur l'identification des zones sources critiques des pollutions, les entrées et sorties hydrographiques et la répartition des bénéficiaires et acteurs-usagers. Cette étape peut s'avérer difficile de par les propriétés d'infiltration de l'eau dans les sols ce qui suppose que le territoire de l'eau à gérer ne corresponde pas toujours aux limites visibles du bassin versant hydrographique. La DCE propose des outils pour répondre à ces enjeux et représente au niveau mondial l'une des formes juridiques les plus performantes de gestion intégrée des ressources en eau (Bréhaut & Pfiæper, 2017)

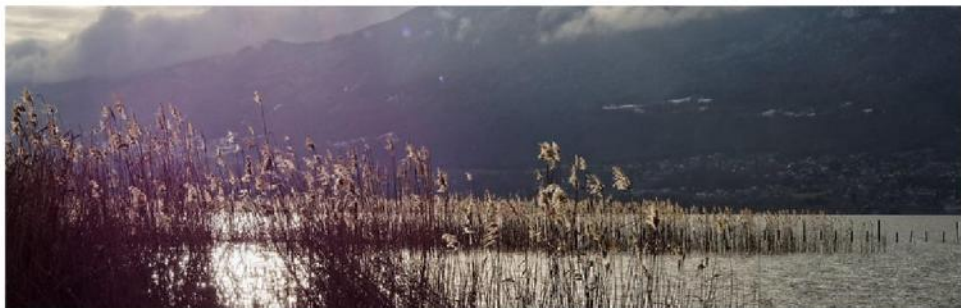
Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de définir les grands lacs comme des objets pluridisciplinaires, nécessitant une approche d'étude intégrée à l'échelle du système grand lac – BV – société. Ce chapitre a présenté les notions et concepts théoriques de la limnologie, de la géographie, de l'hydrologie, de la gestion qui seront mobilisées par la suite pour évoquer les processus qui associent les Hommes aux grands lacs.

Nous avons vu que l'écosystème lacustre en général, et les grands lacs en particulier, possèdent un fonctionnement global spécifique, structuré par les propriétés hydrologiques et hydrochimiques caractéristiques des masses d'eau à caractère stagnant, par les modalités de la productivité biologique en milieu aquatique et par sa relation avec son BV. Les diverses fonctions écosystémiques qui en résultent, participent à la production de bénéfices pour les sociétés riveraines et la mise en valeur du territoire lacustre. L'espace de gestion de ces écosystèmes s'opère à l'échelle du couple lac – BV ; elle est ainsi basée sur des composantes biophysiques et hydrologiques du mode d'occupation des sols, mais prend difficilement en compte les composantes sociétales du système grand lac – BV – société, notamment les usages des plans d'eau qui ne sont pas dépendant de la relation biophysique avec l'amont des lacs.

Tout cela questionne la géographie et suggère des développements conceptuels pour réfléchir à l'échelle de gestion des territoires lacustres permettant de prendre en compte les spécificités des écosystèmes, considérant notamment les multiples échelles spatiales relatives à chacun des usages des grands lacs. Le chapitre suivant présente les terrains d'étude choisis, et la suite de ce manuscrit teste la capacité des concepts de SE et de SSE à soutenir ces évolutions dans la gouvernance des grands lacs alpins.

Chapitre 2. Les grands lacs alpins : des objets qui font territoire



Les grands lacs alpins : Yvoire, au bord du Léman (haut), le lac d'Annecy en hiver (milieu) et le lac du Bourget (bas)

Notre site de référence est constitué par **trois systèmes grand lac - BV - société** situés dans la même écorégion alpine et appartenant à l'hydrosystème fluvial du Rhône : le Léman, les lacs d'Annecy et du Bourget. L'ensemble forme un espace géographique de taille régionale. Ces trois systèmes sont associés à de vastes espaces de concentration urbaine et touristique (Vernex 1998), sont insérés dans de larges pôles régionaux de peuplement et d'activités économiques, tous porteurs de la même grande dynamique de développement industriel et économique. Ils sont également associés à des enjeux forts de conservation de la biodiversité.

Comme d'autres grands lacs sur la planète, le Léman, les lacs d'Annecy et du Bourget ont connu à partir des années 1950 un développement territorial intense dont a résulté une altération de ces grands écosystèmes aquatiques sans précédents dans l'histoire (Vitousek et al. 1997, Chapin et al. 2010, Montuelle and Clémens 2015). Une telle évolution s'est traduite par des baisses de qualité des eaux et des milieux, associées à des pertes de ressources ou des difficultés d'usages qui, plus ou moins rapidement, ont provoqué la mise en place de réponses techniques (en termes de gestion et d'aménagement du territoire) visant à maîtriser les impacts (exemple : soutien des populations de poissons) et/ou les causes (lutte contre les rejets de polluants). Le cas exemplaire et structurant est celui de la lutte contre l'eutrophisation ; la principale différence entre ces trois lacs aujourd'hui est ainsi de **ne pas avoir atteint le même stade de restauration des qualités des eaux et des milieux** (Jacquet et al. 2012). Cette situation nous invite à la comparaison entre ces trois systèmes pour comprendre les différences dans les trajectoires d'évolution des relations sociétés-grands lacs en réponse aux problématiques de pollutions.

Ce second chapitre est dédié à la **présentation de ces trois terrains d'étude**. Nous allons dresser le portrait de ces systèmes « grand lac alpin – BV – société » en faisant référence aux multiples dimensions, à la fois biophysiques et territoriales, c'est-à-dire socio-économique, spatiale, temporelle, symbolique et en termes d'enjeux et de gouvernance. Du fait de leur forte influence socio-économique locale et culturelle, de leur histoire récente, des investissements sociétaux engagés en vue de leur conservation, nous verrons en quoi les grands lacs alpins sont des objets structurants des territoires lacustres, en d'autres termes : en quoi ces lacs sont des objets qui font territoire et en quoi ils possèdent chacun une identité propre. Ce chapitre servira de cadrage aux analyses de l'évolution des relations grands lacs – BV – société en réponse aux problèmes de pollution qui seront réalisées aux chapitres 5 et 6 et permettra de montrer en quoi ces grands lacs sont des modèles d'étude des territoires lacustres adaptés aux objectifs de notre recherche.

Le besoin de généraliser les observations menées sur les grands lacs alpins à des systèmes très différents mais montrant, malgré cela, des dynamiques équivalentes nous emmènera, dans le chapitre 6, sur les rives **du lac Saint-Pierre** au Québec (Canada). Une présentation géographique succincte de ce grand lac est proposée à la fin de ce chapitre, accompagné d'un ensemble cartographique en Annexes 2-3.

2.1 Les trois grands lacs alpins observés à différentes échelles

2.1.1 Des lacs alpins carrefours de flux biophysiques, démographiques et socio-économiques et pôles de développement ...

❖ Origine des grands lacs alpins

La morphologie des grands lacs alpins a évolué au cours de l'histoire géologique. D'origine glaciaire, ces grands lacs se sont formés entre – 140 000 ans et – 25 000 ans, lors de la fonte des glaciers du Riss et du Würm, à l'issue des deux dernières glaciations. Les lacs étaient alors bien plus étendus et volumineux qu'aujourd'hui, le lac du Bourget était le plus imposant des trois ; des signes montrent qu'il s'étendait sur plus de 1 000 km² il y a 140 000 ans, jusque dans la plaine grenobloise au sud (Monjuvent and Nicoud 2014) ; le lac Léman s'étendait à plus de 5 km à l'aval de Genève en – 32 000 ans avant JC ; le lac d'Annecy était alimenté par la rivière dans laquelle il se jette aujourd'hui : le Fier ; sa superficie estimée atteignait plus de 63 km² (contre 27 km² actuellement) il y a – 20 000 ans (Loizeau et al. 2015).

La forme des cuvettes lacustres a ainsi été creusée par le **passage des grands glaciers** qui descendaient des hauts massifs alpins, sur des chemins au préalable préparés par **la tectonique depuis la formation des Alpes** (Touchart 1993), puis sous l'effet de l'accumulation glaciaire et des dépôts sédimentaires des rivières et du fleuve Rhône à la fin de la dernière glaciation du Würm. En se rencontrant dans les vallées, ces glaciers ont donné naissance aux différentes sous-cuvettes lacustres du Léman et du lac d'Annecy (Loizeau et al. 2015).

L'histoire géologique et hydrologique de ces lacs ne s'arrête pas là. Comme tous les écosystèmes lacustres, les grands lacs alpins se comblent peu à peu de sédiments et dans un avenir estimé à plus de 65 000 ans, les grands lacs alpins vont « *vieillir puis mourir* », jusqu'à ne former plus que d'immenses plaines alluviales (Touchart 1993).

❖ Positionnement géographique

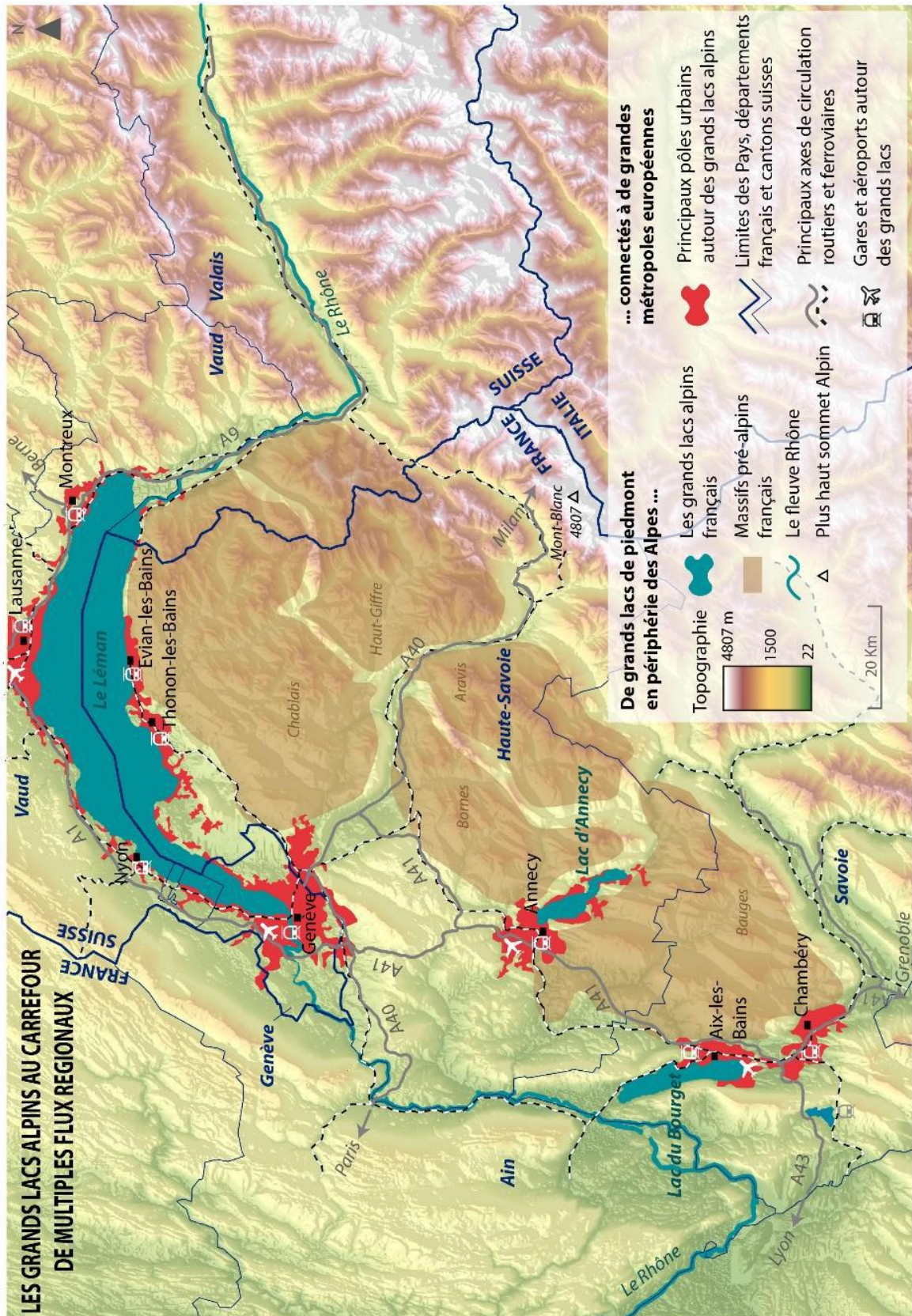


Figure 2-1 Carte de situation des grands lacs alpins

D'un point de vue géographique (Figure 2-1), ces grands lacs se situent dans la partie occidentale de **l'Europe**, en périphérie septentrionale de la **chaîne alpine**, le Léman étant le plus au nord des trois, séparé d'une distance d'environ 75 km du lac d'Annecy, lui-même d'environ 30 km du lac du Bourget situé le plus au sud. Ces plans d'eau sont enclavés entre plusieurs massifs préalpins et la partie méridionale du Jura : entre les massifs sédimentaires (calcaire, marno-calcaire et marnes) de la Chartreuse, du massif des Bauges à l'Est et du Jura à l'ouest pour le lac du Bourget ; entre les Bauges au sud, sud-ouest et les Bornes au nord, nord-est et un plateau morainique au nord-ouest pour le lac d'Annecy ; et entre le massif préalpin du Chablais au sud, la chaîne jurassienne suisse au nord et les Préalpes valaisannes et bernoises à l'est pour ce qui est du Léman.

De par les fortes précipitations que subissent les montagnes environnantes des Alpes et du Jura, les grands lacs alpins font partie du principal "*château d'eau*" de la France (Berthemond et al, 1974). Le **régime hydrologique** de montagne se caractérise par des régimes glaciaires à maximum d'été en haute montagne et différents types de régimes nivaux-pluviaux à maximum au printemps en moyenne montagne, avec le fleuve Rhône comme collecteur principal de la région. Les cuvettes lacustres sont orientées est, sud-ouest en forme de croissant pour le Léman et sud-est, nord-ouest pour les deux autres lacs. Tous trois appartiennent au **système fluvial du Rhône**, prenant sa source dans le glacier qui porte son nom à une altitude de 2 209 m, à l'extrémité orientale du Valais suisse dans le massif du Saint-Gothard. Les eaux du fleuve se mélangent dans le Léman. L'exutoire des eaux du lac d'Annecy est constitué par la rivière du Thiou qui s'écoule au cœur de la ville d'Annecy, puis rejoint le Fier qui se jette dans le Rhône. Le lac du Bourget est lié au fleuve par le canal de Savière au nord du lac. Le Rhône s'éloigne ensuite des massifs alpins en direction de Lyon, puis coule au sud jusqu'à la mer Méditerranée. Chacun de ces lacs entretient une relation hydrologique différente avec le Rhône, à savoir que 17% de l'eau du Rhône à l'amont du lac du Bourget provient du bassin lémanique et qu'en période de crue, ces lacs assurent temporairement un effet d'écrêtement du niveau de l'eau par le stockage des flux hydriques drainés depuis les BV. A l'inverse, en période d'étiage, ces lacs peuvent soutenir le débit du Rhône (Loizeau et al. 2015).

❖ Climatologie et écorégion

Les trois grands lacs alpins sont situés **dans une même écorégion** et font partie de l'ensemble montagneux des Alpes du Nord dont le climat est largement influencé par la morphologie (orientation des vallées, exposition des versants aux vents dominants, ensoleillement) mais également par les lacs eux-mêmes (Benedetti-Crouzet 1972).

Ces grands lacs sont sous l'influence des trois systèmes climatiques qui régissent le climat en Europe occidentale : le régime atlantique, caractérisé par des vents de sud-ouest qui apportent l'essentiel des pluies, le régime continental qui provoque des hivers froids et secs et des étés lourds et orageux, enfin le régime méditerranéen qui engendre des hivers doux et pluvieux et des étés secs et brûlants (Plan paysage, 2000). Autour de ces trois lacs, **le climat est ainsi de type montagnard et de marges montagnardes** (Joly and Langrognet 2016), avec une grande diversité résultant de l'élévation progressive du relief sur les versants, de l'exposition des versants au soleil, des vents dominants et de la pluviométrie ; ce qui favorise le phénomène de l'étagement bioclimatique et morphologique qui modifie la composition en espèces végétales sur les moyennes montagnes autour des lacs (Varaschin et al. 2014).

Localement, sur les versants abrités des vents peuvent se rencontrer des microclimats en moyenne plus chauds, favorables à l'implantation d'une végétation typiquement méditerranéenne, notamment autour du Bourget (thermophile et xérophile) (Boy 2011). Les lacs sont également sous l'influence de différents vents qui s'engouffrent dans les vallées alpines et convergeant vers les masses d'eau, faisant frémir et agiter le plan d'eau avec des vagues qui viennent déferler sur les rivages pouvant être supérieures à 1 m (Delorme et al. 2000).

En retour, les grands lacs alpins, et tout particulièrement le Léman, parfois considéré comme une véritable « *mer intérieure* », jouent le rôle de grands régulateurs venant **modérer localement le climat** (Touchart 1993). Les lacs vont emmagasiner la chaleur en été et lentement la restituer en hiver ; venant réchauffer les espaces situés autour sur une distance d'environ 2 km en hiver (pour le Léman ; manque de données quantifiées sur les deux autres lacs), avec une hausse d'environ 1°C par rapport à la moyenne ; le phénomène inverse se produit en période estivale, ce qui permet de profiter d'un climat plus frais de 1°C autour des lacs (Blavoux et al. 1962). Cet effet, en atténuant les extrêmes de température, génère un effet tampon sur le climat, le rendant légèrement plus agréable sur les abords des lacs. Ce phénomène entraîne également la formation de vents et de brises qui tantôt se dirigent vers les terres, notamment en fin de journée, tantôt vers les lacs ; des brouillards parfois épais se forment aussi et apportent une atmosphère qui peut sembler « *inquiétante et mystérieuse* », ne laissant passer que quelques rayons du soleil dans les vallées sur les littoraux lacustres en hiver ; ou encore de légères brumes au-dessus de l'eau peuvent se former le matin, donnant l'impression de « *masses d'eau fumantes* ». Enfin, l'évaporation des lacs peut participer à la formation de cumulus imposants et nuages moutonneux impressionnants dans le ciel (Delorme et al. 2000). Ces effets sont profitables à certaines activités, notamment récréatives et pourraient jouer un rôle accru dans le cadre des évolutions climatiques attendues.

Le paysage des montagnes des Alpes évolue au gré des saisons, générant des coteaux verdoyants forestiers sur les abords des lacs en été, qui se recouvrent de neige en hiver. Aussi, le climat agit sur l'hydrologie des lacs, et le ciel qui se réverbère dans les lacs en modifie les couleurs. L'ensemble de ces effets dynamiques entre saisons participe fortement à la perception des paysages et aux valeurs esthétiques associées aux grands lacs alpins.

❖ Des lacs de piedmont : la « mer à la montagne »

Bien que dénommés dans ce travail grands lacs « *alpins* », ils n'en restent pas moins des **lacs de piedmont** et ne peuvent pas être définis comme des lacs de montagne d'un point de vue géologique.

Le relief, l'altitude et le volume montagneux sont les caractéristiques qui définissent la montagne, avec notamment la limite de 2 000 m d'altitude séparant la moyenne montagne de la haute montagne (Chardon 1984). Sur le plan écologique, les montagnes renferment des écosystèmes très particuliers du fait des caractéristiques climatiques et pédologiques qui les différencient des écosystèmes de plaine situés aux mêmes latitudes (Ramade 1993). Cette unité géographique est par ailleurs associée à un phénomène d'étagement bioclimatique et morphologique dont la limite inférieure de l'étage montagnard se situe entre 900 m et 1 100 m d'altitude, soit bien au-dessus de l'altitude du lac d'Annecy (le plus élevé des trois) à 447 m. Les lacs de montagne sont par ailleurs caractérisés par un fonctionnement spécifique marqué

notamment par une surface couverte de glace une partie importante de l'année. Malgré cela, certains sommets visibles depuis les berges des lacs dépassent l'altitude de 2 000 m ; il est ainsi possible de considérer les pourtours de ces trois grands lacs et une grande partie de leur BV comme appartenant au milieu de **la moyenne montagne**, voire de haute montagne pour le haut BV du Léman.

Le positionnement géographique de ces grands lacs logés dans les dépressions des massifs préalpins leur confère des propriétés paysagères marquées par la présence d'un plan d'eau au cœur d'une vallée ceinturée par des moyennes montagnes, que Forel désigne sous l'appellation de "*murailles de la vallée*" des lacs (Forel 1892 p. 161). Cette spécificité forme des contrastes de reliefs et une **mosaïque paysagère** qui participent aujourd'hui au cadre de vie et au développement touristique, et attirent également depuis longtemps les poètes, peintres et autres artistes (Vernex 1998). Ces paysages participent à l'attraction de ces lacs pour le tourisme, bien qu'essentiellement orienté vers les loisirs nautiques. En retour, cette configuration du paysage impose une concentration urbaine et touristique entre le littoral des lacs et les reliefs des massifs préalpin et jurassien.

Les grands lacs alpins peuvent ainsi être considérés comme **des lacs de piedmont** du fait qu'ils sont à la fois situés dans un espace de plaine au pied des montagnes et moyennes montagnes, et qu'ils entretiennent des rapports géographiques (climat, paysage) avec celles-ci (Brunet et al. 1992).

❖ Economie et développement

Le piedmont est un espace hybride, qui bénéficie des atouts de la montagne en termes de ressources (sites miniers, forêts et pâtures, ressources en eau, espaces enneigés et éventuellement ressource en main d'œuvre l'hiver), et également un avantage pour la montagne qui peut bénéficier de l'agriculture des plaines et des services offerts par les villes (Brunet et al. 1992). Les espaces de piedmont sont marqués par **des mouvements migratoires saisonniers** entre les plaines et les montagnes, avec régulièrement une ligne de villes-bourgs qui se développe au contact de ces deux espaces (Brunet et al. 1992). Les grands lacs favorisent ce phénomène **en organisant l'étalement urbain sur leur pourtour et le repoussant vers les piedmonts**. Aussi, ils favorisent les flux migratoires saisonniers en générant une complémentarité entre les espaces touristiques montagnards et lacustres, avec en hiver un intérêt tourné vers les montagnes et les stations de sports d'hiver et en été vers les lacs et les activités aquatiques, de détente et de plage.

Par ailleurs, les grands lacs alpins sont insérés dans **de larges pôles régionaux de peuplement et d'activités économiques**, tous porteurs de la même grande dynamique de développement industriel et de services (Figure 2-1). Ils font partie de la région Auvergne Rhône-Alpes, dans les départements de la Savoie (pour le lac du Bourget) et de la Haute-Savoie, le Léman jouant le rôle de frontière naturelle entre la France et trois cantons romands de la Suisse : les états de Genève, de Vaud et du Valais. Cette région frontalière avec la Suisse, la France et l'Italie a été façonnée par la politique, les marchandises et transports et les hommes (Varaschin et al. 2014). La ville de Genève dont le rayonnement économique, politique et culturel s'étend jusqu'en Savoie (Varaschin et al. 2014) est le siège de nombreuses organisations internationales. L'ensemble de ces influences participent à disséminer la réputation des grands lacs au-delà des frontières nationales de la France ou de la Suisse.

Les grands lacs alpins se situent dans une région française¹ placée en deuxième position au niveau de l'économie française (PIB de 30 998 € par habitant), du tourisme (11.7% de la richesse nationale liée au tourisme) et de la démographie (12% de la population totale française) (INSEE 2013, 2018). Aussi, Cristofini et Roybin (1989) dans une étude du développement de la région Rhône-Alpes montrent que les grands lacs engendrent un surcroît de développement socio-économique sur leur pourtour, et soutiennent donc le développement régional.

La Savoie et la Haute-Savoie possèdent une forte notoriété du fait de la présence **des stations de sport d'hiver**, mais les lacs sont de plus en plus investis par les acteurs du territoire afin de garantir des flux touristiques toute l'année, comme le montre la politique de Savoie Mont-Blanc Tourisme et son programme de promotion touristique "*les 4 grands lacs de Savoie Mont Blanc*" (www.inspirez.savoie-mont-blanc.com/lacs/). Les grands lacs sont situés par ailleurs à proximité des agglomérations de Genève, Lyon, Chambéry, Annecy ou Grenoble et à moins de 300 km (distance depuis Genève) du "*triangle industriel*" de l'Italie (Turin, Gênes et Milan), qui forment un espace économique majeur de l'Europe (Varaschin et al. 2014).

Ces villes sont reliées par de nombreuses **voies de circulation** autoroutières et ferroviaires qui serpentent à proximité des grands lacs alpins entre les massifs alpins. Trois aéroports existent à proximité par ailleurs. Une autre voie de communication est possible par le biais du Rhône (le canal de Savière reliant le lac du Bourget est emprunté depuis l'âge du bronze) aujourd'hui utilisée pour la navigation de plaisance.

En conséquence, profitant du dynamisme économique, politique, culturel et démographique régional car facilement desservis par les nombreux réseaux de transports, les lacs sont devenus des **espaces de concentrations urbaines et touristiques** à l'échelle de la région et participent en retour au développement socio-économique et démographique de celle-ci (Cristofini and Roybin 1989, Vernex 1998, Piriou 2012).

2.1.2 ... alimentés par des BV très urbanisés et périurbanisés

Les lacs ne sont pas des systèmes isolés. Les caractéristiques biophysiques et territoriales du BV déterminent le bon fonctionnement de l'écosystème lacustre et sont des forçages majeurs pour ses qualités de l'eau et des milieux. Les BV des trois grands lacs alpins occupent trois gammes de superficies : le BV du Léman, situé à 88% en Suisse, couvre la surface la plus importante des trois et atteint presque 8 000 km² (lac compris), celui du lac du Bourget ceinture le lac et s'étale sur une surface de 4 645 km², et le BV du lac d'Annecy, le plus petit des trois, mesure 300 km². Leur altitude moyenne est élevée : pour le Léman, 1 670 m, 638 m pour le lac du Bourget et 900 m pour le lac d'Annecy.

Le rapport de la superficie du BV au lac est de 13.7 pour le Léman et le lac du Bourget et de 11,5 pour le lac d'Annecy. Les grands lacs alpins se situent donc dans la moyenne mondiale (entre 10 et 25), ils sont suffisamment importants pour que les flux hydrologiques se concentrent majoritairement dans les tributaires, et d'une taille assez réduite pour que le

¹ Ici est considéré l'ancienne région Rhône-Alpes – les chiffres de 2013 et 2018 ne prennent pas en compte les nouvelles délimitations administratives régionales

temps de séjour des eaux dans les lacs soit supérieur à 1 an (Pourriot and Meybeck 1995). Le BV est un système géographique, c'est-à-dire un système global à la fois physique et humain caractérisé par sa géomorphologie et la climatologie qui influent sur son hydrographie, mais également et de manière très importante sur le comportement de ses habitants et du MUS (Touchart 1993).

❖ Hydrographie des BV des 3 lacs

Le Léman reçoit les eaux de trois principaux tributaires (Figure 2-2, haut) qui totalisent 75,5% des apports et de plusieurs affluents secondaires. Bien que le bassin d'alimentation du Rhône ne couvre que 15,2% (5 221 km²) de la surface du BV du Léman, il draine très majoritairement les plus gros apports au lac et constitue 75% de la charge externe du lac (Loizeau et al. 2015). Les deux autres affluents principaux sont les Dranses avec 6.7% des apports sur la partie méridionale du BV du lac et la Vénoge qui se jette à peu près au milieu du lac, sur la rive nord et cumule 3% des apports. Le bassin d'alimentation du Rhône en amont du lac impacte en conséquence le plus fortement l'état et le fonctionnement du lac. La majorité de ce BV se situe dans le canton suisse du Valais et comporte 852 km² de glaces et de névés. Le maximum des fluctuations saisonnières du débit du Rhône est atteint en juillet à la fonte des glaces des Alpes, tandis que pour les Dranses le maximum est atteint au printemps et en décembre. La Venoge est soumis à deux périodes de crues importantes en février et de fin avril à la mi-mai. La moyenne des précipitations au sein du BV est d'environ 1.01 m par an.

Les principaux affluents de la Dranse et du Rhône forment des deltas sous-lacustres où sont déposées les alluvions charriées dans le BV. Dans la partie la plus à l'est du lac, entre les villes de Bouveret et la ligne traversant le lac entre Evian (FR) et Lausanne (CH), s'étend le delta du Rhône sur 13 km jusqu'à une profondeur de 300 m dans le lac, sur une épaisseur évaluée entre 300 et 350 m (Silva et al. 2018). C'est l'apport principal en sédiments du lac (85%) composés essentiellement d'argiles à limon de taille moyenne avec un débit moyen annuel du Rhône de 183 m³/sec.

Le BV du **lac d'Annecy** occupe l'extrémité nord de la plus importante cluse alpine transversale française, reliant les massifs internes à l'avant pays alpin. Ce BV est élevé et peu étendu par rapport au BV des deux autres lacs, avec une pente moyenne relativement importante (10%), une sensibilité au ruissellement torrentiel (avec un coefficient de ruissellement évalué à 54% en cas de crues - (Benedetti-Crouzet 1972) et une forte connectivité entre le BV et le lac. Les flux entrant au lac vont ainsi reproduire ponctuellement toutes les fluctuations du régime des précipitations dans le BV ; cette caractéristique distingue le BV du lac d'Annecy de celui des lacs du Bourget et du Léman dont les apports dépendent ponctuellement (lac du Bourget) ou de manière permanente (le Léman) des apports du Rhône (Loizeau et al. 2015). Le régime hydrologique est de type nivo-pluvial avec un débit moyen mensuel maximum en avril à la fonte des neiges, un minimum en septembre et une diversité de types de régimes d'un sous-BV à un autre (Benedetti-Crouzet 1972).

Du fait des caractéristiques du BV que nous venons d'évoquer, le lac d'Annecy est **le plus sensible aux variations de stocks d'eau** disponibles dans le BV, ce qui peut générer une baisse importante du niveau du lac à la fin de l'été, début d'automne, et/ou une crue lacustre au début du printemps comme ce fut le cas en 2018 où ces deux phénomènes ont été observés (BFM TV 2018). L'affluent principal du lac est l'Eau Morte (40% des apports liquides), puis l'Ire

(15%) et le Laudon (12%) ; leurs débits spécifiques sont importants (20 à 50 l.s.km²) du fait d'un BV bien arrosé par les précipitations (Benedetti-Crouzet 1972).

Le lac du Bourget est entouré de moyennes montagnes, au croisement de trois grands reliefs qui forment un BV ceinturant le lac et culminant à 1 538 m au Mont Revard. Trois affluents principaux alimentent le lac : la Leysse qui contribue à 65% des apports et traverse l'agglomération de Chambéry au sud avant de se jeter au lac, le Sierroz (25% des apports) et le Tillet (10%) situés à l'est du lac qui traversent la ville d'Aix-les-Bains. Le lac se déverse au nord dans le Rhône par le canal de Savière, mais en période de hautes-eaux du Rhône, le phénomène s'inverse (l'un des rares exemples en Europe) et le niveau du lac du Bourget s'élève car il reçoit le trop-plein du fleuve. Le canal de Savière a été construit au 19^{ème} siècle spécifiquement pour cet effet. Quand le phénomène est couplé avec une crue de la Leysse, souvent à la fonte des neiges au printemps, le niveau du lac peut s'élever de plusieurs mètres et submerger le littoral (Jacquet et al. 2006).

Ainsi, le réseau hydrographique des BV des grands lacs a une importance dans le paysage lacustre qu'ils ont façonné au cours de l'histoire depuis l'origine de ces lacs. Les BV affectent grandement le fonctionnement écologique du lac par des apports de matières déterminants pour la qualité des eaux et des milieux.

❖ Hydrologie lacustre

Le niveau des trois grands lacs alpins est aujourd'hui **fixé artificiellement** par la présence de barrages à leur exutoire qui permettent de maîtriser les aléas climatiques (crues et sécheresses) et de satisfaire tous les usages des lacs de manière permanente (Pousse et al. 2015).

La régulation du niveau de l'eau du **Léman** a été instaurée en 1884 pour mettre fin aux conflits entre divers usagers du lac. Un barrage est en place à l'exutoire qui assure l'équilibre entre les débits des flux entrant au lac, la capacité d'évacuation limitée du Rhône à Genève et le niveau du lac. L'Etat de Genève est responsable de ce barrage et assure un abaissement hivernal d'environ 1 m afin de stocker sans dommages la crue issue de la fonte des glaciers en été, et permet de fixer la cote du lac à une altitude moyenne de 372,05 m, conférant au plan d'eau une superficie de 580,1 km² pour un volume de 89 km³ (Montuelle 2015). Toutes les années bissextiles, la cote minimale du lac est abaissée pour permettre des travaux d'entretien et l'aménagement des ouvrages au bord du lac.

Sur le **lac d'Annecy**, la régulation au niveau du Thiou, rivière à l'exutoire du lac, est assurée par la ville d'Annecy et permet principalement de maîtriser le débit sortant, et d'assurer une force motrice suffisante pour les activités hydrauliques sur le Thiou et le Fier à l'aval. Le niveau du lac est fixé à une altitude de 447 m en moyenne et doit toujours être maintenu au plus près de ce niveau légal de retenue. Le plan d'eau possède une superficie de 26 km² pour un volume de 1.124 km³ (Montuelle 2015).

Il existe une relation forte entre le **lac du Bourget** et le fleuve Rhône. La régulation du niveau du lac du Bourget est liée aux aménagements hydroélectriques du Haut-Rhône. Afin de réguler le niveau du lac, un barrage au niveau du canal de Savière a été aménagé depuis les années 1980. Le niveau du lac est géré par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) par deux cotes

planchers : 231,5 m en été et 231,2 m le reste de l'année. En période de crue, le lac peut submerger le littoral (Pousse et al. 2015). La superficie du lac est de 44 km², son volume de 3.6 km³ (Montuelle 2015).

Les grands lacs alpins **sont des lacs monomictiques** : ils ne possèdent qu'une période de retournement des masses d'eau en fin d'hiver. Ces retournements sont essentiels au fonctionnement des grands lacs alpins (voir chapitre 1) mais ne se produisent pas de manière régulière et seul un hiver rigoureux permet d'obtenir un retournement complet des masses d'eaux (Rapin 1992). Le dérèglement climatique représente une menace pour l'avenir car il risque d'entraîner une plus faible récurrence des brassages et des risques accrus de désoxygénation benthique et de libération de la charge interne.

Enfin, les grands lacs alpins présentent **un temps de renouvellement des eaux théorique** de 11,4 ans pour le Léman, de 3.8 ans pour le lac d'Annecy et entre 9 et 16 ans (en fonction des apports) pour le lac du Bourget. Le lac d'Annecy présente donc un faible temps de séjour des eaux, alors que ceux du Léman et du lac du Bourget se situent dans la moyenne des grands lacs dans le monde (Pourriot and Meybeck 1995). Dans les faits, le temps de séjour de l'eau diffère en fonction des masses d'eau dans le lac, qui ne présentent pas toutes le même comportement selon un gradient de profondeur (Touchart 1993). A titre d'exemple, les strates supérieures de l'épilimnion et du métalimnion dans le Léman se renouvellent tous les cinq ans environ, alors que le temps de séjour des eaux de l'hypolimnion s'établit à une dizaine d'années, et à plus de 20 ans pour la couche de l'hypolimnion inférieur (Hubert, 1972 in Touchart 1993). Ces valeurs théoriques varient en fonction de l'hydrographie du BV, de l'hydrologie lacustre et évidemment de la régulation du niveau des lacs par l'Homme.

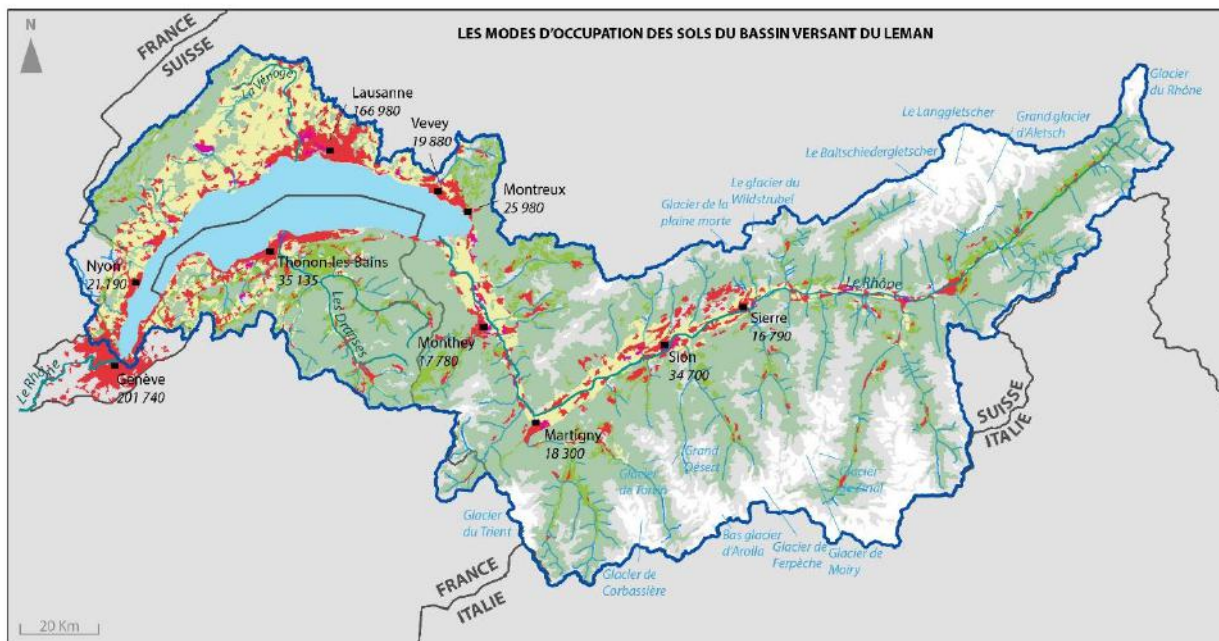
❖ Mode d'occupation du sol

« Par sa puissance et la rapidité des changements qu'il impose à la nature, l'homme est au cœur de la géographie du BV » (Touchart 1993).

Dans le cadre d'une étude portant sur les impacts des pollutions sur l'état du système lac – BV – société, nous nous sommes principalement concentrés sur les zones sources des pollutions diffuses et ponctuelles (Figure 2-2).

CHAPITRE 2

Les grands lacs alpins : des objets qui font territoire

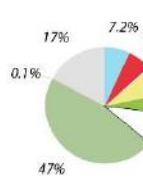


Un hydrosystème étendu ...

- Principaux tributaires du lac et cours d'eau
- Limites du bassin versant (7 999 km²)

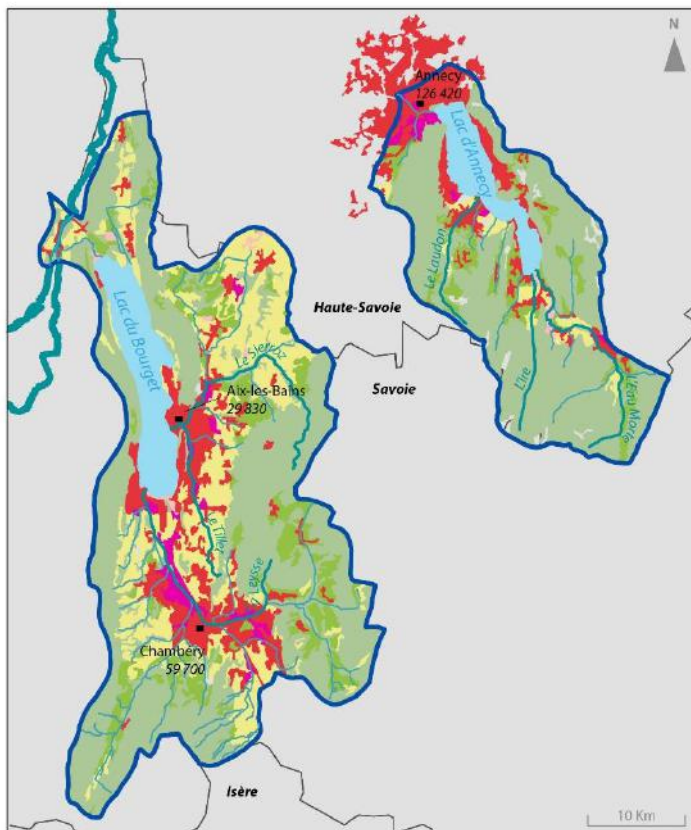
... riche en espaces naturels et avec une urbanisation concentrée autour du lac et du Haut-Rhône

- Roches et cours d'eau
- Zones humides
- Zones naturelles (forêts, landes, pelouses naturelles)
- Zones de névé, glaciers



- Le Léman (580 km²)
- Zones urbanisées
- Zones industrielles
- Zones agricoles (hors prairies)
- Zones pâturées
- Frontières des Pays
- Villes de plus de 15 000 habitants

Sources : Corine Land Cover, 2012 ; EU Hydro ; INSEE, 2018 ; STATPOP, 2019 - OFS
Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019



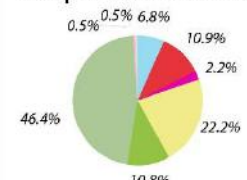
LES MODES D'OCCUPATION DES SOLS DES BASSINS VERSANTS DES LACS DU BOURGET ET D'ANNECY

Deux bassins versants avec des pôles urbains répartis de manière opposées ...

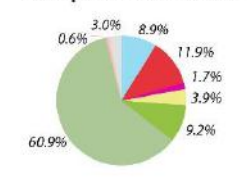
- Principaux tributaires des lacs et cours d'eau
- Limites des bassins versants*
- Villes de plus de 15 000 habitants
- Frontières des Départements

*Le BV du lac d'Annecy prend également en compte celui du Thiou à l'exutoire

... le lac du Bourget avec un BV à l'occupation en amont du lac



... le lac d'Annecy avec un BV à l'occupation en aval du lac



- Roches
- Zones humides
- Zones naturelles (forêts, landes, pelouses naturelles)
- Zones pâturées
- Les grands lacs alpins
- Zones urbanisées
- Zones industrielles
- Zones agricoles (hors prairies)

Sources : Corine Land Cover, 2012 ; EU Hydro ; INSEE, 2018 ; STATPOP, 2019 - OFS
Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 2-2 : Carte des modes d'occupation des sols des trois grands lacs alpins

Le Léman

Près de **1 302 000 personnes** vivent dans le BV du Léman en 2018 ; 88% de cette population résident en Suisse. La plupart des pôles urbains se situent autour du lac à moins de 10 km. Les agglomérations (districts en Suisse) qui concentrent la population la plus importante sont (Tableau 2-1) : Genève (499 332 hab), Lausanne (166 307 hab) et en France se sont les circonscriptions des cantons de Sciez, Thonon-les-bains et Evian (151 408 hab). La capacité d'accueil touristique est de plus de 162 300 lits dans le BV en France et près de 394 000 lits en Suisse (Conseil du Léman 2014, Baguet et al. 2015). Le territoire comporte (Figure 2-2, haut) 47% de surfaces naturelles végétalisées (surfaces boisées, pelouses) et 27% de surfaces « improductives » (roches, glaciers, relief...) ; ce qui représente la majorité de l'occupation du sol et est représentatif des paysages des Alpes ; 9% sont occupés par des glaciers et névés. On retrouve également 13.5% de surfaces agricoles utiles composées à plus de 62% d'herbages et alpages, 4% de viticulture et 2% d'arboriculture.

Tableau 2-1 : Répartition de la démographie dans le BV du Léman (sources : OFEV, 2018 ; INSEE, 2018)

Pays	Canton / département	Principales agglomérations et districts du bassin versant	Nombre d'habitants	Totaux
France	Haute-Savoie	Canton d'Evian	50727	151 408
		Canton de Thonon	52429	
		Canton de Sciez	48252	
Suisse	Genève	District de Genève	499332	499 332
	Vaud	District d'Aigle	45579	307 409
		District de Nyon	100669	
		District Ouest lausannois	76194	
		District de Riviera-Pays-d'Enhaut	84967	
	Valais	Bezirk Brig	26906	343 850
		District de Conthey	28895	
		District de Entremont	15255	
		District de Goms	4440	
		District de Hérens	10862	
		District de Leuk	12353	
		District de Martigny	47962	
		District de Monthey	47027	
		Bezirk Raron	10941	
		District de Saint-Maurice	13815	
District de Sierre	49206			
District de Sion	47745			
Bezirk Visp	28443			
Total			1 301 999	

En Suisse, le canton du Valais dont les limites suivent à peu près celles du bassin hydrographique du haut-Rhône concentre la plus grande population du BV. L'essentiel de la population et des activités économiques y est réparti le long du fleuve, sur trois pôles de concentration humaine autour des villes de Sion-Sierre (96 951 hab), de Martigny (47 027 hab) et de Monthey (47 027 hab). On y retrouve des prairies, alpages dans les vallées, des vergers (pommes, poires essentiellement) et plusieurs zones industrielles aux activités diversifiées le long du Rhône (agroalimentaire, horlogerie, parfumerie, chimie, métallurgie, électronique et mécanique de précision, décolletage, et industries souvent

anciennes, industries actives et tournées vers les hautes technologies – Ferrier 1998). De grands espaces de vignobles sont présents sur les coteaux autour des villes de Sion, Sierre et de Aigle dans le canton de Vaud. Nous reparlerons de ces industries et vignobles au chapitre 5 dans le cadre de la pollution au mercure des années 1970. Le reste du paysage du canton est occupé par de grandes forêts de conifères et feuillus mélangés, caractéristiques des paysages de moyenne montagne des Alpes, des forêts de conifères également pour les zones les plus en altitude. Une grande zone humide occupe l'ancien lit du delta du Rhône à son entrée dans le lac.

Le littoral nord-est du lac est occupé par un tissu urbain continu et dense, coupé par quelques vignobles entre les villes de Montreux (26 000 hab) et de Lausanne (145 500 hab). D'autres vignobles, vergers et quelques surfaces de cultures pérennes sont présents autour de la ville

de Rolle au Nord, jusqu'à Coppet, sur le plateau morainique de l'ancien lit du Léman. Les prairies et alpages sont moins présents dans la partie du BV au nord du lac, que dans la partie sud, tout comme les forêts concentrées essentiellement sur le massif jurassien. Enfin, la ville de Genève est construite au niveau de l'embouchure du lac, à l'aval de celui-ci et influe donc peu sur les flux transférés depuis le BV au lac.

L'anthropisation de la partie française du BV au sud du lac est enclavée entre le littoral du Léman et les contreforts du massif préalpin du Chablais. Le secteur est alors fortement urbanisé le long du littoral de manière presque continue depuis la frontière suisse jusqu'à Lugrin. Au-delà de cette ville et jusqu'à St Gingolf (frontière avec le canton du Valais), le lac longe les falaises abruptes du massif préalpin du Chablais, réduisant les possibilités d'occupation par l'homme. Ce massif de moyenne montagne occupe la majorité du BV français du Léman, il est peu urbanisé, hormis dans les stations de ski. De grandes zones d'alpages, de prairies et de forêts occupent les plateaux et vallées. Plus proches du lac, se trouvent les agglomérations de Thonon-les-bains (36 300 hab) et Evian (9 330 hab) où l'on retrouve quelques petites zones industrielles, des vergers et vignobles plus proches de la frontière avec le canton de Genève. Il existe quelques zones humides le long des Dranses, à l'embouchure de ces affluents importants qui se jettent au lac et dans la cluse de Perrignier et Bons-en-Chablais.

Pour résumer, **l'urbanisation et l'industrie du BV du Léman se concentrent le long du littoral du lac et dans la vallée du Rhône-amont**. Les cultures sont peu présentes du fait d'une spécialisation fromagère, hormis dans les cantons de Vaud et du Valais, où l'on retrouve des espaces de **cultures céréalières, vergers** et vignobles. Dès que l'on s'éloigne de la cuvette lémanique et que l'on monte en altitude, on retrouve de **grandes forêts et espaces naturels**, des alpages et quelques zones humides. L'effet tampon de ces zones naturelles est limité vis-à-vis du lac car elles sont situées majoritairement à l'amont des surfaces anthropisées, qui se trouvent plus au bord du lac. Elles permettent néanmoins de forts apports en eau et de diluer ainsi les pollutions.

Le lac d'Annecy

Le BV du lac d'Annecy est bien moins étendu que celui du Léman et représente le BV le moins urbanisé des trois grands lacs alpins avec une population permanente d'environ **100 000 habitants** – hors agglomération annecienne (INSEE, 2016). La ville même d'Annecy compte : 56 000 hab, son agglomération : 196 330 hab. La particularité de ce territoire est la disposition de la principale agglomération d'Annecy à **l'aval** de celui-ci (Figure 2-2, bas), qui confère un BV peu urbanisé (11.9%), majoritairement recouvert de forêts (60.9 %) et de prairies et alpages (9.2%) générant des apports restreints de pollutions ponctuelles et diffuses. En revanche, l'urbanisation est bien développée sur le littoral du lac avec 70.6% du linéaire littoral artificialisé (Nikolli 2018). Annecy, principale agglomération de Haute-Savoie, dispose d'une offre d'hébergements touristiques évaluée à 59 500 lits (INSEE, 2017) pour pallier à une fréquentation touristique importante en période estivale autour du lac et sur le lac (SILA 2019). Sur le littoral Sud, enclavées entre le lac et le massif des Bauges, s'étendent les villes de Sévrier et de Saint-Jorioz, où l'on retrouve quelques industries et parcelles de cultures annuelles. Nous retrouvons également des parcelles agricoles de cultures annuelles et fourragères dans la vallée de la cluse alpine de l'ancien lit du lac et dans la partie sud du littoral du petit lac entre les villes de La Thuile, Doussard et Veyrier ; à proximité s'étend la zone humide de la réserve naturelle du bout du lac. Le littoral au sud-est du lac se situant à flanc du

massif préalpin des Bornes représente la partie du lac la moins artificialisée. Séparant le petit lac du grand lac, la réserve naturelle du Roc de Chère délimite le cordon d'urbanisation qui s'étend sur toute la partie nord-est, sud-est du lac depuis Annecy-le-vieux, jusqu'à Talloires. Au-delà du littoral fortement urbanisé du lac, s'élèvent les moyennes montagnes qui marquent les limites du BV. Celles-ci sont occupées par des forêts denses, quelques alpages et petites villes dans les cluses en amont ; certains sommets des têtes du BV au sud, sud-est présentent des enrochements et espaces enneigés la majeure partie de l'année.

En résumé, le lac d'Annecy est un **lac au littoral fortement artificialisé**, qui concentre une grande population à l'année, à laquelle s'ajoutent d'importants flux touristiques en périodes estivales ; les montagnes qui ceignent le lac marquent les limites du BV et sont dotées d'une forte pente principalement occupée par des paysages de prairies d'alpages et forêts, ce qui contraint les aménagements anthropiques et procure au BV un impact relativement faible sur la qualité de l'eau et des milieux du lac. Le lac est moins sensible aux pollutions urbaines que les deux autres lacs du fait que l'essentiel de l'urbanisation associé au plan d'eau se trouve à l'exutoire aval, hors BV (Figure 2-2, bas).

Le lac du Bourget

L'urbanisation dans le BV du lac du Bourget se situe en amont du lac, soit une configuration inverse à celle du lac d'Annecy avec des risques plus marqués de pollutions ponctuelles par les eaux usées urbaines. Le BV totalise une population de près de **200 000 habitants** répartis dans 60 communes en Savoie et 5 communes en Haute-Savoie et comporte deux agglomérations : celle de la ville thermale d'Aix-les-Bains (commune : 30 377 hab, communauté d'agglomération : 50 000 hab) sur la partie est du littoral lacustre et Chambéry (commune : 73 000 hab, agglomération : 137 000 hab), plus en amont au sud dans le BV. Selon les données de Nikolli (2018), 37,5% du linéaire littoral (principalement la rive est) est artificialisée. La faible part d'urbanisation des rivages lacustres sur la partie ouest lui confère un aspect « *sauvage* ». Cette rive ouest du lac du Bourget, qui s'étend depuis la commune de Conjoux à l'extrémité nord du lac jusqu'à la commune de Bourdeau au sud-ouest est surnommée la « *Côte Sauvage* » car elle est préservée de l'activité humaine et difficile d'accès. Les rives abruptes de la montagne de l'Épine (contrefort du Jura méridional) tombent à la verticale dans le lac et empêchent toute installation de l'homme sur ce versant (Duclos 2018). Entre les deux agglomérations d'Aix-les-Bains et de Chambéry se trouvent la plus grande zone industrielle de Savoie (la ZI de Bissy et plus proche du lac la ZI de Savoie Technolac en fort développement), un aéroport au bord du principal affluent du lac : la rivière de la Leyse (Wirtz-Susini 2018) ; d'autres industries sont présentes au sud de la ville d'Aix-les-Bains à proximité de la rivière du Tillet qui se jette dans le lac au niveau d'Aix-les-Bains (nous citerons à nouveau ces industries au chapitre 5 en évoquant l'histoire de la pollution du lac aux PCB). A noter, la présence d'une ancienne décharge sur la commune de Viviers-du-lac au sud-ouest du lac, implantée sur une zone humide, qui a recueilli les déchets de l'agglomération chambérienne pendant une trentaine d'années et constitue encore aujourd'hui une source de pollution pour le lac, la base de la décharge étant en contact avec la nappe d'eau superficielle (Pleux 2011).

Le BV du lac du Bourget **est fortement occupé par des espaces agricoles**, essentiellement des prairies tout autour des agglomérations de Chambéry et Aix-les-bains, et qui recouvrent la majeure partie des plateaux de la Leyse et du Revard. On retrouve quelques parcelles de vignoble en amont de la ville de Chambéry, et sur la partie nord du lac, des vergers au sud-

ouest du lac, à l'ouest de la zone industrielle de Bissy et très peu de cultures annuelles. D'importantes zones humides riveraines se situent à l'embouchure de La Leysse au sud du lac (sur la commune du Bourget-du-lac), ainsi qu'à l'extrémité nord au niveau du Canal de Savière ; d'autres sont présentes dans le BV en amont de la ville d'Aix-les-bains. Enfin, le BV au Nord et à l'Ouest du lac est occupé par de grandes forêts, tout comme les parties du BV situées dans les massifs des Bauges et en Chartreuse au Sud-Est et au Sud du BV, respectivement.

En définitive, **le paysage du BV du lac du Bourget est très contrasté**, entre d'une part des moyennes montagnes aux pentes abruptes occupées par des forêts où les activités humaines sont peu présentes, et d'autre part les cluses et vallées fortement urbanisées où se concentrent de nombreuses activités agricoles, commerciales, de services et industrielles.

Comme nous venons de le voir, **l'aménagement de l'espace** sur les pourtours et les BV des trois grands lacs alpins est sensiblement différent d'un lac à l'autre, avec d'un côté une pression urbaine et industrielle en amont du lac pour les lacs du Bourget et le Léman et une concentration de l'urbanisation à l'aval du lac pour le lac d'Annecy. Néanmoins, ces espaces sont marqués par la présence de **cinq grands types de paysages** (CEN 2017). Tout d'abord, ce sont des territoires (1) entre lac et moyennes montagnes qui présentent une qualité paysagère remarquable par l'attrait touristique que ces lacs génèrent et les différentes mosaïques paysagères entre les plaines rurales et urbaines et les moyennes montagnes en surplomb. Les BV sont drainés par de nombreux cours d'eau, des zones humides dont plusieurs situées sur les littoraux des grands lacs, caractéristiques de (2) paysages aquatiques avec des intérêts marqués pour la biodiversité auxquelles sont fréquemment attribué un rôle tampon. Des paysages (3) agricoles et ruraux s'observent dans les vallées ou sur les coteaux des massifs préalpins ; ils contribuent à l'attractivité du cadre de vie, à la mosaïque paysagère et constituent pour la grande majorité des milieux ouverts de pâturages et prairies, ressources pour la biodiversité (CEN 2017). (4) Les paysages forestiers sur les reliefs, ressources tant paysagères, économiques que d'intérêt pour la conservation donnent un caractère "*sauvage*", "*naturel*" au cadre lacustre. (5) Les zones urbaines enfin comptent un patrimoine bâti et de nombreux sites d'exception sur les zones littorales des trois grands lacs et témoignent de l'histoire dynamique et touristique de cette région frontalière.

La localisation de grands pôles urbains sur le littoral des lacs et à l'amont confère aux trois grands lacs alpins une sensibilité forte aux pollutions d'origine ponctuelle, alors que le risque lié aux pollutions diffuses est limité par un type d'agriculture en moyenne peu intensive et une forte contribution des zones naturelles présentes dans le BV.

2.2 La multifonctionnalité des grands lacs alpins

Voilà plus de quatre millénaires que les hommes ont investi les littoraux des grands lacs alpins. Ces grands lacs attirent les sociétés humaines par les nombreuses ressources qu'ils procurent et les opportunités de développement et de défense qu'ils offrent. L'ensemble des usages, tout comme les rapports que les hommes entretiennent avec ces plans d'eau ont largement évolué au cours du temps (Floret and Hubert 1977). **Quatre fonctions de ces lacs aujourd'hui prédominent** : l'alimentation en eau potable, la pêche, les activités touristiques et de loisir et l'usage des eaux du lac comme réceptacle des eaux usées. Ces utilisations des plans d'eau sont récentes au regard de l'histoire de ces lacs (hormis la pêche) et ont émergé tour à tour en

réponse à l'évolution des modes de vie, des besoins sociétaux et des innovations techniques pour en tirer profit. Elles mobilisent **trois grands types de ressources des grands lacs alpins** : les ressources en eau, les bio-ressources, les ressources paysagères et de manière plus anecdotique les ressources minérales.

Deux conditions sont nécessaires pour convoiter une ressource (Godelier 1982) : elle doit répondre à un **besoin**, une nécessité qui correspond aux critères de la société à un moment donné et il est nécessaire de disposer des **moyens suffisants** pour en tirer profit. Cela implique de posséder les connaissances, les techniques d'exploitation et/ou l'accès aux dites ressources. Le milieu liquide fournit plusieurs obstacles à ce dernier critère : l'Homme doit disposer en plus des moyens techniques d'extraction in situ de la ressource, **des moyens pour accéder** à elle si elle se trouve sous l'eau, dans le sol ou des endroits inaccessibles et de moyens matériels pour la transformer et la consommer. Cela suppose que les humains puissent exploiter certaines ressources lacustres sans les voir et qu'ils puissent créer les outils pour l'atteindre, (ex : la pêche où un instrument est utilisé : la canne à pêche, le filet, les pièges ... pour aller chercher le poisson ou encore le repérer au sonar). **Les milieux aquatiques possèdent donc la spécificité de ne pas être exploitables directement.**

La figure Figure 2-3 dresse une synthèse des grands types d'usages et activités associées aux ressources des grands lacs. **L'eau** est un support des activités, un vecteur des eaux usées, une ressource prélevée et consommée, mais est également utilisée pour produire d'autres ressources aux humains, notamment l'énergie. Les **bio-ressources** recoupent l'ensemble des ressources animales et végétales extraites du milieu ou mobilisées de manière passive au travers de la contemplation. Le **paysage lacustre** a fait l'objet d'investissements sociétaux au cours du XX^e siècle visant à promouvoir une grande diversité de pratiques nautiques ainsi qu'à accueillir les visiteurs et voyageurs venus observer ces paysages ou pratiquer une activité de loisir. Les ressources paysagères des objets d'inspiration et de contemplation. Enfin, les **ressources minérales** sont extraites directement des lacs pour les besoins de la construction ou exploités en tant que matériaux mémoires pour reconstruire l'histoire paléo-limnologique.

Cette partie de thèse est construite sur la description des activités, enjeux et usages associés à chacune de ces ressources, ainsi que les pratiques sociales et techniques utilisées pour les exploiter. Les présentations jointes fourniront des repères utiles pour la compréhension de la suite de cette étude, et serviront de cadrage aux analyses rétrospectives des services écosystémiques aux chapitres 5 et 6. L'exploitation des ressources minérales quant à elle sera présentée de manière succincte car elle ne fera pas l'objet d'une étude approfondie dans la suite de cette étude du fait que les activités associées sont moins dépendantes des qualités de l'eau et des milieux que pour les autres ressources.

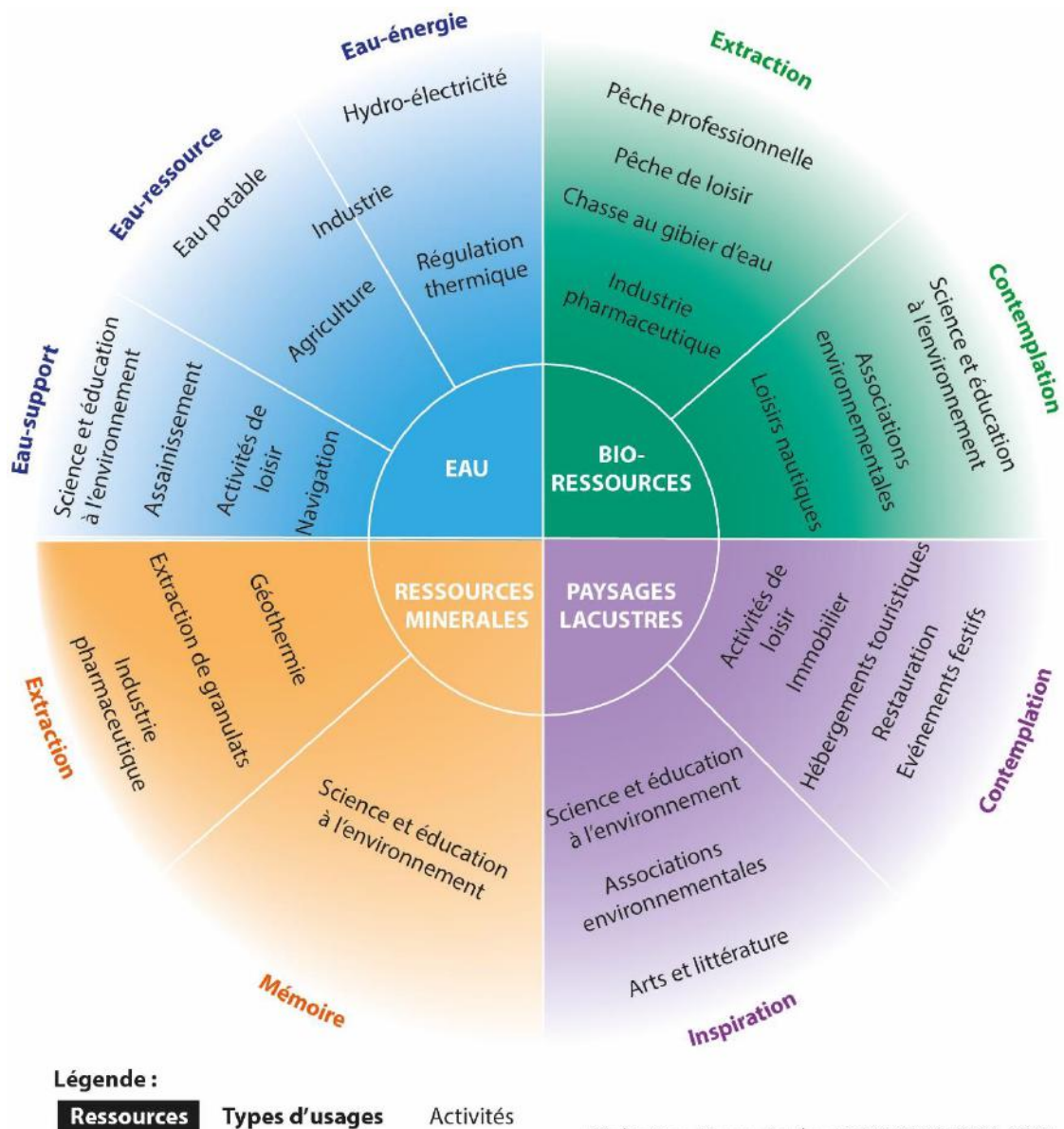


Figure 2-3 : Ressources et types d'usages des grands lacs alpins

2.2.1 Les ressources en eau des grands lacs alpins

Historiquement, l'une des premières utilisations des lacs était associée à **l'eau en tant que support des activités humaines**, que ce soit pour la construction des habitations palafittiques (voir chapitre 5.3.1 pour plus de détails), que pour la navigation et la pêche. La navigation au Moyen-Age et jusqu'au début du XX^e siècle était le moyen de transport des matériaux entre les différents espaces littoraux des grands lacs alpins. Ces matériaux issus des carrières autour des lacs et des moyennes montagnes environnantes étaient acheminés par bateaux pour la construction des villes, tout comme le bois qui servait à la fabrication d'outils et du mobilier. Au XIX^e siècle, les bateaux à vapeur connaissent un véritable essor sur les lacs Léman et du Bourget (Vernex et al. 2015). Le transport de personnes apparaît à la même époque, quand plusieurs villes sont construites autour des grands lacs et qu'un important réseau de

navigation fluviale est aménagé entre Lyon, Chambéry et le lac du Bourget par le Rhône (Jobert 2017).

La navigation a des impacts importants sur les territoires lacustres en termes d'économie, d'aménagement du littoral et de fréquentation sur et autour des lacs (Baguet et al. 2015). En effet, cette activité nécessite des équipements portuaires avec du personnel dédié, depuis la construction des embarcations dans les chantiers navals jusqu'aux loueurs et compagnies de bateaux qui participent à l'économie régionale. La navigation est également associée de manière indirecte à quelques activités supplémentaires comme l'événementiel, (l'organisation d'événements sportifs nautiques avec embarcation - voile, canoë, aviron, bateaux à moteurs, etc.), la sécurité civile où les déplacements sur le lac sont parfois privilégiés aux moyens aériens pour le secours des personnes et la recherche des victimes ou encore les activités de recherche et d'éducation à l'environnement. Aujourd'hui, c'est un **moyen de déplacement** incontournable entre la Suisse et la France (rive nord et sud du lac) face à l'engorgement des routes aux heures de pointe, mais non suffisant. Ce moyen de transport est réservé exclusivement au tourisme sur les autres grands lacs.

Plus récemment apparaît l'utilisation de l'eau pour **la production d'énergie** : énergie mécanique et cinétique dans un premier temps pour alimenter en énergie : l'eau des moulins, au niveau des exutoires des lacs, le long du Rhône dans la ville de Genève, ou le long du Thiou à Annecy. Aujourd'hui, seul le Léman produit de l'hydroélectricité au niveau de l'exutoire du lac depuis 1894 (Baguet et al. 2015). Depuis quelques années sont utilisées les propriétés thermiques de l'eau pour alimenter les systèmes de chauffage/climatisation de certaines zones industrielles et résidentielles des villes de Genève et Lausanne, dans un souci de gains économiques. Un projet est en cours de réflexion sur le lac du Bourget pour exploiter l'eau du lac de la même manière. L'eau du Léman est également utilisée à ces mêmes fins pour refroidir l'accélérateur à particules du CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), avec un volume de plus de 3 300 000 m³ prélevé par an pour ce seul besoin depuis 1976.

Enfin, **l'eau est utilisée en tant que ressource dédiée à la consommation**. Cet usage est pratiqué depuis 1708 pour alimenter la ville de Genève à partir d'un prélèvement sur le Rhône à l'exutoire du lac, puis à partir de 1920-1930 elle est puisée directement dans le lac (aujourd'hui les prélèvements au lac représentent 90% des ressources en eau de la ville), dès 1932 pour la ville de Lausanne, et depuis 1910 sur les lacs d'Annecy et du Bourget en complément d'autres sources. L'apparition du « *jet d'eau* » à Genève, objet patrimonial important pour la ville, est liée à l'approvisionnement en eau potable de la ville à partir des eaux du Rhône. Mis en place en 1896, il sert de soupape en cas de surpressions. Il sera déplacé dans la rade de Genève en 1891 pour en faire une attraction touristique (Duc et al. 2009). L'eau du Léman est également utilisée pour l'irrigation en agriculture : le volume prélevé annuellement est inconnu mais reste une utilisation très minoritaire de l'eau, sans compter les pompes plus ou moins réglementaires des riverains (dires d'experts).

Assurer une eau potable de qualité et en quantité suffisante pour les populations est un des enjeux majeurs des grands lacs alpins aujourd'hui.

❖ Les pratiques et techniques d'exploitation de l'eau potable

Les pratiques et techniques employées pour tirer profit de l'eau potable renvoient aux deux premières étapes du petit cycle de l'eau (voir chap 1.3.3). L'eau est ainsi prélevée dans les grands lacs alpins ; on la qualifie alors **d'eau brute**, rendue potable au travers différents procédés, notamment de filtration et de désinfection pour permettre sa consommation sans risque pour la santé humaine, puis est stockée avant sa distribution par un réseau de canalisations jusqu'aux lieux d'utilisation.

L'importance des traitements de potabilisation dépend de la qualité de l'eau brute. Les grands lacs alpins fournissent une eau brute d'assez bonne qualité permettant des traitements minimums pour son exploitation. Néanmoins des épisodes exceptionnels de pollution accidentelle (ex : fuite de produits toxiques d'une usine ou d'un véhicule de transport de produits dangereux) peuvent apparaître et nécessiter la mise en place de traitements spécifiques préventifs pour assurer une eau potable de qualité en permanence. Les choix des traitements dans les stations de prélèvements sont réalisés en fonction des risques de pollutions. Ils comportent une étape de **filtration** obligatoire pour supprimer les matières organiques, le plancton et les déchets présents dans l'eau, parfois une phase de **désinfection**, qui peut être complétée par un **procédé d'oxydation**.

Les systèmes de filtration sont composés de micro-tamis en toiles (cas du prétraitement de l'eau prélevée au lac d'Annecy), sur des lits de sable, de pierre ponce, des charbons actifs et via des procédés physiques (anneaux mobiles percés sur des plateaux, tambours rotatifs). Le choix de l'un ou l'autre de ces modes de filtration réside dans la taille minimale des objets à filtrer (le seuil de coupure), le type de matériaux présents dans l'eau et les caractéristiques de l'eau (une charge organique en suspension dans l'eau trop importante implique des nuisances olfactives qui limitent l'utilisation de micro-tamis ; les PCB peuvent être stockés et absorbés uniquement par le charbon actif – d'ires d'experts) et les moyens techniques et financiers disponibles.

La désinfection est la deuxième étape du traitement de l'eau de consommation avant distribution. Cette étape permet l'élimination des micro-organismes pathogènes présents dans l'eau. Celle-ci ne doit être exercée que sur une eau brute de bonne qualité, d'où la nécessité de mise en place de procédés de filtration ou d'oxydation à l'ozone au préalable. La désinfection est souvent réalisée par un procédé de chloration ou bien par UV. Cette dernière méthode est très efficace et présente l'avantage d'aucun ajout de produits chimiques dans l'eau, mais reste coûteuse à l'installation.

L'oxydation consiste en l'utilisation de réactions chimiques avec de l'ozone pour dégrader chimiquement les polluants et micropolluants organiques et germes pathogènes ; ce procédé permet aussi l'amélioration de l'aspect de l'eau (amélioration de la transparence, disparition des nuisances visuelles et olfactives). Il existe des inconvénients en termes de coûts et de consommation d'énergie, et un manque d'information sur les risques associés aux produits chimiques oxydés, sur les risques d'exposition à l'ozone et le manque d'action sur les métaux (d'ires d'experts ; Agence de l'eau, 2017).

Sur les lacs du Bourget et le Léman, la filière de traitement la plus courante suit les phases suivantes de **prélèvement – filtration – désinfection** avec un traitement en une seule étape

CHAPITRE 2

Les grands lacs alpins : des objets qui font territoire

avec des charbons actifs. La qualité de l'eau du lac d'Annecy étant supérieure à celle des deux autres grands lacs alpins, les techniques de potabilisation choisies (Figure 2-4) ne comprennent pas le processus de désinfection : le choix s'est porté sur l'ultrafiltration de l'eau car l'eau brute comporte une grande quantité de particules organiques et organismes planctoniques.

Après traitements, l'eau potable est **stockée** dans des réservoirs avant d'être **acheminée** aux consommateurs via un réseau de canalisations. La spécificité de l'utilisation de l'eau des lacs est la nécessité d'installer des systèmes de pompages et de relevages de l'eau depuis les lieux de fourniture jusqu'aux bénéficiaires, contrairement au fonctionnement généralement en gravitaire des stations d'approvisionnement en eau potable issues des nappes phréatiques et rivières. Ces systèmes sont sensibles au développement du phytoplancton et le colmatage.

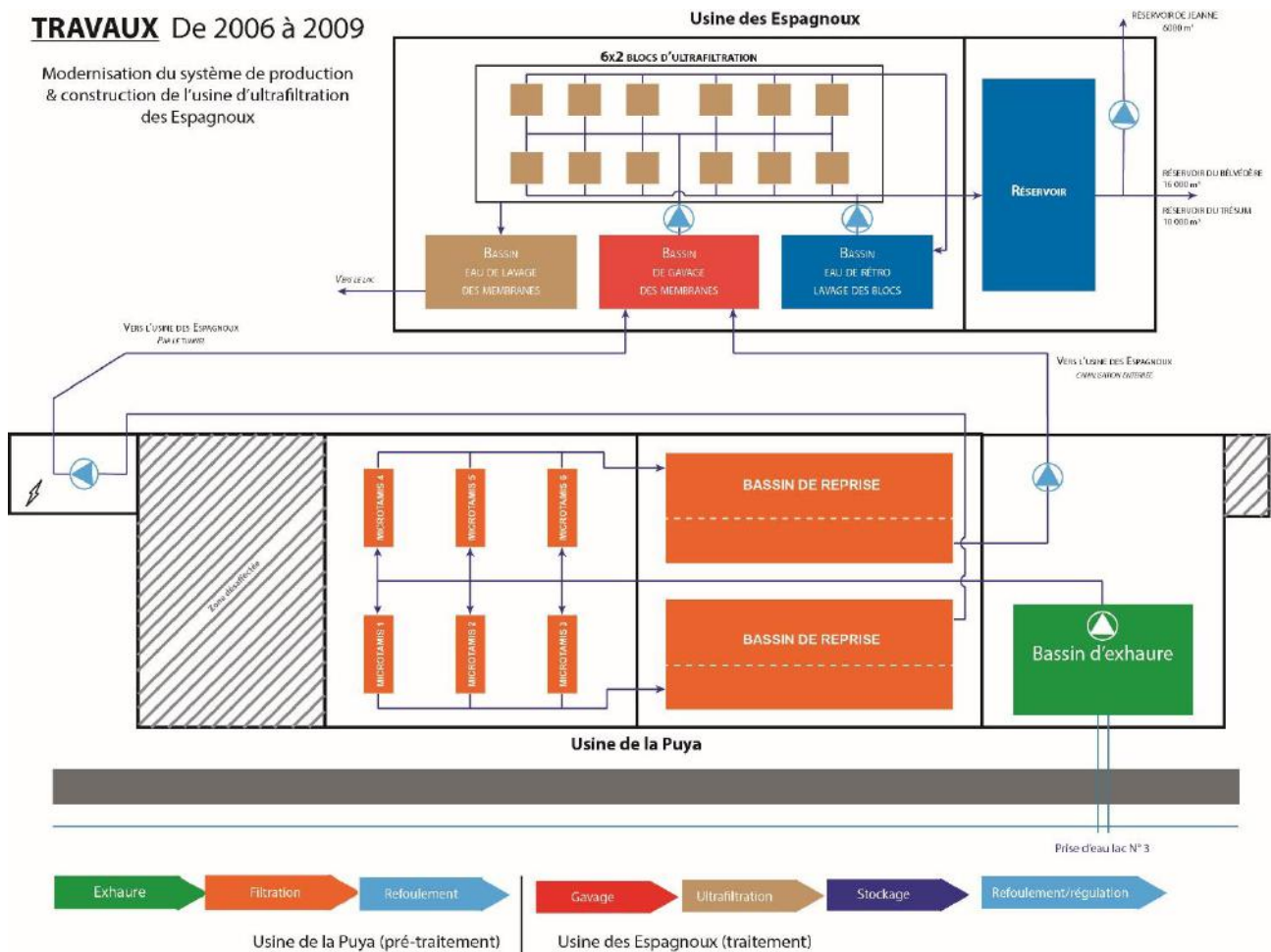


Figure 2-4 : Exemple de la chaîne de traitement de l'eau potable issue du lac d'Annecy depuis 2009

❖ Les pratiques et techniques associées à l'assainissement des eaux usées

Après consommation par les ménages et les industries, les **eaux usées** sont collectées et traitées dans les stations de traitement des eaux usées (STEP). Ces eaux sont alors réinjectées dans les milieux naturels sous forme **d'eau épurée** ; ces étapes finalisent le petit cycle de l'eau (voir chap 1.3.3). Malgré les traitements effectués, il ne s'agit pour nombre de polluants que d'une réduction de la charge des eaux ; **il subsiste donc généralement un fond de pollution qu'il est difficile, voire impossible à traiter** sans la mise en place d'options d'assainissement

coûteuses. Les eaux épandues sur les surfaces agricoles n'interviennent pas dans ce cycle et finissent sous forme de flux diffus dans les milieux naturels.

Les eaux usées issues des ménages sont traitées de manière collective dans les **STEP et stations de lagunage ou bien par un assainissement individuel et/ou dans des puits dits maladroitement « perdus »** pour les habitations non reliées aux réseaux domestiques. Les rejets industriels sont en partie traités à la sortie des usines puis réinjectés directement dans les milieux naturels ou dans les réseaux de collecte des eaux usées. Les eaux de pluies sont souvent recueillies dans des **réseaux séparés** pour ne pas surcharger les STEP et assurer un assainissement constant. La mise en place de ce réseau séparatif s'est organisée progressivement dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle pour les grands lacs alpins (voir 5.3 pour plus de détails).

La dépollution des eaux usées dans les STEP nécessite une série d'étapes de traitements à la fois physiques, physico-chimiques et biologiques. **La première étape de prétraitement** s'apparente à une étape de filtration physique permettant de débarrasser les eaux usées des polluants solides les plus grossiers (dessablage, dégraissage). **La seconde étape, appelée « traitement primaire »** utilise les procédés physiques et physico-chimiques de décantation pour éliminer les matières minérales et organiques en suspension. Dans les BV des grands lacs alpins, le traitement primaire doit être accompagné d'un **« traitement secondaire »** pour répondre aux exigences réglementaires et préserver le maintien des milieux naturels. Ce traitement secondaire regroupe des techniques d'élimination biologique et physico-chimique des matières polluantes solubles (carbone, azote, phosphore). Ce niveau permet notamment de lutter contre le processus d'eutrophisation des grands lacs alpins.

La nécessité d'agir contre les micropolluants et germes pathogènes entraîne la mise en place de **« traitements tertiaires »**. Ces traitements comprennent une étape de désinfection qui utilise généralement les mêmes systèmes que ceux décrits précédemment pour l'approvisionnement en eau potable (chlore, ozone, UV). Les UV issus du rayonnement solaire dans les stations de lagunage, couplés avec le traitement biologique par des micro-organismes, permettent également d'assurer un traitement tertiaire pour les petites collectivités. Il est néanmoins dépendant des conditions météorologiques.

Les résidus de matériaux polluants et de sédiments récoltés dans les STEP sont extraits sous forme de boues qui peuvent être valorisées en tant que fertilisants sur les parcelles agricoles, de compost (c'est le cas d'une petite partie des boues issues du traitement des eaux usées générées autour du lac d'Annecy) ou sont incinérées (pratique la plus courante dans les BV des grands lacs alpins en France).

2.2.2 Les bio-ressources des grands lacs alpins

Les premiers signes d'une activité de pêche dans le Léman datent du Néolithique (entre 4300 et 800 ans avant JC) et font de cette pratique **l'une des plus anciennes des grands lacs alpins**. A cette époque tout comme aujourd'hui, la perche et le corégone (dénommé localement la féra sur le Léman, le lavaret sur le Bourget et Annecy) avec le brochet, constituent les espèces principalement pêchées au moyen de techniques variées : au filet, à la ligne, à la nasse ou au harpon (Gillet 2017, Malgat 2018). Au cours des siècles, cette activité s'est intensifiée, les pratiques diversifiées, les techniques modernisées, la réglementation de la pêche et la

CHAPITRE 2

Les grands lacs alpins : des objets qui font territoire

pratique de la pêche de loisir se sont mises en place. Nombre de ces changements ont eu lieu au cours de la période récente, sous l'influence du développement des transports et du tourisme et d'une demande toujours accrue en poissons du lac, des changements dans les modes de consommation, ou encore de la problématique de pollution du lac et depuis peu, du réchauffement climatique. **En 150 ans, cette activité traditionnelle des grands lacs alpins a été davantage modifiée qu'en plus de 2 000 ans de pêche dans les grands lacs.**




Liste des espèces de poissons des 4 grands lacs alpins		ESPÈCES PAR LAC	Léman	Bourget	Annecy
	Espèce autochtone				
	Espèce introduite				
	Espèce disparue				
alv : espèce bénéficiant d'un soutien d'effectif					
En gras : espèce exploitée par la pêche professionnelle et amateur.					
* Il existe plusieurs appellations locales du corégone : féra pour le Léman et le lac d'Annecy ; lavaret pour les lacs du Bourget et d'Aiguebelette.					
** N'inclut pas les espèces disparues ou supposées disparues.					
	Ablette				
	Alose				
	Anguille				
	Barbeau				
	Blageon				
	Blennie fluviatile				
	Brème bordellère				
	Brème commune				
	Brochet				
	Carassin				
	Carpe commune				
	Chabot				
	Chevaine				
	Corégone*	(alv)	(alv)		
	Epinoche				
	Gardon				
	Goujon				
	Grémille				
	Hotu				
	Lamproie marine				
	Loche franche				
	Lotte				
	Ombre chevalier	(alv)	(alv)	(alv)	
	Ombre commun				
	Perche				
	Perche soleil				
	Poisson chat				
	Rotengle				
	Sandre				
	Spirilin				
	Tanche				
	Truite (lacustre)	(alv)	(alv)	(alv)	
	Truite arc-en-ciel				
	Vairon				
	Vandoise				
	Nb. espèces tota**	24	29	20	

Figure 2-5 : Liste des espèces de poissons des grands lacs alpins (Cachera et al. 2015)

Les grands lacs alpins abritent un ensemble d'espèces de poissons variées, et environ entre 5 et 10 d'entre elles sont capturées par la pêche professionnelle et de loisir dans chacun des grands lacs alpins (Figure 2-5). Les pêches professionnelles et de loisir ne ciblent pas toujours les mêmes espèces. Les pêcheurs professionnels exploitent essentiellement les salmonidés

(*salmonidae*) : l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*), la truite lacustre (*Salmo trutta*) et le corégone (*Coregonus lavaretus*), et également la perche commune (*perca fluviatilis*), le brochet (*Esox lucius*), la lotte (*Lota lota*) et l'écrevisse américaine (*Orconectes limosus*). Les pêcheurs de loisir s'intéressent également à ces espèces et peuvent cibler aussi les sandres (*Sander lucioperca*) dans le lac du Bourget ou les carpes (*Cyprinus carpio*) par exemple. **Les captures sont très variables en fonction des saisons et de manière interannuelle suivant les cycles de vie des poissons.** De nombreux facteurs induisent une variabilité dans les captures. Ces facteurs sont liés d'une part aux changements d'état des habitats, des zones de reproduction, de l'état trophique du lac et de sa qualité de l'eau, et d'autre part au niveau de pression de pêche, aux pratiques et engins de pêche utilisés, au comportement des pêcheurs, etc. Une gestion des pêches s'est instaurée peu à peu sur les grands lacs alpins veillant à une exploitation durable de la ressource piscicole, par le biais d'un suivi halieutique précis sur les populations de poissons, d'une réglementation sur les engins et techniques de pêches, et d'opérations de paquage lacustre (alevinage). A titre d'exemple, le repeuplement du Léman représente en 2016 plus de 7 millions d'alevins de corégones, autant de truite lacustre et plus de 160 000 alevins d'omble-chevalier (OFEV 2018).

Le poisson est une ressource qui participe à **l'attractivité du lac** : les pêcheurs de loisir proviennent de toute la région Rhône-Alpes Auvergne et de Suisse, voire au-delà. Ces espèces sont cuisinées depuis des générations par les populations locales ; une gastronomie spécifique et des pratiques culinaires se sont développées dans les territoires lacustres (Vernex et al. 2015). **Les poissons font ainsi partie de la culture et l'identité associées aux grands lacs alpins et participent à leur image.** Une partie des poissons pêchés composent les menus des restaurants à proximité des lacs, plus-value d'attractivité pour ces établissements.

Parmi les autres espèces animales et végétales exploitées dans les grands lacs alpins, nous retrouvons **les gibiers d'eau**². La chasse au gibier d'eau se pratique généralement sur la rive des lacs. L'avifaune (qui ne comprend pas que des espèces gibier) sur les grands lacs alpins est remarquable, avec la présence d'oiseaux présents toute l'année comme le canard colvert (*Anas platyrhynchos*), le cygne tuberculé (*Cygnus olor*), la foulque macroule (*Fulica atra*), le goéland leucophée (*Larus michaellis*) ou encore le grèbe huppé (*Podiceps cristatus*). D'autres espèces se rencontrent dans les zones humides et les berges uniquement en période d'hivernage, c'est le cas du grand cormoran (*Phalacrocorax carbo*) (quelques populations sédentaires apparaissent néanmoins autour des grands lacs), le fuligule milouin (*Aythya ferina*), la galinule poule d'eau (*Gallinula chloropus*), le garrot à oeil d'or (*Bucephala clangula*), le grèbe castagneux (*Tachybaptus ruficollis*), etc. Les zones humides et roselières autour des grands lacs alpins représentent des zones clés pour les migrations et sont protégées au titre de statut de Réserve Naturelle et par la convention de RAMSAR ; 80% des rives du lac d'Annecy sont placées en réserves de chasse et plus de 60% pour le Léman. Des conflits peuvent survenir entre acteurs de la chasse au gibier d'eau et de la conservation. Les pratiques de chasse au gibier d'eau ne seront pas étudiées de manière approfondie dans cette étude.

² Certains animaux et végétaux peuvent également être exploités par l'industrie pharmaceutique, mais cette activité n'est pas pratiquée dans les grands lacs alpins à notre connaissance.

❖ Les pratiques et techniques de pêche dans les grands lacs alpins

Les activités de pêche commerciale et de loisir s'exercent au moyen de techniques traditionnelles, parfois spécifiques aux grands lacs alpins et utilisent trois types d'engins différents : **les filets, les pièges et les hameçons**. Les définitions des engins présentées ci-dessous sont issues du règlement d'application des accords du 20 avril 1982 (et évolutions de ces accords depuis cette date) entre le Gouvernement de la République française et le Conseil Fédéral suisse concernant la pêche dans le lac Léman.

Les filets peuvent être flottants, lorsqu'ils sont suspendus dans l'eau et maintenus à la surface au moyen de flotteurs ou au contraire dormants s'ils reposent sur le fond, entre ces deux profondeurs (l'engin est dit allégé). Ces filets peuvent être utilisés en pêche active, manipulés par les pêcheurs lors du processus de capture, ou en pêche passive. Les filets sont alors tendus et installés dans l'eau mais non manipulés par les pêcheurs lors du processus de capture (le « *grand pic* » est un filet flottant passif, utilisé pour la pêche du corégone, « *les araignées* » sont des pics de fond passifs, utilisés essentiellement pour la capture du brochet). Ces filets sont en général tramailés avec trois nappes en toile souple superposées, de mailles différentes qui piègent les poissons capturés par les écailles et les ouïes. Ils peuvent aussi être simples, composés d'une seule nappe. Sur le Léman, sont également utilisées des « *sennes* », en pêche active, en forme de sac que l'on resserre sur les bancs de poissons pour les capturer (« *le grand filet* » et « *la monte* » utilisés pour capturer les perches). Un dernier type de filet existe, « *le carrelet* », pour la pêche aux appâts : il s'agit d'un filet carré maintenu tendu au moyen d'arceaux réunis à leur sommet, filet peu utilisé. Les sennes, les grands pics et les araignées composent les trois principaux types de filets utilisés par les professionnels sur les grands lacs alpins.

Trois pièges différents sont également utilisés par les professionnels et amateurs des grands lacs alpins : « *les nasses* » (nasse à poissons, nasse à écrevisses et nasse à tanches et brèmes) constituées d'un réseau de mailles tendues de façon rigide sur une armature. Elles sont posées sur le fond, un appât est généralement disposé à l'intérieur pour attirer les animaux. « *La bouteille à vairons* » (ou *gobe-mouche*) pour la capture d'appâts est constituée d'un récipient dont le fond concave est percé en son milieu. « *La balance à écrevisse* », dormante, passive, est constituée d'un ou plusieurs anneaux superposés, assemblés entre eux par du treillis ou un filet, reliée à la surface par un fil.

Les hameçons enfin sont montés sur des lignes pour la pêche active. Les lignes peuvent être flottantes et munies d'un flotteur fixe, plongeantes et plombées avec ou sans flotteur, et traînées derrière une embarcation (« *pêche à la traîne* » utilisée pour la capture des Omble-Chevalier, Truite et Brochet) ou non (« *pêche à la sonde* », « *la ligne gambe* » ou « *pêche au canin* » - suivant appellations - agrémentées de nymphes – appâts vivants ou artificiels – pour la capture des corégones, ombles ou perche). Ces lignes sont utilisées du bord de l'eau, en marchant dans l'eau ou depuis un bateau, essentiellement par les pêcheurs de loisir. Sur le Léman est pratiquée la pêche traditionnelle de « *la grande traîne avec écarteurs* », consistant en plusieurs traînes écartées les unes des autres pour la capture des brochets.

Chacun de ces engins de pêche est utilisé pour la capture spécifique de certaines espèces. Les filets sont ainsi composés de mailles plus ou moins grandes qui permettent d'attraper l'espèce cible recherchée et les spécimens qui ont l'âge optimal pour ne pas engendrer de pression

trop importante sur les populations de poissons. Les lignes sont munies d'hameçons de différents types en fonction de l'espèce recherchée. Dans les lacs, la pêche se pratique essentiellement en zone littorale sur la beine (zone du lac qui s'étend de la grève vers le large, formant une terrasse littorale immergée à faible pente) ou au bord du mont (zone de rupture de pente entre la beine et le mont), ou en zone profonde à partir du pied de la pente du mont en fonction des espèces recherchées.

Enfin, les pêcheurs disposent également d'une épuisette (« *filoché* ») pour les aider à récupérer le poisson capturé, ainsi qu'un « *sondeur* » pour détecter les bancs de poissons dans les lacs. Ces techniques traditionnelles ont grandement évoluées au cours du XXème siècle ; ces évolutions seront analysées en détail dans le chapitre 6.

2.2.3 Les ressources minérales des grands lacs alpins

L'exploitation des ressources minérales ne concerne **que le Léman**. Elle est assurée par le groupe Sagrave, entreprise créée en 1890 chargée d'extraire des granulats du fond du lac et d'assurer le transport de matériel sur le lac grâce à ses embarcations à fond plat. Cette société réalise également des travaux de dragage, de nettoyage des ports et de confection de digues. Deux sites d'extractions existent au niveau de l'exutoire des deux principaux tributaires du lac : le Haut-Rhône et les Dranses. Les granulats prélevés sont issus des matériaux charriés par les rivières et constituent une ressource économique importante, exploitée en tant que matériau de construction. Il existe également des carrières situées en bordure de lac, notamment celle de Meillerie dans la partie sud-est du lac, historiquement utilisée pour la construction des villes littorales. Elle représentait la carrière employant le plus d'ouvriers de Haute-Savoie au XIXè siècle (360 employés – Varaschin et al. 2014).

Les problématiques environnementales causées par l'activité de dragage des sédiments du Léman se posent en termes de remise en suspension des sédiments et polluants stockés dans le fond des lacs et de destruction des habitats littoraux, benthiques et le comblement des frayères de poissons pouvant impacter les activités de pêches.

2.2.4 Les paysages lacustres des grands lacs alpins

Le tourisme et les activités de loisir sont d'importantes sources de revenus pour les territoires étudiés et les grands lacs alpins sont une ressource clé de leur attractivité. **Un paysage lacustre** peut être défini en tant qu'arrangement d'objets visibles au sein d'une mosaïque d'écosystèmes, dont le lac est la composante principale, visible et perçue par un sujet à travers ses propres filtres, ses propres humeurs, ses propres fins (d'après Brunet et al. 1992, Amigues and Chevassus-au-louis 2011). Il n'y a pas de paysage **sans représentation visuelle**. Celle-ci peut être orientée horizontalement, oblique et constitue un ensemble qui embrasse une certaine étendue d'un territoire (Lévy and Lussault 2013). Il existe une grande variabilité de représentations du paysage selon les sociétés, les personnes, les cultures et les modes de vie : les paysages sont associés à des valeurs sociales et culturelles qui nous permettent d'éprouver des sentiments lorsqu'on les admire (Brunet et al. 1992). Ce processus génère de l'attractivité pour les pratiques touristiques et de loisir, que ce soit simplement pour contempler un "*beau*" paysage ou bien exercer une activité qui nous met en scène dans ce paysage.

Les grands lacs alpins présentent des caractéristiques qui valorisent la qualité de leurs paysages (Figure 2-6) : ce sont des **plans d'eau de grande taille**, pouvant procurer une sensation d'immensité (figures 5 – 6 – 8), **les eaux sont souvent calmes** (photos 5-6) mais peuvent être plus agitées, notamment au Léman parfois considéré à ce titre comme une mer intérieure depuis Forel. Les **paysages sont très changeants** (photographies 2, 5, 6, 8) en fonction du reflet du ciel sur le lac, de la couleur de l'eau, des propriétés physico-chimiques, des conditions climatiques : enneigement des moyennes montagnes à proximité par ex (photographie 2). Ces paysages sont également variés du fait de la **diversité des milieux naturels sur les rives**, comme les roselières (photographie 4), et **des points de vue**, à la fois sur le littoral (photographie 6), sur les moyennes montagnes en surplomb (photographie 8) que sous l'eau, rendus accessibles par la plongée (photographies 7 et 9). Le paysage des grands lacs alpins a une importance dans la culture locale, et inversement la culture et l'histoire locale ont une importance dans le paysage (photographies 1, 3). **La biodiversité** est une composante majeure qui donne en partie sa valeur au paysage. **Certaines activités** : la navigation, la pêche et les activités en contact avec l'eau mettent en mouvement ces paysages, montrent leur importance dans la vie locale et participent aux représentations qui leurs sont attachées. Les monuments, les centres urbains et éléments patrimoniaux culturels influent également dans la qualité des paysages. Les paysages sont donc des objets hybrides, déterminés par les écosystèmes et leur utilisation et aménagement par la société. Il est à ce titre souvent difficile d'évaluer l'importance des structures anthropiques dans la valeur et l'attractivité des paysages (Hall and Harkonen 2006).

Le paysage des grands lacs alpins est donc caractérisé par de **multiples composantes à la fois naturelles et anthropiques**. En conséquence, les effets des paysages lacustres sur le bien-être ne se limitent pas à la présence d'un littoral lacustre, d'une masse d'eau, mais peuvent s'étendre bien au-delà. La position des lacs **pied de montagne et moyenne montagne** procure des **zones de vue** en hauteur sur les lacs d'une distance importante. Les paysages sont également des sources d'inspiration pour l'art, la littérature, la peinture, etc... et procurent évidemment une valeur marchande influant sur le prix de l'immobilier (valeur hédoniste).

Les lacs au centre de ce paysage sont l'objet de représentations et d'enjeux dont la filière touristique est un activateur et un promoteur qui a su en faire de véritables lieux d'attraction touristique (Rudzewicz et al. 2020), parfois payants (télescopes aux points de vue), parfois privatisés (plages payantes). Cette mise en tourisme des grands lacs alpins structure aujourd'hui fortement les représentations associées à ces espaces. L'iconographie promotionnelle s'est focalisée sur l'image que renvoient ces **lacs naturels calmes, associés au bien-être, sur la multitude d'expériences sportives et d'aventures possibles mobilisées au travers d'images de grands espaces, la diversité des points de vue** (sur le lac, au bord du lac, dans les airs, dans les montagnes, en ville...), **les contrastes de couleurs** : bleu du ciel, vert des montagnes, bleu turquoise de l'eau des lacs et l'impact d'un bâti littoral ancien. (Rudzewicz et al. 2020).

CHAPITRE 2

Les grands lacs alpins : des objets qui font territoire

Ceci étant, cette vision doit être nuancée : les paysages promus par les acteurs du tourisme ne sont **pas toujours accessibles**, sont sujets à tensions et conflits autour des questions de l'urbanisation des rives, la suppression des zones humides ou encore la privatisation des berges et la sur-fréquentation des plages et du littoral en période estivale (Pelte et al. 2015, Nikolli 2018). Les paysages lacustres sont une composante du territoire lacustre qui est attaché à une certaine qualité et sont à préserver selon Brunet et al. (1992). Cette préservation prend place également au sein même d'un lac où la biodiversité, les sédiments, la géomorphologie du lac, les vestiges anthropiques sont des composantes des paysages immergés rendus accessibles par la plongée sous-lacustre et par la relative grande transparence des eaux.

LES DIFFERENTES FACETTES DES PAYSAGES DES GRANDS LACS ALPINS



Sources : photographies personnelles ; Association Léman Passion (ALP) photographies 7 et 9 ; image Flickr photographie 4
Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 2-6 : Mosaïque d'exemples de paysages des grands lacs alpins

❖ Les pratiques socio-culturelles et de loisir

La grande diversité de pratiques touristiques et de loisirs associées aux grands lacs alpins entretient des rapports divers avec le paysage lacustre. Etant donné la variabilité des éléments qui composent ce paysage lacustre et la diversité des rapports qu'entretiennent les usagers avec celui-ci selon leurs intérêts personnels, il est difficile de proposer une typologie de ces pratiques et il n'est pas possible non plus de réduire les pratiques associées au lac à celles qui sont **uniquement en contact avec l'eau**. Certaines pratiques socio-culturelles et de loisirs terrestres (ex : randonnée, cyclisme), ou aériennes (ex : parapente, ULM) sont favorisées par la présence du lac au sein du territoire.

Nous proposons alors d'organiser la présentation de **ces pratiques selon le type de rapport qu'elles entretiennent avec le paysage lacustre**. Cependant, nous considérons ce rapport « *pratiques – paysage lacustre* » comme un continuum d'intensité d'utilisation du lac en tant qu'objet physique (le lac comme support) et en tant qu'objet contemplatif (le lac comme décor) (voir Figure 2-7).

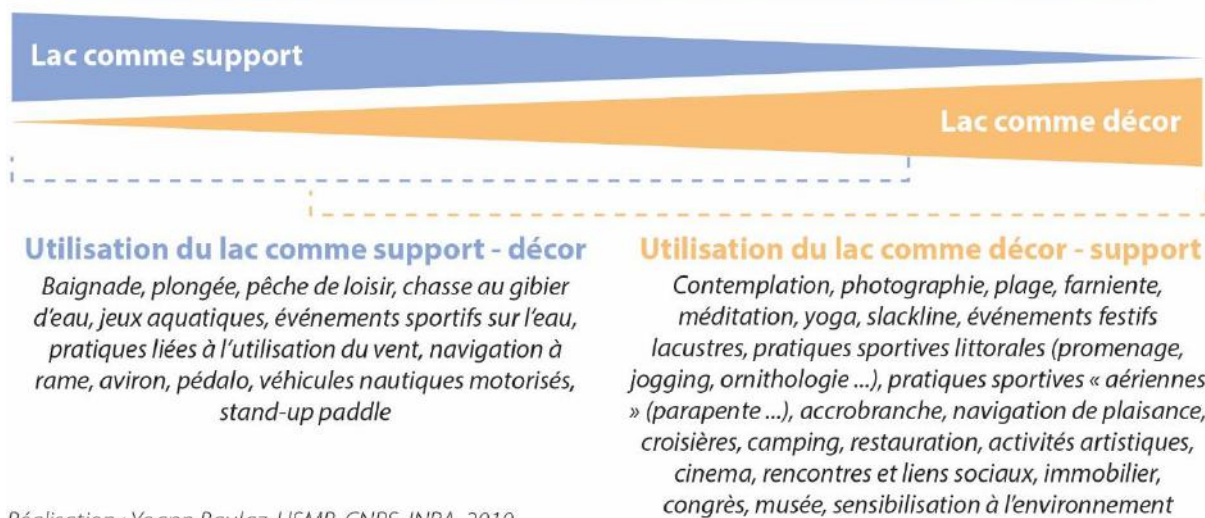
Le premier type de pratiques utilise le lac comme « **support – décor** ». Ces pratiques nécessitent un contact physique avec le lac car ici sont recherchées principalement les propriétés physiques, biologiques ou écologiques du lac, la beauté du paysage lacustre, les valeurs socio-culturelles attachées au lac étant recherchées dans une moindre mesure. Cela concerne essentiellement les activités nautiques et de loisirs ludiques et/ou sportifs en contact avec le lac ou les activités de prélèvement de bio-ressources.

Le deuxième type de pratiques utilise le lac comme « **décor – support** », c'est-à-dire qu'elles recherchent un contact visuel ou cognitif avec le lac, les propriétés physiques, biologiques ou écologiques lacustre étant recherchées dans une moindre mesure. Cela concerne des activités ludiques, pédagogiques, éducatives, de contemplation et toutes les activités sportives et de loisir terrestres et aériennes dont le lieu de la pratique est favorisé par la présence d'une vue et/ou une « *ambiance* » associée au lac.

Sur les grands lacs alpins, les différents usagers (habitants, résidents secondaires, touristes et excursionnistes) vont se partager l'espace. Les pratiques issues de la première catégorie, utilisant le lac comme objet physique, sont les plus prisées, avec notamment une prédominance des pratiques récréatives, en particulier la baignade et les activités de glisse sur l'eau, surtout en période estivale. Les lacs sont aussi connus pour la pratique de la navigation, de la pêche récréative, du parapente, du camping, pour la multiplicité d'événements festifs, culturels et sportifs. Certaines activités pédagogiques proposent une diffusion des connaissances et une sensibilisation sur l'importance écologique et biologique des milieux naturels associés aux lacs ; elles valorisent le patrimoine local et la présence des sites palafittiques. Nous retrouvons donc autour du lac une **concentration d'activités touristiques**, plusieurs fois combinées avec les pratiques de loisirs sportives, ludiques, pédagogiques, éducatives et festives, qui profitent du cadre scénique du lac pour leur réalisation. L'ensemble de ces pratiques sont favorisées par les caractéristiques lacustres (propriétés physiques, écologiques) et les valeurs et images associées aux grands lacs alpins qui vont offrir les conditions idéales à la pratique de ces activités, nombreuses de surcroît.

Cependant, certaines activités ont des rapports au paysage lacustre antagonistes dans le sens où elles recherchent des caractéristiques biophysiques particulières qui sont à l'inverse évitées par d'autres, ce qui peut entraîner des **tensions et conflits d'usages**. Les activités sportives de voile par exemple sont attachées à des conditions hydrodynamiques importantes (présence de vagues, de vent), qui seront évitées par d'autres pratiques, comme la pêche, le stand-up paddle. De plus, certaines pratiques nautiques vont non seulement gêner la pratique d'autres usagers mais aussi modifier les conditions biophysiques du lac en générant des vagues : le ski nautique, le déplacement à grande vitesse sur l'eau ou avec une embarcation à fort tirant d'eau. A noter : ces conflits semblent être davantage exacerbés dans les lacs de taille réduite, comme le lac d'Aiguebelette, que dans les lacs de grande taille comme le Léman, du fait d'un espace plus contraint (Rudzewicz et al. 2020).

LES RAPPORTS DES PRATIQUES SOCIO-CULTURELLES AU PAYSAGE LACUSTRE



Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 2-7 : Typologie des pratiques socio-culturelles associées aux grands lacs alpins

2.3 Les parties prenantes de la gestion des grands lacs alpins

Les grands lacs alpins sont ancrés dans des espaces complètement investis par l'homme et s'inscrivent au cœur de territoires dont ils constituent des éléments structurants. En retour, la diversité du patrimoine naturel et culturel au sein de- et autour de ces trois lacs a favorisé leur mise en valeur et leur attractivité. Ils sont d'une certaine manière « victimes » de ce succès et au fil du temps ont subi les impacts de cette attractivité : multiplication des déchets, des flux d'eaux usées, destruction d'habitats naturels, etc. qui ont nécessité la mise en place de réglementations, de mesures de correction des nuisances et d'encadrement des pratiques et donc de dispositifs *ad'hoc* associés à chaque problématique. Progressivement, de manière indépendante pour chacun des lacs, des unités de gestion se sont mises en place **pour organiser la gouvernance** du lac à l'échelle des BV et lutter contre les différentes pressions qui ont affecté chacun de ces écosystèmes et pèsent sur eux aujourd'hui encore, la gouvernance d'un lac pouvant se définir comme l'ensemble des processus et des institutions qui participent de la gestion politique d'un territoire lacustre (d'après Lévy and Lussault 2013).

Nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la gestion de l'eau évolue en Europe depuis le milieu du XXème siècle vers un modèle de gestion plus intégrée. **Les systèmes de gestion des**

grands lacs alpins se sont construits en parallèle, voire en amont, de ces évolutions réglementaires, afin de prendre en compte les spécificités induites par l'objet lac et la nécessité d'agir contre les pollutions. Certaines actions de gestion sur les grands lacs alpins ont, à ce titre, eu un rôle **précurseur** et ont servi d'exemple à l'échelle nationale pour le lac d'Annecy (Servettaz 1977), ou internationale pour le cas du Léman (Lestel et al. 2017). Nous avons choisi de présenter le fonctionnement de la gestion des grands lacs alpins au travers de la description et l'analyse du réseau d'acteurs impliqués dans la gouvernance des lacs (information dont l'analyse est indispensable pour définir les stratégies d'enquêtes associées à notre étude). Nous débuterons par la présentation des acteurs français impliqués dans la gestion des trois grands lacs, puis apporterons des informations complémentaires sur le statut spécifique transfrontalier du Léman.

Un acteur peut être défini en tant que « *celui qui agit* » (Brunet et al. 1992). Sur un territoire, les acteurs agissent sur l'espace selon leurs moyens et leurs stratégies, qui dépendent en partie au moins de leurs représentations et de leurs intentions (d'après Lévy and Lussault 2013). **Les acteurs vont avoir des effets différenciés sur l'espace et peuvent jouer un rôle important dans la gestion des grands lacs alpins.** Les acteurs de la gestion des lacs sont toute personne et institution qui agit, d'une manière ou d'une autre, sur les lacs. L'expression de "*partie prenante*" de la gestion est un terme un peu plus large que "*acteur*", car certaines parties prenantes peuvent être « *observatrices de la gestion* », par exemple et y prennent part indirectement.

Ces parties prenantes peuvent être organisées en quatre grands groupes, en interactions (Figure 2-8). Les acteurs décideurs vont prendre des décisions en matière d'aménagement du territoire, de gestion de l'eau et des milieux naturels et peuvent être considérés comme des "**producteurs d'espaces lacustres**" (Maussin 2004, Lévy and Lussault 2013). Ils regroupent les institutions rattachées à l'Etat, les collectivités territoriales, organismes publics, techniques, etc. Les acteurs "**consommateurs d'espaces lacustres**" sont les usagers des espaces lacustres, les populations résidentes, les touristes, les acteurs économiques. Ils suivent, s'adaptent, et font évoluer les décisions prises par le premier groupe (Lévy and Lussault 2013). Ces deux groupes principaux interagissent avec les « **observateurs de la gouvernance** ». Composés de membres du monde associatif et académique, ces derniers mènent des examens attentifs du fonctionnement du territoire lacustre et participent aux décisions avec un rôle de conseil, d'expertise ou de représentation d'intérêts spécifiques. Enfin le dernier groupe est très important pour le fonctionnement de la gouvernance : les acteurs « **coordinateurs de la gouvernance** » qui permettent de faire le lien entre l'ensemble des acteurs, de guider les prises de décision et leur application concrète.

Bien souvent, les acteurs de chacun de ces groupes font partie intégrante du second : les décideurs producteurs d'espace peuvent également être des consommateurs et pratiquants des lacs. Chacun de ces acteurs possède des rapports spécifiques aux lacs, un système de valeurs, et des besoins qui ne sont pas partagés par tous. Ces différences témoignent de la **complexité des rapports** entre les différentes parties prenantes et des difficultés dans les prises de décision concertées qui peuvent en être issues, d'où la nécessité de rechercher des compromis dans les décisions.

CHAPITRE 2

Les grands lacs alpins : des objets qui font territoire

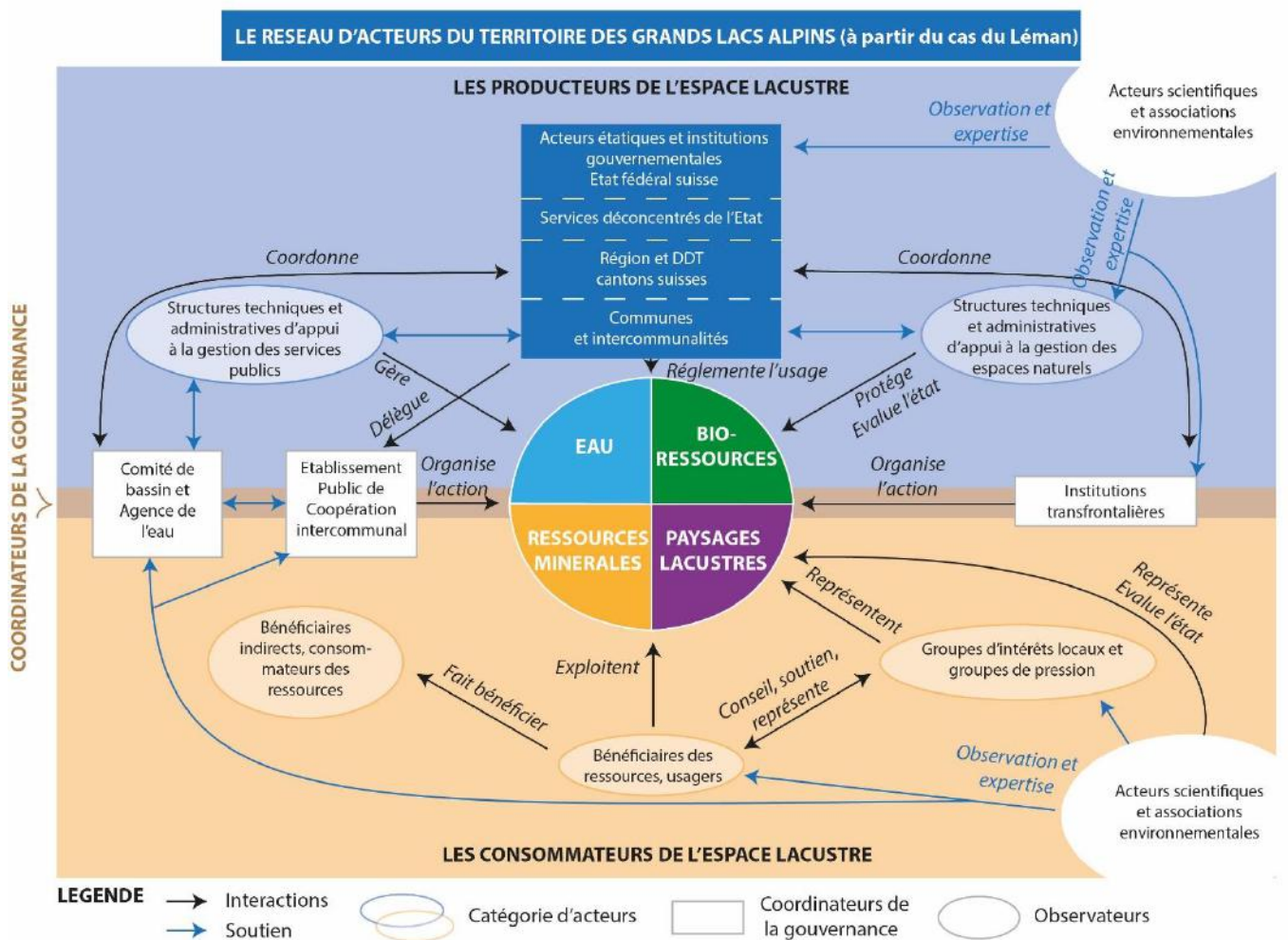


Figure 2-8 : Réseau d'acteurs de la gestion des ressources des grands lacs alpins

2.3.1 Les acteurs « producteurs de l'espace lacustre »

Les acteurs producteurs de l'espace lacustre intervenant dans les prises de décisions dans la gestion des territoires lacustres sont majoritairement des **acteurs institutionnels**, définis comme la plus petite unité d'action d'un système politico-administratif (Easton, 1965 in Maussin 2004). Ils regroupent l'ensemble des institutions gouvernementales, administratives, juridiques qui relèvent du droit public, tels que l'Europe, l'Etat ou les collectivités territoriales nationales. Ces institutions sont présentées en Annexe 2-1. Elles ont un rôle important car elles décident, votent, hiérarchisent, planifient, rédigent des lois et règlements et veillent à leur respect par les usagers, voire financent les actions à mettre en place sur les territoires. La **Direction Départementale des Territoires (DDT)** est notamment un organisme décisionnaire important, en tant que propriétaire des grands lacs alpins français (voir Encadré 2-1) et représentant de l'état.

Ces acteurs institutionnels s'appuient sur deux groupes d'acteurs que nous avons nommés les « *gestionnaires de services aux collectivités* » et les « *structures techniques de gestion des espaces naturels* ». Le premier groupe est composé de l'ensemble des agents communaux qui assurent les fonctions de service associées aux ressources lacustres. Au niveau des ressources

en eau, ces acteurs assurent le fonctionnement et l'entretien des STEP et stations de pompage d'eau potable. Pour les bio-ressources, on peut mentionner les maîtres d'œuvre et d'ouvrages de protection des milieux naturels et de la biodiversité, sous tutelle des **Etablissements Publics de Coopération Intercommunal** (EPCI) (présentés en tant que « *coordinateurs de la gestion* » ici). Les acteurs de la mise en place et du suivi des projets de conservation font également partie de ce groupe, il peut s'agir de bureaux d'étude privés qui interviennent ponctuellement. La gestion des services liés au tourisme (et paysage lacustre) est assurée par les offices de tourisme qui coordonnent les acteurs du tourisme, assurent la gestion de certains équipements collectifs et la promotion touristique à l'échelle des communes ou intercommunalités.

Chaque type d'acteurs producteurs du territoire lacustre a été consulté dans le cadre des études spécifiques sur la gestion des lacs et des ressources associées aux activités de pêche, d'eau et des paysages lacustres.

Encadré 2-1 : Un acteur décisionnel essentiel : la DDT

La DDT est une unité interministérielle qui dépend du préfet. Elle met en œuvre dans le département les politiques publiques d'aménagement durable des territoires et notamment est en charge de coordonner l'activité sur les lacs. Cette instance représente l'Etat et en tant que propriétaire des grands lacs alpins, elle est alors le gestionnaire du domaine public sur les lacs et prend les décisions finales en matière d'aménagement et de gestion. Elle veille notamment à décliner localement les réglementations nationales en matière d'usages et instruit les demandes d'autorisation d'occupation du domaine public fluvial temporaires (événements festifs, travaux, actions scientifiques...) ou permanentes (ports, pontons, aménagements divers), veille au respect des règlement nationaux et spécifiques à chaque lac (règlement de navigation, des usages, de la bande de rive, et également en matière d'eau, de pêche et de chasse), l'entretien du plan d'eau et de ses berges (balisage, enlèvement d'obstacles, entretien d'ouvrages...). La DDT dispose d'un droit de police pour faire respecter ces dispositions (www.haute-savoie.gouv.fr ; Klein et al, 2015).

2.3.2 Les acteurs « consommateurs de l'espace lacustre »

Les usagers des grands lacs alpins sont le deuxième groupe d'acteurs importants de la gestion. Ces acteurs prélèvent les ressources des grands lacs alpins et sont aussi les partenaires des projets de gestion, de valorisation des territoires lacustres, et de préservation, réhabilitation de la qualité de l'eau et des habitats naturels. Ils jouent un rôle d'aménagement et d'entretien des paysages lacustres, de promotion des projets auprès de la population et des touristes. Les usagers ont un rôle à jouer également en tant qu'observateurs du lac et lanceurs d'alertes face aux atteintes aux qualités de l'eau et des milieux. Ces structures ont un rôle décisionnel faible, mais sont impliqués ou consultés dans les processus de concertation pilotés par les acteurs coordinateurs.

Trois grands types d'acteurs consommateurs de l'espace lacustre sont à prendre en compte (Figure 2-8) : **les bénéficiaires des ressources lacustres et usagers** qui tirent profit directement des ressources des grands lacs alpins, **les bénéficiaires indirects et les consommateurs** des ressources qui achètent les produits aux bénéficiaires directs (les populations riveraines et touristes sont inclus dans cette catégorie), enfin **les groupes d'intérêts locaux et groupes de pression** qui représentent les intérêts des usagers des lacs, les intérêts socio-économiques et environnementaux dans les processus de gouvernance ; ils fournissent également un rôle de conseil auprès des bénéficiaires. Ces acteurs sont présentés par type de ressources en Annexe 2-2.

Les acteurs impliqués dans la gestion des grands lacs alpins ne regroupent pas uniquement ceux qui bénéficient directement des ressources des lacs, mais également les acteurs des BV. Les industries, collectivités territoriales, agriculteurs et usagers du BV et leurs actions sur le MUS du BV sont donc présents dans les processus de gouvernance.

2.3.3 Les acteurs observateurs (scientifiques et de la conservation des milieux naturels)

Les acteurs observateurs ont un rôle de suivi de l'état des écosystèmes, de veille et de porte-parole des acteurs « *non humains* » : le lac, les paysages lacustres et la biodiversité (Encadré 2-2). Ces acteurs ont un rôle d'experts en conseillant les décideurs et aident à faire des choix de gestion éclairés. Par leurs actions, ils « *représentent le lac et les qualités de l'eau et des milieux, la biodiversité* », ce sont des acteurs majeurs de la gestion.

Eviter les conflits autour de la gestion des ressources lacustres nécessite l'intégration de données hydrologiques, écologiques, sur la qualité de l'eau, sur les dimensions sociales et de porter à connaissance la nature des problèmes (Olivaux 2007). **Les acteurs scientifiques et associatifs** de protection de l'environnement jouent ainsi ce rôle et possèdent une place cruciale dans la diffusion des connaissances. Ces acteurs mènent des diagnostics globaux de l'état des lacs et/ou s'intéressent à des questions spécifiques qui renseignent la gestion. La connaissance des milieux est une condition préalable indispensable à la prise de décision. D'autres acteurs importants pour les grands lacs alpins sont les acteurs associatifs, représentants d'usagers et les structures impliquées dans la conservation des milieux naturels.

Un acteur historique du suivi des grands lacs alpins est encore bien présent : **la station d'hydrobiologie lacustre** (SHL) de Thonon-les-bains devenue UMR CARTEL (Unité Mixte de Recherche Centre Alpin sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques) : centre de recherche dépendant de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) créé il y a plus de 70 ans sur les bords du Léman (création 1946). C'est le seul laboratoire de recherche spécialisé en limnologie en France. Ses objectifs sont les suivants : (1) fournir des éléments de connaissance scientifique en écologie, limnologie sur le fonctionnement des grands lacs alpins et lacs d'altitude en relation avec leurs BV, (2) élaborer des indicateurs d'état et d'évolution des milieux aquatiques et (3) développer des méthodes d'aide à la gestion des ressources piscicoles. Depuis sa création, le centre vient en appui aux politiques publiques ayant permis la restauration des grands lacs alpins et effectue des mesures bimensuelles avec plus de 20 indicateurs biologiques et physico-chimiques sur les grands lacs alpins. Le suivi a notamment

permis un transfert d'informations et de connaissances entre les lacs sur les mesures à adopter lors de la lutte contre l'eutrophisation. Les données recueillies sont aujourd'hui réunies à l'observatoire des lacs alpins (observatoire OLA – <https://si-ola.inra.fr/>). Les compétences scientifiques accumulées ont permis une reconnaissance internationale de la SHL (UMR CARRTEL 2018). La région concentre également un grand nombre d'Universités, écoles et laboratoires partenaires de programmes de recherches sur les lacs : l'Université Savoie Mont-Blanc, l'Université de Genève et l'Institut Forel, l'Université de Grenoble, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), etc.

Encadré 2-2 : Quelques exemples de représentants des acteurs "non-humains" sur le Léman

- La Ligue Protectrice des Oiseaux (LPO) participe à l'acquisition de données sur les populations d'oiseaux d'eau des grands lacs alpins,
- La Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature (FRAPNA, depuis peu FNE) fait partie d'un réseau national qui œuvre en faveur de la protection de la nature par le biais d'actions variées sur le terrain et de sensibilisation aux populations sur la valeur de la nature de la région.
- L'Association pour la Sauvegarde du Léman (ASL) existe depuis les années 1970 et a eu un impact significatif dans les années 1980 auprès des élus du BV du Léman afin de les sensibiliser à l'épuration des eaux usées urbaines et la protection du lac. La particularité de cette association est d'être transfrontalière entre la Suisse et la France. Son comité comprend plusieurs spécialistes scientifiques du lac.
- L'Association Léman Passion (ALP) a vu le jour en 2017 et œuvre spécifiquement pour la protection du Léman. Elle regroupe essentiellement des passionnés, usagers, plongeurs et scientifiques et mène des actions de lutte contre les déchets sur les plages et au fond du lac, contre les espèces invasives et mène des actions de sensibilisation et de portée à connaissance des citoyens, des informations scientifiques sur le fonctionnement du Léman et son état.

2.3.4 Les structures de coordination de la gestion

Chaque acteur impliqué dans les prises de décisions sur la gestion des grands lacs alpins possède **une aire de compétence** spécifique et plus ou moins étendue sur le territoire. Celle-ci est délimitée par les frontières administratives de l'Etat, la région, les intercommunalités, les communes ; pour d'autres acteurs, elle est définie par les limites naturelles des milieux remarquables comme des zones naturelles protégées, d'autres encore s'inscrivent dans les limites biophysiques des BV, ou sont centrées sur le lac et/ou son littoral. Le domaine de compétence des acteurs peut être très différent entre ceux qui gèrent des **espaces administratifs** (communes, département, région...) et ceux qui gèrent **des objets** (une réserve naturelle, un BV, un lac ...), **des ressources** (eau potable, ressources piscicoles, hydroélectricité ...), ou **des activités** (pêche, tourisme, assainissement ...) et de ce fait, les espaces lacustres sont perçus différemment selon les catégories d'acteurs concernés. A l'échelle étatique ou européenne, les grands lacs alpins peuvent être perçus comme des milieux naturels remarquables sur le plan écologique et de biodiversité ou peuvent évoquer des espaces touristiques majeurs ; à l'échelle régionale ce sont des pôles économiques à protéger en

priorité, des stocks d'eau pour les usages à l'aval des lacs, et plus localement les lacs représentent une ressource majeure pour le développement territorial, et sont associés à un patrimoine naturel, culturel et social qui participe au bien-être des habitants vivant autour (Maussin 2004). En conséquence, ces grands lacs vont être associés à des représentations diverses en fonction des acteurs et vont répondre à des besoins spécifiques pouvant être antagonistes entre les différentes parties prenantes.

L'enjeu principal de la gestion réside alors dans la recherche de « *compromis* » entre protection et restauration des milieux naturels, respect des besoins de chaque acteur, et développement économique et territorial. Pour faire face à la complexité d'échelles, d'acteurs et enjeux, et organiser la concertation, voire la coopération entre acteurs et usagers des lacs, **des structures de coordination de la gestion** sont nécessaires. Au cours du XX^{ème} siècle, de telles structures ont été créées pour gérer spécifiquement les grands lacs alpins et leur BV. Ces structures, nous le verrons dans le chapitre 6.2 ont émergé en réponse à la même problématique de pollution, mais ne sont pas toutes de même nature. Le pouvoir décisionnel qui leur a été confié et leurs modalités d'actions sont alors très différents d'un lac à l'autre.

Trois types de coordinateurs de la gouvernance des grands lacs alpins peuvent être identifiés. En premier lieu, **les organismes de bassins**, qui suivent une organisation spatiale délimitée par les six grands bassins hydrographiques des principaux fleuves français et permettent de coordonner la gestion à cette échelle. L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse intervient dans la gouvernance des grands lacs alpins. Cet organisme mobilise et fédère les acteurs producteurs et consommateurs de l'espace au niveau des bassins. Elle est responsable de la planification, de l'animation des réseaux d'acteurs au travers de la construction d'accords-cadres pour définir les engagements et objectifs à atteindre. Elle fournit des moyens financiers pour la réalisation des actions de préservation et de restauration de l'eau à l'échelle des BV. Les SDAGE, SAGE et contrats de bassins (chap 1.3.4) sont les outils contractuels mis à disposition des collectivités territoriales pour appliquer localement la politique nationale/européenne en matière de gestion de la ressource en eau. Les agences de l'eau veillent à leur mise en œuvre (Maussin 2004). A l'échelle des grands lacs alpins, les agences de l'eau accompagnent les EPCI et les maîtres d'ouvrage dans la mise en place des actions de gestion et dans l'information et la sensibilisation du public à la protection des écosystèmes lacustres (www.eaurmc.fr).

Le deuxième type d'acteur coordinateur est représenté **par les EPCI**, structures administratives de regroupement de communes créées dans le but de mutualiser les compétences. Il existe deux communautés d'agglomérations dans le BV du lac du Bourget (Communauté d'Agglomération – CA - du lac du Bourget – CA Grand lac ; la CA de Chambéry Métropole – Cœur des Bauges), une communauté d'Agglomération (CA Grand Annecy) et une Communauté de Communes (CC – des sources du lac d'Annecy) dans le BV du lac d'Annecy, et pour le Léman : la CA de Thonon Agglomération, la CC du pays d'Evian – vallée d'Abondance, et 27 districts³ en Suisse.

Il existe des syndicats mixtes, des EPCI avec des compétences multiples spécifiques qui jouent un rôle important dans la gestion des lacs. Le Comité intersyndical pour l'Assainissement du lac du Bourget (**le CISALB**) possède des compétences transférées des deux agglomérations du

³ Les districts correspondent à la subdivision territoriale intermédiaire entre les cantons et les communes

BV du lac et a pour mission : (1) la préservation des milieux et le maintien du développement socio-économique en lien avec le lac, (2) la mise en réseau des acteurs, (3) la gestion et le suivi des qualités de l'eau et des milieux du lac et de son BV, (4) la coordination de la gestion piscicole, (5) la gestion de la conduite de détournement des eaux usées traitées vers le Rhône, (6) l'information à la population et l'accueil du public. Le CISALB s'appuie essentiellement sur le contrat de bassin du lac du Bourget pour organiser et planifier la gouvernance du lac, il a un rôle de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage. Ces éléments en font une structure très dépendante des structures décisionnelles. Sur le lac d'Annecy, le Syndicat Intercommunal du Lac d'Annecy (**le SILA**) a des compétences plus étendues en matière de gestion du lac, avec un fonctionnement en régie, ce qui lui confère plus d'autonomie dans la prise de décision et la mise en place d'actions concrètes. Ce syndicat mixte a un pouvoir de décision, de maîtrise d'œuvre et d'ouvrage sur l'assainissement, l'aménagement, la protection et la restauration du lac, l'accueil du public, la gestion des déchets et de certains équipements pour la navigation et la voie verte. Il assure donc **des missions de co-gouvernance** avec l'Etat (représentant : DDT 74) sur le lac d'Annecy, et a un rôle important de mise en réseau des acteurs et de résolution des conflits d'usages.

Le caractère transfrontalier du Léman et l'étendue de son BV supposent l'existence d'institutions transfrontalières pour assurer les relations et coordonner les actions entre les acteurs des deux pays. La Commission Inter-gouvernementale pour la Protection des Eaux du Léman (**CIPEL**) est un organe franco-suisse de coordination de la politique de l'eau à l'échelle du BV du Haut-Rhône à partir de la frontière suisse à l'aval du Rhône. Son aire de compétence comprend donc le BV du Léman et celui de la rivière de l'Arve en Haute-Savoie. Les missions de la CIPEL sont (1) la veille et le suivi des eaux du Léman et du BV, (2) organiser et faire effectuer les recherches nécessaires pour déterminer la nature, l'importance, les sources des pollutions, ainsi que les actions pour y remédier, (3) mettre en réseau les parties prenantes, (4) coordonner la politique de l'eau à l'échelle du bassin lémanique, (5) informer la population, (6) émettre des recommandations de gestion aux gouvernements français et suisse. Contrairement aux CISALB et le SILA, la CIPEL n'a pas de compétences de maîtrise d'ouvrage, de maîtrise d'œuvre ou décisionnelles. Dernier acteur transfrontalier qu'il convient de mentionner ici : le **Conseil du Léman**, bien qu'il ait un rôle indirect sur la gestion du lac. Il s'agit d'une structure politique de concertation franco-suisse visant à promouvoir les relations entre les deux pays et initier des projets en coopération dans le domaine de l'économie, le tourisme, la mobilité, la jeunesse et la culture et l'environnement.

A noter que, bien que les grands lacs alpins soient associés au système fluvial du Rhône, il n'existe pas de coordination franco-suisse à l'échelle du fleuve. Il est géré selon une vision sectorielle par les deux concessionnaires d'hydro-électricité français et suisse du fleuve : la **Compagnie Nationale du Rhône (CNR)** en France et les **Services Industriels de Genève (SIG)** en Suisse. En ce sens, le fleuve a pendant longtemps été considéré comme un objet de production hydroélectrique. Cependant, une **gestion intégrée à l'échelle du BV du Rhône** prenant en compte les enjeux du fleuve et du lac, devient de plus en plus nécessaire du fait des changements climatiques et de leurs impacts à venir sur les régimes hydrauliques (Pflieger and Brethaut 2012).

Les acteurs que nous venons de présenter sont au centre de la gouvernance des grands lacs alpins. C'est autour d'eux que gravitent les parties prenantes de la gestion, y compris les représentants d'usagers et les informations mobilisées pour la restauration des grands lacs

alpins. Certains auteurs ont proposé des termes pour qualifier ces organismes à l'interface science – gestion et science – société. Les « **boundary organization** » (organisations frontières) sont des structures coordinatrices de la gestion, dont le rôle est de mettre en relation les acteurs, fournir une plateforme d'échanges pour orienter les prises de décisions et piloter le suivi des écosystèmes (Guston 2001, Gustafsson and Lidskog 2018). Afin de mener à bien ce rôle de coordination, les structures mettent en place des outils de coordination de la gestion. Les « **boundary objects and standardized packages** » (objets frontière et « ensembles/paquets » standardisés) sont des outils opérationnels qui permettent de lier deux mondes sociaux différents, comme le monde scientifique et les décideurs ou entre les décideurs et les populations (ex : rapports de synthèse des suivis, plans d'actions, moyens numériques de partages de données, modèles conceptuels...). La mobilisation de ces outils dans la gouvernance d'un grand lac facilite les collaborations : ils permettent de synthétiser les connaissances et servent d'outils de référence sur lesquels les acteurs peuvent s'appuyer pour leurs délibérations, prendre des décisions et planifier des actions (Gustafsson and Lidskog 2018).

Les coordinateurs de la gestion sont consultés dans le cadre de cette étude, du fait de leur rôle structurant dans l'histoire de la lutte contre les pollutions et le fonctionnement des territoires lacustres.

2.4 Le lac Saint-Pierre : un site d'étude des territoires lacustres hors du contexte alpin

Dans une perspective d'analyse du fonctionnement et de l'évolution des territoires lacustres, il nous a paru intéressant de tester les modèles développés dans le cadre de cette étude sur un site d'étude très différent des grands lacs alpins et soumis à des perturbations liées aux pollutions diffuses. Pour cela, nous avons choisi le Lac Saint-Pierre (LSP) au Québec, lac de plaine peu profond, inséré au sein du réseau fluvial du fleuve Saint-Laurent. Une description sommaire du contexte géographique et historique, en lien avec les problématiques de pollution qui affectent ce lac est proposée dans les paragraphes suivants. Un ensemble cartographique est visible en Annexe 2-3 qui complète cette partie (« *la cartothèque du lac Saint-Pierre* »).

❖ Contexte géographique et historique du territoire lacustre du lac Saint-Pierre

A l'occasion d'un voyage en 1603 en naviguant à travers le LSP, le colonisateur et grand navigateur français Samuel Champlain reconnaît déjà la grande richesse et productivité du lac, notamment piscicole, et par la présence d'arbres fruitiers et vignes, prairies, gibier et animaux sauvages sur les îles qui le bordent. Il précise même que « *La pescherie du poisson y est plus abondante qu'en aucun lieu qu'eussions vu* » (De Koninck 2000 in Laverdière 1870). Champlain va nommer le lac en référence au jour de la Saint-Pierre, le 29 juin, date à laquelle il traversa le lac pour la première fois.

Le LSP est un **lac d'origine glaciaire**, formé il y a 12 500 ans du retrait de la calotte glaciaire du Québec permettant aux eaux marines de s'engouffrer dans les basses terres du futur fleuve Saint-Laurent et de former la Mer de Champlain. Le LSP s'est formé au rétrécissement de cette mer par le soulèvement du socle rocheux libéré du poids des glaces qu'il supportait. Pendant environ 4 000 ans, l'eau douce a progressivement remplacé l'eau salée et le niveau d'eau a diminué pour dessiner la physionomie du système des Grands Lacs et du Saint-Laurent que l'on connaît aujourd'hui (MDDEFP 2013).

Le LSP est un **lac fluvial du Saint-Laurent** qui prend sa source dans le lac Ontario et s'écoule sur près de 400 km jusqu'à Québec, où il s'élargit pour se jeter dans l'Océan Atlantique (Annexe 2-3, carte 1). Avec les lacs Saint-François et Saint-Louis, le LSP est l'un des 3 grands lacs situés sur ce fleuve. Le LSP est le plus imposant des trois : il s'étend sur près de 30 km de long et 13 km de large et couvre une superficie d'environ 500 km², avec une **profondeur moyenne faible** de trois mètres. Dans sa partie amont se trouve « *les cent îles du LSP* » (De Koninck 2000) : l'archipel de Sorel, un système d'îles, îlots et canaux qui partagent le Saint-Laurent en trois chenaux principaux naturels avant qu'il ne se jette dans les étendues d'eaux lacustres (MDDEFP 2013).

L'histoire des usages de ce lac est intimement liée à celle de la colonisation de la province du Québec. Le LSP sera décrit à l'occasion du second voyage en Amérique par Jacques Cartier (1535) comme un obstacle majeur à la navigation dans le Saint-Laurent de par sa faible profondeur naturelle. La navigation océanique s'arrêtait alors à Québec, le cabotage permettait de prolonger la navigation commerciale sur le fleuve Saint-Laurent vers l'Ouest en direction de la ville de Montréal. Avec l'arrivée des bateaux à vapeur à fort tirant d'eau au début du XIX^{ème} siècle, les marchands de Montréal sont de plus en plus contraints par la présence du lac et rédigent une pétition au ministère des Travaux Publics du Canada demandant d'approfondir le fleuve au niveau du lac pour étendre le commerce et le développement de la ville de Montréal. La décision fut prise en 1841 de creuser un chenal droit à travers le lac. Ce dragage au centre du LSP fut la première action d'une longue série visant à creuser une voie maritime commerciale qui permettrait de rejoindre l'Atlantique à la ville de Montréal et aux grands lacs Américains (Côté and Morin 2003). **Le chenal atteint aujourd'hui la profondeur de 11,3 m, il divise longitudinalement le lac et canalise l'écoulement de ses eaux** (MDDEFP 2013).

Situé à un emplacement stratégique au cœur de la plaine fertile du Saint-Laurent entre Québec, Trois-Rivières et Montréal, au confluent du fleuve Saint-Laurent et de la rivière Richelieu et au cœur d'un archipel de centaines d'îles basses en amont, le lac a joué un rôle stratégique pour la défense du territoire québécois, tant pour les populations autochtones, que pour les colons français et anglais. Cet emplacement sera également choisi lors de la seconde guerre mondiale pour implanter des industries métallurgiques, chantiers navals et de fabrication de canons et ainsi profiter de la proximité d'abondantes sources de minerais et d'électricité. Ces industries perdureront après la guerre jusque dans les années 1980 et le lac sera utilisé jusqu'en 2000 comme zone de test de tirs d'obus (Godmaire and Sauvé 2005). **Le positionnement du lac, sa profondeur et la physionomie de l'ensemble lac – îles - littoral ont représenté un défi majeur pour le développement du Québec mais sont aussi parmi les caractéristiques écosystémiques du lac les plus anciennement utilisées et convoitées.**

Le BV de ce lac représente plus de 60% de de la superficie du Québec (990 000 KM² - Annexe 2-3, cartes 2 et 3). Il touche 11 régions administratives, 58 Municipalité Régionales de Comté et 654 municipalités où vivent environ 3,3 millions d'habitants (MDDEFP 2013, TCRLSP 2016). En tête de BV du fleuve, les eaux du lac Ontario drainent la pollution du bassin des Grands Lacs américains et canadiens où se concentrent de grandes agglomérations, une forte activité industrielle, ainsi que de grandes superficies en culture intensive de maïs dans les états du nord des États-Unis. Entre le lac Ontario et le LSP, le fleuve Saint-Laurent reçoit les **effluents urbains** de plusieurs millions de personnes et entre Montréal et le LSP, s'ajoutent les eaux de plus de la moitié des **terres cultivées** du Québec, apportant phosphates, nitrates, pesticides et sédiments. Localement, le lac reçoit les **effluents industriels** de la ville Sorel-Tracy et les effluents de plusieurs stations d'épuration (MDDEFP 2013). Malgré la multiplicité des sources potentielles de pollutions, l'eau est de bonne qualité à la sortie du lac Ontario jusqu'en amont de Montréal, la pollution du BV des Grands Lacs est largement confinée dans ces derniers. C'est au sortir de Montréal et au niveau du LSP que la qualité des eaux se détériore : le lac est situé sur **la portion la plus urbanisée et agricole du fleuve**, les 11 tributaires de ce lac fournissent une quantité des plus importantes en phosphore de l'ensemble du BV du fleuve Saint-Laurent (Patoine 2017) (Annexe 2-3 – carte 4).

Au fil du temps, le LSP est devenu le lac **le plus pollué du Québec** (Francoeur 2004 - presse). On y retrouve des pollutions au **métaux lourds** et pollutions chimiques d'origines industrielle et agricole, **des pesticides, des pollutions ponctuelles aux hydrocarbures** causées par le passage des navires marchands et pétroliers, **des micropolluants médicamenteux** et **contaminations par micro-organismes pathogènes** non dégradés par les stations d'épuration, des **cyanobactéries benthiques**, des excédents de phosphore et de **matières en suspension** en réponse à la spécialisation de l'agriculture intensive de cette partie du Québec et **l'érosion littorale** qui provoquent un envasement généralisé du lac (Francoeur 2004 - presse).

Depuis 1950, les pratiques agricoles et les MUS du BV ont profondément évolué. L'agriculture québécoise s'est à la fois intensifiée et densifiée, l'urbanisation s'est étendue et les paysages cultureux **dans la zone littorale**⁴ du lac ont subi des transformations majeures qui se sont manifestées par un passage marqué des cultures pérennes de pâturages laitiers vers les cultures annuelles de maïs et soja (TCRLSP 2017) (Annexe 2-3, carte 5 et 7, schéma 6).

L'ensemble de ces pressions portent atteinte à la riche biodiversité du lac sachant que le lac représente la plus importante halte migratoire des oiseaux de tout l'est du Canada (MDDEFP 2013) et que la région affiche la plus grande biodiversité piscicole de tout le système fluvial du Saint-Laurent (Mingelbier et al. 2008 in Dauphin and Jobin 2016). Le LSP représente **l'un des piliers du patrimoine naturel du Québec**, reconnu au niveau international par la Convention de Ramsar et en tant que Réserve mondiale de la biosphère par l'Unesco. Son patrimoine culturel et historique est reconnu car inséré au territoire francophone du Québec et foyer de la colonisation du Canada (De Koninck 2000).

⁴ zone qui s'étend depuis le centre du lac jusqu'à la ligne des hautes eaux déterminée par la limite des inondations de récurrence de 2 ans. D'une superficie de 28 061 ha (hors cours d'eau et plan d'eau), il s'agit de la plus étendue plaine d'inondation d'eaux douces du Québec – TCRLSP, 2017

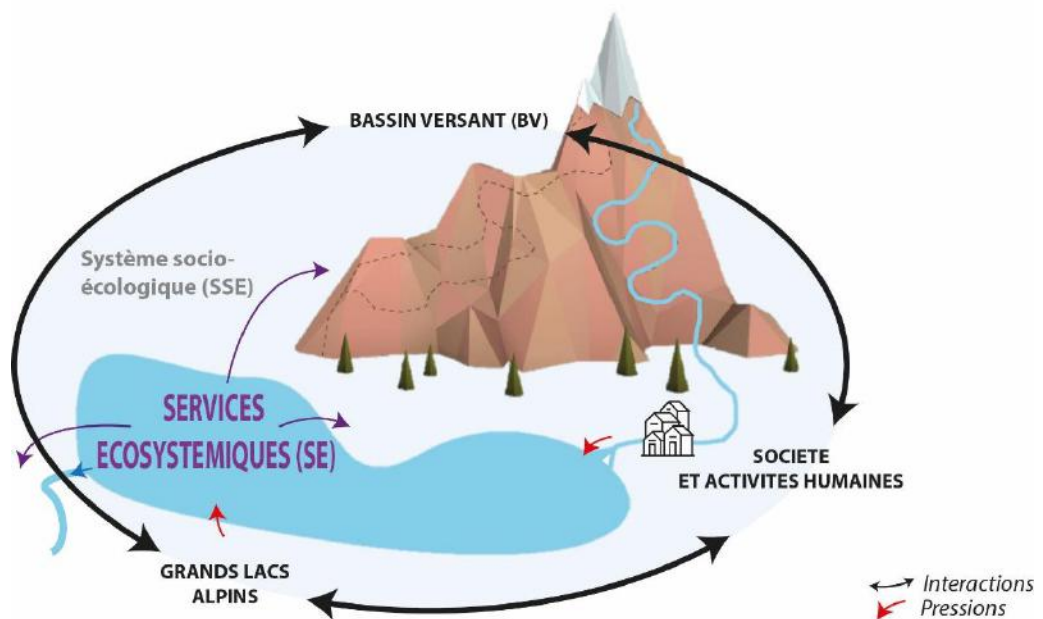
Les trajectoires écosystémiques et humaines de ce territoire sont intrinsèquement liées. Elles sont porteuses d'enjeux économiques, de conservation, culturels et historiques majeurs qui font du LSP **l'un des socio-écosystèmes les plus complexes du Québec**. Les changements qui ont eu lieu dans la période récente ont transformé ce socio-écosystème et ont amené de nombreuses perturbations des services écosystémiques et usages lacustres. En conséquence, la mise en place de réponses sociétales à ces impacts et la constitution d'un système de gouvernance visant à encadrer un développement durable de ce territoire, et apporter des solutions aux nombreuses problématiques du lac, est toujours en construction.

Conclusion du chapitre 2

Nos sites de références sont constitués par trois systèmes grand lac – BV – société soumis à des forçages climatiques, hydrologiques, socio-économiques et réglementaires similaires : même écorégion, système fluvial du Rhône, lacs associés à des espaces de concentration urbaine et touristique, pôles régionaux de peuplement et d'activités économiques, mêmes acteurs. Ces lacs sont porteurs de la même grande dynamique de développement industriel et économique, associés à des enjeux forts de conservation de la biodiversité et de protection de la qualité des eaux. Ces trois systèmes sont pertinents pour une approche comparée, la principale différence entre ces trois lacs relevant de leurs trajectoires de réponses aux perturbations subies au cours du XX^{ème} siècle. Le caractère transfrontalier du Léman et sa taille apportent quelques spécificités au niveau de la coordination de la gestion, des acteurs impliqués et des usages du lac qui pourront être explorés dans cette thèse. Il a été décidé d'enrichir cette comparaison avec l'analyse d'un territoire lacustre situé dans un contexte hydroécologique et socio-économique totalement différent mais présentant une trajectoire de réponse aux pollutions similaires : le LSP au Canada.

Nous faisons le pari que l'étude de ces quatre territoires lacustres et de leurs trajectoires d'impacts et de réponses écologiques et sociétales aux pollutions permettront d'identifier les principaux fonctionnements qui associent les sociétés aux grands lacs et d'éclairer la gestion de ces écosystèmes.

Chapitre 3. Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société



Le système grand lac – BV – société peut être interprété en tant que socio-écosystème rendant des services à la société

Nous avons vu dans les deux premiers chapitres que les grands lacs sont (1) des objets structurants des territoires lacustres et (2) qu'ils se situent à l'interface entre des systèmes biophysiques à l'amont et à l'aval investis par les sociétés. Les inter-dépendances en termes de quantité, qualités des flux d'eau et de matériaux et d'enjeux qui relient ces différents espaces font des grands lacs des objets interdisciplinaires qui doivent être étudiés à l'échelle du système grand lac – BV – société.

La spécificité des territoires lacustres réside dans **l'inadéquation entre l'aire de bénéfices des ressources des grands lacs qui dépend de leur état et celle du BV**, à l'origine de la charge externe qui détermine en grande partie cet état. Pour étudier le fonctionnement de ce système, il est donc primordial d'étudier les bénéfices rendus par les grands lacs, la manière dont le BV détermine l'état de ces bénéfices et comment en retour, ces derniers influent le BV. Les concepts de service écosystémique (SE) et de socio-écosystème (SSE) sont les outils clés de cette analyse croisée.

La notion de service écosystémique est considérée comme un « *concept d'interface* » (Amigues and 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. L'étude des SE permet d'intégrer des connaissances sur les fonctionnalités des écosystèmes et les dynamiques écologiques, avec une analyse du contexte social, des usages et des valeurs recherchées par les acteurs qui exploitent les ressources naturelles. Ce concept considère une gamme de dépendances la plus complète possible, rendant prévisibles des conséquences non désirées des actions des humains sur la Nature.

Les grands lacs étant associés à de nombreux usages, l'étude des SE peut être très intéressante pour évaluer l'impact des perturbations anthropiques sur ces écosystèmes et la société (Keeler et al. 2012). Ce concept peut également s'intéresser aux priorités données par les acteurs locaux et les décideurs politiques dans leur gestion du territoire. Il permet la reconnaissance que la vie humaine est dépendante du fonctionnement des écosystèmes et fournit des outils pédagogiques pour représenter cette dépendance de manière à vulgariser les travaux scientifiques et faire l'interface entre science et société. Ce concept peut ainsi être utilisé comme outil de communication sur la gestion des ressources naturelles et de la conservation de la biodiversité.

Le concept s'est imposé progressivement au cours des 30 dernières années et a reçu une attention particulière de la communauté scientifique, également des sphères politiques et de l'aménagement des territoires en France et à l'international. En attestent le nombre important de publications traitant des SE (Figure 3-1) et l'intégration de ce concept à de nombreux projets de recherche en environnement depuis le début des années 2000, les moyens financiers alloués à son application aux écosystèmes du monde entier, ou encore l'existence de nombreuses controverses autour de ce concept. Il est aussi le point de convergence d'études et d'écoles de pensées très variées, **à la croisée des sciences naturelles et humaines** (Roche et al. 2016) et à ce titre, nous paraît intéressant d'être testé dans une approche géographique appliquée aux grands lacs.

Pourtant, bien qu'un nombre important de recherches se soient développées pour étudier les SE aquatiques à partir de 2008 (Figure 3-1 ; Hackbart et al. 2017, Aznar-Sánchez et al. 2019), peu d'études ont été menées sur les grands lacs à travers le monde. Un article sorti début

2020 dans la revue *Ecosystem Services* répond en partie à ce manque, et place la préservation des SE des très grands lacs comme un enjeu mondial (Sternier et al. 2020). Parmi les études sur les SE aquatiques, l'évaluation économique est le type d'évaluation le plus souvent réalisé (61%), les approches intégrées sont quant à elles, les moins répandues (Castro et al. 2014, Hackbart et al. 2017). Or, c'est une **co-évaluation** à la fois de la capacité des écosystèmes à fournir des SE, de la demande en services par les sociétés et de leurs interactions qui devrait être réalisée. Ces approches intégrées permettent véritablement d'étudier le lien entre les systèmes naturels et les sociétés humaines qui les utilisent et les gèrent. Elles sont portées par des projets pluridisciplinaires (Amigues and Chevassus-au-louis 2011); il s'agit de l'approche que nous promovons dans cette thèse.

Cette démarche d'utilisation du concept 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 leur mise en relation, il est nécessaire de fournir un **cadre conceptuel** complet à la notion de SE. Nahlik et collaborateurs (2012) définissent un cadre conceptuel comme une *"structure qui comprend les relations entre un ensemble d'hypothèses, de concepts, de valeurs et de pratiques qui établissent une approche pour atteindre un objectif ou plusieurs objectifs"*. Ce sont des outils à la fois méthodologiques qui permettent de structurer la recherche et la synthèse des informations, et également des modèles d'analyse des interactions Homme – Nature.

Le développement conceptuel à réaliser pour mettre en application le concept à propos des grands lacs alpins devra considérer les spécificités des écosystèmes lacustres et permettre l'étude des interactions entre BV, société et les bénéfices tirés des grands lacs dans une perspective large, incluant les pertes et gains de bénéfices au cours de l'histoire récente des pressions anthropiques. Cette perspective nous amènera à considérer la **gouvernance des grands lacs alpins et les adaptations sociétales** en réponse aux impacts de la pollution sur les SE, ainsi que les forçages et les relations aux systèmes adjacents des territoires lacustres. Pour étudier l'ensemble de ces bouclages il sera nécessaire de faire appel à un deuxième concept, plus englobant, compatible avec le concept de SE, qui visera à modéliser l'ensemble du système grand lac – BV – société : le concept de **système socio-écologique** (SSE) et nous donnera la possibilité de coupler ces deux concepts.

Ce chapitre pose les bases théoriques pour l'utilisation de ces deux concepts et pour la construction des cadres conceptuels nécessaires à leur application au cas des grands lacs alpins. Il est découpé en trois parties avec une première faisant état de l'émergence, des paradigmes et critiques associées à l'utilisation de ces concepts, la seconde dédiée à la présentation des concepts et leurs composantes, tout en mettant en avant les choix conceptuels à réaliser pour leur utiliser, enfin une dernière qui expose la démarche d'application et de couplage envisagé des deux concepts.

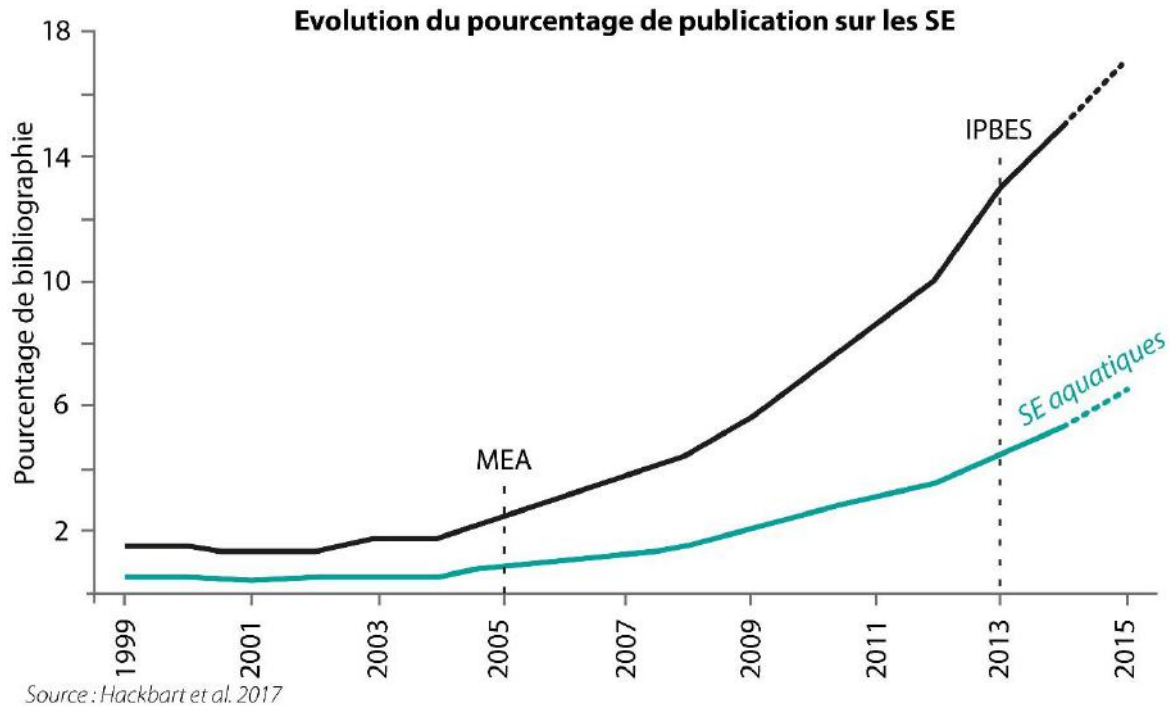


Figure 3-1 : Evolution du nombre de publications sur les SE depuis 1999 (18 413 articles identifiés entre 1960 et 2015, à partir des termes "ecosystem service", "environmental benefit", "environmental service") réalisée par Hackbart et al. 2017. La ligne noire représente le pourcentage d'articles publiés portant sur les SE, et la ligne colorée les études spécifiques sur les SE associés à la thématique de l'eau.

3.1 L'émergence des concepts de service écosystémique et de système socio-écologique

Face à la prise de conscience de la dégradation des ressources naturelles et à la nécessité de raisonner de manière globale, différents concepts et outils émergent dans l'objectif d'enrayer la crise environnementale. Parmi eux, les concepts de SE et de SSE qui permettent d'étudier les compromis pouvant apparaître entre conservation et développement et les multiples interactions dynamiques entre Nature et Société (Liu et al. 2007b, De Groot et al. 2010). Ces concepts se sont développés historiquement autour de trois domaines de la recherche : la **biologie de la conservation** et la protection de la biodiversité, **l'économie écologique** et l'évaluation monétaire des différents types de valeurs de la Nature pour le concept de SE et **l'approche systémique** qui considère ici l'imbrication des systèmes naturels et socio-économiques (Berkes and Folke 1998, Schlaepfer et al. 2017). L'objectif de cette partie est de comprendre l'émergence de ces concepts, les paradigmes de la protection de la Nature auxquels ils correspondent et les critiques fréquemment émises sur leur utilisation. Notre approche visant à combiner les deux concepts, nous considérerons essentiellement les critiques faites au concept de SE et mettrons en avant comment le concept de SSE peut aider à y faire face.

3.1.1 Pour quelles « valeurs » protéger la Nature et donc les lacs ?

Pourquoi protéger la Nature ? Il est difficile de répondre de façon simple à cette question tant les raisons sont nombreuses et variées. Certains diront qu'il faut la protéger parce que la

société a besoin d'elle pour vivre, d'autres parce qu'elle est belle et qu'il faut sauvegarder le patrimoine Naturel, parfois pour des raisons spirituelles, religieuses, ou encore parce que l'avenir de l'Homme se trouve dans les innombrables ressources qu'elle procure. D'autres disent enfin qu'il n'est pas nécessaire de trouver une raison, que, sans la Nature nous n'existerions pas, et que c'est un devoir de la protéger, etc...

En réalité, il faudrait plutôt reformuler la question en s'intéressant aux différentes valeurs pour lesquelles protéger la Nature, car l'idée même de **protéger la Nature implique que lui soient attachées certaines valeurs**. « Valeur » est un mot polysémique (Figure 3-2) qui parfois peut entraîner des difficultés de compréhension et qu'il est nécessaire de définir ici car cette notion sera mobilisée à de nombreuses reprises dans cette étude et de différentes façons.

La définition retenue est celle proposée par Lévy et Lussault (2013) ; les valeurs représentent "*l'ensemble des qualités socialement valorisables d'un espace, de la biodiversité, ou, dans le cadre de cette étude, d'un lac*" (d'après Lévy and Lussault 2013). Pour affiner cette définition, on peut faire référence aux trois types de valeurs attribuées à la biodiversité (Brunet et al. 1992, Lévy and Lussault 2013, Roche et al. 2016) : 1/ les **valeurs-comme-mesure**, qui font référence aux valeurs chiffrées ou qualitatives (une évaluation n'est pas forcément quantitative), de l'importance, du prix ou de l'utilité d'une chose (ex: valeur d'un indice de biodiversité, valeur économique d'un bien Naturel), 2/ les **valeurs-comme-préférence**, relatives à l'appréciation de l'importance d'une chose, à l'affect (ex : préférence personnelle pour un type de paysage lié à des goûts esthétiques, des souvenirs, etc.), 3/ Les **valeurs-comme-norme** que sont les règles ou références morales, idées et principes auxquels on tient, que ces valeurs soient personnelles ou collectives, qui peuvent être vues comme un objectif à atteindre ou une idée à défendre (ex: valeurs religieuses accordées à des espèces animales dans certaines cultures). Ces deux derniers types de valeurs ne s'échangent pas mais se partagent (Brunet et al. 1992).

La protection de la Nature fait appel à ces différents types de valeurs pour argumenter l'action et « *mettre en valeur* » un espace pour sa protection (Figure 3-2). Les valeurs-comme-mesure sont utilisées en tant que variables mesurables (indicateurs) pour décrire les « **valeurs écologiques** » qui permettent de décrire l'état de la biodiversité, ou caractériser un objet comme un lac (ex : la superficie d'un lac, sa richesse spécifique ou encore son état trophique) (Roche et al. 2016). Les décisions des acteurs qui utilisent ou gèrent un territoire mobilisent également un ensemble de valeurs intangibles que l'on nomme généralement « **valeurs socio-culturelles** », qui sont associées à l'affect et aux représentations. Ces valeurs définissent notamment *l'image d'un territoire*¹ et déterminent les actions. Elles regroupent à la fois des valeurs-comme-préférence et des valeurs-comme-norme, elles représentent les qualités socialement valorisables d'un objet (Lévy and Lussault 2013), par exemple l'association de l'eau dormante en milieu lacustre à des images de rêverie, de calme, d'inspiration ou de ressourcement (Vernex 1998). Les valeurs socio-culturelles peuvent être mesurées, de manière qualitative et peuvent apparaître sous forme d'évaluations semi-quantifiées. L'ensemble des valeurs ne sont pas des invariants : elles évoluent dans le temps et dans l'espace en fonction des actions anthropiques (pratiques, pressions, dispositifs de protection...), de l'identité culturelle des individus, des sensibilités à l'environnement, des

¹ (représentation plus ou moins abstraite, qui peut être purement idéelle d'un territoire. Les images d'un territoire posent le problème du décalage entre le réel et sa représentation - Brunet et al, 1993)

cadres économiques et sociaux ou encore de l'évolution des sociétés (Stephenson 2008, Lévy and Lussault 2013).

Dans le contexte des actions de conservation, un espace et sa biodiversité peuvent être associés à des « **valeurs d'usage** » ou instrumentales, qui correspondent à l'ensemble des valeurs d'utilité pour l'Homme, et qui relèvent d'une approche d'étude « *anthropocentrée* » (centrée sur les intérêts humains). L'objectif du concept de SE est de fournir des outils permettant de caractériser ce types de valeurs. Le concept de SSE, qui intègre l'ensemble des interactions entre les sociétés et les écosystèmes permet de s'intéresser aussi aux « **valeurs de non-usage** », c'est-à-dire à des composantes du milieu, indépendamment de leur utilité pour la société, pour développer une approche d'étude « *biocentrée* » (Figure 3.2).

Pour nous, la question n'est pas de savoir quelle approche (*biocentrée ou anthropocentrée*) est la meilleure. Elles sont complémentaires et définissent un plus vaste ensemble d'arguments en faveur de la protection de la Nature. Dans la présente étude, notre approche de la modélisation des SE se base sur les travaux d'approches parfois biocentrées auxquelles l'analyse par le prisme des SE apporte un nouveau regard et replace les résultats dans une perspective plus vaste, qui dépasse les frontières disciplinaires de la limnologie ou les frontières spatiales de l'écosystème lacustre, les frontières temporelles du cycle de vie des espèces.

Certains auteurs mettent en avant l'hypothèse que, si l'on détruit la Nature depuis plus de deux siècles, c'est qu'il existe un « souci » dans la manière dont on donne de la valeur à la Nature (Maier 2012) : comprendre les valeurs socio-culturelles attachées à un écosystème peut aider à comprendre les raisons sous-jacentes à l'action néfaste de certains individus ou groupes d'individus envers les milieux naturels. L'étude de ces valeurs peut fournir des arguments en faveur de la protection de la Nature, mettre en avant certains liens entre les sociétés et les écosystèmes que l'on ne soupçonnait pas ; c'est l'un des plus grands enjeux actuels de la conservation. L'émergence des concepts de SE et de SSE est liée à ces enjeux.

Au cours du XXème siècle, différents concepts et courants de pensée se sont succédés pour étudier les valeurs de la biodiversité et trouver de nouveaux arguments en faveur de la protection de la Nature. Au cours du temps, ce sont tantôt les valeurs de non-usage, tantôt les valeurs d'usage qui ont permis de construire ces argumentaires. L'émergence des concepts de SE et de SSE est liée à ces évolutions.

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

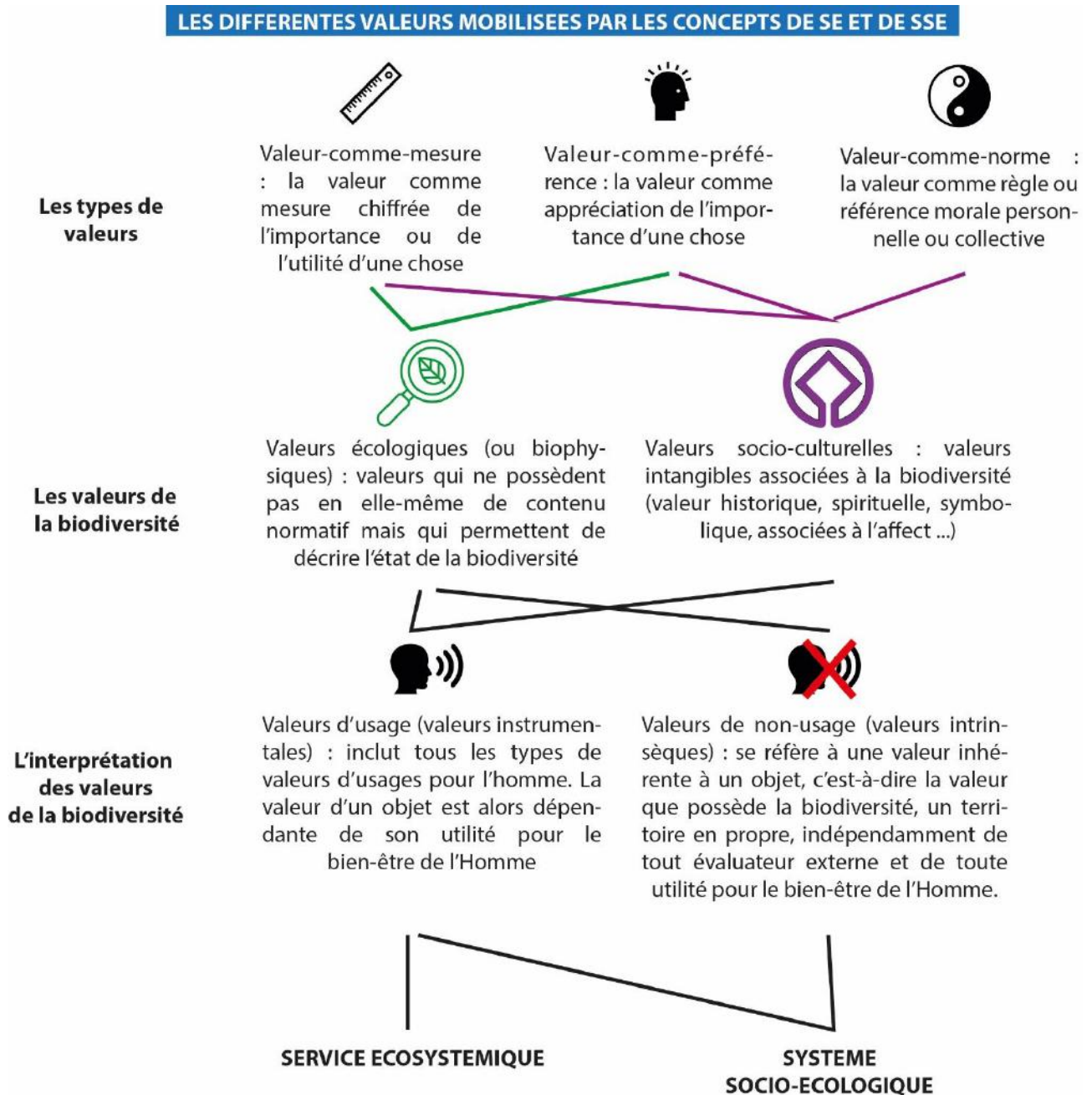


Figure 3-2 : Les différentes « valeurs » mobilisées par les concepts de SE et de SSE

3.1.2 L'évolution des paradigmes de la protection de la Nature et l'émergence des concepts de SE et de SSE

« Il faut trouver des façons d'interagir avec la Nature sans que cela soit toujours aux dépens des autres espèces, que nos villes deviennent accueillantes, que nos champs ne soient plus le théâtre des opérations d'un biocide permanent. Il faut savoir habiter mieux la Terre, plus sobrement, avec davantage de bienveillance pour les vivants non humains et de soin pour les paysages. Mais il faut peut-être aussi accepter de se limiter, restreindre notre territoire. » (Maris 2018 p. 5)

La prise de conscience des impacts de l'Homme sur la Nature n'a jamais été aussi grande. Non seulement nous pouvons suivre l'évolution exponentielle de l'entreprise humaine dans l'Anthropocène et des perturbations sur les écosystèmes planétaires qui en découlent, mais nous appréhendons également mieux les multiples interdépendances entre les systèmes qui sous-tendent la vie sur Terre ainsi que les interactions entre les sociétés et les écosystèmes. Dans l'Anthropocène, la vision des rapports Homme-Nature a évolué, passant d'une perception de la Nature inépuisable qu'il faudrait combattre, domestiquer, à désormais une Nature indispensable à l'Homme, que l'on cherche à préserver.

La société et la Nature ne sont plus considérées comme deux systèmes indépendants et séparés, mais comme faisant partie d'un même système couplé Homme - Nature (Liu et al. 2007b). Cette prise de conscience s'est effectuée par étapes au cours du XXème siècle et a conduit à la mise en place de **mesures de conservation** dans l'ensemble des types d'écosystèmes de la planète, avec par exemple comme objectif (Aichi pour 2020) d'obtenir 17% de la surface terrestre classée en aire protégée (IPBES 2018a).

En 1972, le Club de Rome lance une alerte mondiale sur l'impact de la croissance démographique sur la surexploitation des ressources planétaires. Souvent considérés comme événements déclencheurs de **la prise en compte de la destruction de l'environnement par l'Homme**, en réalité les premiers mouvements en faveur de la protection de la Nature apparaissent bien plus tôt (Phillips 2003) dès le XVIIIème siècle avec les penseurs des lumières, mais surtout à partir de la moitié du XIXème siècle par des acteurs de sociétés savantes liées à la protection de la Nature, des ONG et des gestionnaires de ressources (Méral and Pesche 2016). L'extension des empires coloniaux au milieu du XIXème siècle et la révolution industrielle entraînent des conséquences graves sur le fonctionnement des sociétés (esclavage, colonisation, guerres, droits des femmes et des minorités...) et sur la Nature (érosion, transformation des paysages, extinction d'espèces, urbanisation) qui font prendre conscience des dégâts que l'Homme peut causer. Cela provoque l'émergence de la protection des sites

naturels remarquables par leur beauté et leur Nature sauvage ou par les ressources qu'ils abritent (mouvement ressourciste - Therville, 2013) (Maris 2018).

Le terme de **protection des espaces naturels**² apparaît en 1923 lors du premiers Congrès International pour la Protection de la Nature, puis la création en 1948 de l'UIPN, précurseur du développement d'une communauté que l'on peut qualifier aujourd'hui *d'environnementalistes* à l'échelle internationale avant les années 1970 (Méral and Pesche 2016). L'approche de la préservation de la période 1850 - 1970 cherche à limiter l'emprise humaine sur la Nature, à préserver des lieux, des territoires en limitant l'intrusion humaine par la création de réserves naturelles ou bien en contrôlant l'exploitation des ressources qui pourraient venir à manquer (Maris 2018).

Une évolution significative de cette conception "*préservationniste*"³ de la Nature émerge dans les années 1970 avec l'organisation d'un champ scientifique autour du problème de l'érosion de la diversité biologique : la **biologie de la conservation**. C'est l'émergence d'un mouvement "*conservationniste*"⁴ (voir Encadré 3-1) qui va proposer des outils d'instrumentalisation de la protection par le biais de quotas, de moratoires sur l'exploitation des ressources, l'incitation aux bonnes pratiques ou à l'inverse la mise en place de sanctions pour celles estimées comme mauvaises (principe de pollueur-payeur). La biologie de la conservation impulse le développement de l'écologie qui conceptualise scientifiquement la Nature et ses relations aux Hommes et envisage des solutions de respect réciproque entre les Hommes et la Nature ; le concept de **développement durable** émerge à cette époque. Ce changement de paradigme donne lieu à la création d'organisations intergouvernementales qui se préoccupent de l'environnement et la création d'un ministère de l'Environnement dans de nombreux pays (Méral and Pesche 2016).

Encadré 3-1 : Différence entre préservation et conservation (Therville, 2013)

La préservation vise à la protection totale des milieux naturels, caractérisée par un contrôle de l'accès et l'interdiction de prélèvement des ressources naturelles. Le "*cliché protectionniste*" fait référence à la généralisation de cette vision préservationniste à toutes les aires protégées percevant l'Homme comme une menace pour la Nature qu'il convient d'exclure des milieux naturels et implique de mettre de côté (expression courante : "*mettre sous cloche*") les espaces fragiles pour minimiser les impacts anthropiques. La conservation peut être définie comme la protection, l'amélioration et l'utilisation rationnelle des ressources naturelles afin d'offrir la plus grande valeur pour le présent et l'avenir (Saunders 2003). La conservation implique une gestion active des interactions entre l'Homme et la Nature et une gestion prudente et mesurée des ressources naturelles pour les maintenir dans un bon état général, dans un objectif explicite de protection et en vue de leur transmission aux générations futures.

A l'échelle internationale, la **Convention sur la diversité biologique (CDB)**, adoptée lors du **Sommet de la Terre** à Rio de Janeiro en 1992, marque un moment important puisqu'elle

² Protection des espaces naturels : défense d'éléments de Nature face à des perturbations, notamment anthropiques, jugées de manière négative et perçues comme destructrices - (Therville 2013)

³ vision ségrégative : "*la Nature sans l'Homme*" - Mace 2014

⁴ vision intégrative : "*la Nature avec l'Homme*" - Mace 2014

reconnait pour la première fois au niveau du droit international que la conservation de la diversité biologique est une préoccupation commune pour l'ensemble de l'humanité. Ce traité international a pour buts : (1) la conservation de la biodiversité, (2) l'utilisation durable de ses éléments et (3) le partage juste et équitable des avantages découlant de l'exploitation des ressources génétiques. Il prévoit par ailleurs la création de la Conférence des Parties (COP - association de tous les pays ayant adhéré à la CDB) dont l'objectif est d'évaluer et de réviser, annuellement, les mesures prises pour atteindre les objectifs de la CDB⁵.

L'Anthropocène fait partie des découvertes scientifiques qui ont bouleversé le milieu de la conservation car il met en avant que l'avenir, pas seulement d'une petite minorité d'espèces rares, mais bien d'une large fraction des écosystèmes de la planète, est menacé par le développement des activités humaines. Comme l'explique Maris (2018 p. 1) *"avec l'Anthropocène, il n'y a plus lieu de préserver, de conserver, de protéger. L'heure est à la conception et à la gestion d'un environnement utile et durable"*.

Mais comment faire ? Comment protéger la Nature contre les activités humaines lorsque celles-ci sont motivées par des intérêts économiques et financiers importants ? Comment agir dans un système en recherche continue de croissance ? Comment protéger en faisant face aux logiques socio-économiques d'une humanité en expansion ?

La **"nouvelle conservation"** (Soulé 2014) qui a émergé depuis les années 2000 cherche à intégrer des mesures de protection issues des deux courants préservationniste et conservationniste : l'Homme fait partie de la Nature et la Nature est le résultat des interactions complexes entre acteurs humains et non humains. Cette approche reconnaît les rôles multiples des systèmes écologiques, socio-économiques, politiques, culturels et les considère comme étant **imbriqués** à de **multiples échelles spatiales et temporelles**.

La conservation doit aujourd'hui considérer l'ensemble des niveaux qui structurent la Nature et les sociétés et leurs interactions mutuelles. Elle doit nécessairement adopter une logique **intégrative** pour considérer les changements provoqués par la rencontre de ces différents niveaux (Lévy and Lussault 2013). De nouveaux principes émergent comme ceux de *solidarité écologique* (Mathevet et al. 2010) ou de *bienveillance* (Maris 2018) et également de nouveaux concepts visant à renouveler les arguments en faveur de la protection de la Nature, fournir des clés de lecture des systèmes complexes couplés Homme-Nature, permettant d'intégrer les différentes disciplines, différents courants et écoles de pensées permettant d'analyser et interpréter les rapports société – écosystèmes.

Les concepts de SE et de SSE sont issus de la nouvelle conservation et sont intéressants pour l'étude du territoire lacustre car ils permettent la mobilisation des approches interdisciplinaires environnementales, humaines et sociales, et de l'ingénierie territoriale ainsi que le recours à une approche intégrée qui consiste à l'analyse des composantes des systèmes pour comprendre leur fonctionnement.

Cette évolution de paradigme a fait l'effet d'une véritable *bombe* dans les milieux de la protection de la Nature, au point de **réformer en profondeur les discours, les politiques et**

⁵ En 2010, la Conférence des parties adopte le nouveau « Plan stratégique pour la diversité biologique 2011-2020 » qui présente les 20 objectifs pour la biodiversité à atteindre pour 2020, dits « objectifs d'Aichi ».

les recherches en environnement, le tout cristallisé autour d'un concept qui a connu un succès fulgurant : le concept de service écosystémique (Maris 2018). Regardons plus en détail l'émergence de ce concept et la manière dont il s'est imposé en sciences et politique de l'environnement.

3.1.3 Diffusion du concept de service écosystémique dans les sphères scientifiques et politiques

Gómez-Baggethun et al. (2010) distinguent **trois périodes de développement du concept de SE** (Figure 3-3). Une première phase entre 1970 et 1980 (« *origins and gestation* ») qui correspond à la phase d'émergence du concept, une phase dans les années 1990 - 2000 qui se termine par la publication des travaux du MEA (« *mainstreaming* »), au cours de laquelle le concept est diffusé en partie avec des travaux scientifiques de Costanza et al. (1997) et l'ouvrage de Daily (1997) et une troisième phase qui débute en parallèle à la précédente dans les années 1990 et qui se poursuit aujourd'hui (« *articulation in Markets* »), caractérisée par un intérêt croissant pour les instruments de marchés⁶. La période récente qui a commencé avec les travaux du MEA au début du XXI^e siècle, peut aussi être vue comme une phase de mise à l'agenda politique selon les auteurs (« *le temps de la politique* » - Méral 2012).

Bien que l'étude des relations Homme - Nature et l'idée de services rendus par la Nature à l'Homme remontent à l'Antiquité (Méral and Pesche 2016), le concept trouve ses racines dans les écrits des **économistes classiques** avec la prise de conscience de l'importance des écosystèmes dans le système économique au XVIII^e siècle (Gómez-Baggethun et al. 2010), où la Nature est vue comme fournisseuse de ressources gratuites mais limitées, qui imposent des contraintes physiques à la croissance. Certains économistes néoclassiques attirent l'attention sur les risques économiques liés à l'épuisement des ressources planétaires, mais l'optimisme technologique ambiant amène à considérer que les innovations technologiques permettront de repousser l'ensemble de ces contraintes (Gómez-Baggethun et al. 2010).

Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, **l'économie environnementale** se développe et met en avant les manquements de l'économie néoclassique pour traiter des problématiques environnementales. Des méthodes sont créées afin de considérer les impacts environnementaux des activités humaines sur l'économie, et les **services non-marchands** fournis par les écosystèmes sont vus comme des externalités positives qu'il est important de monétariser afin de pouvoir les intégrer aux décisions politiques (Gómez-Baggethun et al. 2010).

Dans le cadre de la préparation de la Conférence de Stockholm sur l'Environnement Humain (1972), **une première liste** de SE est proposée en 1970 dans une étude du MIT (Roche et al. 2016). Mais c'est surtout à la fin des années 70 dans une vision encore utilitariste de la Nature que l'idée de « *services rendus par la Nature pour l'Homme* » et le terme de « *service écosystémique* » apparaissent véritablement (De Groot et al. 2010), avec des auteurs américains tels que Westman (1977) puis Ehrlich et Mooney (1983) (Barnaud et al. 2011, Roche et al. 2016). Le concept se caractérise alors, par la volonté de certains scientifiques de renouveler leurs approches en intégrant les **aspects écosystémiques, globaux et dynamiques**

⁶ Les MES – « *market for ecosystem services* » ex : les marchés de compensation ; et les PES – « *payment for ecosystem services* », consistant en la rétribution pour des activités maintenant la bonne qualité des écosystèmes

des processus écologiques, de prendre en compte la **dépendance des sociétés humaines à la Nature** et de s'organiser afin **d'alerter** sur l'urgence de sauvegarder le bon fonctionnement des écosystèmes (Méral and Pesche 2016, Roche et al. 2016). Cette posture renouvelle les approches de l'époque, essentiellement basées sur le concept de ressources naturelles, centrées sur les biens produits par les écosystèmes et non sur les processus permettant de fournir ces biens et ceux directement utiles à l'Homme (Méral and Pesche 2016). La volonté initiale est de mettre en avant l'importance de l'ensemble des écosystèmes pour le bien-être humain et non pas seulement les composantes qui produisent des ressources (Méral and Pesche 2016). Un dernier avantage du concept est avancé par Westman (1977) qui met en avant l'idée que le concept de SE pourrait aider à **sensibiliser le public** aux problèmes de la dégradation de la Nature (Roche et al. 2016).

A cette époque, deux courants scientifiques s'intéressent aux SE. Un premier, composé d'économistes écologiques (Robert Costanza, Leon C Braat, Dolf De Groot, Crawford S Holling) qui approfondissent les réflexions théoriques sur les interactions Homme/Nature. Le second est constitué d'économistes de l'environnement (Karl-Göran Mäler, Partha Dasgupta et Geoffrey M Heal) qui formalisent la contribution de la Nature au développement des sociétés par la notion de « *capital Naturel* », en essayant de l'incorporer dans les modèles économiques standards par une démarche tournée vers l'action politique. La jonction entre ces 2 courants s'opère progressivement dans les années 1980-1990 (Méral 2012, Roche et al. 2016).

Dès la fin des années 1980, début des années 1990, les écologues s'intéressent à comprendre le rôle de la biodiversité sur le fonctionnement des écosystèmes et les SE vont plus fréquemment être reliés à la biodiversité. Ils feront partie intégrante de la compréhension forte du développement durable, sans toutefois être mentionnés dans le rapport Brundtland (1987) (Méral and Pesche 2016, Roche et al. 2016). **Le concept de SE se développe ainsi avec l'approche du développement durable et avec la montée en puissance de l'évaluation monétaire de la biodiversité qui naît au milieu des années 1990.** Il est dans un premier temps porté par les ONG environnementales internationales qui l'utilisent en tant qu'argumentaire économique pour justifier leurs actions. Il va notamment être mentionné dans le Global Biodiversity Assessment en 1995, commissionné par le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement). C'est seulement à la fin des années 1990, avec les articles de Costanza et collaborateurs (1997) et l'ouvrage de Daily (1997), que le concept commence à être diffusé et trouve une place centrale dans les arènes scientifiques mais aussi politiques (Roche et al. 2016).

Dès lors, la thématique des SE va être largement promue par les initiatives internationales en faveur de l'environnement⁷ et l'ensemble de ces organisations vont alors amorcer des réflexions en 1998 pour un « *nouveau processus international d'évaluation* », qui mènera à la création du futur **MEA** (Evaluation des Ecosystèmes pour le Millénaire) (voir Encadré 3-2).

⁷ Ensemble des organisations internationales à l'origine du MEA : PNUD, PNUE, United Nations Foundation, Packard Foundation, Global Environmental Facility, la Banque Mondiale, International Council for Science, World Conservation Union, World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development

Encadré 3-2 : Le Millenium Ecosystem Assessment (MEA)

L'apogée du processus d'institutionnalisation du concept aura donc été le MEA, conduit entre 2001 et 2005. Légitimé par son ampleur et sa rigueur (plus de 1300 chercheurs du monde entier, pendant plus de 3 ans), le projet est parvenu à imposer sa typologie en 4 catégories de services et son diagnostic d'une forte érosion de 15 des 26 grands SE identifiés (Levrel et al, 2014 in Roche et al. 2016). L'objectif était d'évaluer les conséquences des changements écosystémiques sur le bien-être humain et d'établir une base scientifique afin de mettre en place les actions nécessaires à la conservation et l'utilisation durable de ces systèmes (MEA 2005)

Depuis le MEA, le concept fait l'objet d'un nombre grandissant de programmes et d'études, tant scientifiques que politiques dont il constitue un des piliers conceptuels allant de l'échelle internationale (Objectifs d'Aïchi, The Economics of Ecosystems and Biodiversity- TEEB, programme MAN & Biosphère de l'UNESCO, Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services - IPBES), européenne (Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services – MAES), ou l'échelle nationale (ex : rapport du Centre d'Analyse Stratégique, Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques – EFESE en France ou le UK National Ecosystem Assessment pour le Royaume-Uni) (Méral and Pesche 2016).

L'**IPBES** peut être vue comme une suite du MEA. Cette structure a pour objectif d'éclairer les décisions politiques en mobilisant les connaissances sur les écosystèmes et la biodiversité à l'échelle mondiale. A ce titre, de nouvelles évaluations de l'état des écosystèmes planétaires sont menées. Comme cela avait été lancé par le MEA, l'IPBES propose des évolutions conceptuelles significatives et détient désormais sa place dans le milieu de la conservation sur les scènes politiques et scientifiques internationales au niveau de l'alerte sur la dégradation de la biodiversité mondiale et sur son évolution future⁸.

Ainsi, la montée en puissance du concept depuis le MEA est le résultat d'une co-construction entre science et politique à l'échelle internationale. Dans ce processus, plusieurs personnalités scientifiques ont joué un rôle central : Robert Watson (Banque Mondiale), Walter Reid (World Ressources Institute), Harold Mooney (scientifique) en occupant des fonctions clés dans chacune des grandes initiatives relatives aux SE depuis 20 ans (Roche et al. 2016). Par ailleurs, une revue spécifiquement dédiée à ce concept a été créée en 2010 (*Ecosystem Services*, chez Elsevier).

Le **monde économique des entreprises** s'intéresse également à cette notion : un nombre croissant d'activités entreprennent d'appliquer le concept pour prendre en compte leurs impacts et leurs dépendances sur les ressources naturelles (FAO 2015). Le concept innove car il propose une approche économique et sociale pour l'étude des écosystèmes et de leur fonctionnement, permettant de mieux préciser les atteintes à l'environnement et leurs conséquences à la fois écologiques et socio-économiques, d'identifier les mécanismes en jeu

⁸ à ce titre, il est parfois présenté comme le "GIEC - Groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat - de la biodiversité"

et de les prendre en compte dans la gestion. Cette diffusion du concept montre un besoin toujours présent de meilleure compréhension des liens entre Nature et Société (De Araujo Barbosa et al. 2015, Hackbart et al. 2017). Mais aussi, bien que le concept de SE soit relativement nouveau, il est de plus en plus mentionné ou défini dans la législation de nombreux Etats (voir Encadré 3-3). Il est intégré aux conditions d'inscription de certains espaces naturels protégés (ex : réserves mondiales de la biosphère), et en passe de devenir un outil de compensation écologique de certaines politiques financières nationales ou internationales (Paiements pour Services Environnementaux - FAO 2015).

Dans le droit français, les termes de « *fonctions* » et de « *services écologiques* » apparaissent dans la définition du dommage à l'environnement⁹ ou de mesures de réparation¹⁰ au sein de la Directive n°2014/35/CE du 21 avril 2014, article 2 sur la responsabilité environnementale. Est définie également la notion de services : « *les fonctions assurées par une ressource Naturelle au bénéfice d'une autre ressource Naturelle ou du public* ». Dans la loi française, l'article L110-1 du Code de l'environnement du 8 août 2016 mentionne directement le terme de SE dans le premier de ses principes généraux¹¹, dans le second, où le rapprochement entre services et développement durable est clairement identifié¹², dans le principe 3 présentant cinq objectifs de développement durable, et dans le principe 8, où la notion de « *services environnementaux* » est mentionnée.

Encadré 3-3 : Les SE dans le droit à l'international

Le MOOC en ligne (Schlaepfer et al. 2017) "*Ecosystem Services : a Method for Sustainable Development*" proposé par l'Université de Genève propose aux participants du monde entier (10 650 inscrits au 6 août 2019) d'indiquer dans un tableur toutes les lois et règlements qui mentionnent les SE. On y retrouve indiqués de nombreux pays et Etats plus ou moins développés de tous les continents, dont voici quelques exemples : Suisse, Croatie, Brésil, Mexique, Etats-Unis d'Amérique, Canada, Inde, Népal, Indonésie, Australie, Angola, Zimbabwe, Ethiopie ... A ce jour, le document recense plus de 380 entrées (plusieurs entrées par pays en fonction des types de règlements et échelle administrative - pays, Etat). Cette information est représentative de l'importance politique du concept à l'échelle internationale.

⁹ Définition du dommage à l'environnement : « *modification négative mesurable d'une ressource Naturelle ou détérioration mesurable d'un service lié à des ressources Naturelles, qui peut survenir de manière directe ou indirecte* »

¹⁰ Définition de mesures de réparation : « *toute action, ou combinaison d'actions, y compris des mesures d'atténuation ou des mesures transitoires visant à restaurer, réhabiliter ou remplacer les ressources Naturelles endommagées ou les services détériorés ou à fournir une alternative équivalente à ces ressources ou services* »

¹¹ « *Les espaces, ressources et milieux Naturels terrestres et marins, les sites, les paysages diurnes et nocturnes, la qualité de l'air, les êtres vivants et la biodiversité font partie du patrimoine commun de la nation. Ce patrimoine génère des services écosystémiques et des valeurs d'usage* » « *Ce principe [n°2] implique d'éviter les atteintes à la biodiversité et aux services qu'elle fournit ; à défaut, d'en réduire la portée ; enfin, en dernier lieu, de compenser les atteintes qui n'ont pu être évitées ni réduites, en tenant compte des espèces, des habitats Naturels et des fonctions écosystémiques affectées* »

¹² « *Leur connaissance, leur protection, leur mise en valeur, leur restauration, leur remise en état, leur gestion, la préservation de leur capacité à évoluer et la sauvegarde des services qu'ils fournissent sont d'intérêt général et concourent à l'objectif de développement durable qui vise à satisfaire les besoins de développement et la santé des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.* »

Les SE sont en conséquence présents dans toutes les **sphères scientifiques et politiques** qui s'intéressent à la protection de l'environnement. Le SE apparaît à la fois comme un outil d'analyse des interdépendances complexes entre les systèmes naturels et humains et également en tant qu'outil normatif qui questionne sur les normes, les valeurs qui sous-tendent la décision et qui permet de juger "ce qui est bon ou pas" sur un territoire donné.

Malgré l'institutionnalisation, la politisation et la diffusion de ce concept en sciences, l'approche par les SE n'est toujours pas véritablement utilisée pour l'instant par les décideurs publics (Muradian et al. 2010) et des développements conceptuels, méthodologiques ou encore opérationnels font encore l'objet de discussions. Selon Gunderson and Holling (2001), si la notion doit apporter des changements dans la manière dont les écosystèmes sont gérés, ce ne sera qu'à la suite de crises majeures dans les systèmes de gestion, et/ou avec l'arrivée d'une nouvelle génération d'acteurs, dont les valeurs seront différentes de celle de la génération précédente.

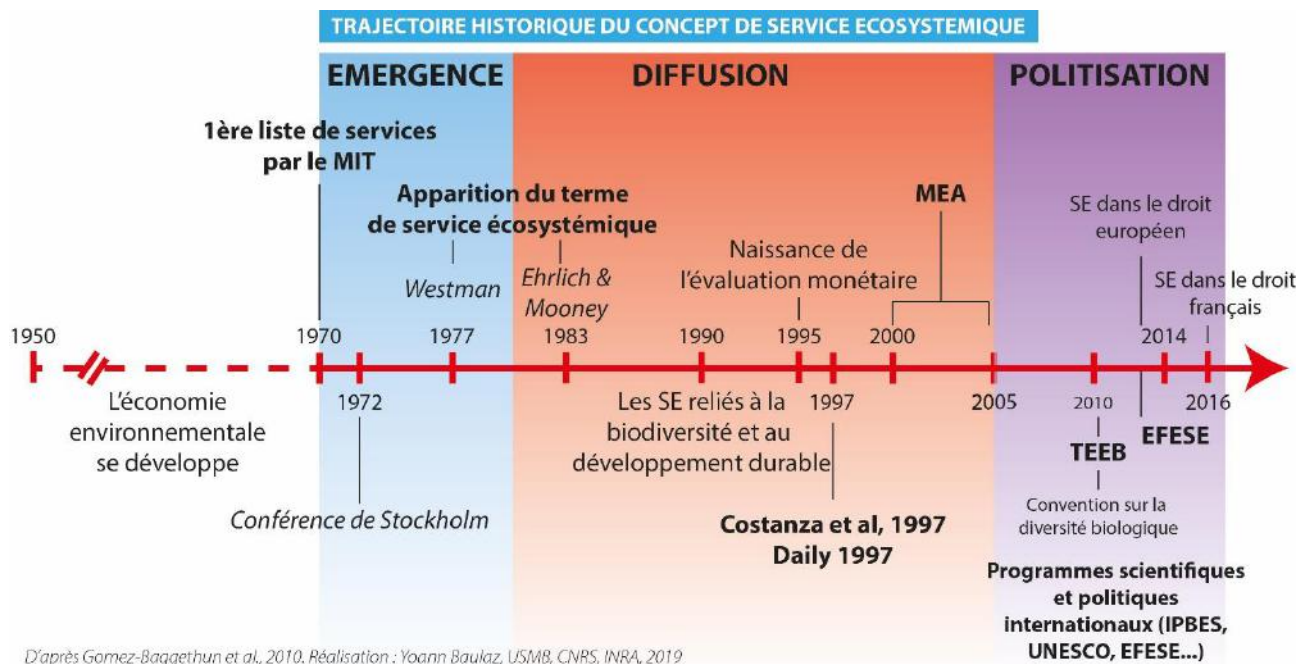


Figure 3-3 : Frise chronologique d'émergence et diffusion du concept de SE

3.1.4 Plus-values et verrous des concepts de SE et de SSE appliqués aux grands lacs alpins

Les concepts de SE et de SSE sont intéressants pour l'étude des relations grands lacs – BV - société car ils proposent une clé de lecture des territoires lacustres, à la fois :

- **Inclusive**, c'est-à-dire qui permet de prendre en compte la multiplicité des acteurs et des intérêts. Ces deux concepts apportent un cadre de dialogue de référence (ils amènent des notions, des méthodes, un vocabulaire, une vision des rapports grands lacs – sociétés), qui rendent compatibles les approches participatives mobilisant scientifiques, gestionnaires et usagers pour communiquer sans contraintes, échanger

et mettre en réseau les personnes, compétences et informations. On pourrait ainsi dire que ces concepts peuvent soutenir la *prise de risque* sur l'étude interdisciplinaire des territoires lacustres.

- **Intégrée**, car ces concepts sont des outils adaptés à l'étude d'objets complexes, facilitent les études interdisciplinaires et notamment le rapprochement de la géographie physique (la limnologie) avec la géographie sociale pour appréhender l'étude des territoires lacustres dans leur globalité. Ils incitent un changement de regard sur les écosystèmes lacustres en rapprochant analyses quantitatives et qualitatives, et en favorisant la prise en compte de multiples échelles spatiales et temporelles, de multiples niveaux de la gestion, des multi-services, de la multi-fonctionnalité des écosystèmes, de multiples bénéficiaires.
- **Orientée** : les SE relèvent d'une vision anthropocentrée de la Nature. Ils peuvent en ce sens véhiculer une vision plus positive de certaines activités ou certains éléments des écosystèmes, en montrant combien ceux-ci sont importants pour le bien-être humain. Ceci incite à s'intéresser surtout à la "*Nature ordinaire*" comme support des fonctions écosystémiques essentielles au maintien de la biodiversité et des SE.
- **Appliquée** : c'est un intérêt majeur de ces deux concepts, car ils peuvent s'appliquer à des objets variés et être développés en tant qu'outils d'aide à la décision (Brunet 2016). Ils peuvent s'avérer être des outils normatifs intéressants. La portée opérationnelle de ces outils est de réfléchir à faire évoluer l'observatoire des grands lacs pour qu'ils prennent en compte pleinement les composantes sociétales et les interfaces entre processus biophysiques et sociétaux.

Cependant, l'approche par les SE ne fait pas consensus au sein du monde scientifique et des gestionnaires de l'environnement. Elle est soumise à de **nombreuses critiques**. Celles-ci relèvent soit des **principes fondateurs** du concept (approche individualiste et anthropocentrée, approche économique et peur de la monétarisation de la Nature) qui l'opposent à des approches biocentrées focalisées sur les valeurs intrinsèques des écosystèmes et de la biodiversité. Cette critique soulève notamment des questionnements moraux sur les principes de la protection de la Nature. D'autres critiques portent sur les **méthodologies à mettre en œuvre** : les approches seraient trop complexes, jonglant avec des perceptions multiples, aboutissant à des généralisations abusives, générant donc des problèmes de fiabilité des résultats et de reproductibilité des analyses.

Plus spécifiquement, l'approche par les SE ne fait pas consensus au sein du monde scientifique et des gestionnaires de l'environnement pour plusieurs raisons (Barnaud et al. 2011) :

- Une première incertitude « *scientifique* » liée à la **difficulté à mettre en relation les processus écologiques et les SE** du fait d'une trop grande complexité des systèmes étudiés ou d'un manque de connaissances sur ces questions. Roche et collaborateurs (2016) soulignent que la science des SE est encore "*jeune et non stabilisée*" et émettent l'hypothèse que, si la notion de SE se laisse difficilement appréhender, c'est entre autres, parce qu'il s'agit d'un objet frontière qui renvoie à la diversité des relations entre communautés humaines et environnement naturel. Aussi, les sciences humaines et sociales semblent témoigner d'une certaine réticence à s'emparer de ce concept et si l'un des avantages de la notion est de faciliter l'interdisciplinarité, on observe que, dans les faits celle-ci est difficile à mettre en place (Brunet 2016).

- Une seconde incertitude est liée à **l'existence de perceptions multiples et différenciées du concept** même de SE et des notions associées, et ce, autant chez les scientifiques que chez les acteurs non scientifiques. Cela génère de nombreuses incohérences et variabilités autour du concept, de sa terminologie, des définitions, classifications et cadres conceptuels et des controverses sur les portées et limites de l'approche par les SE (La Notte et al. 2017). Cette incertitude est accentuée par la place croissante qu'occupe le concept dans les programmes de recherche, le débat public et dans les dispositifs de gestion (Roche et al, 2016).
- L'idée de « **monétariser la nature** » crée de nombreuses polémiques. Pour certains, il s'agit d'un argument indispensable pour sensibiliser les décideurs au rôle de la nature, alors que d'autres voient dans la faible valeur financière accordée à certains écosystèmes, un faible intérêt pour l'Homme et le droit à le détruire. Cette approche ne sera pas développée dans cette étude, les raisons de ce choix seront précisées en discussion (chapitre 7).

Par ailleurs, les SE induisent une manière « *égoïste* » et anthropocentrée d'étudier et de protéger la nature : la protéger **pour** l'Homme (Brunet 2016). Certains suggèrent que la nature soit aussi protégée pour elle-même, suivant des raisons « *biocentrées* » (Stern and Dietz 1994). En ce sens, Maris (2018 p 108) écrit que *"si la notion de biodiversité permet d'intégrer les sociétés dans la nature, celle de service écosystémique se recentre complètement sur l'humain. En mettant en évidence la dépendance des sociétés à l'égard du bon fonctionnement des écosystèmes, les SE ne désignent plus que les éléments de la nature dont nous pouvons tirer avantage."*

Face à ces incertitudes et critiques, il est nécessaire de développer des cadres conceptuels spécifiques au cas d'étude traité.

3.2 Les bases théoriques des concepts

Le succès de nombreuses actions de gestion environnementale est issu des capacités de ces actions à prendre en compte la complexité des systèmes couplés Homme - Nature (Liu et al. 2007a). Cela passe par la compréhension impérative des liens entre les composantes physiques / écologiques et sociales du système à gérer (Carpenter et al. 2007) et par la construction d'outils conceptuels et méthodologiques voués à l'analyse de ces interactions société – écosystème (Liu et al. 2007b). L'enjeu est d'appréhender la gestion des systèmes complexes dans une perspective large intégrant l'ensemble des imbrications et les différentes échelles de temps et d'espace des processus socio-écologiques (Pahl-Wostl 2007a). Malheureusement, de par les caractères complexes et dynamiques des systèmes à considérer, il n'existe pas une mesure ou une approche qui suffise pour donner une image complète de leur état (Parrott 2010) et de leur évolution. Répondre à ces enjeux est l'un des challenges les plus importants des sciences de l'environnement aujourd'hui (Collins et al. 2011).

Du fait de la diversité des disciplines qui s'intéressent aux concepts de SE et de SSE et des différents objectifs de leur application, il n'est pas possible de développer une approche unique s'adaptant à la grande variété de cas traités. Un grand nombre de propositions ont été faites pour adapter ces concepts à différents types d'écosystèmes et contextes socio-culturels dans le monde. Certaines de ces propositions ont été développées par des institutions

internationales comme le MEA, le TEEB, ou plus récemment l'IPBES. Il en résulte une grande diversité de définitions et de typologie des SE et d'approches d'études des SSE. Cette section a pour but de faire le point sur ces différentes propositions et connaissances théoriques et de réaliser en conséquence des choix conceptuels pour l'étude des grands lacs alpins. Les trois critères mobilisés pour arriver à faire ces choix sont : (1) la compatibilité avec une **approche intégrée**, considérant l'imbrication des composantes biophysiques et sociétales des SSE des grands lacs et leurs dynamiques spatiales et temporelles, (2) la possibilité d'utilisation des concepts par les acteurs des territoires lacustres dans le cadre d'**enquêtes**, (3) la prise en compte des impacts des **pressions**, notamment polluantes, sur le fonctionnement des lacs et les bénéfiques qui en sont retirés.

3.2.1 Les services écosystémiques : un concept clé pour explorer le fonctionnement des socio-écosystèmes

Costanza et al. (2014) considère aujourd'hui que la valeur planétaire annuelle de tous les services rendus par la Nature aux sociétés s'élève à plus de 125 trillions de dollars US. A partir des évaluations monétaires globales des SE par écosystèmes de De Groot et al. (2012) et de Costanza et al. (2014), la valeur moyenne pour les lacs et rivières est évaluée à 4 267 \$US/ha/an et la valeur globale cumulée est de 2.5 trillions de \$US/an. Ces valeurs monétaires ne cessent d'augmenter d'années en années du fait de plusieurs facteurs : (1) l'augmentation de la population mondiale, (2) de l'espérance de vie et (3) des modes de vie. Ces facteurs impliquent une augmentation des besoins en ressources alimentaires, énergétiques et matérielles. Les pressions toujours croissantes sur le système terrestre agissent dans le même sens : augmentation des besoins de régulation des pressions anthropiques par les et accroissement des valeurs des SE qui y participent. On considère une perte de 50% des biomes aquatiques au cours du siècle dernier (Rinke et al. 2015), ce qui entraîne une **perte de capacité des écosystèmes à répondre à ces besoins**. Cette perte ne semble pas compensée par la construction de retenues d'eau car celles-ci génèrent une diminution de la biodiversité aquatique (Rinke et al. 2015, IPBES 2018b).

Toute l'histoire et la société moderne se sont construites autour des liens qui unissent les Hommes à la Nature. Les écosystèmes sont source de vie pour l'Homme, sont le support des infrastructures et activités humaines, des savoirs et connaissances, ils procurent les ressources essentielles à l'existence : l'air, l'eau, l'énergie, la nourriture, la santé, la sécurité. Ils participent à l'identité personnelle en offrant des opportunités de loisir, de lien social, d'évasion etc. Pourtant, dans les sociétés occidentales, nous observons **une déconnexion croissante à la Nature** (Roche et al. 2016). L'évolution et "*l'accélération des modes de vie*", le développement des nouvelles technologies, l'augmentation de la population en milieux urbains, la perte de biodiversité et de connaissances sur la Nature sont autant de facteurs qui limitent nos opportunités de contacts à la Nature, que certains auteurs nomment "*l'extinction de l'expérience de Nature*" (Soga and Gaston 2016). **La perte d'interactions avec la Nature** diminue les bénéfiques que l'on peut en retirer ; ce qui alimente l'éloignement des sociétés et le mécontentement général envers la Nature. L'extinction de l'expérience entraîne un oubli de l'importance de la Nature pour le développement humain et réduit l'attractivité pour les activités en faveur de la protection de l'environnement (Soga and Gaston 2016). C'est pourquoi l'un des principes et objectifs généraux de la nouvelle conservation s'attache à

mettre en avant les avantages des écosystèmes dans le développement économique et social et dans l'aménagement du territoire.

A l'interface entre le fonctionnement des écosystèmes et le fonctionnement des sociétés, le concept de SE permet de lier les éléments des écosystèmes participant au bien-être humain et les systèmes socio-économiques qui en tirent avantage.

❖ Epistémique du concept

Il existe **différentes perceptions** de la notion de SE au sein de la communauté scientifique, qui ne sont pas toujours compatibles et qui peuvent être mises en débat. Barnaud et collaborateurs (2011) expliquent que, selon les auteurs et les domaines, ce sont **tantôt les écosystèmes qui produisent les services, tantôt les composantes humaines** des écosystèmes anthropisés.

Afin de traduire cette différenciation, on distingue souvent les services environnementaux des services écosystémiques, les SE étant un sous-groupe des **services environnementaux** ne prenant pas en compte les services fournis par les écosystèmes semi-naturels ou anthropisés (Muradian et al. 2010). Le terme de service environnemental est par exemple employé dans les milieux de la production agricole ou aquacole pour mentionner la production de services issus de l'activité des exploitants des écosystèmes (maintien des paysages, maintien de savoir-faire traditionnels ...). L'expression de **service écosystémique** est davantage utilisée pour des travaux de recherche visant à évaluer la contribution des écosystèmes au bien-être humain et dans une optique pédagogique et de plaidoyer politique, alors que l'expression de service environnemental est souvent utilisée dans le cadre d'outils réglementaires visant à favoriser les bonnes pratiques dans le domaine de la conservation de la biodiversité : Paiements pour services environnementaux - PSE ; compensation écologique ... (Méral and Pesche 2016). Aussi, les services environnementaux peuvent inclure des biens et services issus du compartiment physique des écosystèmes (exemple : une dune de sable protégeant les habitations humaines du vent et des submersions marines), indépendamment du fonctionnement du compartiment biotique (Amigues and Chevassus-au-louis 2011) alors que les SE ne concernent que les biens et services directement liés à une activité des organismes vivants (exemple : pollinisation - voir projet EFES: EFES 2016). Ceci étant, d'autres distinctions de ces deux termes sont proposées, l'expression de "*paiements pour services écosystémiques*" peut également être observée. **Il n'y a pas encore de consensus à ce sujet.**

Nous pouvons également retrouver le terme de **service écologique** qui apparaît être un terme plus générique que celui de SE car pouvant s'appliquer à des entités spatiales composites, regroupant des écosystèmes variés (Amigues and Chevassus-au-louis 2011). Dans leur papier, Nahlik et collaborateurs (2012) proposent l'utilisation du concept de « **Bien et services finaux des écosystèmes** » (FEGS en anglais) plutôt que SE, qu'ils définissent (Boyd and Banzhaf 2007) comme les « *components of Nature, directly enjoyed, consumed, or used to yield human well-being* »¹³. Enfin, le programme international IPBES a pris parti de nommer les SE « *Nature's*

¹³ « *Composantes de la Nature, directement appréciées, consommées ou utilisées pour produire le bien-être humain* ». Cette définition présente plusieurs forces. Elle permet notamment, d'éviter en partie l'ambiguïté associée à d'autres définitions en limitant les SE aux éléments des écosystèmes avec lesquels les bénéficiaires interagissent directement. Par ce biais, on élimine le double comptage des SE en ne prenant pas en compte à la fois

benefits to people » (traduction : bénéfiques de la Nature à la société) qui reconnaît le rôle central de la culture, des valeurs intrinsèques de la biodiversité, et considère l'ensemble des interactions, tant positives que négatives avec la Nature (Díaz et al. 2018).

Hackbart et collaborateurs (2017), en réalisant une analyse des expressions utilisées pour qualifier les services rendus à l'Homme par la Nature, montrent, sur un total de 18 413 articles analysés, que 72% des études ont utilisé le terme de SE, 11% celui de bénéfiques environnementaux, 9% de services environnementaux et 9% d'autres termes.

Dans cette étude nous allons privilégier le terme de **service écosystémique** car les services qui nous intéressent en priorité sont ceux dont les impacts des perturbations anthropiques affectent la biodiversité, le fonctionnement des écosystèmes lacustres et le bien-être humain.

❖ Définir les services écosystémiques

Il y a une variabilité marquée des définitions des SE (un tableau présentant les 10 définitions des SE les plus utilisées dans la littérature est visible en Annexe 3-1). Elles prennent leurs racines dans l'un ou l'autre des champs disciplinaires qui s'intéressent actuellement à cette notion (Roche et al. 2016) et l'envisagent selon deux « *philosophies* » : Les SE sont soit directement assimilés aux **avantages** fournis par l'écosystème, soit associés aux **attributs de l'écosystème** (par ex : facteurs biologiques, physiques, chimiques, caractéristiques inhérentes à un écosystème) qui conduisent aux bénéfiques (Nahlik et al. 2012).

Trois définitions sont généralement utilisées pour qualifier les services écosystémiques (SE) :

- *“the conditions and processes through which natural ecosystems, and the species that make them up, sustain and fulfill human life”* (Daily 1997)¹⁴

- *“the benefits human populations derive, directly or indirectly, from ecosystem functions.”* (Costanza et al. 1997)¹⁵

- *“the benefits people obtain from ecosystems”* (MEA 2005)¹⁶

Cette dernière définition du Millennium Ecosystem Assessment (MEA) est la définition la plus communément utilisée. Elle possède une dimension plus intégrative que les deux premières (Fisher et al. 2008). Les définitions du MEA et de Costanza assimilent les SE aux avantages procurés par les écosystèmes tandis que celle de Daily considère que ce sont les conditions et

les processus écosystémiques (régulation de la qualité de l'eau) et les entités écosystémiques (eau potable) avec lesquelles les individus interagissent directement. Enfin, cette définition relie les SE aux caractéristiques écologiques et aux bénéficiaires, elle encourage ainsi la transdisciplinarité, et cette définition est simple, pouvant être comprise par le grand public. Les auteurs précisent toutefois que cette définition n'est pas encore opérationnelle mais est testée actuellement par plusieurs programmes nord-américains (Ringold et al. 2009).

¹⁴ Traduction : « Les conditions et processus à travers lesquels les écosystèmes Naturels, et les espèces qui les composent, soutiennent et comblent la vie humaine »

¹⁵ Traduction : « Les bénéfiques que les populations humaines dérivent, directement ou indirectement, des fonctions des écosystèmes »

¹⁶ Traduction : « Les bénéfiques que les sociétés se procurent des écosystèmes »

processus naturels qui créent les avantages (Nahlik et al. 2012). On voit bien ici que les trois définitions ne sont pas forcément compatibles entre elles.

Dans le cadre de cette étude, nous considérerons **la définition de Costanza** qui assimile les SE aux avantages procurés par les écosystèmes, tout en permettant de considérer l'étude des fonctions écosystémiques qui conduisent à ces avantages. Les services représentent alors une interface entre les sous-systèmes biophysiques et socio-économiques, ce qui est cohérent avec notre objectif de modélisation du système lac-BV-société et le fait de considérer les impacts des pollutions sur le fonctionnement de l'écosystème lacustre et les bénéfices qui en sont retirés. Les SE sont alors une production des interactions entre le lac et le BV et procurent des avantages à la société dont bénéficient les grands lacs.

❖ Approches d'évaluation des SE

Dans de nombreuses études, la caractérisation des services est déséquilibrée : selon Burkhard et collaborateurs (2012), elle s'effectue soit en privilégiant « *la capacité des fonctions écosystémiques et éléments biophysiques d'un écosystème à fournir un ou des services écosystémiques* », que l'on appelle la **fourniture en service**, soit en privilégiant l'étude des « *biens et services consommés ou utilisés à un lieu et un temps donné* », que l'on appelle la **demande** en services. L'étude de la demande est principalement portée par les économistes de l'environnement qui analysent les flux entre les SE et le système socio-économique et l'étude de la fourniture par les écologues qui analysent les flux entre le système naturel et les SE. De nombreuses méthodologies de caractérisation des SE peuvent être utilisées qui se rapprochent plus ou moins de l'une ou l'autre approche en fonction des orientations de recherches, des objectifs du projet, de l'écosystème considéré, des disciplines auxquelles sont rattachés les membres de l'équipe, du caractère participatif, des outils à disposition, du temps etc....

Notre approche dans cette étude est de réaliser une **co-évaluation** (ou approche intégrée d'évaluation) à la fois de la fourniture et de la demande en services et de leurs interactions, car elle permet véritablement d'assurer le lien entre les systèmes naturels et les sociétés humaines qui les utilisent et les gèrent (Amigues and Chevassus-au-louis 2011). Nous allons considérer également une troisième notion qui est celle de **l'accessibilité aux SE**. Cette notion est rarement mobilisée dans les études sur les SE (Ala-Hulkko et al. 2016), cependant elle est tout particulièrement importante à prendre en compte pour les grands lacs, du fait que la présence du plan d'eau engendre un aménagement territorial spécifique, avec notamment la difficulté de traverser un grand lac, hormis avec une embarcation et la présence de routes qui permettent d'en faire. Pour les grands lacs alpins, l'aménagement est enclavé entre les plans d'eau et les moyennes montagnes ce qui limitent l'étalement urbain et favorise l'urbanisation du littoral. Cette notion d'accessibilité est généralement mobilisée dans des approches de cartographie des SE (Burkhard and Maes 2017), nous souhaitons la compléter avec une approche socio-culturelle mettant en avant l'importance des pratiques, outils et techniques mobilisées pour « *accéder aux SE* » et en tirer profit (ex : l'utilisation d'appareil photo pour l'observation de la Nature, de filets, hameçons, embarcation pour les pêches, de stations de pompages pour extraire l'eau potable des lacs ...). Ce faisant, il sera possible d'identifier les conflits pouvant résulter des **difficultés d'accès** à certains SE et d'appréhender les impacts des pollutions sur l'accessibilité. Par ailleurs, nombre de mesures de gestion visent à réguler l'accès aux SE en agissant sur les pratiques (ex : interdiction d'accès à certaines zones,

limitation d'utilisation de certains moyens de pêche, coût d'entrée aux plages, etc.). Ainsi formalisée, l'accessibilité aux SE 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* » (d'après Lévy and Lussault 2013, Ala-Hulkko et al. 2016).

Il existe de nombreux outils permettant de caractériser les SE, généralement regroupés en trois types d'approches : **les évaluations de la valeur biophysique des SE**, qui consistent à caractériser la fourniture en SE par les écosystèmes, **les évaluations de la valeur socio-culturelle** et **les évaluations de la valeur économique** qui permettent de caractériser la demande en SE. La co-évaluation des SE cherche à évaluer les différents types de valeurs associées à un même SE au travers une complémentarité de ces différentes approches d'évaluations. Cette approche reflète ainsi à la fois la diversité des unités de mesures, des variables associées aux systèmes couplés Homme - Nature et la diversité des valeurs. Elle peut être tout particulièrement utile pour une mise en débat des enjeux de la conservation d'un écosystème entre acteurs et usagers.

Le choix des approches d'évaluation dépend des objectifs de l'étude des SE. Voici une liste (non exhaustive) de ces objectifs :

- Pour évaluer l'état et les tendances d'évolution des écosystèmes et des SE associés (ex : IPBES 2018c)
- Pour comparer la capacité de fourniture en SE des écosystèmes à la demande sociétale en SE. (ex : Wolff et al. 2017)
- Pour identifier la valeur des capitaux naturels et des SE (ex : TEEB 2010)
- Pour informer la gestion et la prise de décision (ex : IPBES 2018b)
- Pour comprendre et étudier le fonctionnement des relations Homme – Nature

Notre objectif est d'appliquer le concept de SE dans une approche rétrospective pour comprendre l'évolution de la fourniture et de la demande en SE des écosystèmes lacustres soumis aux pollutions. Plusieurs travaux mettent en avant le manque de considération des dynamiques temporelles dans les typologies (Chan et al., 2012; Johnston and Russell, 2011), les méthodes d'évaluation (Abson and Termansen 2011) et les évaluations elles-mêmes (TEEB 2010). On considère à ce jour que seuls 3% des papiers sur les SE se sont intéressés aux dynamiques temporelles (Rau et al. 2018). Cependant, les **bénéfices rendus par les SE ne sont pas invariants dans le temps** (Fisher et al. 2008, de Groot et al. 2010, Andersson et al. 2015), le niveau des SE peut répondre aux évolutions biophysiques et socio-économiques (Abson et al. 2014).

❖ Classifications des SE

Différentes classifications ont également été produites afin de rendre plus concret et plus opérationnel le concept de SE. Le MEA a opté pour une classification des SE en quatre catégories (Tableau 3-1) : (i) les **services d'approvisionnement** (produits agricoles, bois, eau potable, poissons, etc.), (ii) les **services de régulation** (climat, inondations, purification de l'eau, etc.), (iii) les **services culturels** (aspects esthétiques, religieux, récréatifs...), et (iv) les **services de soutien/support** servant de base au fonctionnement des trois premières catégories (cycle du carbone, formation des sols..) (MEA 2005).

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

Tableau 3-1 : Définition des types de SE (MEA 2005)

Type de SE	Définition
<i>Approvisionnement</i>	Produits issus des écosystèmes comme la nourriture, l'eau douce, le bois de feu, les fibres, produits biochimiques et ressources génétiques.
<i>Culturel</i>	Bénéfices immatériels que les hommes tirent des écosystèmes à travers l'enrichissement spirituel, le développement de la connaissance, la réflexion, le divertissement et les expériences de beauté écologique.
<i>Régulation</i>	Bénéfices issus de la régulation des processus des écosystèmes comme la régulation du climat, des maladies, de l'eau, l'épuration des eaux. Les services de régulation aident à maintenir la qualité de l'environnement dans les limites socialement désirées (Villamagna et al. 2013).
<i>Support</i>	Services nécessaires à l'octroi de tous les autres services fournis par les écosystèmes tels que la constitution des sols, le développement du cycle nutritionnel ou la production primaire.

Plus récemment, une classification globale et commune des SE est 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 (CICES 2018). La CICES (2018) reprend la classification du MEA (2005) et opte pour une classification des SE en **trois catégories** ; les services de support et de régulation sont regroupés en une seule catégorie afin d'éviter les doubles comptages dans les évaluations (ces SE sont liés pour la plupart aux mêmes fonctions écosystémiques et processus qui les sous-tendent). Les séparer en deux catégories distinctes augmente le risque de considérer deux fois le même service sous deux appellations différentes. Ceci étant, chaque écosystème pourrait posséder sa propre classification de services qu'il fournit.

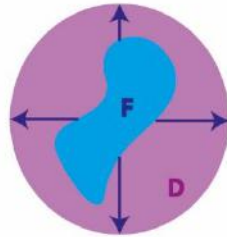
Cette classification en trois ou quatre groupes est de très loin la plus utilisée, mais est aussi très critiquée pour trois raisons principales : (1) **des confusions** existent entre fonctions écosystémiques, SE de régulation et de support, (2) il est très **difficile d'identifier** quels sont les éléments paysagers à l'origine des SE culturels, d'autant plus que de nombreuses études (Blicharska et al. 2017) mettent en avant l'importance des structures anthropiques au sein des paysages, (3) **la faible opérationnalité** de ce modèle du fait des problèmes de double-comptage dans la quantification, notamment monétaire (Wallace 2007, Costanza 2008, Fisher and Turner 2008, Fisher et al. 2008, Amigues and Chevassus-au-louis 2011). Ces problèmes de « *double-comptage* » entre services s'observent donc entre les SE support et de régulation, et parfois entre les services de régulation et services d'approvisionnement ; les premiers participant activement à la fourniture des seconds. Aussi, certains services peuvent entrer dans plusieurs catégories et il n'est pas toujours évident de réaliser les bons choix : l'activité de pêche participe aux services d'approvisionnement en produits de la pêche, mais également aux services culturels liés aux activités récréatives si l'on considère la pêche de loisir. Ces auteurs concluent que cette classification possède un **intérêt pédagogique, plutôt qu'opérationnel**.

D'autres classifications ont donc été proposées. Costanza (2008) et Fisher et collaborateurs (2008) proposent **deux autres catégorisations des services** intéressantes pour l'étude des territoires lacustres. La première distingue les services selon leur lieu de production et d'utilisation, elle inclut cinq catégories (Figure 3-4). La seconde (Figure 3-5) repose sur la distinction économique entre biens publics et biens privés sur la base de deux critères classiques : celui d'exclusion (il est possible concrètement d'empêcher l'usage du service à certains) et celui de rivalité (l'usage par les uns restreint l'usage par les autres). Les biens et services sont « **excluables** » dans la mesure où les individus peuvent être exclus de leurs bénéfices. Par exemple : « *je peux empêcher un tiers de consommer des produits que je cultive, mais je ne peux empêcher un tiers de profiter des biens offerts par la Nature, comme le climat agréable, les poissons de haute mer ou les avantages esthétiques d'un lac* ». Les biens et SE peuvent ensuite être « **rivaux** » dans la mesure où un bénéficiaire doit « *rivaliser* » avec un ou d'autres pour en profiter. Une même ressource peut être placée, suite à des évolutions techniques ou des décisions politiques, dans l'une ou l'autre des quatre catégories. L'utilisation de cette grille pour classer les différents services, peut donc se révéler utile pour fonder une gestion durable et intégrée, soucieuse d'une juste répartition des bénéfices issus de ces services (Amigues and Chevassus-au-louis 2011). Cette classification peut être compatible avec des concepts et outils de la conservation : la classification pose la question de la **solidarité écologique** entre producteurs, exploitants des SE et bénéficiaires à différentes échelles (Mathevet et al. 2010, Amigues and Chevassus-au-louis 2011) ou encore la **théorie des biens communs** (Ostrom 2009, 2012).

Classification des services par relations spatiales entre aires de fourniture (F) et de demande (D)

(d'après Costanza 2008 et Fisher et al. 2008)

SE Globaux distaux



Les services globaux distaux : services produits dans l'ensemble de l'écosystème et dont le bénéfice retiré ne dépend pas de sa proximité avec le lieu de production.

Ex : régulation du climat

SE Locaux proximaux



Les services locaux proximaux : services qui dépendent de la proximité spatiale entre l'écosystème et les bénéficiaires.

Ex : régulation des risques naturels

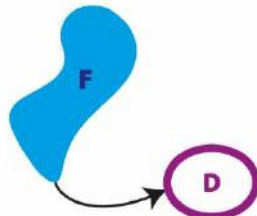
SE In situ



Les services in situ : services produits là où ils sont consommés ou utilisés.

Ex : approvisionnement en bio-ressources à des fins alimentaires (pêche, chasse), eau utilisée à des fins matérielles (navigation)

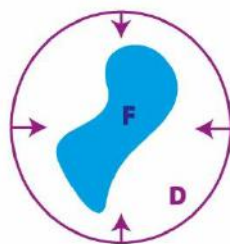
SE de flux directionnels



Les services liés à un flux directionnel : services qui nécessitent d'être acheminés par un flux directionnel entre le point de production et d'utilisation/consommation.

Ex : fourniture en eau potable

SE liés au mouvements des usagers



Les services liés au mouvements des usagers : services associés aux flux de personnes pour profiter d'une caractéristique naturelle unique.

Ex : interactions physiques et récréatives avec les lacs (activités de loisir)

Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2018

Figure 3-4 : Classification des SE par relation spatiale entre la fourniture et la demande en SE (d'après Costanza 2008 et fisher et al. 2008, complété par des exemples relatifs aux lacs)

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

	Excluable	Non excluable
Rivaux	Biens privés La plupart des services de prélèvements Ex. : la tourbe	Biens communs Certains services de prélèvement Ex. : la pêche maritime
Non rivaux	Biens de club Services récréatifs Ex. : la baignade	Biens publics Services de régulation Services esthétiques Ex. : le climat

Figure 3-5 : Classification des SE selon le type de biens (d'après Fisher et al. 2008)

Une dernière classification peut être intéressante pour la gestion est celle proposée par Roche et collaborateurs (2016). Celle-ci regroupe les SE suivant une logique de stocks-flux de ressources. Ainsi, ils distinguent :

Les stock-services, qui recouvrent en grande partie les biens pouvant être extraits de l'écosystème et exportés pour être utilisés, consommés ou modifiés (services d'approvisionnement).

Les processus-services, qui recouvrent les services tributaires du fonctionnement de l'écosystème pour être produits. Ils ne sont généralement pas exportables et dépendent de la maintenance et de l'intégrité de l'écosystème (services de régulation, support).

Les structure-services, qui recouvrent les services liés à la structure spatiale et/ou de l'apparence de l'environnement, des invariants biophysiques (services culturels, contrôle du vent, etc.).

Chacune de ces classifications serait intéressante pour l'étude des SE des grands lacs alpins. La classification de Fisher et collaborateurs (2008) selon le type de bien donne une importance forte aux questions de gestion des SE et met l'accent sur les relations entre bénéficiaires, mais nous paraît davantage adaptée à une évaluation de la demande en SE qu'à une co-évaluation. A l'inverse, la classification de Roche et collaborateurs (2016) serait très bien adaptée à l'étude de la fourniture, permettant d'identifier les composantes de l'écosystème impliquées dans la production des SE et de les spatialiser. La classification de Costanza (2008), complétée par Fisher et collaborateurs (2008) a l'avantage de proposer une **analyse spatiale des SE**, ce qui peut être intéressant dans le cadre d'une co-évaluation des SE des grands lacs alpins, elle permettrait notamment de prendre en compte l'inadéquation entre les aires de fourniture de certains SE (le lac et le BV) et les aires de répartition des bénéficiaires. Cependant, nous avons privilégié la typologie des SE de la CICES, du fait qu'elle limite les problèmes de double-comptages dans l'évaluation et qu'elle conserve une facilité de compréhension et d'utilisation par les acteurs qui seront amenés à être mobilisés dans le cadre de cette étude. En outre, la CICES classification internationale des SE de la CICES, peut être intéressante à mobiliser. Elle rend possible l'ouverture de notre recherche à l'étude d'autres grands lacs et la réutilisation des résultats pour d'autres écosystèmes ; cela permettrait également de s'appuyer plus

facilement sur les données issues de la bibliographie étant donné que la plupart des études suivent cette typologie.

❖ La caractérisation des bouquets de SE

L'approche des SE par les « **bouquets de SE** » est une méthode d'analyse qui peut dépasser certaines critiques et de nombreux auteurs insistent sur la nécessité de ces approches pour la conservation de la biodiversité (Kareiva et al. 2007, Bennett et al. 2009, de Groot et al. 2010). Les « *bouquets* » permettent de représenter le profil caractéristique des SE qui sont fournis par un écosystème. Ils sont souvent représentés sous forme de diagramme radar ; ce qui permet de bien comprendre **l'importance des interactions entre SE**, de **modéliser l'impact d'une perturbation** sur les SE ou de **tester les effets de certaines mesures de gestion** (voir Figure 3-6) et **d'appréhender plus facilement les compromis et synergies entre SE** (Roche et al. 2016). Le concept de bouquet reconnaît l'existence d'interactions multiples et permet d'effectuer des regroupements entre SE interdépendants à l'échelle d'un écosystème donné (de Groot et al. 2010) ; cette approche renforce l'analyse systémique et intégrée associée au concept.

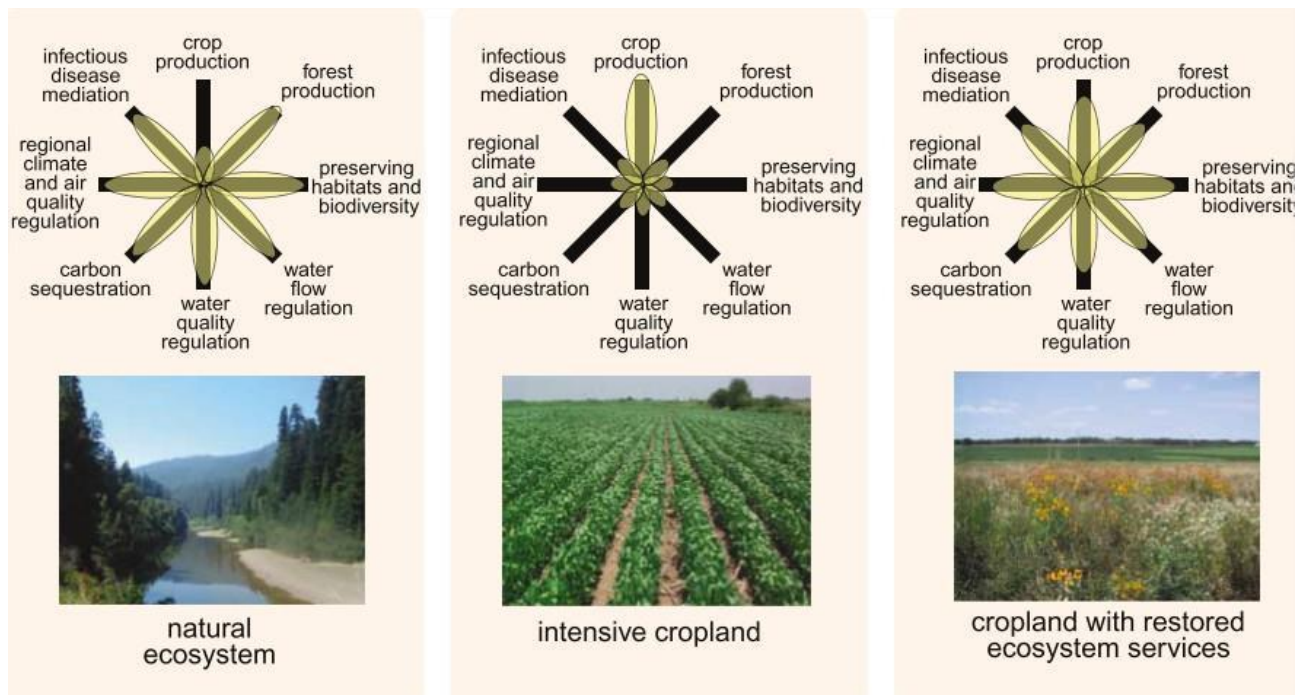


Figure 3-6 : Exemple de représentation des bouquets de SE et de leur réponse à différents modes d'usage des sols (Foley et al. 2005)

Deux grands mécanismes sont à l'origine de ces bouquets : ils possèdent soit un **déterminant biophysique commun**, soit une **interaction directe entre SE** (le SE 1 va modifier le niveau du SE 2) (Bennett et al. 2009). Les relations entre paires de SE peuvent alors être positives ou négatives, ou neutres si il n'y a pas d'effets. Si cette relation est positive, les services sont alors en **synergie** et sont renforcés simultanément, en raison d'une réponse à un même facteur ; ce qui est souvent le cas entre SE de régulation et d'approvisionnement et culturels. A l'inverse, si la relation entre paires de SE est négative, on parle alors de **compromis** (*tradeoff* en anglais) entre SE. Ces compromis surviennent lors de situations dans lesquelles il existe des demandes sociétales antagonistes entre SE : par exemple, la pisciculture (in situ) peut utiliser beaucoup

d'espace et limiter la possibilité de réalisation des autres SE de l'écosystème. Enfin, de plus en plus d'auteurs intègrent également la notion de **disservices** (parasites, milieux générateurs de nuisances olfactives, sonores ...) qui nuisent à la société (Evers et al. 2018).

Les types de SE et leur intensité dépendent du milieu et de la problématique traitée. Dans de nombreuses situations, les écosystèmes sont multi-services, fournissant aussi bien des SE matériels et non matériels (IPBES 2018a), cas des grands lacs. L'enjeu est alors d'identifier les « *bouquets de SE* » c'est-à-dire de décrire et analyser les relations de synergies et d'antagonismes entre plusieurs SE. Pour les grands lacs alpins, celles-ci dépendent parfois de **pratiques** (de Groot et al. 2010), **d'actions de gestion**, et toujours de **processus écologiques sous-tendant les SE de régulation**. L'analyse des bouquets de SE des grands lacs alpins permettra d'identifier les relations entre SE d'approvisionnement, culturels et les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux. Cette approche permettra d'explorer comment les atteintes à l'écosystème lacustre affectent les différentes composantes des SE, s'il existe des synergies entre SE qui impliqueraient une « *transmission* » des impacts des pollutions entre SE et d'identifier les relations spécifiques entre SE et bouquets de SE avec les qualités de l'eau et des milieux.

3.2.2 Le concept de système socio-écologique : les bases théoriques

D'après Liu et collaborateurs (2007), « *nous arrivons à un consensus qui montre aujourd'hui que, pour de nombreux problèmes les plus urgents aujourd'hui, l'environnement est mieux compris s'il est étudié comme un socio-écosystème* ». Au cours du XX^{ème} siècle, la compréhension des impacts des actions humaines sur les écosystèmes, est un sujet de recherche qui s'est imposé de manière croissante dans les communautés scientifiques et en politique depuis le siècle dernier (Vitousek et al. 1997). L'un des points fondamentaux mis en avant est la nécessité **d'intégrer des approches pluridisciplinaires pour analyser les problématiques complexes** impliquant des interactions entre les systèmes sociaux et écologiques (Folke 2006, Young et al. 2006, Ostrom 2007, 2009).

Alors que les sciences sociales se sont principalement focalisées sur la caractérisation des systèmes sociaux, sans chercher à analyser le lien avec les écosystèmes environnants, les sciences environnementales se sont elle intéressées à l'environnement biophysique sans le rapprocher des systèmes sociaux (Liu et al. 2007b, Collins et al. 2011). Dans les problématiques environnementales, notamment celles concernant les lacs, les aspects socio-économiques sont souvent moins bien étudiés que les aspects biophysiques (Liu et al. 2007b). La communauté scientifique est demandeuse d'une meilleure intégration de ces aspects, considérant **l'intégration des sciences sociales au sein des recherches écologiques de long terme comme une priorité urgente** (Redman et al. 2004, Collins et al. 2011).

Pour répondre à ce besoin, le **concept de socio-écosystème** (parfois appelé également système socio-écologique) apparaît à la fin des années 1990 (Gallopain 1994) et commence à être popularisé au début du XXI^{ème} siècle, avec un ouvrage de Fikret Berkes et Carl Folk (1998) : *Linking Social and Ecological Systems : Management practices and social mechanisms for building resilience*, et plus tard grâce à la publication d'Elinor Ostrom en 2009¹⁷ (Ostrom 2009)

¹⁷ Elle obtiendra la même année le prix nobel en économie pour ses travaux sur les Biens Communs

sur la durabilité des systèmes socio-écologiques. Ce concept permet de **modéliser, analyser, représenter les interactions Homme-Nature**. Un système socio-écologique est un « *système cohérent de facteurs sociaux et biophysiques qui interagissent de façon durable* » (Ostrom 2009). Les composantes sociétales et biophysiques du système sont considérées comme hiérarchiquement imbriquées et multi-niveaux, résultant de chaînes causales intégrant processus écologiques et constructions sociales (Gunderson and Holling 2001, Redman et al. 2004, Liu et al. 2007a).

Ce concept mêle les outils propres à deux courants de la gestion des ressources naturelles : **l'approche par les systèmes** et **l'approche de la gestion adaptative**, orientée sur la gestion des pratiques des utilisateurs des ressources plutôt que des ressources en elles-mêmes (Berkes and Folke 1998b) et propose une **combinaison de théories et d'approches multiples** issues de diverses disciplines pour développer la compréhension et la gestion durable des socio-écosystèmes (Collins et al. 2011). Le champ scientifique associé à ce concept est principalement tourné vers la recherche de nouveaux cadres conceptuels d'études des SSE, visant à bien comprendre leur fonctionnement et à mieux caractériser les interactions Homme-Nature (Liu et al. 2007b).

Les différents points qui vont être abordés dans cette partie concernent des éléments de définition sur la complexité et les approches des SSE, puis sur leurs propriétés et caractéristiques.

❖ Qu'est-ce qu'un système complexe ?

Un système est composé d'un ensemble plus ou moins hétérogène d'éléments et d'événements en interactions (Lévy and Lussault 2013). Chaque composante du système peut être vue comme un sous-système du système entier et le système lui-même peut être un sous-système d'un autre plus large. Comprendre un système requiert de comprendre non seulement les éléments qui le constituent, mais également les modèles de relations entre eux, dans l'optique de déterminer la manière dont chaque élément du système affecte les autres composantes de celui-ci (Gallopain 1994). Ce système est complexe si ces éléments ou événements le sont, c'est-à-dire s'il est composé d'un grand nombre **d'interactions diversifiées entre les composantes** du système, au point que l'enchaînement des processus internes est difficilement prévisible du fait de la présence de phénomènes aléatoires, chaotiques, qui peuvent apparaître, disparaître, évoluer ou encore se transformer de manière inédite (Lévy and Lussault 2013). La complexité caractérise un type de « système qui, en raison de la diversité des processus qui s'y déroulent, possède la capacité d'évoluer dans différentes directions, ce qui rend la dynamique globale du système difficile à prévoir à partir des conditions du présent » (Brunet et al. 1992). Le terme "*complexe*" est différent du terme "*compliqué*" (voir Encadré 3-4).

Le système grand lac – BV – société répond à cette définition car il intègre un grand nombre de composantes diverses (à la fois naturelles et sociétales), agrégées au sein de plusieurs niveaux d'organisations, qui interagissent entre eux de manière non-linéaire (avec des « *feed back* » - « effet retour » en français), à des échelles de temps et d'espace hétérogènes (Levin 1998, Wu and David 2002, Parrott 2010). Mais c'est aussi un « système adaptatif » car ses composantes s'adaptent au fur et à mesure de leurs interactions ; ce qui ajoute un caractère instable et imprédictible (Levin 1998, Walker et al. 2002). Les problèmes environnementaux

qui affectent ce système sont en conséquence des **problèmes complexes** (Binder et al. 2011) impliquant les différentes composantes liées au système écologique et au système social des grands lacs.

Encadré 3-4 : « C'est complexe, c'est compliqué ... » quelles différences ?

L'antonyme de complexe est "*élémentaire*", il se base sur la relation linéaire cause/effet. Le couple complexe/élémentaire a une signification différente du couple simple/compliqué qui fait référence à la communication et qui porte sur la capacité de produire une énonciation aisément accessible ou non et utilisable dans un contexte culturel donné" (Brunet et al, 1992).

❖ Apports du concept d'entropie à l'étude des SSE

L'analyse des systèmes complexes tient son origine des sciences mathématiques et de la **thermodynamique** (Locqueneux 2004). Les principes de la thermodynamique contrôlent et imposent des limites à tout ce qui se passe dans un système et peuvent s'appliquer à l'étude des SSE. Le point clé par rapport à notre sujet nous semble être la relation entre l'information dans un système, son fonctionnement et le **principe d'entropie**. La thermodynamique postule que l'état d'équilibre d'un système isolé est celui dont l'entropie est maximale.

Pour comprendre l'entropie et faire une ouverture conceptuelle de cette loi pour les SSE, il est nécessaire de considérer deux types d'états d'un même système donné : l'un « *microscopique* » qui correspond à l'interaction entre deux composantes internes de ce système et l'un « *macroscopique* » qui résulte de l'association de l'ensemble des états microscopiques : par exemple, l'état macroscopique d'un SSE lacustre est l'association du lac avec son BV et sa société ; il résulte d'une multitude d'états microscopiques qui associent ses composantes entre elles (ex: la charge externe du lac apporte des matériaux qui participent aux cycles biogéochimiques, ceux-là même qui participent à la fourniture de certains SE ...). **Parmi une multitude de combinaisons entre composantes d'un système complexe, seule une faible partie d'entre elles participe à sa dynamique et apporte de l'ordre au fonctionnement global (macroscopique) du système.** La grande majorité des combinaisons entre composantes d'un système relève donc d'états microscopiques marginaux pour le système. La somme de tous les états microscopiques permet d'obtenir le degré d'entropie d'un système, qui s'apparente à son degré de complexité (Pinker, 2018). Ainsi, en vertu du principe d'entropie, **toute perturbation, mouvement, évolution, changement du système lac - BV - société a davantage de probabilité de provoquer un état peu fonctionnel ou désordonné, qu'un état ordonné.** Cette dissipation de l'ordre constitue la loi d'entropie : "*c'est une fonction qui exprime la dégradation de l'énergie ou de l'ordre à l'intérieur d'un système*" (Brunet et al. 1992).

Quel rapport entre le fonctionnement du SSE grands lacs alpins et l'entropie ? La fourniture optimale en SE des grands lacs alpins dépend d'un petit nombre d'arrangements ordonnés hiérarchiquement de composantes du SSE, parmi un nombre immense de possibilités. **En théorie, un nombre considérable d'événements peut porter atteinte aux SE d'un grand lac,**

mais seule une poignée d'espèces et de processus clés a une importance fonctionnelle. Identifier ces espèces et processus est tout l'enjeu de l'utilisation du concept de SSE et fera l'objet du chapitre 6.

L'**information et les connaissances** ont alors une place capitale pour maintenir un état "ordonné" et durable des SSE (d'après Stiegler 2015). Les cadres conceptuels constituent ainsi les "*macroscopes*" facilitant l'exploration fonctionnelle des SSE, à savoir l'étude des processus microscopiques qui se produisent dans le système. Ces cadres conceptuels permettent de représenter le SSE et de proposer des outils d'organisation, de hiérarchie de l'ensemble des informations dont on dispose sur son fonctionnement.

❖ **Les systèmes socio-écologiques : diversité et choix d'une référence**

Dans la littérature, les systèmes servant à représenter/modéliser/analyser les interactions Homme – Nature constituent ce qu'on appelle « *les systèmes couplés humains et naturels* » (*Coupled Human And Natural Systems* = CHANS) (Liu et al. 2007b). Ces derniers peuvent être utilisés de trois manières (Gallopain 1994) : (1) pour **l'étude des actions humaines** qui agissent sur le système naturel, (2) pour **l'étude des effets écologiques** générés par la Nature sur les actions humaines, (3) **en tant qu'outil intégré** qui considère les deux visions venant d'être listées.

En fonction du point de vue utilisé et des objectifs de leur application, différents systèmes et plusieurs approches ont été développés afin de faciliter l'étude des CHANS :

- L'approche par les **système socio-écologique – socio-écosystème – système humain-environnement**¹⁸ (Gallopain 1994, Walker et al. 2004, Young et al. 2006, Zurlini et al. 2006, Ostrom 2009, Lambin and Meyfroidt 2010). Tous ces termes se réfèrent à un système composé d'une composante sociétale (humaine) et d'une composante écologique (ou biophysique) qui interagissent (Gallopain 1994, Berkes and Folke 1998b). Ces deux composantes sont considérées comme imbriquées, à multi-niveaux, qui fournissent des services essentiels à la société (Berkes and Folke 1998b).
- L'approche par les **système humain-technologie-environnement** (Pahl-Wostl 2007a). Il prend en compte les facteurs environnementaux, humains et technologiques, en particulier leurs interdépendances dans la représentation du CHANS (Pahl-Wostl 2007a). Dans cette formalisation, les utilisateurs des ressources naturelles et les institutions ont une représentation du monde qui va déterminer leurs actions et la mise en place d'outils technologiques pour améliorer l'état des écosystèmes ou atténuer les impacts générés par les activités anthropiques. Ce cadre conceptuel est généralement utilisé dans la gestion d'une ressource naturelle en particulier (eau, déchets, sols, etc.) (voir : www.resalliance.org)
- L'approche par les **système naturel-économique** analyse les interactions entre les compartiments sociaux et écologiques en termes de flux de matière, d'énergie et d'économies (Weston & Ruth 1997).

L'approche par le SSE est la vision la plus large des trois et vise à comprendre le **fonctionnement de l'ensemble du système « écosystème – société »**, en prenant en compte

¹⁸ Les différents termes font référence au même concept

les jeux d'échelles spatio-temporelles et les effets de retour (*feedbacks*) entre les écosystèmes et les sociétés. Cette approche apporte une meilleure compréhension des processus multi-scalaires des interactions Homme-Nature. Prendre en compte ces aspects est primordial pour la gestion intégrée et durable des territoires, au sein de laquelle la santé des écosystèmes et le bien-être humain sont développés et les SE distribués de manière plus équitable pour la présente génération et celles à venir (Pahl-Wostl 2007a, Collins et al. 2011).

Une autre manière de définir un SSE est proposée par Redman et collaborateurs (2004) qui le définissent comme (1) **un système cohérent de facteurs biophysiques et sociaux** qui interagissent d'une manière durable et résiliente, (2) défini à une **certaine échelle spatiale, temporelle et organisationnelle**, avec des composantes naturelles et sociales qui sont hiérarchiquement liées, (3) qui possède un ensemble de ressources (naturelles, socioéconomiques et culturelles) dont les flux et usages sont régulés par la combinaison de **deux sous-systèmes écologique et social**, (4) **complexe**, perpétuellement **dynamique** et en continuelle **adaptation** (Machlis et al. 1997). Cette définition, centrée sur les propriétés de ces systèmes précise les définitions initiales de Gallopin (1994) et de Berkes et Folke (1998) et nous convient mieux dans le cadre de cette étude.

❖ La question des échelles et de la durabilité des SSE

Un système socio-écologique est bien plus que la somme de ses parties

Tous les systèmes socio-écologiques sont **vulnérables**. Ils sont susceptibles de subir des dommages en raison des changements ou perturbations qu'ils peuvent subir, à l'origine des interactions Homme/Nature (Liu et al. 2007a). Les SSE ont cependant une **capacité d'adaptation et de résilience** qui leur permet de soutenir les SE et le bien-être humain (Chapin et al. 2010). **La durabilité** de ces systèmes est un objectif primordial comprenant des hypothèses ou des préférences souhaitables pour les états du système (Carpenter et al. 2001). Dans la littérature, on retrouve plusieurs définitions de la durabilité des SSE, il s'agit de (1) l'ampleur de la perturbation qui peut être tolérée par un SSE avant qu'il ne change d'état, (Carpenter et al. 2001), (2) la capacité d'un système à subir des perturbations, à maintenir ses fonctions et à se réguler (Gunderson and Holling 2001), (3) la capacité des CHANS à conserver leur structure et un fonctionnement similaire après l'impact d'une perturbation ou suite à un développement humain continu (Holling 2001, Walker et al. 2004).

Historiquement, les interactions humains – nature prenaient place principalement **au niveau local**, alors qu'aujourd'hui des interactions régionales, continentales et globales ont émergé. (Young et al. 2006, Liu et al. 2007a). Bien que ces interactions soient reconnues (Vitousek et al. 1997), elles ne sont pas en général bien caractérisées ni comprises, alors que les comprendre pourrait amener à la découverte de nouvelles informations essentielles au développement d'une gestion intégrée et durable des territoires (Liu et al. 2007b).

Les SSE existent à plusieurs niveaux (Gallopin 1994). Ils peuvent être connectés et vus comme des entités **hiérarchiquement imbriquées**, formant des chaînes complexes d'interactions dynamiques entre les systèmes naturels et sociaux et qui donnent naissance à des structures, fonctions et processus qui assurent le bon fonctionnement du système et la fourniture de

services à la société (Gunderson and Holling 2001, Redman et al. 2004, Liu et al. 2007a). Ces interactions ne sont pas uniquement à « *sens unique* », elles peuvent être réciproques et générer des **effets retour, effets de rétroactions** entre les dynamiques écosystémiques et sociales (Carpenter et al. 2007). « *La rétroaction désigne une action qui a un effet sur l'origine de cette action* » (Lévy and Lussault 2013 p. 875). On parle de **boucle de rétroaction** entre composantes dans un SSE, si celle-ci peut avoir un impact négatif sur la gestion du système en amoindrissant la portée d'une action, ou à l'inverse conduire à amplifier sa portée, à renforcer ses effets (Lévy and Lussault 2013). Une rétroaction positive peut néanmoins générer un déséquilibre pour un SSE, du fait que certains processus sont bénéfiques pour un système jusqu'à l'atteinte d'un **certain seuil**.

L'ensemble de ces connexions peut se manifester au-delà des frontières sociales ou écologiques du système, et être à l'origine de processus internes ou externes à celui-ci (Liu et al. 2007a). Certaines interactions Homme - Nature, comme l'urbanisation ou la mondialisation, ont accentué ces dynamiques. Elles sont aujourd'hui plus communes et plus importantes que par le passé, où elles se produisaient essentiellement à l'échelle locale (Young et al. 2006, Liu et al. 2007b).

Par ailleurs, ces processus ont des **échelles temporelles** qui peuvent varier. Certains processus qui se réalisent à une époque peuvent se manifester à une autre sous le coup de la résilience, ou encore par « *effets d'héritages* » ; les impacts de perturbations à une certaine époque peuvent se **cumuler dans le temps** pour former de nouveaux impacts à une période ultérieure (Liu et al. 2007a).

Ainsi, l'enjeu ne sera pas d'analyser le système à large échelle, mais d'observer comment les interactions entre les systèmes écologiques et sociaux s'intègrent et évoluent aux différentes échelles (Gunderson and Holling 2001, Moffatt and Kohler 2008). Pour ce faire, quelques éléments importants seront à déterminer (Redman et al. 2004) :

- Quelles sont les limites spatiales et temporelles de chacun des processus écologiques et sociaux ?
- Quelles sont leurs caractéristiques spatiales et temporelles ?
- Quels sont les décalages temporels entre les événements et leurs réponses ?
- A quelles échelles spatio-temporelles faut-il étudier tel ou tel processus ?
- Quelle est l'échelle optimale des données à récolter pour expliquer au mieux les phénomènes ?

Aborder ces questions suppose de souligner les liens hiérarchiques entre les systèmes naturels et sociaux à travers l'organisation spatiale et les échelles temporelles (Smith et al. 1999, Scheffer et al. 2001, Carpenter et al. 2007, Liu et al. 2007a, Collins et al. 2011). Carpenter et al. (2007) complètent par le besoin de travaux focalisés sur les lacs comme **sentinelles des changements écosystémiques et régionaux, du fait des interconnexions entre les territoires lacustres et les systèmes voisins, voire mondiaux**.

❖ Propriétés et caractéristiques des SSE

Les différentes caractéristiques des SSE sont citées par Wu and David 2002, Pahl-Wostl (2007b), Parrott (2010). Les SSE peuvent être : (1) multiscalaires, (2) non linéaires, (3) évolutifs et adaptatifs, (4) hiérarchiques, auto-organisés et/ou dépendants d'un contrôle distribué (contrôlés par un élément externe au système : Etat, climat, etc.), (5) ouverts et interagissant avec d'autres systèmes, (6) incertains, (7) avec de multiples « *identités* » et plusieurs systèmes de représentations de la part des acteurs qui vivent et interagissent avec eux.

Ces caractéristiques peuvent présenter un ensemble de freins d'une part à l'évaluation de l'état et l'analyse de la compréhension des SSE et d'autre part à la gestion durable et adaptative de ces systèmes qui doit chercher à prendre en compte l'ensemble de ces propriétés. Le diagnostic d'état des SSE doit alors permettre de mesurer les dynamiques des SSE et suivre les relations entre leurs différentes composantes.

Cependant, l'ensemble de ces caractéristiques confère aux SSE quatre grandes propriétés qu'il est possible d'étudier et d'optimiser pour la gestion (Gallopain 1994) : 1 - **adaptabilité et flexibilité**, 2- **robustesse, résilience et stabilité**, 3- **capacité de réponse**, 4- **auto-dépendance, autonomie**. Nous présentons chacune de ces grandes propriétés ci-après.

1. Adaptabilité et flexibilité

Un SSE n'est jamais statique, il est toujours en état de changement ; ce qui confère au SSE la capacité à s'adapter à un ensemble d'événements inattendus. Il est également flexible et peut être influencé, dans la mesure où il peut mettre en place les modifications nécessaires qui lui permettront d'améliorer sa condition en relation avec son environnement (Gallopain 1994). Concernant le système social, l'adaptabilité et la flexibilité pourraient être définies comme la capacité à maintenir la qualité de vie de ses individus et/ou des communautés à des valeurs adéquates pour le bien-être humain dans un environnement donné (Gallopain 1994).

L'adaptabilité et la flexibilité sont des composantes de la **résilience** qui reflètent la capacité d'apprentissage d'un système en réponse aux perturbations (Gunderson and Holling 2001). Ces propriétés correspondent à une économie d'efforts, qui, une fois réalisée, permet au système l'accomplissement de ses fonctions. Le système met en œuvre des procédés pour y tendre (Lévy and Lussault 2013).

2. Robustesse, résilience et stabilité

Il existe plusieurs niveaux de compréhension de la résilience. La résilience peut être vue comme une « *métaphore liée à la durabilité* », en tant que propriété des modèles dynamiques ou en tant que variable mesurable des SSE (Carpenter et al. 2001). Cette propriété évoque la capacité des SSE à absorber les perturbations, altérations qui modifieraient la structure et/ou le fonctionnement du système. Elle représente à ce titre une forme de résistance aux changements, qu'ils soient positifs ou négatifs (Brunet et al. 1992, Ramade 1993).

Les SSE sont ainsi résilients face aux impacts des perturbations anthropiques, ce qui permet d'atténuer l'importance des chocs écologiques et de retarder leur apparition. Cependant, la dynamique de restauration des SSE est également résiliente. Cette résilience peut contrer les

efforts de restauration des lacs et les retarder (Carpenter and Cottingham 1997). La résilience peut ainsi être désirable ou non pour les usages et être vue comme un avantage ou un frein à l'évolution d'un SSE.

Dans toute étude sur la résilience se pose la question de l'intensité de la perturbation que peut tolérer le système avant d'évoluer vers un autre état (Carpenter et al. 2001). Ces perturbations peuvent être prolongées ou ponctuelles, d'origine interne ou externe au système, d'origine anthropique ou non et peuvent altérer de manière tellement intense un système qu'elles modifient l'organisation de l'ensemble du système (Gallopain 1994, Janssen and Ostrom 2006, Liu et al. 2007a). Le niveau de résilience d'un SSE va dépendre de 3 éléments (Carpenter et al. 2001) : (1) la quantité de changements que le système peut subir, (2) le niveau d'auto-organisation du système, (3) le niveau d'adaptation du système. La mesure de la résilience peut être analysée et donc nous informer de l'état de santé du SSE.

3. Capacité de réponse

La « *capacité de réponse* » se réfère à la capacité d'un système à posséder les processus écologiques, sociaux ou issus de l'interaction entre les systèmes écologiques et humains lui permettant de faire face aux changements. Elle dépend de son adaptabilité, de sa robustesse et de sa résilience. Le système social dépend également de sa capacité à présenter un nombre important d'options disponibles pour faire face aux changements ainsi qu'aux moyens pour les mettre en place (Gallopain 1994).

4. Auto-organisation et autonomie

L'auto-organisation est un processus par lequel un ensemble d'éléments interagissant les uns avec les autres produisent une organisation qui tend à se maintenir sur une certaine durée (d'après Lévy and Lussault 2013). Chaque système possède un certain degré d'autonomie sur son propre fonctionnement, et de contrôle par d'autres systèmes externes (forçages). L'autonomie est la capacité du système à réguler ses interactions avec l'environnement extérieur. Il implique le développement de mécanismes internes pour développer ses propres objectifs, priorités et son identité, cela implique la capacité des systèmes sociaux à innover et prévoir les changements et perturbations à venir (Gallopain 1994).

3.3 Application des concepts de SE et de SSE au système grand lac – BV – société : choix d'une démarche

D'une manière générale, de nombreux enjeux sociétaux sont liés à la caractérisation des SE associés aux ressources lacustres et à l'eau en général (voir encadré 3-5). Il semblerait même que, plus un lac est grand, plus son potentiel de fourniture en SE est fort et plus la valeur économique de ses SE est élevée (Reynaud and Lanzanova 2017). Ceci souligne l'importance des études visant à l'évaluation des SE des grands lacs. Des enjeux méthodologiques existent également en ce qui concerne l'utilisation des concepts de SE et de SSE et l'évaluation des impacts anthropiques sur les SE des lacs (Keeler et al. 2012, Hackbart et al. 2017).

Les études des relations entre qualités de l'eau et des milieux et SE sont généralement centrées sur l'analyse des impacts des polluants sur le fonctionnement du lac, sans que les

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

résultats soient toujours extrapolés aux impacts générés sur la pêche, l'eau potable ou encore l'image des lacs. Ces informations importantes seraient d'avantage adaptées à la sensibilisation du public si elles étaient **associées aux usages des lacs**. La gestion des ressources aquatiques devrait pouvoir s'appuyer sur des **modèles** prenant en compte les variations des systèmes naturels et sociaux et leurs conséquences sur le bien-être humain (Keeler et al. 2012).

Keeler et al. (2012) mettent en avant plusieurs lacunes de l'évaluation des SE aquatiques, notamment une **sous-estimation sérieuse des actions de gestion** sur les SE et le manque de prise en compte des **relations entre qualités de l'eau et des milieux et SE**, alors que les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux pilotent un nombre important de processus déterminants pour les SE d'approvisionnement et culturels.

Pour répondre en partie à ces manques de connaissances, l'objectif de la thèse est la réalisation d'une évaluation intégrée des SE pour comprendre les relations entre SE et régulation des qualités de l'eau et des milieux et bien-être humain. Dans une perspective plus large, il s'agit de comprendre le fonctionnement de la gouvernance des grands lacs et de quelle manière les qualités de l'eau et des milieux sont prises en compte. Les concepts de SE et de SSE font appel à différents types de modélisation, permettant de mobiliser les outils d'analyse des différentes disciplines des sciences écologiques, des sciences humaines et sociales et de l'ingénierie territoriale. La présente partie du chapitre 3 présente la démarche de couplage des concepts et les connaissances nécessaires à la construction d'un cadre conceptuel des SSE des grands lacs alpins.

Encadré 3-5 : L'importance de l'eau pour le bien-être humain

L'eau douce est une ressource vitale et irremplaçable pour les sociétés humaines et pour les écosystèmes (Aznar-Sánchez et al. 2019). Les services relatifs à la ressource en eau sont associés à l'ensemble des catégories de services décrites par le MEA (SE de support, approvisionnement, régulation, culturels) (Pinto et al. 2010) et font partie des plus importants pour le bien-être humain et le développement des sociétés humaines (de Groot et al. 2010, Keeler et al. 2012, Aznar-Sánchez et al. 2019). L'eau est un élément du biotope souvent considéré comme un déterminant majeur des SE des milieux aquatiques, mais également des milieux terrestres. Des processus physiques associés aux propriétés de l'eau (propriétés thermiques, viscosité) ou des masses d'eau (pression, densité, étagement...) jouent un rôle tout aussi important que la biodiversité dans la réalisation de certains SE de régulation ; c'est le cas notamment des processus de dilution, de sédimentation et décantation de l'eau, de l'hydrologie et du retournement des masses d'eaux déterminants pour le service de filtration et purification de l'eau dans les lacs.

La fourniture globale des SE associés à l'eau est en diminution du fait d'une diminution de la disponibilité de cette ressource (Culhane et al. 2018). L'eau fait l'objet de prélèvements croissants pour l'alimentation en eau potable des populations, l'irrigation ou l'industrie, générant de plus grands déficits en eau (Aznar-Sánchez et al. 2019). La biodiversité aquatique est impactée par les changements de MUS, la croissance démographique, la surexploitation des ressources halieutiques ; en conséquence la perte d'écosystèmes aquatiques est la plus importante de tous les écosystèmes (ONEMA 2013, Aznar-Sánchez et al. 2019). Les milieux aquatiques sont également particulièrement sensibles au réchauffement climatique. Les périodes de sécheresse de plus en plus longues et plus importantes ont des répercussions à la fois sur l'approvisionnement en eau potable et sur les écosystèmes dépendant de l'eau et des milieux aquatiques, ce qui se répercute sur de nombreuses composantes du bien-être humain, des territoires bénéficiant des écosystèmes aquatiques et des écosystèmes adjacents qui en dépendent (IPBES 2018a). Les problématiques associées aux inégalités d'accès aux ressources en eau sont alors devenues les plus urgentes qui affectent le système planétaire (Aznar-Sánchez et al. 2019).

3.3.1 La co-évaluation de la fourniture et la demande en SE : un défi de l'évaluation des SE

La co-évaluation de la fourniture et de la demande en SE accorde de l'importance aux processus écologiques et socio-économiques complexes qui sous-tendent les rapports sociétés - grands lacs. Cette approche permet également de s'affranchir de certaines critiques sur la monétarisation de la Nature en développant une démarche intégrée à même de diversifier les points de vue et disciplines. Dans cette thèse les résultats sont également replacés dans des contextes d'analyses rétrospectives, cherchant à mettre en avant des tendances et approches typologiques et semi-quantifier pour évaluer les trajectoires des SE. Se baser sur les faits passés permet d'accroître la fiabilité des résultats du fait qu'ils reposent sur des événements vécus ou déjà observés, mesurés.

La co-évaluation des SE des grands lacs alpins va permettre l'exploration des relations entre les grands lacs et leurs BV, notamment les conséquences qu'elles entraînent sur les qualités

de l'eau et des milieux, les SE liés et le bien-être humain. Nous souhaitons développer un cadre conceptuel permettant l'étude spécifique des relations entre qualités de l'eau et des milieux et SE. La présente section synthétise les informations nécessaires au développement d'un tel cadre.

❖ Les points clés de la construction d'un cadre conceptuel associé au concept de SE

La définition de cadre conceptuel a été donnée en introduction du présent chapitre. Ces modèles prennent généralement la forme **d'organigrammes** des composantes qui associent les écosystèmes au bien-être humain et conduisent à la production de SE. Il existe plusieurs types de cadres conceptuels des SE (voir Annexe 3-3) qui répondent à différents objectifs (Nahlik et al. 2012) : (1) **Analyser l'organisation des SE** (De Groot et al. 2002, Kremen and Ostfeld 2005, Fisher et al. 2008, Rounsevell et al. 2010), (2) proposer des outils méthodologiques pour **caractériser les SE** et/ou les quantifier (Hein et al. 2006), (3) **rendre opérationnel** le concept en prenant en compte la gestion des écosystèmes (Turner and Daily 2008, Daily et al. 2009). Nahlik et collaborateurs (2012) proposent une méthode d'élaboration d'un cadre conceptuel associé aux SE, et mettent en avant six points clés de la composition et l'application d'un cadre conceptuel pour leur application :

1. Les cadres conceptuels doivent contenir une **définition claire des SE** et un **système de classification** approprié au sujet d'étude,
2. Etre associé à une **approche transdisciplinaire**, qui mobilise les savoirs des acteurs et usagers de l'écosystème étudié,
3. Etre utilisé en **application avec les acteurs de la gestion du territoire** que l'on étudie (approche intégrée),
4. **Etre résilient** : un cadre de services écosystémiques devrait inclure des stratégies d'adaptation flexibles et résilientes pour son application,
5. **Etre cohésif et cohérent** : le cadre conceptuel doit être fondé sur les hypothèses sous-jacentes à l'étude et le cadre global doit être organisé de façon logique et réaliste,
6. Etre opérationnel et pouvoir être appliqué à un ou plusieurs écosystèmes.

Les auteurs expliquent que les points clés ci-dessus sont fondamentaux à la caractérisation des SE (en particulier les définitions des SE, leur classification et l'approche intégrée) et sont souvent mal traités. A partir de ces éléments, ils proposent un cadre méthodologique pour la création d'un cadre conceptuel d'étude des SE : (1) Identifier les objectifs et principes directeurs, ensemble de règles fondamentales propres à l'étude, (2) lister les SE, les définir et les classer en fonction des objectifs et principes directeurs précédemment établis (ces deux étapes permettent de définir le cadre conceptuel d'étude des SE spécifique à l'écosystème considéré), (3) mettre en application le cadre conceptuel avec la création d'un plan de mise en œuvre qui explique les méthodes et l'approche par lesquelles le cadre conceptuel d'analyse des SE va être réalisé.

Nous veillerons à suivre ces recommandations pour la co-évaluation des SE des grands lacs alpins dans le chapitre 5. Les principes directeurs propres à l'étude, sur lesquels repose l'application du concept, visent à répondre à l'hypothèse présentée en introduction : « *les services écosystémiques rendus par les grands lacs ne sont pas invariants dans le temps. Ils se*

sont construits, ont évolué en réponse à l'évolution des usages des lacs, de la qualité de l'eau et de ses impacts sur la société et des réponses apportées par la société pour y répondre ». En conséquence, le cadre conceptuel d'application des SE devra permettre l'analyse rétrospective, prendre en compte les impacts des pollutions sur les SE, l'étude des usages des grands lacs et leur évolution en réponse aux demandes des bénéficiaires et des dégradations des qualités de l'eau et des milieux. En conséquence, le cadre conceptuel devra accorder une place importante aux SE de régulation des qualités de l'eau, permettant de faire le lien entre les atteintes aux fonctions écosystémiques et la transmission des impacts jusqu'aux SE d'approvisionnement et culturel. Ce cadre conceptuel devra permettre une étude des bouquets associés à ces SE de régulation.

❖ Le modèle en cascade : un modèle de base pour la co-évaluation des SE

Parmi les cadres d'analyse des SE, le "*modèle en cascade*" de Haines-Young and Potschin (2010) est intéressant pour notre étude car il représente les SE comme **une interface entre le fonctionnement des écosystèmes et le fonctionnement des sociétés** et est compatible avec une approche de **co-évaluation** des SE. Il fait partie des cadres conceptuels les plus compréhensifs, complets et des plus utilisés aujourd'hui pour caractériser les SE (Van Oudenhoven et al. 2012). Ce modèle considère les SE comme un lien fonctionnel entre, d'une part les systèmes naturels, qui déterminent la capacité d'un écosystème à fournir des SE et d'autre part, le système socio-économique au travers l'ensemble des bénéfices et valeurs tirés des SE, qui profitent à un ou plusieurs bénéficiaires (Van Oudenhoven et al. 2012, Roche et al. 2016). Ce modèle opère une distinction claire entre les composantes biophysiques de l'écosystème qui participent à la formation des fonctions écosystémiques et conduisent à la **fourniture des SE**, et entre les bénéfices pour la société dont il est possible d'en retirer et qui répondent à une **demande en SE** (voir Figure 3-7). Ainsi formalisés, les rapports entre les systèmes naturel et humain se caractériseraient par des relations **fourniture – demande en SE** (Brunet 2016). Cette vision met en avant que les écosystèmes contribuent au bien-être humain à partir du moment où ils répondent à un besoin sociétal et qu'ils sont exploités par des **bénéficiaires** (Costanza 2008, Fisher and Turner 2008).

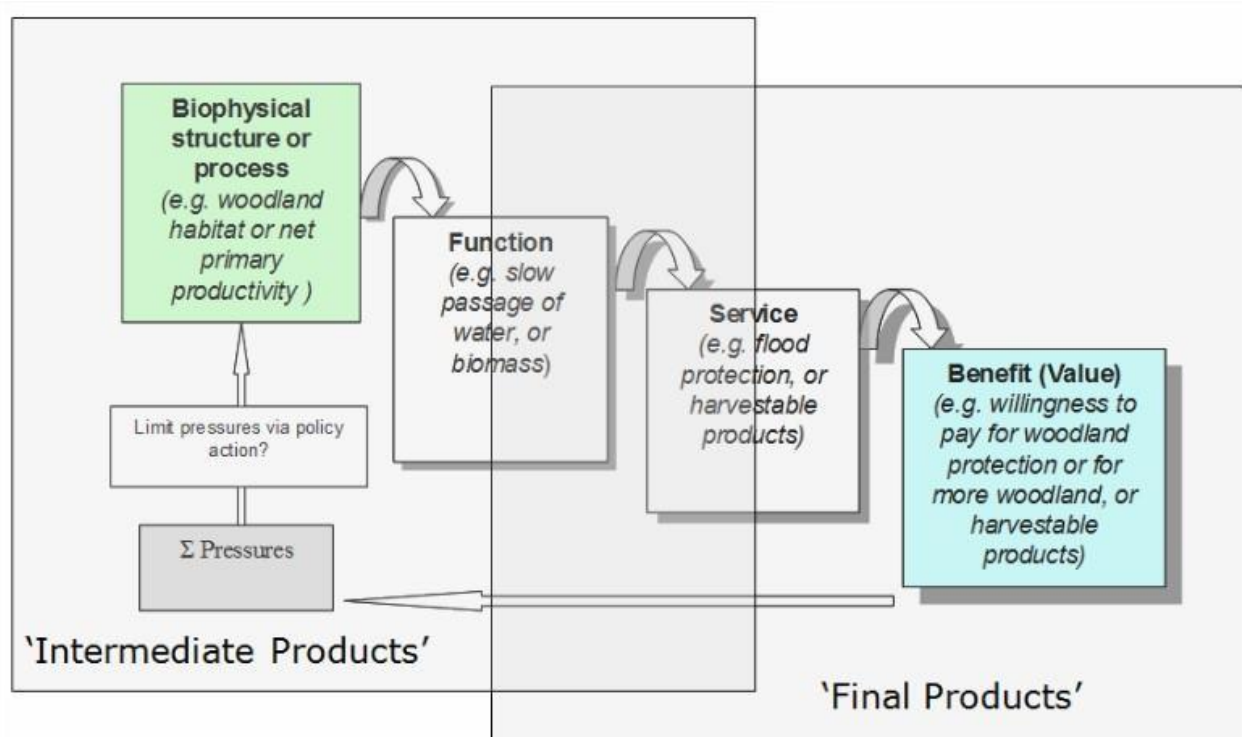


Figure 3-8 : Le modèle en cascade des SE représente les relations entre biodiversité - fonctions écosystémiques et bien-être humain (Haines-Young & Potschin 2010)

La schématisation de ce modèle permet d'étudier les SE étape par étape (Figure 3-7), approche intéressante pour évaluer les SE de manière structurée (Van Oudenhoven et al. 2012). Cependant elle lui confère **une linéarité peu réaliste** (Roche et al. 2016). C'est pourquoi ce modèle est régulièrement utilisé comme base à l'élaboration d'autres modèles conceptuels plus complets et adaptés au contexte spécifique des objets d'étude. C'est le cas par exemple de Van Oudenhoven et collaborateurs (2012) qui adaptent le modèle en cascade à une application pour la gestion des modes d'occupation des sols. Cette représentation est intéressante car elle met en avant deux bouclages du système qui associent les écosystèmes au bien-être humain par la « réponse sociétale » et une rétroaction entre la fourniture en SE et l'écosystème (figurée en pointillé sur le schéma, voir Figure 3-8).

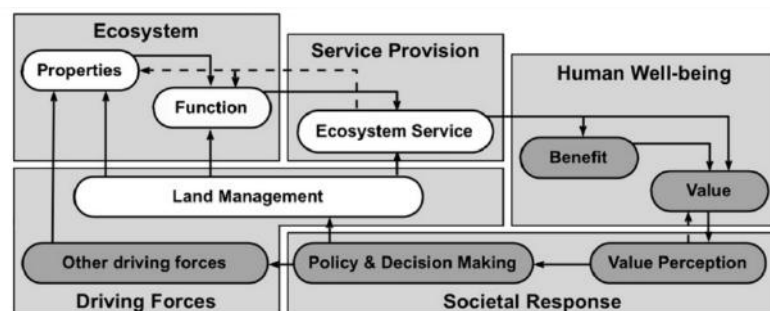


Fig. 1. Framework for assessing links between land management, ecosystem services provision, and human well-being. Based on Haines-Young and Potschin (2010), Kienast et al. (2009), De Groot et al. (2010a), and Hein (2010). The white boxes indicate the scope of our study. Solid arrows indicate effects; dashed arrows indicate feedbacks.

Figure 3-7 : Adaptation du modèle en cascade des SE par Van Oudenhoven et al. (2012)

❖ Les constituants du bien-être humain

Une composante importante du compartiment « *bien-être humain* » est constituée des « *bénéfices* » que rendent les SE aux Hommes. Les bénéfices peuvent être définis comme les changements positifs dans le « *bien-être* » à partir de l'accomplissement de besoins et de désirs (TEEB 2010). Caractériser les bénéfices recherchés par les sociétés humaines permet d'identifier les possibles **synergies et antagonismes** entre SE (deux SE qui procurent les mêmes types de bénéfices) et de mieux comprendre les enjeux associés à la gestion et préservation des SE. Le MEA a proposé une typologie de ces bénéfices qui pourrait être réutilisée dans cette étude et appliquée aux grands lacs alpins. Elle différencie quatre composantes du bien-être auxquels les bénéfices retirés des écosystèmes sont associés (Tableau 3-2) : **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).

L'application de cette classification du bien-être au cas des grands lacs alpins permettra d'identifier les besoins des sociétés associés aux grands lacs alpins et les SE qui permettent de les satisfaire. Ce sera un élément important de la caractérisation de la demande en SE.

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

Tableau 3-2 : Définition des composantes du bien-être selon le MEA (2005) et bénéfices associés que l'on peut retrouver dans les grands lacs alpins

Composantes du bien-être	Définition	Bénéfices
<i>Sécurité</i>	Se réfère à la sécurité des personnes et des biens, à l'accès sécurisé aux ressources nécessaires et à la protection contre les catastrophes naturelles ou d'origine humaine.	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité d'habiter dans un environnement sain et propre (résistance aux pressions anthropiques et changements environnementaux) • Capacité d'interagir avec un milieu riche en habitats et biodiversité • Epuration des eaux usées traitées
<i>Éléments essentiels pour une vie agréable</i>	Capacité à avoir des moyens de subsistance sûrs et adéquats, y compris un revenu et des avoirs, suffisamment de nourriture et d'eau en tout temps, un abri, l'énergie nécessaire pour se tenir au chaud et au froid, et avoir accès aux biens.	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité d'accès aux ressources procurant des revenus et du bien-être
<i>Santé</i>	Capacité d'un individu à se sentir bien et fort, ou, dans d'autres termes, à être suffisamment nourri et exempt de maladie, à avoir accès à une eau potable suffisante et propre, à un air pur. La santé humaine est à la fois un produit et un déterminant du bien-être humain.	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité d'accès à une alimentation adéquate, de qualité gustative et nutritionnelle • Capacité d'accès à l'eau potable, facile d'accès et à moindre coût • Capacité d'échapper aux maladies et problèmes sanitaires
<i>Bonnes relations sociales</i>	De bonnes relations sociales font référence à la présence de cohésion sociale, de respect mutuel, à la capacité d'aider les autres et de pourvoir aux besoins des enfants.	<ul style="list-style-type: none"> • Opportunités d'extérioriser les valeurs récréatives et beautés écologiques attachées aux écosystèmes lacustres pour les pratiques ludiques, sportives, récréatives et de détente • Opportunités d'extérioriser les valeurs spirituelles et culturelles liées aux écosystèmes (Héritage culturel, attachement, lien social, inspiration, calme, intimité, ressourcement, instinct géographique, spiritualité et religion)

3.3.2 Choix d'un cadre conceptuel d'application du concept de SSE à l'étude

La dernière décennie a permis des progrès significatifs dans les champs de la recherche interdisciplinaire et de la modélisation des SSE (Binder et al. 2011) avec la proposition de plusieurs modèles d'analyses et de cadres conceptuels. Dans cette partie nous analyserons les plus souvent utilisés, nous présenterons leurs similitudes et spécificités, afin de pouvoir choisir le modèle conceptuel le plus approprié à notre étude. L'étude du système complexe des grands lacs alpins nous amènera probablement à utiliser des méthodes issues de différents modèles qu'il conviendra d'adapter.

Pour modéliser un SSE, nous distinguerons deux concepts pour qualifier les deux sous-systèmes principaux : **le système écologique** qui fait référence au système environnemental ou naturel (Binder et al. 2011) constitué de l'ensemble des propriétés, fonctions, paramètres et structures de l'écosystème et **le système social** faisant référence au système humain (Binder et al. 2011) comprenant les institutions sociales, les cycles et ordres sociaux (Machlis et al. 1997, Redman et al. 2004). Les relations entre ces deux systèmes, forment des « dynamiques » qui caractérisent les changements au sein des SSE au cours du temps (Binder et al. 2011).

Les **cadres conceptuels des SSE** diffèrent selon des critères contextuels et structurels, par la manière de conceptualiser les systèmes social et écologique et leurs inter-relations et en fonction de la profondeur spatio-temporelle de leur analyse (Binder et al. 2011). Même si l'un des objectifs des cadres conceptuels est de représenter de manière égale les systèmes social et écologique, la majorité de ces modèles ne le fait pas (Folke 2007 in Binder et al. 2011). Ils suivent une vision soit « *anthropocentrée* », c'est-à-dire ils conceptualisent le système social de manière plus importante que le système écologique ou « *écocentrée* », donc avec une plus grande importance donnée au système écologique. Ils sont soit orientés « *action* » (cherchent à améliorer la gestion du SSE) ou bien « *analyse* » (cherchent à mieux le comprendre) (Binder et al. 2011). En fonction de ces caractéristiques, Binder et collaborateurs (2011) classifient les modèles conceptuels d'étude des SSE en quatre catégories :

- **Les Frameworks écocentrés** : les activités humaines affectent le système écologique. Ils peuvent être utilisés pour étudier les impacts des actions humaines sur les écosystèmes, ils sont orientés action.
- **Les frameworks intégratifs** : ils considèrent les interactions entre les sous-systèmes de manière réciproque, en incluant différents types de feedbacks. Ce type de framework apporte des solutions aux problèmes des SSE complexes, il est orienté action.
- **Les frameworks politiques** : s'intéressent aux impacts des actions humaines sur le système écologique. Ils sont appropriés pour le développement de stratégies de gestion cherchant à réduire l'impact des activités humaines sur le système écologique.
- **Les frameworks vulnérabilité** : s'intéressent à la manière dont le système écologique va affecter le système social par la survenue de « hasards environnementaux » ou bien de variations dans les stocks des ressources Naturelles. Ils sont généralement appliqués à des problématiques dans lesquelles les Hommes sont exposés à des changements environnementaux qui les rendent vulnérables.

Le Tableau 3-3 récapitule les caractéristiques des 10 modèles conceptuels de SSE les plus souvent utilisés et met en avant leur avantages et inconvénients vis-à-vis de notre étude.

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

Il a été réalisé à partir du papier de Binder et collaborateurs (2011). Ce tableau facilite la comparaison entre les cadres conceptuels et permet de faire des choix vis-à-vis de leur utilisation possible en fonction des attendus d'une étude sur les socio-écosystèmes. Tous ces modèles sont liés à un grand nombre d'utilisations et peuvent en cumuler plusieurs (Collins et al. 2011) :

3. Analyser des phénomènes de dégradation de l'environnement et recherche d'une **gestion durable des écosystèmes**. Exemples : le modèle MEFA (*Material and Energy Flow Analysis*) ; le DPSIR (*Driver - Pressure - State - Impact - Response*) ; le SESF (*Social-Ecological Systems Framework*) ; le MTF (*Management and Transition Framework*) ; le SLA (*Sustainable Livelihood Approach*) ; le NTS (*The Natural Step*)
4. Comprendre les **feedbacks entre les systèmes sociaux et biophysiques** (Kremen and Ostfeld 2005). Exemples : le modèle DPSIR ; le ES (*Ecosystem Services*) ; le HES (*Human - Environment System*) ; le MTF ; le SESF
5. Décrire les composantes des systèmes socio-écologiques ou bien certaines **interactions** (économiques, liées à la biodiversité, etc.) (Ohl et al. 2007). Tous les modèles de SSE peuvent être utilisés pour cela.
6. Modéliser l'**impact des perturbations anthropiques** (Collins et al. 2011, Kelble et al. 2013). Exemples : le modèle DPSIR ; le SESF ; le MTF ; le MEFA ; le ES ; le SLA ; le TNS ; le TVUL
7. Prendre en compte les **interactions spatiales** au sein des SSE (Redman et al. 2004). Exemples : le MEFA ; le ES ; le HES ; le TNS
8. Quantifier les **services écosystémiques**. Exemples : le ES ; le DPSIR ; le HES ; le MTF ; le SESF ; le SLA ; le TVUL

Vis-à-vis des objectifs de notre étude, le cadre conceptuel à développer devra (1) comprendre une **approche intégrative**, considérer les interactions entre les sous-systèmes de manière réciproque, mais avec une caractérisation anthropocentrée du système écologique (comment les activités humaines affectent le système écologique ?), (2) **être orienté action** afin de pouvoir tester son opérationnalisation au cas des grands lacs, (3) considérer **les pressions** sur les écosystèmes et les réponses sociétales, (4) être capable d'analyser les **dynamiques et interactions** à l'intérieur des sous-systèmes écologique et social et entre eux, (5) considérer les **multiples échelles spatiales et temporelles des processus** socio-écosystémiques, (6) pouvoir intégrer le concept de SE.

Tableau 3-3: Avantages, inconvénients et spécificités de chacun des 10 cadres conceptuels de SSE parmi les plus utilisés en vue de leur application à notre objet d'étude

Nom du framework	Avantage(s)	Inconvénient(s)	Spécificité(s)
<i>The Driver, Pressure, State, Impact, Response (DPSIR)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Peut intégrer le concept de services écosystémiques • Considère un système d'indicateurs • Vision anthropocentrée du système écologique 	<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation à l'échelle macro du système social • Ne considère pas les feedbacks entre sous systèmes 	Approche sous forme de chaîne de cause à effet (Les activités humaines génèrent des pressions sur l'environnement. Ces pressions modifient l'état

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

	<ul style="list-style-type: none"> • Prend en charge le système de gestion • Orienté action : cherche à réduire l'impact des activités humaines 		des écosystèmes, ce qui provoque des impacts négatifs sur les sociétés qui mettent en place des réponses adaptées)
<i>The Ecosystem Services (ES)</i>	Peut être intégré à d'autres frameworks	<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation à l'échelle macro du système social • Prend mal en compte les dynamiques écologiques • Les feedbacks directs entre les sous systèmes ne sont pas considérés 	Procure une idée de comment les activités humaines affectent les services écosystémiques
<i>The Earth Systems Analysis (ESA)</i>	Caractérisation fine du système écologique en analysant l'ensemble des interactions et dynamiques	<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation à l'échelle macro du système social • Les feedbacks directs entre les sous systèmes ne sont pas considérés 	Approche par l'évolution des stocks et flux de matières et d'énergies
<i>The Human-Environment System (HES)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration des dynamiques internes au système social • Considère les feedbacks et processus d'apprentissage du système social • Intégration possible du concept de services écosystémiques • Vision anthropocentrée du système écologique • Considère les boucles de rétroactions et les impacts anthropiques à différentes échelles spatio-temporelles • Apporte une compréhension des processus de décision 	Considère les dynamiques internes au système écologique uniquement par le biais de l'évolution de la perception de la société pour son environnement	<ul style="list-style-type: none"> • L'échelle d'étude du système écologique est choisie en fonction de l'échelle d'impact du problème tel qu'il est perçu par la société • Les actions de sensibilisation à l'environnement, considérées à chaque étape des processus de décision sont analysées pour rendre compte de l'évolution de la perception de la société sur son système écologique
<i>The Material and Energy Flow Analysis (MEFA/MFA)</i>	S'intéresse à la construction du SSE au travers de la gouvernance	<ul style="list-style-type: none"> • Caractérise le SSE par des équations et modèles mathématiques • Caractérisation à l'échelle macro du système social • Feedbacks non considérés 	Intégration d'équations mathématiques
<i>The Management and Transition Framework (MTF)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration des dynamiques internes au système social • Considère les feedbacks et processus d'apprentissage du système social • Intégration possible du concept de services écosystémiques • Compatible avec un système d'indicateur • Vision anthropocentrée du système écologique 	Considère les dynamiques internes au système écologique uniquement par le biais de l'évolution de la perception de la société pour son environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse les « événements de transition » dans l'évolution du SSE. • Peut être appliqué dans une approche prospective afin d'améliorer la gouvernance environnementale

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

	<ul style="list-style-type: none"> • Le BV est identifié dans le modèle 		
<i>The SES framework (SESF)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration des dynamiques internes au système social • Considère les feedbacks et processus d'apprentissage du système social • Intégration possible du concept de services écosystémiques • Proposition d'un système d'indicateur • Vision anthropocentrée du système écologique 	<ul style="list-style-type: none"> • Considère les dynamiques internes au système écologique uniquement par le biais de l'évolution de la perception de la société pour son environnement • Son utilisation optimale doit être réalisée par une équipe pluridisciplinaire. Il est difficile de l'appliquer seul dans son ensemble 	Seul framework à analyser le système social et écologique avec la même intensité
<i>The Sustainable Livelihood Approach (SLA)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse le système de gouvernance du système • Intégration possible du concept de services écosystémiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Le système social est vu comme un ensemble de facteurs externes venant affecter le système écologique. • Dynamiques sociales non considérées • Pas de feedbacks entre les sous systèmes • S'applique à des SSE de pays en voie de développement 	S'applique à des questions de développement des SSE dans des pays pauvres, où les hommes sont vulnérables et exposés aux changements environnementaux et ne sont pas capables d'influencer ces forces externes à leur système
<i>The Natural Step (TNS)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse les interactions, dynamiques du système social à différentes échelles • Propose un système d'indicateurs sur les changements du SSE 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne prend pas en compte les dynamiques écologiques • Pas de feedbacks entre les sous systèmes 	Orienté action, visant à mettre en place des mesures de gestion de réduction des impacts anthropiques sur le système écologique.
<i>Vulnerability framework (TVUL)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse le système de gouvernance du système • Intégration possible du concept de services écosystémiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Le système social est vu comme un ensemble de facteurs externes venant affecter le système écologique. • Dynamiques sociales non considérées • Pas de feedbacks entre les sous systèmes • S'applique à des SSE de pays en voie de développement 	S'applique à des questions de développement des SSE dans des pays en développement, où les hommes sont vulnérables et exposés aux changements environnementaux et ne sont pas capables d'influencer sur ces forces externes à leur système

En conséquence, l'analyse des avantages et inconvénients des différents frameworks nous permet de sélectionner quatre cadres conceptuels pouvant s'appliquer à notre étude. Il s'agit du DPSIR, du HES, MTF et du SESF.

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

Le MTF de Pahl-Wostl et collaborateurs (2010) nous paraît être le cadre conceptuel le plus utile pour notre étude car il est développé pour la compréhension des systèmes aquatiques et de leur gestion. Ce modèle est applicable dans le cadre d'études comparatives et peut aider à la sélection d'indicateurs d'état des SSE, ce qui permettrait une application concrète du modèle. Ce modèle est intéressant pour l'analyse du fonctionnement du système social car il est construit autour des processus qui conduisent à la prise de décision de gestion environnementale.

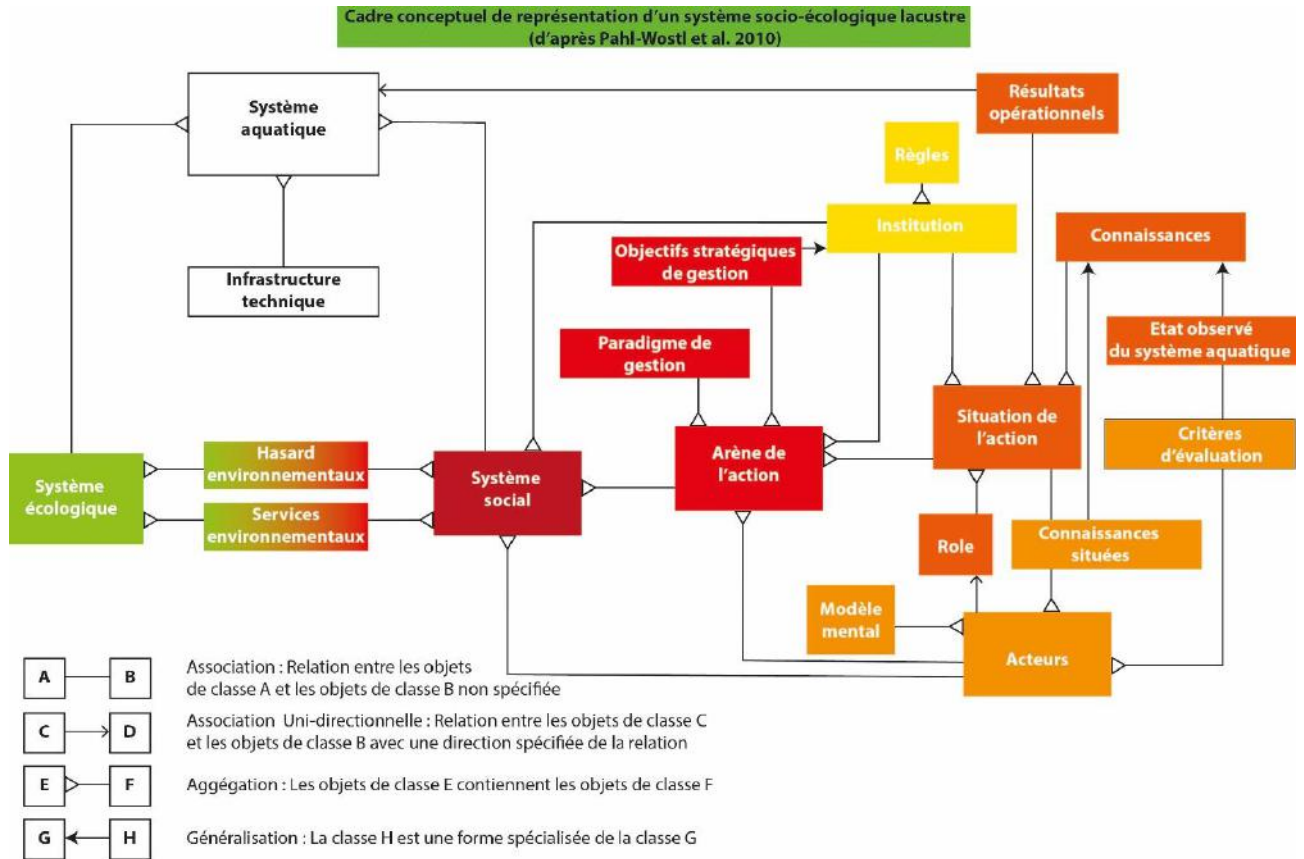


Figure 3-9 : Représentation et traduction du modèle conceptuel du Management and Transition Framework (d'après Pahl-Wostl et al. 2010)

3.3.3 Synthèse des choix conceptuels effectués et modalités de couplage des modèles de SE et de SSE

Ce chapitre nous a permis de justifier un ensemble de choix conceptuels parmi les nombreuses propositions d'applications des concepts de SE et de SSE qu'il est possible de trouver dans la littérature scientifique. Ces choix conceptuels représentent une étape préalable avant toute application des concepts. En fonction des attendus de l'étude et des spécificités de l'écosystème étudié, nous avons choisi la **définition des SE** proposée par Costanza et al, 1997 et la **classification des SE en trois catégories** (SE d'approvisionnement, de régulation et culturels), qui sont compatibles avec une approche de co-évaluation de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs. Nous privilégierons l'approche par les **bouquets de SE** plutôt qu'une étude séparée des SE et dans ce cadre, **les disservices** seront mentionnés mais ne feront pas l'objet d'une étude approfondie.

Parmi les cadres conceptuels des SE et des SSE, le **modèle en cascade des SE et le MTF** sont deux modèles qu'il pourrait être intéressant de coupler, l'un et l'autre présentant des avantages pour cette étude. L'avantage de ces deux modèles est de fournir différents niveaux d'analyse du fonctionnement et de l'évolution du système grand lac – BV – société, soumis aux pollutions.

Pour qu'un couplage entre ces deux modèles soit envisageable, cela suppose de disposer de composantes partagées par les deux modèles. L'intérêt du MTF par rapport à d'autres cadres conceptuels est d'intégrer la composante « SE » (appelée « *services environnementaux* »), qu'il considère comme « *aggrégé* » à un système écologique et un système social. Cette agrégation des SE aux deux sous-systèmes permet de satisfaire la « *philosophie intégrative* » de la **co-évaluation des SE** qui envisage ces derniers à l'interface entre les écosystèmes et la société qui en bénéficie. Il serait donc envisageable d'intégrer le modèle en cascade des SE (Figure 3-7) au sein du MTF (Figure 3-9), remplaçant le système écologique du MTF par les processus et fonctions écosystémiques de la cascade et le système social par les bénéfiques et valeurs. Il s'agirait ensuite d'associer ces composantes aux processus de prises de décisions, tels que décrits par le MTF, à la manière de l'adaptation du modèle en cascade proposée par Van Oudenhoven (Figure 3-8). De cette manière, nous pourrions proposer un nouveau modèle conceptuel compatible avec nos attendus, bien « *équilibré* » dans sa structure et sa représentation des systèmes écologique, social et de gouvernance. Sur cette base, il conviendrait d'intégrer les **spécificités d'interdépendances entre les grands lacs, leurs BV et l'aval** et d'envisager l'étude des « *entrées et sorties* » du système, car les SSE ne sont pas des systèmes fermés, mais sont soumis à des forçages qui déterminent en partie les dynamiques internes.

Nous avons vu dans ce chapitre que le système grand lac - BV - société est un **SSE complexe adaptatif, de taille régionale, qui intègre un large nombre de composantes, à la fois naturelles et socio-économiques, politiques, reliées par des flux de matériaux, d'économies ou d'informations**. Ces ensembles sont agrégés au sein de plusieurs niveaux d'organisations, qui dépendent de paramètres biophysiques liés à l'hydrologie, les habitats et la biodiversité, ou socio-économiques comme les échelons administratifs, les MUS, etc. En conséquence, les interactions entre les éléments qui constituent ce système sont non-linéaires et prennent part sur des échelles de temps et d'espaces hétérogènes (Levin 1998, Wu and David 2002, Parrott 2010). Ces composantes sont capables de s'adapter aux changements qu'elles subissent, ce qui ajoute un caractère instable et imprédictible (Levin 1998, Walker et al. 2002). L'ensemble de ces propriétés nécessitent une approche dynamique d'un système complexe.

Les grands lacs et leurs BV sont des espaces multifonctionnels de plus en plus investis par les sociétés au travers de nombreux usages et enjeux pouvant être antagonistes, satisfaisant différentes dimensions du bien-être humain. Les acteurs du SSE sont nombreux et interdépendants, ce qui peut générer des conflits. Tout ceci est exacerbé par les pressions auxquelles les écosystèmes sont soumis (IPBES 2018a) et par les évolutions sociétales qui peuvent en engendrer de nouvelles, dont les effets à court, moyen ou long terme sont parfois méconnus.

Les actions de gestion des territoires lacustres sont bien souvent abordées de manière fragmentée par SE et tout l'intérêt de cette étude est de montrer l'importance de la gestion

CHAPITRE 3

Les concepts d'étude du système grand lac - bassin versant - société

intégrée de ce système, considérant le multi-service, l'imbrication des échelles spatiales et temporelles des processus écosystémiques et sociétaux. Seule une approche pluridisciplinaire est capable d'analyser à une large échelle, **l'objet d'étude « grand lac - BV – société »**, son fonctionnement et son évolution en réponse aux évolutions sociétales et à l'état des écosystèmes (Brewer 1995). Tout ceci justifie l'application et d'adaptation des concepts de SE et de SSE au cas des grands lacs alpins, ce qui passe par un travail important de modélisation conceptuelle. Se posent alors les questions : comment construire, valider et tester de tels modèles ? Quelles sont les spécificités et les composantes du système étudié ? Quelles en sont ses limites ? Comment rendre opérationnel les modèles à développer ?

Le chapitre suivant présente la démarche et les méthodes permettant de mobiliser ces concepts et répondre à ces questionnements.

Nous avons vu dans les trois premiers chapitres que les grands lacs ne sont pas des systèmes isolés, et sont reliés aux territoires situés à l'amont et à l'aval par des flux biophysiques et des SE. Les interdépendances associant les espaces terrestres et aquatiques aux sociétés qui les utilisent et les gèrent s'opèrent à différentes échelles spatiales et temporelles, ce qui confère à ces écosystèmes une influence à taille régionale, voire au-delà, et une grande variabilité. Les problématiques de pollutions entraînent des chaînes de causes à effets qui affectent alternativement les systèmes biophysiques et humains. Dans ce contexte, *à quelle(s) échelle(s) étudier le système grand lacs – BV – société ? Comment prendre en compte les composantes et propriétés biophysiques et sociétales et leurs influences sur la dynamique des SSE des grands lacs ? Comment ont évolué les territoires lacustres et sur quelle période analyser ces évolutions ?*

Ces SSE sont également capables d'adaptations et sont soumis à des forçages extérieurs qui viennent modifier leurs dynamiques internes. Les SE et les SSE sont donc en évolution permanente. Ce qui nous amène à émettre l'hypothèse que ***les SE rendus par les grands lacs ne sont pas invariants dans le temps. Ils se sont construits, ont évolué en réponse à l'évolution des usages des lacs, de la qualité de l'eau et de ses impacts sur la société et des réponses apportées par la société pour y répondre.***

Depuis le début du XX^{ème} siècle, les grands lacs ont connu une succession de perturbations qui ont affecté les SE et nécessité la mise en place d'actions de gestion. Ces phénomènes ont généré de nouveaux enjeux pour les grands lacs, l'apparition de nouveaux acteurs et outils pour coordonner l'action. A cet effet, nous émettons une seconde hypothèse générale qui vise à analyser si ***le système socio-écologique des grands lacs s'est construit et complexifié autour de la gouvernance des impacts des pollutions sur les SE. Il s'agira également de voir si l'exploration fonctionnelle de ce SSE et sa modélisation permettent de disposer d'un outil opérationnel à la gestion adaptative.***

Pour y répondre pleinement, il est nécessaire de considérer que les grands lacs sont des objets géographiques complexes et par là-même d'envisager une étude pluridisciplinaire afin d'analyser les relations qu'ils entretiennent avec la société. Les concepts de SE et de SSE appliqués au système grand lac – BV – société sont les outils conceptuels qui permettent de soutenir **la dynamique pluridisciplinaire et transdisciplinaire** dans cette étude. Leur couplage est nécessaire pour prendre en compte l'influence des grands lacs sur la société, les relations que les territoires lacustres entretiennent avec les systèmes adjacents et étudier l'organisation et le fonctionnement de la gouvernance qui fait face à ces complexités.

Cependant, des adaptations conceptuelles et des développements méthodologiques doivent être mis en place pour répondre aux enjeux de cette approche. Nous avons exposé nos choix conceptuels pour mobiliser les concepts de SE et de SSE dans le chapitre précédent, il s'agit maintenant de réaliser des choix théoriques et de méthodes de récolte, synthèses des données et analyses des résultats pour les mettre en application.

Notre démarche vise à l'identification des **composantes fonctionnelles** du territoire des grands lacs et à l'abstraction et la synthèse des informations sur les **processus clés** qui le sous-tendent. Leur analyse demandera la **création d'un modèle** pour confronter les informations pluridisciplinaires ; ce qui pourra être réalisé par l'adaptation de cadres conceptuels d'étude des SE et SSE.

Il s'agit d'étudier l'objet d'étude qu'est le système lac – BV – société comme un **objet pluridimensionnel**, combinant trois champs disciplinaires (relatifs aux sciences environnementales, aux sciences humaines et sociales et aux sciences de la gestion - Figure 4-1). Ces trois champs mobilisent des contenus qu'il s'agit d'analyser par le **croisement d'expertises** (émanant des scientifiques, usagers, de l'ingénierie et parties prenantes de la gestion) dont on cherche à faire une synthèse pluridisciplinaire **systemique** des connaissances. La synthèse consiste à rassembler les données provenant des différents champs disciplinaires retenus et à les combiner, en identifiant les composantes principales et leurs liaisons et rétroactions en vue d'élaborer un modèle général. L'objectif est d'aboutir à une compréhension globale de l'objet.

Pour cela le cheminement méthodologique suivi peut être décrit à travers trois étapes (Figure 4-1), en premier lieu les choix conceptuels et méthodologiques qui ont permis de construire la démarche théorique centrée sur une étude pluridisciplinaire, les analyses rétrospectives et la comparaison de trois sites d'étude et un dernier choix situé dans un contexte différent (le lac Saint-Pierre). A partir de cette approche, un ensemble de données variées ont été récoltées, synthétisées et analysées de manière intégrée par différents concepts et outils. Enfin, ces synthèses sont adaptées et analysées dans des modèles conceptuels du fonctionnement et de l'évolution des territoires lacustres. L'ensemble de la démarche s'insère dans un enjeu d'ouverture opérationnelle des données produites pour soutenir la gestion adaptative des grands lacs.

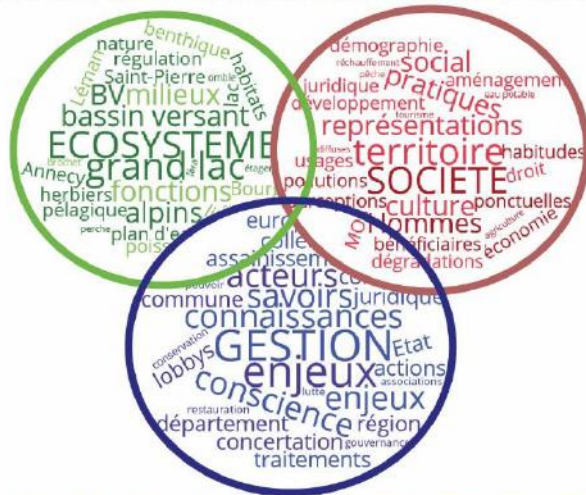
Ce chapitre présente le cheminement méthodologique. Il est découpé en deux parties, une première relative à la présentation de la démarche pluridisciplinaire et une seconde décrivant les méthodes et outils de récolte, de synthèse et d'analyse des informations.

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

CHEMINEMENT ET FONDATIONS METHODOLOGIQUES


INTEGRER DES CHAMPS DISCIPLINAIRES VARIÉS



Faire face à la multitude d'informations

- Physico-chimiques
- Biologiques
- Ecologiques
- Socio-culturelles
- Economiques
- Gouvernance
- Politiques
- Réglementaires
- Techniques
- Géographiques
- Représentations
- Quantitatives
- Qualitatives
- Factuelles, ...

1 - Réaliser des choix méthodologiques

 **Choix des hypothèses**
Choix théoriques
Choix méthodologiques de récolte et traitement des données
Choix des sites d'étude

La démarche théorique :
Etude interdisciplinaire
Analyses rétrospectives
Analyse comparée de sites d'étude dans l'espace et dans le temps

2 - Récolter et synthétiser des informations

 **Méthodes de récolte des données :**
Bibliographie, archives
Réglementations
Données écologiques, socio-économiques
Enquêtes, ateliers

Méthodes d'analyses et de synthèse :
La triangulation des données
La frise chronosystémique
Les concepts de service écosystémique et de système socio-écologique

3 - Adapter et développer des modèles conceptuels

 **Adaptation du concept de SE**
Développement d'un nouveau cadre conceptuel des SSE des grands lacs
Application à la gestion

Les résultats :
La cascade des SE des grands lacs
Le modèle SOALP
Trajectoires d'évolution et fonctionnement des SSE des grands lacs
Synthèses de données historiques



OUVERTURE VERS L'AIDE A LA GESTION ADAPTATIVE

Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 4-1 : Démarche globale de la recherche doctorale

4.1 La démarche : modélisation, analyses rétrospectives et opérationnalisation

Notre recherche, visant à collecter et synthétiser de multiples savoirs disciplinaires et expertises pour appréhender la complexité du territoire lacustre et son évolution dans le temps, mobilise une grande diversité de concepts et méthodes issus de la géographie, l'écologie, la sociologie, l'économie et la gestion de l'environnement. La mobilisation de ces champs disciplinaires va prendre part dans l'utilisation des concepts de SE et de SSE, l'étude du fonctionnement des écosystèmes lacustres et de leurs relations avec le BV, l'analyse spatiale et temporelle du fonctionnement du système. Sur un plan méthodologique, il s'agira de récolter des **données quantitatives et qualitatives**, mener des **consultations d'experts de différentes disciplines**, **mobiliser des savoirs profanes**, d'usage, réaliser des enquêtes, animer des ateliers d'acteurs, collecter de **données écologiques**, etc...

Notre recherche s'insère ainsi dans le champ de la **récolte de données pluridisciplinaires** acquises en combinant différents types de méthodes. L'utilisation de concepts visant à combiner ces données et les approches d'étude de différentes disciplines **place notre méthodologie dans le champ de la transdisciplinarité**. Cette vision transdisciplinaire est plus large qu'une vision pluridisciplinaire car elle invite à faire interagir les disciplines de façon multidimensionnelle (différentes échelles spatio-temporelles et organisationnelles) et multiréférentielle (mobilisation de savoirs issus de sources variées) (Chettiparamb 2007).

Pour mener à bien ce projet, la modélisation des interactions Homme – grand lac est une étape importante de la recherche. Elle permettra de mêler différentes **analyses conceptuelles** considérant de multiples interactions entre objets de différentes natures, avec des applications concrètes sur des objets d'études complexes. Dans ce cadre, les **approches rétrospectives** permettront de rechercher des axes structurants et processus clés qui ont émergé, ont évolué et ont conditionné le fonctionnement des territoires des grands lacs en réponse à l'émergence des problèmes de pollutions. Cette démarche d'étude rétrospective permettra d'informer la gestion sur les évolutions à venir et les relations clés du fonctionnement des grands lacs sur lesquelles porter l'attention. Ces informations apporteront une ouverture vers **l'opérationnalisation et l'application** des résultats à la gestion adaptative des grands lacs.

4.1.1 Les enjeux de l'étude du système grand lac – BV - société et verrous de leur analyse

La modélisation porte ici sur l'étude des territoires lacustres, autour des interactions entre les grands lacs et la société. Pour ce faire, la modélisation prendra la forme d'une analyse du fonctionnement des SSE des grands lacs. Tout l'enjeu sera de réussir à **représenter et analyser la construction des SSE** associés aux grands lacs alpins représentant nos sites d'étude, en réaction aux problèmes de pollution. Cette approche implique d'appréhender l'objet de manière **systemique et intégrée**, c'est-à-dire considérant le SSE dans son ensemble en analysant le fonctionnement de ses composantes et leurs imbrications. Pour ce faire, la modélisation impliquera l'utilisation des concepts de SE et de SSE, soumis à de larges incertitudes présentées au chapitre 3. Un autre enjeu de la modélisation sera de **fournir des outils d'analyse de l'état et du fonctionnement du SSE** des grands lacs qui puissent s'appliquer aux analyses rétrospectives, voire prospectives.

L'enjeu des analyses rétrospectives est d'arriver à analyser l'évolution des pollutions des grands lacs alpins, leurs impacts sur les SE et les réponses apportées par la société pour y répondre. Cette rétrospective nous conduira à rechercher de nombreuses informations de nature variée depuis le début du XX^{ème} siècle, période à partir de laquelle les flux de polluants issus de leurs BV se sont accrus sous l'effet du développement démographique, agricole et industriel. La difficulté d'une telle démarche sera d'arriver à **gérer le « trop plein » d'informations** et à identifier celles qui ont une importance pour le fonctionnement du SSE des grands lacs. Un second verrou est lié à **l'incertitude** dans l'utilisation de données pluridisciplinaires de différente nature.

Enfin, le dernier enjeu de cette étude est, à partir de cette approche rétrospective, d'être en mesure de **faire émerger des enseignements généraux** sur le fonctionnement des territoires lacustres utiles pour la gestion des grands lacs. L'intérêt de l'utilisation des concepts de SE et de SSE est la réalisation d'une analyse critique du fonctionnement de la gestion des grands lacs. La perspective opérationnelle de l'utilisation de ces concepts est de réfléchir à l'extension des systèmes d'observations actuels des lacs aux composantes territoriales associées. La difficulté sera de faire émerger des pistes d'évolution des systèmes de gestion des grands lacs en lien avec les enjeux actuels et à venir.

❖ Verrou n°1 : gérer des incertitudes scientifiques

Le premier verrou est d'ordre conceptuel. Pour cadrer la démarche et réaliser des synthèses efficaces d'informations, la démarche fait appel aux concepts de SE et de SSE (voir chapitre 3). Ces concepts ont pris une importance forte dans le champ des recherches pluridisciplinaires en environnement, mais sont soumis à des incertitudes, provenant en grande partie d'une part du manque de méthodologie universelle d'application de ces concepts et d'autre part, du fait que cela implique dans la plupart des cas des adaptations à l'objet et au sujet d'étude. Par ailleurs, peu d'études ont été menées sur les grands lacs, ce qui est une justification supplémentaire au développement d'un modèle d'application spécifique des SE et SSE au cas des grands lacs.

Démarches et méthodes pour dépasser la difficulté : Pour faire face à l'incertitude liée aux concepts de SE et de SSE, il convient de bien définir en amont les termes, idées clés et approches liées à l'application des concepts (ce qui a été réalisé en 3.2 et 3.3). Les développements conceptuels ont ensuite été testés, discutés et soumis à différentes formes d'expertises scientifiques et techniques, puis présentés et validés, d'une part avec des experts issus de différentes disciplines, et d'autre part avec des acteurs techniques et gestionnaires. Ces concepts ont par ailleurs été appliqués à des sites d'étude concrets : trois terrains d'études soumis aux mêmes conditions biogéographiques et de développement (les grands lacs alpins), puis un quatrième situé dans un contexte totalement différent (le lac Saint-Pierre). Cette approche nous a permis d'employer une méthodologie transdisciplinaire et ainsi d'appréhender au mieux la complexité des systèmes Homme – grand lac et de tester par le même temps l'opérationnalité des développements conceptuels réalisés.

Par ailleurs, le **modèle conceptuel du SSE des grands lacs alpins** a été construit progressivement avec l'aide d'experts scientifiques et notamment des membres du Comité de Pilotage de la présente thèse. Sa présentation à l'occasion de plusieurs séminaires a

également été un moyen d'avoir des retours d'experts pour améliorer le modèle. La construction de ce modèle a néanmoins été longue et complexe car il a fallu faire face à plusieurs difficultés, d'abord pour **organiser les différentes composantes du système** afin que le modèle soit une représentation fidèle de la réalité, simple à comprendre et à utiliser, puis une difficulté pour **généraliser et construire des compartiments** du système permettant d'intégrer l'ensemble des phénomènes socio-écologiques impliqués dans les problèmes de pollution. La construction de ce modèle a duré plus de deux ans, l'Annexe 4-1 présente l'évolution de sa représentation au fil de l'étude.

❖ Verrou n°2 : faire face au « trop-plein » d'informations

L'étude du système grand lac - BV - société doit considérer **l'ensemble des composantes** de ce système et les différents processus associés qui **s'opèrent à différentes échelles**. En conséquence, les analyses vont mobiliser des informations issues de champs disciplinaires variés qu'il nécessitera de mettre en comparaison. Se posent alors les questions suivantes : *comment récolter les informations de nature diverse ? Comment sélectionner les informations les plus importantes ? Comment analyser des données de métriques différentes ? Sur quelles échelles spatiales et temporelles renseigner les processus socio-écosystémiques ?*

Pour ce faire, la recherche fait appel à **diverses méthodes de récolte et de tri des informations, de synthèse et d'analyse**. Cela nous amène à mobiliser des outils et théories issus de différentes disciplines et à les intégrer au sein d'un **cadre théorique global** (Lélé and Norgaard 2005).

Démarche et méthode pour dépasser la difficulté : Afin de disposer d'un maximum de données et d'un outil permettant de les synthétiser, nous avons choisi de réaliser une **analyse rétrospective** de l'évolution du système grand lac - BV - société. L'analyse historique des phénomènes permet de tirer profit d'éléments de connaissances tangibles déjà mesurés ou vécus et de se baser sur l'analyse des faits passés. L'analyse temporelle permet également d'identifier des **dates clés** d'évolution et d'organiser la recherche en suivant **la chronique des phénomènes** pour identifier des **trajectoires d'évolutions** des interactions société-écosystèmes. Notre approche permet notamment d'observer et analyser la trajectoire d'impacts et de réponses des SSE aux pollutions. Notamment, cela nous permet d'identifier : (1) **l'émergence et l'alerte** des problèmes de pollution et leurs impacts sur les lacs, (2) le "*temps d'incubation*" des phénomènes dans l'écosystème lacustre avant **l'émergence d'effets** sur les usages, (3) les **réponses sociétales** mises en place pour résoudre ces problèmes et (4) les **effets de ces réponses sociétales** sur l'écosystème lacustre. La comparaison des trajectoires écologiques et sociales face aux problèmes de pollutions nous permet de faire émerger des généralités sur les impacts de ces phénomènes sur les SSE des grands lacs.

Des **frises chrono-systémiques** permettent de rendre compte des mutations, des recompositions et des adaptations des territoires dans des contextes de perturbations (Bergeret et al. 2015b). Les processus lacustres et sociétaux ne suivent pas les mêmes temporalités : la plupart des phénomènes biophysiques sont soumis au **temps de séjour de l'eau**, ce qui ne correspond pas aux temps requis pour **adapter des pratiques d'exploitation** des SE, construire **la gouvernance** d'un lac, diagnostiquer des problèmes de pollution ou encore **mettre en place des actions de gestion**, etc. Ces différences d'échelles complexifient les études rétrospectives des SSE. L'outil-frise est un "*objet-frontière*" qui permet d'articuler les diverses temporalités des différents processus avec une grande flexibilité, tout en

rapprochant des données pluridisciplinaires (Bergeret et al. 2015a). Plusieurs types de frises chrono-systémiques ont été produites dans cette étude à chaque étape de la récolte et de l'analyse des informations. Elles prennent plusieurs formes mais suivent une structure globale similaire que nous présentons dans la partie suivante.

❖ Verrou n°3 : les incertitudes dans les données pluridisciplinaires

L'incertitude ne porte pas uniquement sur des aspects conceptuels mais également sur l'analyse des données récoltées. Les données qualitatives associées aux SE (notamment SE culturels) et les processus socio-économiques, politiques ou culturels liés au fonctionnement d'un SSE concernent des faits sociaux où la dimension symbolique est une composante majeure. La méthodologie de recueil et d'analyse des données doit alors s'appuyer sur des dispositifs clairs et rigoureux pour chaque type de SE ou processus étudié. Par ailleurs, l'analyse rétrospective est une approche d'étude où l'incertitude est très présente, du fait que 1/ **la mémoire** des personnes interrogées peut être imprécise et inexacte (des "*faux-souvenirs*" peuvent exister), notamment pour ce qui est de la mémorisation des dates (Galligani 2000) et 2/ **différents protocoles de récoltes** de données quantitatives peuvent s'être succédées, générant un risque accru d'erreurs dans le jeu de données. Enfin, certaines informations passées sont difficiles à obtenir aujourd'hui ; il va donc falloir composer avec un **manque de données** sur certains processus.

Démarches et méthodes pour dépasser la difficulté : Pour valider les informations historiques, nous utilisons une méthode courante des approches en sciences humaines et sociales : **la triangulation méthodologique**. Cette approche peut se définir "*comme le fait d'appréhender un objet de recherche d'au moins de deux points de vue différents*". Concrètement pour notre étude, cela revient à identifier plusieurs sources de données ou méthodes qui permettent d'expliquer un fait : nous tâchons de combiner des méthodes qualitatives (entretiens, ateliers de travail, articles de presse, articles de loi, rapports et bibliographie) avec des méthodes quantitatives (données socio-économiques ou écologiques) pour expliquer des faits spécifiques. Nous appréhendons différentes sources sans relations apparentes pour obtenir la même information.

❖ Verrou n°3 : proposer des sorties opérationnelles à la gestion adaptative

L'un des enjeux de la recherche en environnement n'est pas seulement de comprendre le fonctionnement des écosystèmes ou des SSE, mais de pouvoir quantifier rapidement leur "*état*" pour être en mesure d'établir des recommandations aux gestionnaires et résoudre les problèmes environnementaux (Roche et al. 2016). Pour ce faire, il est possible de faire appel à des **systèmes d'indicateurs** pour évaluer l'état des SSE. Cependant, cette approche suppose un travail important de réflexion, de sélection des indicateurs et une difficulté majeure pour "**agréger**" les indicateurs qui ne possèdent pas les mêmes métriques. De plus, certains processus peuvent être une composante de différents SE et risquent d'entraîner des doubles comptages dans l'évaluation. Dans une recherche d'application des résultats de l'étude des SSE à la gestion, Roche et collaborateurs (2016) préconisent d'utiliser des paramètres et indicateurs que les gestionnaires connaissent et qu'ils ont l'habitude d'employer. La recherche d'application des modèles conceptuels développés dans le cadre de notre étude nous conduit à identifier les points forts et points faibles des observatoires actuels des grands lacs en nous

appuyant sur les cas concrets des grands lacs alpins et à explorer en profondeur le SSE pour en faire émerger les principaux facteurs et fonctionnements qui déterminent son état.

4.1.2 Le choix des terrains d'étude

Nous allons voir dans cette partie que les sites d'étude choisis permettent une bonne interprétation des relations grands lacs - société. Le cas du lac Saint-Pierre au Québec a été un site non retenu initialement dans une optique d'étude du fonctionnement d'un SSE différent. Il a été décidé de choisir un petit nombre de sites d'étude, et en particulier ces grands lacs, pour leurs caractéristiques biophysiques (long temps de séjour) et les nombreux usages qui y sont associés. D'un point de vue méthodologique, le choix des terrains a cherché à prendre en compte au mieux l'ensemble des limites présentées ci-dessus.

L'analyse multi-scalaire des grands lacs alpins est facilitée par **leurs similarités** écologiques (ex : faune et flore semblables), biophysiques (lacs situés dans une même écorégion, lacs de piedmont, tailles similaires) et sociétales (même région administrative, usages, acteurs). Certains processus complexes peuvent ainsi être communs à ces trois systèmes, ce qui simplifie leur identification et analyse. Les grands lacs alpins ont notamment subi des épisodes de pollutions similaires, mais n'ont pas engagé les actions de restauration en même temps ; ce qui a généré **des histoires de gestion différentes**, mais comparables car ces lacs sont situés dans un même contexte biogéographique et de développement.

L'inertie des phénomènes biophysiques au sein des grands lacs alpins du fait d'un long temps de séjour est remarquable également dans le sens où elle permet de suivre les évolutions interannuelles. Le choix d'étude de trois grands lacs alpins¹ permet par ailleurs d'observer et analyser certains phénomènes communs à deux des trois lacs et d'analyser les différences avec le troisième. Les lacs d'Annecy et du Bourget présentent ainsi des caractéristiques biophysiques proches, tandis que le Léman est plus volumineux, avec un BV plus étendu, un temps de séjour des eaux plus long et est transfrontalier. Ces attributs accordent au Léman des ordres de grandeurs plus importants dans les échelles ou dans la taille des phénomènes écologiques et sociétaux. Ces différences sont dignes d'intérêt car elles nous permettent d'émettre des hypothèses ou de tester certains "effets d'échelles" (tant spatiales que temporelles ou organisationnelles) sur le fonctionnement des SSE.

La multitude d'informations peut devenir rapidement problématique dans l'étude des systèmes. L'intérêt des grands lacs alpins est tout d'abord de **disposer d'informations similaires** car ils se caractérisent par les mêmes enjeux et par une histoire commune (chapitre 2). Ensuite, les suivis écologiques de ces lacs sont réalisés par les mêmes organismes scientifiques, et ce depuis le début de l'existence des monitorings (Station d'Hydrobiologique Lacustre, Université Savoie Mont-Blanc). Cela facilite la recherche des informations car les rapports de suivis de ces lacs sont organisés de la même façon, avec des protocoles identiques pour la plupart des paramètres étudiés. Certains experts limnologues/écologues ont des connaissances sur les trois grands lacs alpins. Toutes ces raisons facilitent la comparaison

¹Au début de l'analyse, le choix d'inclure l'étude du lac d'Aiguebelette avait été envisagé, mais il nous est vite apparu que l'échelle des phénomènes était beaucoup plus réduite que celle des autres grands lacs alpins, en complexifiant l'analyse et empêchant à plusieurs niveaux les comparaisons interlacs.

interlacs et l'identification des informations essentielles pour le fonctionnement du SSE, partagées ou non entre les lacs.

De par le nombre important de SE, leurs similitudes et la **disponibilité d'ensembles de données** bio-physico-chimiques précises et de quelques données socio-économiques, ces lacs représentent des sites d'étude intéressants pour mobiliser le concept de SE. Ils se prêtent donc facilement à une approche de co-évaluation des SE. De plus, chacun d'eux possède une gouvernance organisée différemment, ce qui est intéressant pour la comparaison du fonctionnement des SSE.

Les difficultés liées aux incertitudes des données pluridisciplinaires peuvent être dépassées par, d'une part, **la longue série de données écologiques** de suivis qui permet de suivre l'évolution des impacts des pollutions dans le temps, d'autre part par **l'accessibilité des gestionnaires** pour réfléchir à l'opérationnalité des résultats.

Enfin, la problématique des incertitudes questionne sur **la portée générale de l'étude**. Les grands lacs alpins sont des lacs d'origine glaciaire, le type de lac le plus courant au monde. Ils possèdent un temps de résidence situé dans la moyenne des grands lacs dans le monde (Pourriot and Meybeck 1995 - chapitre 1), et leur morphologie homogène ne présente pas de sous-lacs avec des fonctionnements écologiques différenciés. Pour ces raisons, nous pensons que ces lacs sont des modèles appropriés d'étude de lacs situés en zone développée ; ce qui permet d'émettre des hypothèses sur la portée générale des résultats produits.

Le lac Saint-Pierre, grand lac Canadien (Québec), a été choisi pour tester la cohérence et l'applicabilité du cadre conceptuel développé dans cette thèse sur un cas de grands lacs situés dans un autre contexte. A cet effet, il a été choisi car **extrêmement différent** à la fois dans ses caractéristiques biophysiques (le lac Saint-Pierre est un lac de plaine, peu profond, avec un BV très étendu, un écosystème peu stratifié), socio-économiques (ce lac est situé dans une zone à tendance rurale ou péri-urbaine, fortement occupée par l'agriculture céréalière) et politiques (autre Etat, autre continent, autre réseau d'acteurs). En terme de pollution, il s'agit d'un lac touché par de nombreux types de polluants, les principaux étant **l'eutrophisation** issue de sources diffuses agricoles, **les contaminations bactériennes, des eaux usées et micropolluants médicamenteux, plastiques et chimiques**, notamment issus des intrants agricoles et les matières en suspension en réponse à l'érosion intense du BV et des berges du lac qui conduisent à un phénomène d'envasement. En termes d'usages, le lac Saint-Pierre est principalement utilisé pour la **navigation commerciale, le tourisme et la pêche**. Il présente néanmoins quelques similarités avec le Léman : ces deux lacs subissent les mêmes types de pressions et sont situés en zone développée. L'intérêt de l'étude porte alors dans la recherche de similitudes dans **les relations entre les compartiments du SSE et dans l'analyse des trajectoires de réponses sociétales aux pressions**.

L'application des modèles conceptuels développés à un autre grand lac permet de faire émerger un plus grand nombre d'hypothèses liées aux différences structurelles de ces systèmes et leurs impacts sur la réaction des territoires lacustres aux pollutions. Dernière raison de ce choix : Il est actuellement en phase de dégradation importante, contrairement aux grands lacs alpins dont la gouvernance se structure depuis de nombreuses années. Ce lac est actuellement fortement investi par les décideurs et institutions publiques pour la sauvegarde de son état et de ses usages. Il existe ainsi de forts enjeux à l'application d'un

modèle de compréhension du fonctionnement des SSE des grands lacs dans une optique de gestion.

4.1.3 La dynamique de construction pluridisciplinaire de l'étude du système lac – BV – société

Cette recherche s'inscrit dans le **domaine de la géographie** : elle étudie les phénomènes de sociétés associés aux grands lacs alpins, tout particulièrement de quelle manière les décisions prises face aux problèmes de pollution, l'ensemble des pratiques et usages associés aux lacs et les adaptations aux changements écosystémiques ont fait évoluer les rapports grands lacs - BV - société depuis le début du XX^{ème} siècle. Cette approche considère les lacs comme des espaces appropriés, exploités, contemplés et imaginés, parcourus, gérés et aménagés au sein d'un territoire qui s'est construit et organisé autour des lacs, et de leurs relations avec les BV. La géographie permet **l'étude des phénomènes complexes** qui associent l'Homme et les espaces lacustres en mobilisant des outils, concepts et avancées scientifiques propres à la géographie, mais également à **d'autres sciences** (Brunet et al. 1992). Il s'agit ici d'une « *géographie complète* » où la pluridisciplinarité est mise en avant et pratiquée à toutes les étapes de la recherche.

L'encadrement de la thèse a également veillé à respecter cette pluridisciplinarité car composé d'un écologue (Jean-Marcel Dorioz) et d'une économiste (Véronique Peyrache-Gadeau), intégrés dans deux laboratoires, J. M. Dorioz en limnologie (INRA, UMR CARTELE) et V. Peyrache-Gadeau en géographie des territoires de montagne (UMR EDYTEM, CNRS). Deux stagiaires, mobilisés dans le cadre de cette étude, sont issus du milieu de l'ingénierie hydraulique et de l'anthropologie dans un objectif de renforcer la dynamique pluridisciplinaire.

En conséquence, cette étude offre plusieurs regards méthodologiques sur le SSE des grands lacs, à la fois : 1/ **empirique**, qui s'inspire des faits, des représentations et des événements passés, 2/ **rationnel**, par la mobilisation de données mesurées sur les écosystèmes et les sociétés, 3/ **théorique et conceptuel**, par le biais des concepts de SE et de SSE qui introduisent de nouvelles réflexions sur les rapports des sociétés aux grands lacs, 4/ **historique**, pour reconstruire, représenter et interpréter les évolutions des SSE, et 5/ **systémique** et fonctionnel car cet objet est sensible aux dimensions spatiales, organisationnelles et temporelles des phénomènes socio-écosystémiques et au fonctionnement des relations entre leurs composantes. Il en résulte un souci majeur pour situer les phénomènes induits à la fois **dans l'espace** - ce qui nous amènera à spatialiser les SE -, **dans le temps** par le biais de frises chrono-systémiques, mais également **au sein de modèles** permettant de représenter les états et changements d'états.

La méthodologie suit deux trajectoires menées simultanément depuis les premiers mois de la thèse visant à répondre à chacune des deux hypothèses globales (Figure 4-2). La première relève de la « **géographie historique** » et a consisté en la recherche de méthodes d'enquêtes pour récolter un grand ensemble d'informations sur l'évolution des SE, la seconde était associée à la **modélisation conceptuelle du SSE**. L'objectif de la géographie historique était de reconstruire l'évolution de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins en cherchant les réponses à quatre questions principales qui s'apparentent au fil conducteur de l'enquête :

- *Comment l'impact des polluants sur l'état des lacs a-t-il affecté les SE ?*
- *Comment les dégradations et les diverses pressions responsables sont-elles révélées ?*
- *Quelles réponses de la société ces impacts ont-ils généré ?*
- *Comment ont été mises en place les actions de restauration de la qualité des lacs ?*

C'est à l'ensemble de ces questions que l'étude dans un premier temps a cherché à répondre, en s'appuyant sur un ensemble d'expertises scientifiques, techniques et des savoirs profanes mobilisés au travers de diverses méthodes (enquêtes, enquêtes bibliographiques, focus group, cartes mentales) et au croisement de ces différents savoirs. La quantité d'informations à rechercher étant vaste, nous avons réduit nos investigations aux données relatives aux **SE associés aux régulations des qualités de l'eau et des milieux lacustres**. Ainsi, nous n'avons pas pu étudier l'ensemble des SE des grands lacs alpins.

Les données ont été récoltées dans des **bases de données construites pour ce sujet d'étude**, puis ont été synthétisées au sein de frises chrono-systémiques. Cette approche a permis d'identifier des **axes structurants** dans un ensemble complexe d'informations, et dans un 2^{ème} temps de modéliser des trajectoires d'évolution. On considère alors le SSE des grands lacs alpins comme un système construit selon deux trajectoires imbriquées, l'une écologique et l'autre sociétale (Moffatt and Kohler 2008).

Les synthèses de données s'appuient sur une analyse croisée de l'évolution des SSE lacustres, des SE associés et des pressions subies. Pour ce faire, nous avons **construit ou adapté des modèles conceptuels** car nous avons identifié dès le début de la thèse un manque de références sur l'application des SE et SSE aux grands lacs alpins. Il s'agit du second chemin poursuivi dans cette thèse (Figure 4-2) en parallèle du cheminement géo-historique. Pour construire ces modèles et tester leur intérêt, nous les avons appliqués au fonctionnement actuel du SSE des grands lacs, ce qui a permis de se baser sur des informations connues. A cet effet, une recherche de données sur l'état actuel du système a été entreprise, basée sur les savoirs de chercheurs qui étudient l'état des grands lacs (Annexe 4-2), et les savoirs techniques des gestionnaires qui connaissent bien les problématiques. De cette façon, le développement des modèles appliqué au cadre actuel de fonctionnement des grands lacs alpins a permis de vérifier leur **capacité de synthèse et d'analyse des informations**. Des présentations en séminaires ont été menées tout au long de la thèse afin de soumettre le développement de la recherche à critiques. Il s'agit d'une autre forme d'évaluation de la recherche.

Les gestionnaires des grands lacs alpins ont ainsi pu confirmer la capacité du cadre conceptuel des SSE des grands lacs alpins à synthétiser les informations relatives au fonctionnement de la gestion. Ces gestionnaires ont également mentionné que ce modèle **représentait une vision fidèle de la réalité**, et qu'ils n'avaient pas l'habitude de la voir formulée de cette façon.

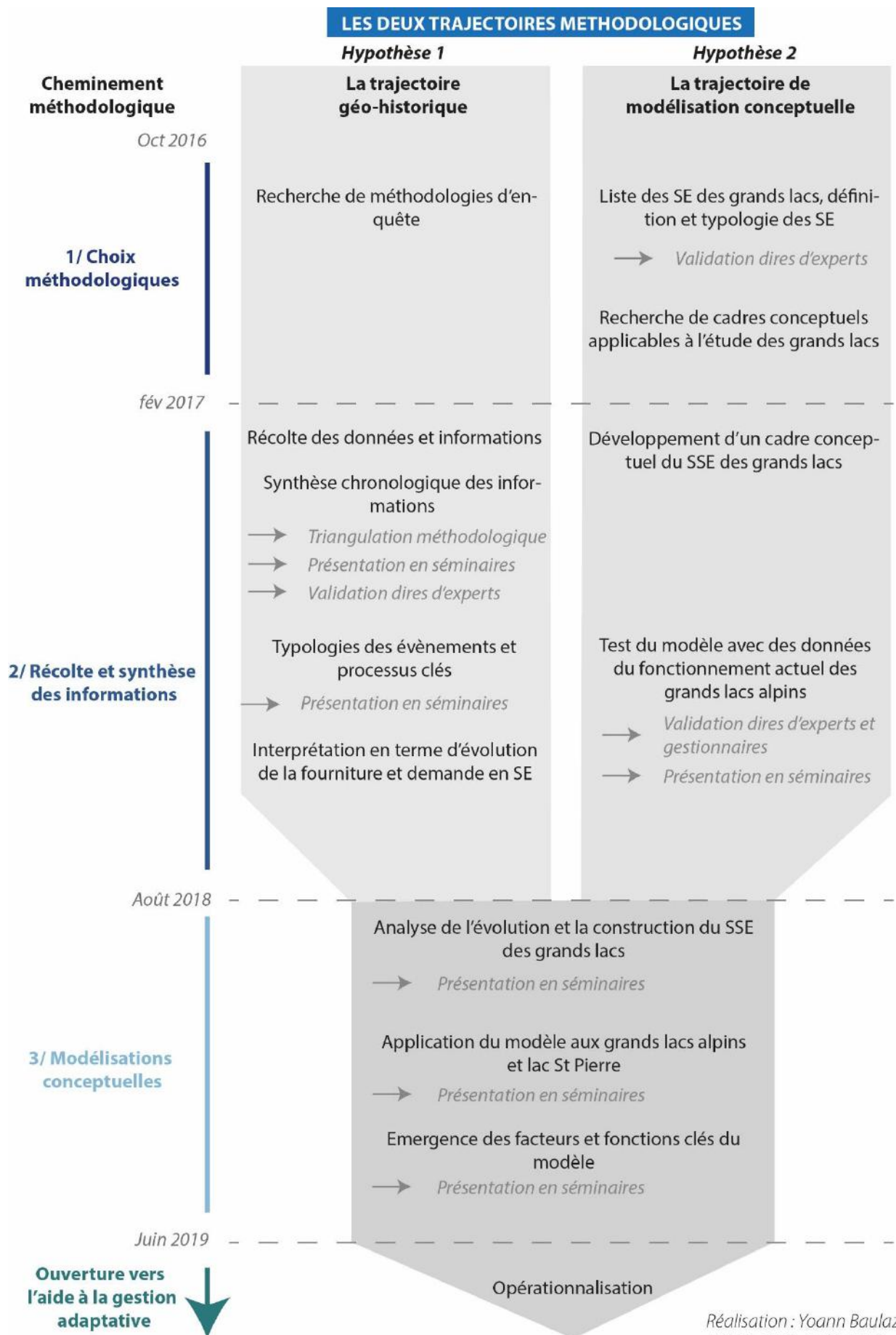
Une fois le modèle conceptuel du SSE « *stabilisé* » les deux trajectoires méthodologiques se sont rejointes pour réaliser une analyse rétrospective de l'évolution des SSE des grands lacs, tester l'application et la portée générale du modèle au cas du lac Saint-Pierre et faire émerger des fonctions clés et des facteurs endogènes et exogènes qui modifient l'état du SSE. Ces informations font partie des **sorties opérationnelles** du modèle qui peuvent intéresser la gestion.

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

L'un des résultats issu de cette étude relève de **la typologie**. Il permet notamment de définir des classifications de polluants, d'acteurs, d'actions de gestion, de SE, etc. Les modèles conceptuels permettent d'organiser ces typologies et d'analyser les changements d'état du SSE. Cette méthode peut ainsi être comparée à un "*suivi clinique*" des SSE des grands lacs. Sur cette base est discutée la portée générale de l'étude et son application à d'autres systèmes dans le monde.

Nos terrains d'étude ont été peu investis par les approches d'études pluridisciplinaires, ce qui a demandé une **construction progressive** « *pas à pas* » de la démarche méthodologique d'enquêtes. En conséquence, le cheminement méthodologique et les choix théoriques réalisés sont des résultats en soit de cette étude. Les méthodes de récolte, de synthèse et d'analyse des résultats sont présentées dans la partie suivante.



Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 4-2 : Représentation des trajectoires méthodologique et des étapes de l'étude

4.2 Les méthodes de récolte et d'analyse des informations

L'information est l'une des plus grandes énergies des SSE. C'est une entrée importante qui peut engendrer des évolutions, voire des changements d'état, mais également des sorties. L'information est un constituant de base des cadres conceptuels des SSE. Intégrer les informations dans le cadre conceptuel est une manière de tester sa validité et son applicabilité.

Cette partie vise à présenter les différents types d'informations collectées, les différentes méthodes ayant servi à leur récolte, la base de données développée spécifiquement pour les conserver et faciliter les liens, et enfin les méthodes de synthèse et analyses de données utilisées.

4.2.1 Les différents types d'informations

L'enquête réalisée a fait appel à des moyens tels que : entretiens, entretiens bibliographiques, démarches participatives au sein d'ateliers d'expertise et a mis en confrontation différents types d'expertises (Tableau 4-1), à la fois scientifiques en interrogeant des chercheurs limnologues, écologues, un médecin et chercheurs en sciences humaines et sociales, des savoirs liés à la gestion, des usagers, et représentants d'usagers, associatifs, des savoirs profanes des bénéficiaires de certains SE. Ces différents savoirs correspondent à trois types d'informations : des **informations écologiques** sur le fonctionnement, l'évolution ou l'état des écosystèmes lacustres, des **informations socio-économiques, culturelles et réglementaires** relatives à la société associée aux grands lacs alpins ou aux acteurs et modalités de gestion et à **la gouvernance** (Figure 4-3, A et B).

L'interfaçage de ces savoirs a permis d'obtenir des informations relatives aux SE des grands lacs alpins, aux dynamiques d'acteurs et aux actions de gestion de lutte contre les pollutions.

Tableau 4-1 : Nombre de personnes enquêtées selon le type d'expertise recherché

Type d'expertise	Nombre d'enquêtés
<i>Ecologie – limnologie</i>	28
<i>Sciences humaines et sociales</i>	14
<i>Gestion de services aux collectivités</i>	15
<i>Décision et coordination de la gestion</i>	9
<i>Usages et savoirs profanes</i>	27
<i>Associative</i>	3
<i>Médicale</i>	1

TYPES D'INFORMATIONS ET DONNEES UTILISEES DANS LE CADRE DE L'ETUDE

A/ Les hypothèses

H1 : Les services écosystémiques rendus par les grands lacs ne sont pas invariants dans le temps. Ils se sont construits, ont évolué en réponse à l'évolution des usages des lacs, de la qualité de l'eau et de ses impacts sur la société et des réponses apportées pour y répondre

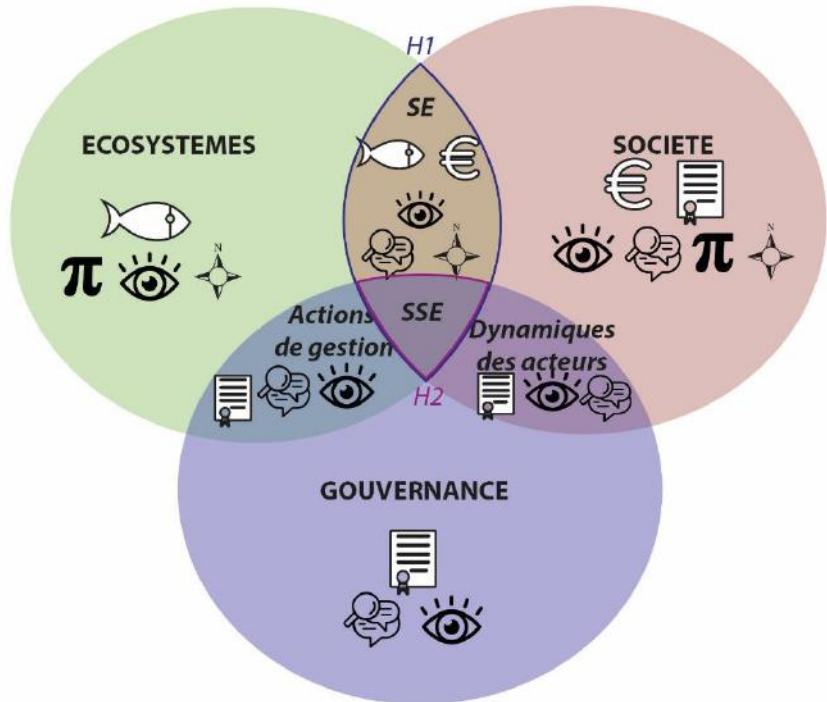
H2 : Le système socio-écologique des grands lacs s'est construit et complexifié autour de la gouvernance des impacts des pollutions sur les SE. L'exploration fonctionnelle de ce SSE et sa modélisation permettent de disposer d'un outil opérationnel à la gestion adaptative

B/ Types d'informations et données mobilisées


Données écologiques
 Données relatives aux écosystèmes lacustres et leurs BV



Données socio-économiques et culturelles
 Données relatives aux sociétés qui tirent profit des écosystèmes lacustres ou les gèrent. Ces données peuvent intégrer des représentations


Données réglementaires
 Données issues des lois et règles édictées par un groupe, une nation ou un Etat ou une collectivité territoriale.



C/ Descriptif des méthodes de récolte et tri des informations


Approches qualitatives
 Récoltes de données relatives à des qualités sans donner de mesures ou de possibilité de mesures. Données issues d'enquêtes.


Méthodes quantitatives
 Récoltes de données mesurées au travers d'indicateurs écologiques ou statistiques socio-économiques.


Méthodes empiriques
 Récoltes de données issues de l'expérience et des faits observés plus ou moins consciemment. Données issues d'enquêtes ou d'archives.


Spatialisation
 Récolte de données spatiales de l'espace terrestre ou lacustre. Données qualitatives, quantitatives ou empiriques spatialisées, obtenues par des modèles cartographiques ou non.

D/ Les outils de synthèses d'informations

L'OUTIL-FRISE
 Un outil d'étude interdisciplinaire du changement territorial

LES OUTILS CONCEPTUELS
 Des outils d'étude interdisciplinaires des systèmes complexes

Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 4-3 : Types d'informations, données et méthodes mobilisées pour l'étude

4.2.2 Les méthodes de récolte d'informations

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour récolter les informations recherchées (Figure 4-3 ; C). Quatre grands types de méthodes ont été différenciés en fonction de la récolte de données qualitatives, quantitatives, empiriques et spatiales. Ces méthodes sont présentées successivement.

En réponse aux deux trajectoires méthodologiques (Figure 4-2) la récolte d'informations s'est effectuée en deux temps : (1) une récolte d'informations visant à définir le **fonctionnement actuel du SSE** des grands lacs alpins et l'état des SE par le biais d'ateliers de travail composés d'experts scientifiques et gestionnaires, puis (2) une recherche sur **l'évolution des SE et du SSE** en réponse aux problèmes de pollution. La deuxième phase a mobilisé de nouveaux ateliers de travail avec des chercheurs, essentiellement retraités, impliqués de longue date au cours de leur parcours professionnel dans la mise en place et la réalisation des suivis écologiques des grands lacs alpins. Ces informations sur l'évolution de l'état des lacs ont été complétées par des analyses approfondies des SE liées aux qualités de l'eau et des milieux : les SE associés aux activités de pêche, d'approvisionnement en eau potable, de tourisme, et à l'assainissement.

La limite la plus significative des enquêtes historiques est liée à la conservation de la mémoire du sujet et à sa volonté à se remémorer certains événements (Galligani 2000). Pour faire face à cette difficulté, nous avons cherché à confirmer les informations obtenues par des méthodes empiriques, factuelles et qualitatives (portant notamment sur les dates et la chronologie des événements), par la **recherche de données écologiques** au sein des rapports de suivi des lacs et articles scientifiques pour valider les informations sur l'évolution de l'état des lacs et leurs ressources, par des données qualitatives issues de rapports techniques, articles de presse, essentiellement pour la recherche de dates et analyse des jeux d'acteurs (les articles de presse peuvent être utilisés pour réaliser des analyses des controverses autour des conflits d'usage des lacs) et des documents réglementaires et administratifs pour les informations relatives aux mesures de gestion (Figure 4-3 ; B). La mobilisation de toutes ces informations a notamment permis de reconstruire l'évolution de la fourniture et demande en SE présentée au chapitre 5.3. Une triangulation méthodologique a été effectuée pour obtenir des informations sur les usages, les actions de gestion, la dynamique des acteurs et sur le fonctionnement des SSE quand les données étaient suffisantes, et que cette méthode se justifiait (Figure 4-3 ; A).

4.2.2.1 Les entretiens semi-directifs

La plupart des données récoltées dans cette thèse sont des informations qualitatives et empiriques renseignant le fonctionnement et l'évolution des territoires lacustres. Cette recherche d'informations s'est focalisée sur deux échelles spatiales et organisationnelles différentes : une première, de la fourniture et de la demande de chaque SE, et une seconde, systémique de l'ensemble du SSE et ses relations aux systèmes adjacents et facteurs exogènes qui influencent les dynamiques de ses processus internes. Ces informations ont été obtenues par enquêtes qualitatives s'appuyant sur des entretiens plus ou moins approfondis, avec des formes de directivité différentes en fonction du matériau recherché. Les acteurs rencontrés peuvent être qualifiés d'« experts », définis comme des personnes qualifiées sur un sujet, et en principe reconnues comme telles, et donc consultées parce qu'elles ont de l'expérience

(Brunet et al. 1992). **Deux types principaux d'experts** ont été consultés : scientifiques, membres d'un laboratoire de recherche, spécialisés sur un sujet spécifique ou avec une connaissance approfondie des grands lacs alpins, et d'autres **techniciens** impliqués dans la gestion des grands lacs alpins et consultés dans une optique de compréhension du fonctionnement de la gouvernance des grands lacs. L'intérêt de la consultation d'experts est leur habilité à pouvoir renseigner les informations essentielles et synthétiques. L'expression « *dire d'experts* » dans le manuscrit précise que les données présentées sont issues de la consultation de ces experts.

La plupart des entretiens réalisés étaient de type **semi-directifs**, avec une trame d'enquête structurée en thèmes et une succession de questions ou de mots-clés organisant les échanges entre l'interviewé et l'enquêteur. Certains entretiens étaient également accompagnés de documents (cartes, frises chronologiques, schémas...) sur lesquels les personnes étaient invitées à réagir. Deux matériaux différents étaient recherchés : (1) des données précises empiriques factuelles ou associées à des représentations sur la **relation entre une composante du système socio-écologique des grands lacs alpins et les problèmes de pollution**, (2) un avis d'expert sur un **sujet précis**. L'objectif de cette méthode était de rechercher soit des **connaissances générales** sur un sujet technique pour soutenir le travail d'analyse ou bien des **validations ou approfondissements des analyses** déjà effectuées. Chaque trame d'enquête était donc spécialisée selon le domaine de compétences de l'expert rencontré. Plus l'information recherchée était précise, plus l'entretien se rapprochait d'une forme directive permettant de valider des analyses déjà effectuées. A l'inverse, les questions posées pouvaient être très vagues si l'objectif était la récolte d'avis et de représentations.

❖ Enquêtes sur les relations qualités de l'eau et des milieux et SE

Etant donné le nombre important de SE des grands lacs alpins et le temps restreint octroyé pour mener une étude approfondie des impacts des pollutions sur l'ensemble des SE, nous avons fait le choix de réduire notre champ d'investigation à l'étude de quatre SE spécifiques, identifiés au cours des ateliers comme les plus dépendants des qualités de l'eau et des milieux, à savoir :

- Le SE d'approvisionnement de bio-ressources à des fins alimentaires (associé à la pêche)
- Le SE d'approvisionnement en eau potable
- Les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux (importants pour l'assainissement des eaux usées)
- Les SE culturels, en lien avec le développement touristique

Pour les trois derniers SE, nous avons fait appel à deux stagiaires, sur six mois, pour mener ces investigations (voir Encadré 4-1). Deux études ont été réalisées simultanément, suivant la même méthodologie basée sur une série **d'enquêtes semi-directives** auprès de parties prenantes de la gestion des SE étudiés et représentant des bénéficiaires. Sept responsables de structures de gestion de services d'assainissement et d'approvisionnement en eau potable des collectivités et un élu ont été rencontrés dans le cadre de l'étude sur le SE d'approvisionnement en eau potable et l'assainissement (voir Annexe 4-5), sept responsables de structures de gestion du tourisme (Office du tourisme et Savoie Mont-Blanc Tourisme) et 10 représentants d'activités touristiques dans le cadre de l'étude sur les SE culturels (Annexe

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

4-6). Commencée quelques mois plus tôt, une étude très approfondie du SE d'approvisionnement en bio-ressource a été réalisée par le biais **d'entretiens biographiques** de bénéficiaires directs du SE (7 pêcheurs de loisir et 1 professionnel sur le lac d'Annecy et 4 pêcheurs professionnels et 5 amateurs sur le Léman), une « *sortie de pêche* » avec un pêcheur professionnel a été réalisée sur le lac du Bourget pour mieux comprendre – par l'observation - le métier de pêcheur dans les grands lacs alpins.

Dans un souci de gain de temps, pour chacun de ces SE, nous avons choisi de répartir les efforts d'enquêtes sur les trois lacs pour avoir une représentativité de la fourniture et la demande en SE sur chacun des lacs. **L'étude des pêches** a donc été réalisée sur les lacs Léman et d'Annecy, l'étude de **l'assainissement et l'eau potable** sur les trois grands lacs et l'étude des **SE culturels** sur les lacs d'Annecy et du Bourget. Chacun de ces SE a fait l'objet d'une étude approfondie visant à (1) **définir les pratiques et techniques d'exploitation des SE** des grands lacs alpins, (2) **identifier les facteurs et événements clés** qui ont modifié la fourniture et la demande en SE au cours du temps, en réponse aux problèmes de pollution.

Encadré 4-1 : Apports du travail de deux stagiaires à l'étude globale

Rémi Wirtz--Susini, élève ingénieur en hydraulique, ouvrage et environnement en deuxième année à Grenoble, s'est focalisé sur l'évolution de la fourniture et de la demande en SE d'approvisionnement en eau potable en réponse à l'évolution des besoins sociétaux et des problèmes de pollution. Son sujet de stage s'est intéressé aux relations entre deux fonctions des grands lacs en apparence contradictoires : l'utilisation des lacs pour l'approvisionnement en eau potable et en tant que réceptacle des eaux usées. Ainsi, dans le même temps, il a exploré l'évolution des techniques déployées sur les grands lacs alpins pour potabiliser l'eau des lacs et assainir les eaux usées du BV. Ce travail a été effectué sur le Léman et le lac d'Annecy et a mis en évidence l'ensemble des facteurs biophysiques, socio-économiques, culturels et réglementaires qui influent sur ces pratiques. L'étude a également conduit à la réalisation d'un réseau d'acteurs de l'eau dans les grands lacs alpins, ainsi que des frises chrono-systémiques sur l'évolution des techniques d'approvisionnement en eau potable, d'assainissement des eaux usées en lien avec les problèmes d'eutrophisation ou de micropollutions.

Mémoire : Wirtz-Susini, R, 2018. Approvisionnement en eau potable et réceptacle des eaux usées, deux fonctions contradictoires des grands lacs, 29p

En parallèle, Capucine Duclos, étudiante en master 2 environnement, dynamiques, sociétés, territoires à AgroParisTech de Paris a étudié les compromis entre développement touristique et qualité de l'eau et des milieux dans les grands lacs alpins. L'objectif de ce stage portait sur une analyse rétrospective de l'évolution des activités touristiques associées aux grands lacs alpins en réponse à la qualité des eaux. Il s'agissait dans un premier temps de définir la nature des interactions entre qualités des eaux et des milieux et pratiques touristiques, de déterminer de quelle manière ces relations ont évolué depuis l'émergence des premiers signes de pollution dans les années 1950, et comprendre comment l'offre touristique s'est construite peu à peu dans les grands lacs alpins en réponse à ces problématiques. Cette étude s'est basée sur les cas des lacs d'Annecy et du Bourget et a permis d'élaborer un ensemble cartographique des aménagements d'accès aux SE culturels autour des grands lacs alpins, des frises chrono-systémiques d'évolution des pratiques socio-culturelles associées à ces SE, et un descriptif de l'ensemble des facteurs d'influence de la fourniture et de la demande.

Mémoire : Duclos, C, 2018. Développement des pratiques touristiques sur et aux abords des grands lacs alpins : une construction multifactorielle des relations homme-Nature, 82p.

4.2.2.2 Les récits de vie : une technique d'enquête sociologique adaptée à l'étude des relations société - grands lacs

L'étude des SE associés aux pratiques de pêche dans les grands lacs alpins a fait l'objet d'une méthodologie spécifique que nous allons détailler dans cette partie (Figure 4-4)

« *Ages de la vie* », « *cursus* », « *cycle de vie* », « *cheminement* », « *parcours* », « *trajectoire* », « *récit biographique* », « *itinéraire* », « *carrière* » : il existe de nombreux termes synonymes de « *récit de vie* » (Bourdieu, 1986; Passeron, 1990). Anciennement appelé « *histoire de vie* » (life story, Norman K. Denzin, 1970) et parfois nommé « *récit biographique* », le **récit de vie** est une technique d'enquête utilisée en science sociale, principalement dans les domaines de la sociologie, ethnologie, histoire. Il s'agit d'une forme particulière d'entretien – l'entretien narratif – au cours duquel le chercheur demande à une personne de lui raconter « *sa vie* » en fonction d'un thème précis (Bertaux 1997).

La grande différence avec une autobiographie est que le récit s'intéresse généralement à des « *fragments de vie* », en lien avec la thématique de recherche étudiée. Selon Daniel Bertaux (Bertaux 1997), « *Il y a du récit de vie dès lors qu'un sujet raconte à une autre personne, chercheur ou pas, un épisode quelconque de son expérience vécue* » c'est-à-dire à partir du moment où il y a description sous **forme narrative** d'un fragment de l'expérience vécue. Là est la particularité de l'entretien de type récit de vie (Galligani 2000) : il apparaît donc comme une reconstruction réalisée en interaction entre un "*interviewer acteur du récit*" et un "*narrateur producteur*", mais qui ne récite pas : « *il réfléchit tout en se racontant* » (Bertaux 1980). Le dernier élément essentiel qui crée le récit de vie est la **dimension temporelle** (Marie-claude 2014) : le narrateur donne un début, un milieu, une fin à sa narration, une chronologie qui est structurée par la personne qui l'interroge. Par les récits de vie, on peut ainsi retracer les itinéraires et processus (Galligani 2000), ce qui explique l'emploi de « *trajectoires* », « *carrières* », « *parcours* » de vie pour parler de ces récits de vie (Passeron 1990). L'utilisation de cette méthode peut dépasser les besoins de la recherche car le narrateur « *met en intrigue* » les facettes de son identité à partir desquelles il agit (Ricœur, 1984). Cette mise en intrigue le conduit à mieux exprimer ses expériences de vie (Özçaglar-Toulouse 2009), lui donne envie de les raconter et peut lui procurer du bien-être (Galligani 2000).

L'approche par les récits de vie ne s'inscrit pas dans la démarche hypothético-déductive. Elle repose sur la logique inverse qui suppose d'analyser et de comprendre les situations **à partir du vécu de l'individu, de les comparer au vécu d'autres individus** appartenant au même monde social ou ayant vécu les mêmes situations, afin d'apporter des connaissances sur l'ensemble de ce monde social ou du contexte. L'objectif est par « *l'étude d'un ou plusieurs microcosmes, [de] donner des informations sur l'ensemble du mésocosme* » (Billen 1997). Le récit de vie ne prend pas seulement en compte les faits et pratiques, mais aussi **les motivations personnelles et représentations** qui font ces pratiques, donc les aspects subjectifs et sensibles. Le Tableau 4-2 énumère les avantages et inconvénients de cette méthode.

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

Tableau 4-2 : Avantages et inconvénients de la méthode d'enquête par récits de vie

	Citation	Bibliographie
AVANTAGES	Les récits de vie sont créateurs de connaissance sur les problèmes auxquels sont soumis les interrogés et sur les profils des narrateurs, les professions, etc...	(Chaxel, Fiorelli, & Moity-maizi, 2014)
	Les données biographiques seront toujours plus complètes, que les données issues d'un autre type de questionnement ou d'une grille d'observation, puisque les informations récoltées sont très riches en détails.	(Passeron, 1990).
	les récits de vie permettent de «saisir des mécanismes, des processus récurrents au sein d'un même milieu socioprofessionnel (...) insaisissables par d'autres types d'enquêtes».	(Bertaux, 1997)
	Le récit de vie renferme des informations pouvant permettre la connaissance culturelle, que d'autres méthodes n'apportent pas forcément.	(Perrier, 2001)
	Permet de parvenir à l'universel et au général (la société) à partir de l'individuel et du singulier.	(Perrier, 2001)
LIMITES	La limite la plus significative des entretiens de type récit de vie est liée à la mémoire du sujet et à la volonté du sujet à se remémorer les choses.	(Galligani, 2000)
	Pour que la méthode soit efficace, les interrogés doivent avoir confiance en l'intervieweur.	(Chaxel et al., 2014)
	La technique de récit de vie impose une quantité importante de récits à analyser, demande donc beaucoup de temps.	(Martouzet, Bailleul, Feildel, & Gaignard, 2010)
	Biais : La tentation, souvent présente chez l'enquêté, est de donner les éléments qu'il croit que l'enquêteur attend.	(Martouzet et al., 2010)

Employer la démarche biographique, dans une étude en géographie et en sciences pour l'environnement et mieux comprendre un problème environnemental (évolution des relations acteurs - grand lac - pollutions) **n'est pas une pratique courante**. Cependant, elle se justifie dans la mesure où l'on s'intéresse à l'évolution temporelle des pratiques et rapports aux grands lacs, et que l'on cherche à récolter un grand ensemble de connaissances de diverses natures.

Cette méthode a été utilisée pour étudier un SE précis des grands lacs alpins associé aux activités de pêches commerciales et de loisir (SE d'approvisionnement en bio-ressources). Ce choix a été motivé par deux raisons : (1) la pêche dans les grands lacs alpins présente de nombreuses spécificités que l'on ne retrouve pas dans d'autres lacs ou en mer ; il a semblé pertinent pour l'enquête de réaliser des entretiens approfondis avec ces acteurs pour bien **connaître et comprendre leurs pratiques** et mieux les analyser, (2) les pêcheurs sont des usagers qui ont un **rapport privilégié avec le lac**, étant donné qu'ils peuvent observer l'évolution du lac, de son état et de ses ressources, ce qui implique des connaissances étendues qui dépassent le cadre de la pêche, et susceptibles d'apporter des renseignements sur d'autres usages, d'autres composantes de la recherche (Figure 4-4).

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

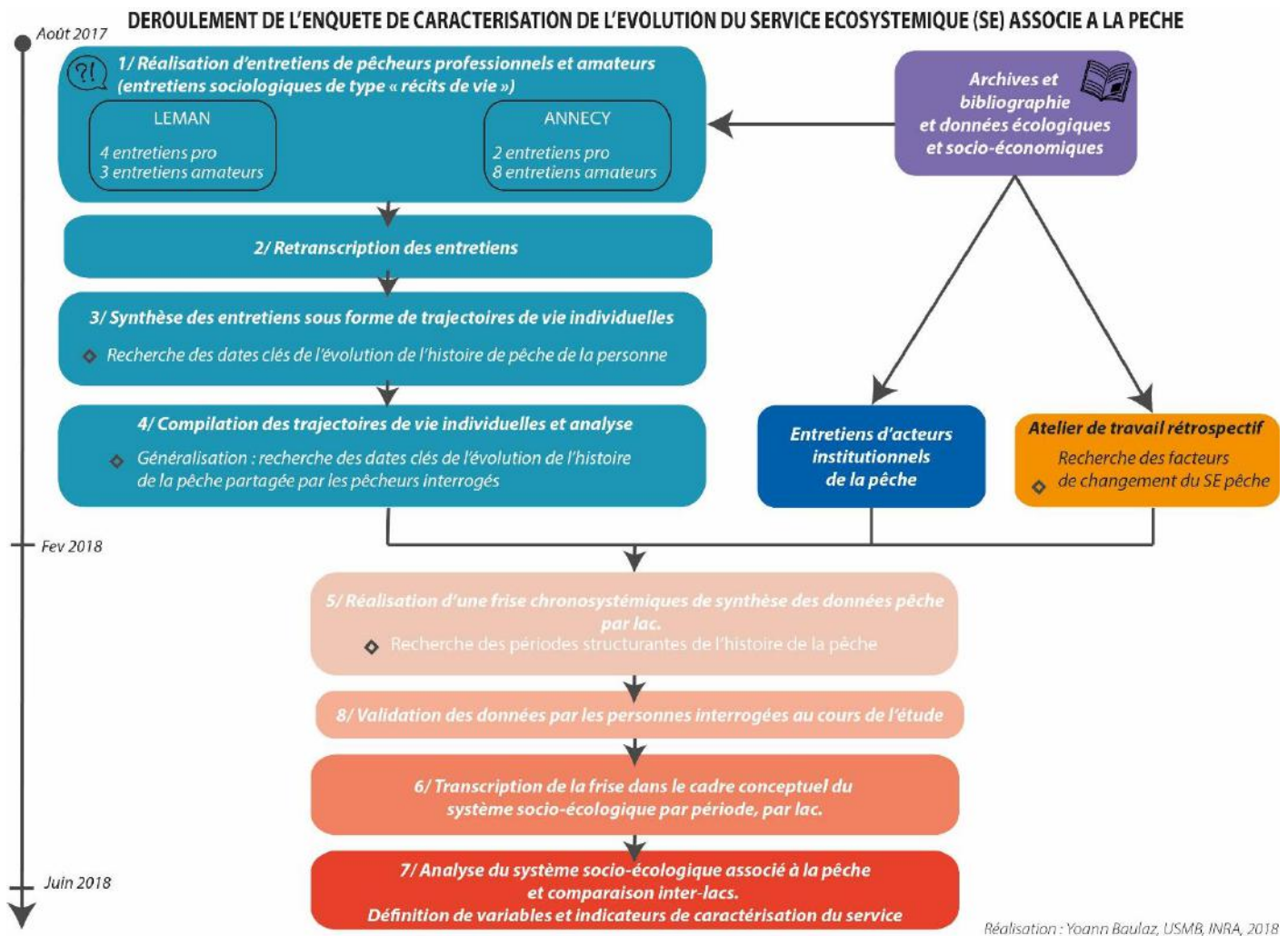


Figure 4-4 : Trajectoire méthodologique de l'étude spécifique pour la pêche dans les grands lacs alpins

La principale limite de la méthode est que les entretiens de type « *récits de vie* » sont longs à réaliser. En moyenne ils ont duré 1h30 dans cette étude, mais dans certains cas ils peuvent dépasser trois heures (Özçaglar-Toulouse 2009). Comme ils sont retranscrits dans leur intégralité à la fin des échanges, le chercheur amasse une **quantité importante d'informations qualitatives**, d'où la nécessité de trouver une méthode pour en faciliter la lecture et l'analyse.

Toutes les méthodes d'analyse des récits de vie utilisent le principe de « *comparaison des récits* » qui **analyse les points communs et différences** entre chaque entretien (Galligani 2000). La comparaison entre les parcours biographiques permet de voir apparaître des récurrences des mêmes situations, des logiques d'actions proches, des événements clés, ce qui permet de repérer un même mécanisme social et un même processus. La période de comparaison commence dès le 2ème entretien (Sanséau 2005 – cet auteur liste les différentes approches d'analyse des récits de vie que nous avons énumérées dans le Tableau 4-3).

Pour notre étude, certains types d'analyses des discours ont été éliminées directement, comme l'analyse structurale, l'analyse lexicale et l'analyse psychique. Notre idée a été de créer un modèle nous permettant de représenter schématiquement le parcours de la personne, pour nous défaire rapidement du discours brut retranscrit et faciliter la lecture et l'analyse par comparaison des récits. C'est ainsi que l'analyse **des parcours biographiques** a été choisie.

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

Tableau 4-3 : Types d'analyses des verbatims associées à la démarche d'enquête par récits de vie (Sanséau 2005)

Type d'analyse	Description	Bibliographie
L'analyse diachronique.	Elle met l'accent sur la succession d'événements marquants qui se sont succédés dans le temps et tente d'éclairer les relations avant/après entre ces événements.	
L'analyse compréhensive.	Il s'agit de se former une représentation des rapports et des processus qui sont à l'origine des phénomènes dont parle le récit recueilli. Cette dernière demande d'associer, dans sa mise en oeuvre imagination et rigueur	(Kaufmann, 1996).
L'analyse thématique	Appliquée aux récits de vie, elle consiste à identifier dans chaque récit les passages touchant à différents thèmes afin de comparer ensuite les contenus de ces passages d'un récit à l'autre.	
L'analyse comparative.	Elle consiste à élaborer progressivement un modèle de plus en plus précis et riche faisant apparaître des récurrences entre différentes situations.	
L'analyse structurale.	Développée par les linguistes et les sociologues, elle a pour postulat qu'il est possible d'observer le sens subjectif des actions, par les paroles et structures de phrases dans la production du récit.	Demazière et Dubar (1997)
L'analyse psychique.	Cette approche tente de saisir l'articulation du psychique et du social mais également leur transmutation réciproque.	
L'analyse des parcours biographiques.	Elle a pour objet d'élaborer des catégories biographiques tels que les « carrefour » ou les « moments charnières », « événements » ou « catastrophes ».	Cette voie est en phase d'exploration par Schütze (1983), Legrand (1993) et Leclerc-Olive (1997).
L'analyse lexicale.	A partir des mots, des expressions et des groupes de mots, ce type d'analyse permet de repérer la façon dont sont construits les discours autour d'un thème ou d'un sujet.	

Pour ce faire, nous avons cherché à construire des **"trajectoires de vies"** des pêcheurs interrogés à partir de chaque récit retranscrit. La réalisation de représentations graphiques de la trajectoire est intéressante car elle peut mettre en valeur les phases de bifurcation et de rupture dans le parcours qui n'avaient pas été explicitées comme telles au cours du récit (Chaxel et al. 2014). Un exemple de trajectoire de vie est proposé en Annexe 4-3.

La représentation graphique de la trajectoire de vie est scindée en trois sections. Tout d'abord, au centre, une frise chronologique des **engins de pêche** successivement utilisés par le pêcheur au cours de sa vie. Les grandes étapes de sa vie en lien avec la pêche sont indiquées : les périodes où il a utilisé tel ou tel engin de pêche, les points de ruptures et bifurcations : les changements dans sa trajectoire de vie (ex : changement de port d'attache, changement d'espèce cible, changement important de matériel), les origines de son métier : *comment en est-il arrivé à devenir pêcheur ?*

Dans la partie haute de la frise sont placés chronologiquement tous les verbatims relatifs aux **pratiques et techniques de pêches et aux relations entre pêcheurs**. Dans la partie basse de la trajectoire on retrouve d'une part tous les verbatims associés aux savoirs profanes du pêcheur sur **l'évolution des espèces cibles et de l'état du système écologique lacustre**, et enfin en dernière partie de la trajectoire, les éléments associés à **l'évolution de la gouvernance** de la pêche et réglementations. Voir l'annexe 4-3 pour un exemple de « *trajectoire de vie individuelle* ».

Une fois cette phase de tri des informations des pêcheurs et sa représentation sous forme de trajectoire effectuées, nous comparons l'ensemble des trajectoires individuelles sur un même document. Pour cela nous reprenons la frise centrale de tous les pêcheurs avec les ruptures et les disposons à la même échelle temporelle pour reconnaître les similitudes et différences entre trajectoires. Ce document peut également servir de base de travail pour comparer ces informations qualitatives et empiriques avec des données d'évolution des pêcheries, ou de la réglementation des pêches. Certaines informations obtenues par ailleurs, notamment dans les ateliers participatifs peuvent être ajoutées également (Figure 4-4). Un exemple de trajectoire globale est visible en Annexe 4-4.

4.2.2.3 Les ateliers participatifs

Plusieurs ateliers participatifs ont été réalisés au cours de cette thèse, qui ont réuni à chaque fois des panels d'experts avec deux objectifs : (1) **construire des synthèses de connaissances rétrospectives** des impacts des pollutions sur l'état des lacs et des réponses mises en place pour lutter contre (Figure 4-2, trajectoire méthodologique 1), (2) **obtenir une expertise co-construite** autour de la modélisation de l'état actuel du fonctionnement des SE et du SSE des grands lacs (Figure 4-2, trajectoire méthodologique 2). Six ateliers ont été réalisés entre juin 2017 et février 2018 qui ont réuni un total de 35 participants.

Les ateliers étaient structurés avec une première présentation synthétique du sujet de la thèse, des différentes avancées et des objectifs de l'atelier afin de permettre aux participants de bien identifier les besoins de l'enquête, puis une deuxième phase d'environ 1h30, consistant à réaliser une évaluation collective autour d'une ou plusieurs questions précises. L'ensemble des ateliers présentés jusqu'ici ont été animés par le thésard, avec l'aide des encadrants, stagiaires de l'étude et collègues des laboratoires.

Tableau 4-4 : Nombre de participants et organisateurs de chacun des ateliers participatifs menés dans le cadre de l'étude

Nom de l'atelier participatif	Nombre de participants	Nombre d'organisateur
<i>Fourniture et demande en SE (2 ateliers)</i>	8	1
<i>Les SE culturels</i>	7	1
<i>Décision et coordination de la gestion</i>	9	1
<i>Rétrospectif (2 ateliers)</i>	11	3

❖ Les ateliers d'évaluation de la fourniture et de la demande en SE

Les deux premiers ateliers, relatifs à **l'évaluation de la fourniture et de la demande en SE** ont réuni des experts limnologues et écologues impliqués dans les suivis des grands lacs alpins. Ces experts possèdent une grande connaissance du fonctionnement des systèmes lacustres et ont été consultés à ce titre. Ces ateliers visaient à dresser un état des lieux des SE des grands lacs alpins, de leurs déterminants biophysiques et à réaliser une estimation semi-quantitative collective des niveaux de fourniture et de demande en SE des grands lacs alpins pour connaître à la fois l'état de ces SE et les enjeux auxquels ils sont soumis (Encadré 4-2 et Encadré 4-3).

A l'issue de ces deux ateliers, il a été mis en évidence que les SE culturels associés aux grands lacs alpins étaient difficiles à appréhender en atelier participatif car leurs niveaux de fourniture et de demande dépendent en partie de critères subjectifs qui entraînent des points de vue très contrastés entre experts. En tant qu'experts en limnologie et écologie, ils ne se sentaient pas légitimes pour évaluer ce type de SE. Un autre type d'atelier a donc été organisé réunissant des experts de sciences humaines et sociales qui étudient les activités touristiques en montagne ou en lac dans les Alpes. Ce troisième atelier avait pour but **d'explorer la dimension culturelle et patrimoniale des SE** pour tenter de préciser la typologie de cette catégorie de SE. L'atelier s'est alors déroulé en deux temps avec tout d'abord un brainstorming collectif de l'ensemble des pratiques socio-culturelles associées aux grands lacs alpins, puis, dans un deuxième temps une recherche de classement de ces pratiques en fonction des valeurs et attributs associés aux lacs recherchés pour la réalisation de ces pratiques. Nous avons observé lors de cet atelier une difficulté à mobiliser le concept de SE avec les chercheurs participants, du fait de réserves vis-à-vis de l'utilisation de ce concept (Encadré 4-4).

Plusieurs propositions de **typologies de ces pratiques** socio-culturelles ont été proposées, différenciant : (1) la présence d'un contact physique avec l'élément liquide, (2) le type de relations entre les pratiques et les lacs (relation physique, spirituelle et symbolique, cognitive), (3) le type de finalité (pratiques dynamiques sportives, contemplatives, connaissance), (4) l'utilisation du lac comme support ou comme décor, (5) le niveau de dépendance avec un contact avec le lac (faible, moyen, fort), (6) le degré d'impact de la pratique sur le fonctionnement du lac (pratique « *impactante directe* », « *impactante indirecte* », « *non impactante* », conservation de l'écosystème). La plupart des pratiques sociales et culturelles pouvant être associées à deux catégories, il s'est avéré difficile de réaliser cet exercice. Au final, c'est la typologie des pratiques utilisant le lac comme support ou comme décor qui permettait le plus facilement de classer les pratiques. Les résultats de cet atelier ont été utilisés pour la présentation des pratiques culturelles et récréatives des grands lacs alpins en chapitre 2.2.4.

L'atelier a également proposé une **typologie des SE culturels** des grands lacs alpins en trois catégories, à savoir : (1) les SE de fourniture d'une eau avenante, (2) de fourniture en paysages agréables, (3) de qualité environnementale perceptible des milieux. Cependant, au cours de l'étude il est apparu que ces dénominations de SE se rapprochaient davantage de celles de fonctions écologiques sous-tendant les SE culturels, et il a été opté pour une classification plus habituelle des SE culturels à partir des travaux de la CICES.

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

Encadré 4-2 : Déroulement et résultats bruts de l'atelier d'évaluation de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins

Dans le premier atelier, une liste préalable de SE des grands lacs alpins a été proposée puis testée lors de l'évaluation de l'importance de la fourniture et de la demande en SE. Cette évaluation était organisée autour d'une matrice (Tableau 4-5), à partir de laquelle, pour chaque SE, les experts débattaient entre eux sur un score d'importance de la fourniture et de la demande en SE pour chacun des grands lacs alpins. Les scores étaient établis sur une échelle de quatre modalités, suivant un gradient d'importance allant d'un niveau 0 à 3 : *niveau 0 : le SE n'est pas fourni ou demandé ; Niveau 1 : la fourniture/demande en SE est faible ; Niveau 2 : moyenne ; Niveau 3 : forte*. Cette évaluation a permis d'établir des diagrammes radars de l'importance de la fourniture et de la demande en SE, présentés en chapitre 5.

Tableau 4-5 : résultats de l'évaluation de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins

Libellé du SE	Léman		Lac d'Annecy		Lac du Bourget	
	<i>Offre</i>	<i>demande</i>	<i>Offre</i>	<i>demande</i>	<i>offre</i>	<i>demande</i>
<i>Eau potable</i>	3	3	3	3	3	3
<i>Navigation commerciale</i>	3	3	3	1	3	1
<i>Pêche commerciale</i>	3	3	2	3	3	3
<i>Eau industrielle</i>	3	1	3	0	3	0
<i>Hydroélectricité</i>	3	1	3	1	3	2
<i>Eau pour l'irrigation</i>	3	0	3	0	3	0
<i>Aquaculture</i>	3	0	3	0	3	0
<i>Géothermie</i>	2	0	0	0	2	0
<i>Régulation des flux liquides</i>	3	3	2	2	2	2
<i>Maintien de la qualité de l'eau potable</i>	2,5	3	2,5	3	2,5	3
<i>Maintien de la qualité sanitaire des poissons</i>	2	3	2	3	2	3
<i>Maintien de la qualité de l'eau et du substrat pour les usages récréatifs</i>	2,5	3	2,5	3	2,5	3
<i>Maintien des cycles de vie</i>	2,5	3	2,5	3	2,5	3
<i>Pêche récréative</i>	3	3	2	3	3	2,5

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

Encadré 4-3 : Déroulement de l'atelier 2 sur l'évaluation de la fourniture en SE des grands lacs alpins

A partir des résultats du premier atelier, trois biens et SE présentant de forts enjeux sur les grands lacs alpins ont été identifiés : le bien « *eau potable* », le bien « *poissons* », le SE de récréation lacustre. A partir du modèle en cascade des SE, une seconde matrice a été proposée aux participants les invitant à différencier les processus, fonctions écosystémiques et bénéficiaires associés aux SE sous forme de brainstorming. En fin d'atelier, il a été demandé de réfléchir aux indicateurs et approches d'évaluation qui permettraient d'évaluer l'état de la fourniture et de la demande de chacun des SE.

Les résultats de cet atelier sont visibles à l'Annexe 4-8

Encadré 4-4 : La limite et difficulté de mobiliser une expertise pour l'étude du concept de SE

Autant dans les deux premiers ateliers l'utilisation du concept de SE est assumée et les participants invités à utiliser le vocabulaire et outils relatifs au concept (évaluation de la fourniture/demande, modèles conceptuels), autant dans le troisième atelier le lien entre pratiques sociales et culturelles et SE est plus difficile à établir ; ce qui a complexifié le déroulement de l'atelier.

Les experts en sciences humaines et sociales consultés n'ont pas pour habitude d'utiliser le concept de SE et certains sont très critiques envers son utilisation. Ils notent notamment des similarités importantes avec d'autres concepts plus familiers des sciences humaines et sociales, comme celui de « *ressources* ». Le phénomène de diffusion et politisation d'un concept pas encore stabilisé au niveau conceptuel (définition, cadre conceptuel) les gênent également. Le travail de rapprochement entre "*pratiques socio-culturelles et SE*" s'est réalisé à l'issue de l'atelier et a été assumé par l'équipe de travail autour de la thèse. Cet atelier a mis en lumière la difficulté de définir une typologie des pratiques des grands lacs car les activités récréatives et de loisir font appel à différentes composantes objectives et subjectives des écosystèmes. Il était donc difficile d'identifier une priorisation de ces composantes pour chaque pratique.

Cet atelier a aussi mis en avant une autre question importante : "*comment définir la zone d'influence d'un grand lac pour les SE culturels ?*". En effet, les bénéficiaires de ces SE proviennent potentiellement du monde entier, ce qui rend difficile l'évaluation de la demande en SE.

- ❖ L'atelier décision et coordination de la gestion : état actuel du fonctionnement des SSE des grands lacs alpins

L'objectif de caractérisation de l'état et du fonctionnement du SSE des grands lacs alpins devait être complété par un dernier atelier impliquant leurs **gestionnaires**. La gouvernance des grands lacs alpins inclut un nombre important d'acteurs (chapitre 2.3). Nous avons décidé d'inviter à cet atelier des acteurs ayant la vision la plus « *large* » possible du fonctionnement de la gouvernance de chacun des grands lacs et avons donc fait appel à des représentants des structures de coordination de la gestion, à savoir des représentants de l'agence de l'eau, des EPCI et de la CIPEL. La DDT de Haute-Savoie, représentante de l'Etat en tant que propriétaire du lac, a été consultée en entretien à l'issue de cet atelier.

Un atelier « *décision et coordination de la gestion* » a été mené avec l'objectif de tester une première version du modèle conceptuel des grands lacs alpins et sa possible application à leur gestion adaptative (Annexe 4-1, version 3). Cet atelier a été donc construit en continuité des travaux conduits dans le cadre des précédents ateliers participatifs avec les experts scientifiques (Encadré 4-5). Un second atelier a été réalisé avec des gestionnaires du lac d'Aiguebelette, mais il a finalement été décidé de ne pas tirer profit de ses résultats.

Cet atelier a montré trois résultats intéressants : (1) la **capacité de structuration et de synthèse** des informations relatives à la gestion des grands lacs alpins du cadre conceptuel développé, (2) les acteurs de ces lacs avaient déjà entendu parlé du concept de SE, les approches **d'évaluation économique et de prospective d'évolution des usages les intéressaient beaucoup**, (3) les acteurs ont mis en évidence que les **enjeux de gestion entre ces lacs sont très similaires** et que la principale différence entre ces trois lacs est de ne pas avoir atteint le même stade de restauration de la qualité de l'eau et des milieux.

Les résultats de cet atelier sont disponibles en Annexe 4-11. Les mêmes acteurs ont également été consultés sous forme d'entretiens téléphoniques l'année suivante à titre d'experts techniques.

Encadré 4-5 : Déroulement de l'atelier décision et coordination de la gestion

L'atelier était structuré en quatre parties, une première invitant chaque acteur à présenter sa structure, la place qu'elle occupe dans la gouvernance des lacs, ainsi qu'à présenter leur vision des caractéristiques spécifiques de chacun des lacs qu'il avait à gérer, dans une optique de comparaison des spécificités de gestion de chacun des lacs. La seconde partie concernait le fonctionnement de la gestion et la répartition des jeux de pouvoir et de décision entre acteurs : à partir d'un ensemble de questions spécifiques, l'objectif était de guider les participants dans la caractérisation de chacun des compartiments du SSE. La troisième partie concernait les enjeux de gestion des grands lacs alpins, les menaces et opportunités et visait à récolter leur représentation de l'évolution des enjeux de gestion des lacs. Enfin, en dernière partie, nous avons questionné la plus-value du concept de SE pour la gestion des grands lacs alpins.

- ❖ L'atelier rétrospectif : chroniques des pressions - états des grands lacs alpins - réponses sociétales

La deuxième phase de récolte de données (entre septembre 2017 et janvier 2018) relevait de l'approche rétrospective et visait à reconstruire d'une part l'évolution des pressions - états - réponses associées à chacun des lacs, depuis l'émergence des problèmes de pollution, et d'autre part à explorer les relations entre SE et qualité de l'eau et des milieux.

Deux **ateliers rétrospectifs** ont été organisés en faisant appel à d'anciens chercheurs limnologues impliqués dans l'élaboration des protocoles de suivi des lacs et leur réalisation depuis le début des années 1970 pour les trois grands lacs alpins (Annexe 4-12). Ces deux ateliers ont requis trois animateurs répartissant les participants en trois sous-groupes pour recueillir un maximum d'informations (Figure 4-5, photos 4, 5 et 6). Dans chaque groupe, nous avons veillé à intégrer au moins une personne spécialisée dans le suivi de chacun des trois grands lacs alpins. La même méthodologie a été utilisée pour les trois sous-groupes, l'objectif étant d'identifier des événements clés et faire émerger les phases de ruptures et d'évolution des impacts des pollutions sur l'état des lacs et les usages, et des réponses sociétales à ces impacts. Pour y parvenir, une méthode de structuration étape par étape sous forme de questions spécifiques à partir du modèle Pression-Etat-Réponse de Collins et al. 2011 a été utilisée et a permis de représenter ces événements au sein de frises chronologiques (Figure 4-5, photo 1). A partir des questions posées, chaque intervenant a pu donner des éléments de réponses en fonction de sa mémorisation des événements, les autres membres du groupe venant confirmer, infirmer ou modifier les dires, permettant l'obtention d'informations les plus fiables possibles, notamment au niveau des dates et de la chronologie des événements.

Ce travail a été effectué en deux ateliers consécutifs, un premier pour construire une frise relative à la phase d'eutrophisation et problèmes de micropollutions, métaux lourds pour chacun des grands lacs alpins, puis un second pour présenter, valider et compléter la synthèse des informations obtenues lors du premier atelier. Les frises obtenues sont visibles en Annexe 4-13. Ce travail a permis d'obtenir rapidement une chronologie des événements clés des impacts des pollutions sur les grands lacs alpins et des réponses apportées par la société pour y répondre, ce **qui a servi de cadrage à l'analyse spécifique des impacts des pollutions sur les SE**.

Ces ateliers ont été enregistrés, avec l'aval des personnes concernées, pour faciliter l'animation des ateliers et permettre la réalisation de plusieurs expertises collectives simultanées en sous-groupes de participants.

Photos de l'atelier rétrospectif

Frise chronologique de l'eutrophisation dans les trois grands lacs alpins

LEMAN
AUTRES LACS

PRESSION

1950 1960 1970 1980 1990

LEMAN
AUTRES LACS

ETATS

1950 1960 1970 1980 1990

LEMAN
AUTRES LACS

REPONSES

1/ Le modèle de frise à remplir

2/ Le groupe d'enquêtés

3/ La présentation de l'étude

4/ Premier sous-groupe

5/ Deuxième sous-groupe

6/ Troisième sous-groupe

Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 4-5 : Photos du premier atelier rétrospectif et modèle de frise Pression - Etat - Réponse à remplir

4.2.2.4 Les données complémentaires

Un ensemble de données annexes ont été récoltées à partir de **données bio-physico chimiques** suivies depuis plus de 40 ans sur les grands lacs alpins. Un observatoire, l'Observatoire des Lacs Alpains (OLA) a été mis en place par la Station d'Hydrobiologie de Thonon-Les-Bains qui comporte toutes les données relatives aux suivis des lacs quel qu'en soit le thème (phytoplancton, zooplancton, physico-chimie, poisson ...). Ces données sont obtenues in situ avec des sondes placées sur toute la profondeur du lac et complétées par des données issues de comptages et analyses, obtenues en laboratoire à partir des prélèvements (www.si-ola.inra.fr). Les chroniques de données récoltées sur le Léman sont les plus anciennes car elles débutent en 1957, sur le lac d'Annecy elles sont présentes depuis 1966 et depuis 1978 sur le lac du Bourget (voir Tableau 4-6). Nous n'avons pas utilisé directement ces données, hormis celles liées aux statistiques de pêches et aux évolutions des concentrations en phosphore dans les lacs, mais plutôt consulté les rapports de suivis de ces lacs qui sont publiés tous les ans depuis le début des prélèvements. Ces documents dressent des synthèses des évolutions, des analyses et émettent des recommandations de gestion, contiennent donc des informations complémentaires aux données brutes qui pouvaient renseigner plusieurs composantes du fonctionnement du SSE.

Une recherche d'informations au sein **d'archives**, composées essentiellement de rapports, articles scientifiques anciens et surtout d'articles de presse a également fait l'objet d'un travail important dans le cadre de cette étude. 119 références d'archives ont été utilisées dans la rédaction de ce manuscrit (Annexe 4-14) qui ont permis d'apporter certains éléments de détails « *oubliés* » par la mémoire des personnes interrogées et de confirmer leurs dires et la chronique des événements.

Une étude plus approfondie de l'évolution de la **réglementation des pêches** a également été réalisée pour l'analyse des chroniques de pêche au Léman. Des articles de lois, arrêtés et règlements ont également été consultés pour l'étude de l'approvisionnement en eau potable et l'assainissement.

Enfin, pour renseigner des données de cadrage sur l'évolution de la démographie et des modes d'usages des sols, des **données socio-économiques** ont été utilisées à partir des bases de données de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) pour les données françaises et des instituts fédéraux et cantonaux de statistiques pour les données suisses. Ces données ont également été utilisées en complément de la base de données "Corine Land Cover" pour **l'analyse cartographique** des modes d'usages des sols des BV des grands lacs alpins.

CHAPITRE 4
Démarche, informations et analyses

Tableau 4-6 : Etat des lieux de la base de données OLA pour les grands lacs alpins

Nom du type de données Nombre de variables dans le type et exemple	Nom du site	Date de début
Physico-chimie Phosphore, azote, oxygène, pH, silice, cations, anions.... sur plusieurs profondeurs (21 variables)	Léman	1957 <small>31/05/1957</small>
	Annecy	1966 <small>01/06/1966</small>
	Bourget	1999 <small>03/11/1999</small>
	Dranse (Affluent Léman)	1963 <small>05/06/1963</small>
Chlorophylle chlorophylle a (2 méthodes), chlorophylle c, pheopigments, caraténoïde	Léman	1976 <small>12/04/1976</small>
	Annecy	1990 <small>16/05/1990</small>
	Bourget	1987 <small>12/02/1987</small>
Biodiversité zooplancton biovolume sédimenté, nombre d'individus par taxon et par stade	Léman	1959 <small>18/03/1959</small>
	Annecy	1994 <small>04/01/1994</small>
	Bourget	1995 <small>21/02/1995</small>
Biodiversité phytoplancton Biovolume sédimenté, biovolume de l'espèce dans l'échantillon, nombre d'objets comptés (par taxon)	Léman	1974 <small>01/01/1974</small>
	Annecy	1996 <small>26/03/1996</small>
	Bourget	1995 <small>01/02/1995</small>
Production primaire Production primaire (par durée d'incubation, par tiers médian, par heure)	Léman	1991 <small>08/04/1991</small>
	Annecy	2011 <small>13/01/2011</small>
	Bourget	2011 <small>23/03/2011</small>
Mesures in situ : sondes multiparamètres T°, pH, O2, cond, chloro a (13 variables)	Léman	1976 <small>12/04/1976</small>
	Annecy	1991 <small>07/05/1991</small> 1966 <small>02/06/1966 Temp.</small>
	Bourget	2003 <small>14/01/2003</small>
Conditions de prélèvement Transparence, T° air, vent... (12 variables)	Léman	1957 <small>31/05/1957</small>
	Annecy	1966 <small>01/06/1966</small>
	Bourget	1978 <small>17/01/1978</small>

4.2.3 Les méthodes de tri et de synthèse des informations

C'est un véritable enjeu de traiter et synthétiser une quantité importante d'informations récoltées de diverses natures. Il est nécessaire de développer une approche systémique et intégrée, permettant de **sélectionner les informations** qui ont un intérêt pour le système, afin de se prémunir des détails et analyser les relations entre ces informations, leurs intégrations à différentes échelles. Pour ce faire, une **base de données « socio-écosystémique »** a été développée pour regrouper les données qualitatives facilitant l'analyse. Cette base de données a permis de réaliser un ensemble de typologies pour classer et organiser les informations.

Nous avons choisi deux types d'outils adaptés à la démarche pluridisciplinaire permettant le couplage de données biophysiques, socio-économiques, culturelles et juridiques : **des outils conceptuels** que nous avons déjà présentés au chapitre précédent, et la **frise chrono-systémique**. L'outil « *frise* » est une technique de synthèse bien connue en sciences humaines et sociales permettant d'organiser des informations selon une vision chronologique.

❖ Les frises chrono-systémiques

Sur les frises chrono-systémiques, différents systèmes ou composantes d'un système sont superposés et hiérarchisés dans des bandes horizontales associées à différents niveaux d'analyses, afin de faciliter l'étude des relations entre événement et intégrations entre informations. Le temps est figuré en abscisse, l'enjeu est d'observer des **co-évolutions** entre les différents niveaux d'analyse en les mettant en relation. Des bandes verticales traversent l'ensemble de ces niveaux et mettent en évidence des **périodes clés ou des événements** qui modifient le fonctionnement du système (Bergeret et al, 2015).

Dans la présente étude, les bandes verticales représentent des **périodes**, et le passage d'une bande à une autre se fait au travers d'événements qui entraînent des changements dans l'organisation ou le fonctionnement du SSE sous forme de rupture, de bifurcation ou d'émergence. L'ensemble de la frise représente **une trajectoire socio-écosystémique** évoquant des itinéraires de transformations issus des interactions entre la société et les grands lacs (d'après Bergeret et al. 2015a). Dans ce cadre, **l'émergence** renvoie à l'apparition d'un phénomène ou de nouvelles caractéristiques du système, **la bifurcation** à un changement brusque, important, imprévisible et irréversible de la trajectoire d'un SSE ; ces deux événements se produisent lorsque des perturbations peuvent être la source de réorientations importantes dans les trajectoires individuelles ou les processus collectifs : la bifurcation a des effets structurants sur le long terme (Bergeret et al. 2015a). Les événements de **rupture** séparent deux séquences de réorganisation importante du SSE après un événement brutal d'impacts systémiques. La bifurcation et la rupture impliquent des processus de changements majeurs et nets. Cependant, beaucoup d'évolutions sont progressives et sont plus difficiles à identifier.

Plusieurs formes de frises chrono-systémiques ont été produites dans cette étude, en premier lieu, des frises permettant de trier les informations importantes selon une chronologie et d'en identifier les événements de rupture. C'est le cas par exemple des frises utilisées en ateliers participatifs rétrospectifs qui synthétisent les savoirs issus des experts ou les savoirs profanes extraits des entretiens sous forme de récits de vie avec les pêcheurs. Une fois les données issues de multiples sources récoltées, il a été possible de construire des frises chrono-

systemiques permettant de relier des événements de différents niveaux entre eux. C'est le cas des frises présentées dans le cadre des chroniques des pollutions et de leurs impacts sur les SE au chapitre 5, ou encore des trajectoires de "*représentation-action*" du chapitre 6. Ces frises ont donc à la fois été utilisées comme outils-supports des entretiens pour synthétiser et représenter les données qualitatives et comme outil d'analyse des trajectoires des socio-écosystèmes lacustres.

❖ La base de données socio-écosystémiques

Faire appel à des méthodologies différentes pour récolter les informations engendre deux difficultés : la première est de disposer d'une trop grande quantité d'informations, ce qui complique le "*triage*" et l'**identification des informations clés**, ensuite que ces informations soient associées à des variables qui ont des natures et des **métriques très différentes**. Pour faire face à ces problématiques, il a été nécessaire de développer une **base de données spécifique, conçue pour l'étude des socio-écosystèmes**. L'objectif est de regrouper au sein d'un même document l'ensemble des informations disponibles et de les trier pour faciliter la phase d'analyse qui suit. Cette base de données s'est avérée être un outil essentiel de l'enquête, permettant d'une part d'éviter la perte d'informations, et d'autre part d'optimiser le temps des analyses et synthèses d'informations.

Cette base de données a été élaborée en prenant en compte les différentes composantes du socio-écosystème des grands lacs alpins. Réalisée via le logiciel "*Microsoft Excel*", la base de données est composée de différents onglets correspondant à chacun des compartiments du socio-écosystème des grands lacs alpins (champ écologique ; services écosystémiques ; pratiques sociales et techniques d'exploitation des SE ; champ de la décision ; actions de gestion ; forçages), le dernier onglet correspondant aux sources des informations. Les éléments collectés sont répertoriés dans l'onglet correspondant au compartiment du SSE associé à l'information, et plus précisément dans un tableau à quatre colonnes. La première permet de spécifier la composante du compartiment associée à l'information, la seconde contient les « *informations brutes* », la troisième permet de préciser la temporalité de l'information si besoin, et la dernière colonne fait un rappel de la source. L'onglet source permet de détailler complètement l'origine des données, ainsi que leur type (voir Figure 4-6).

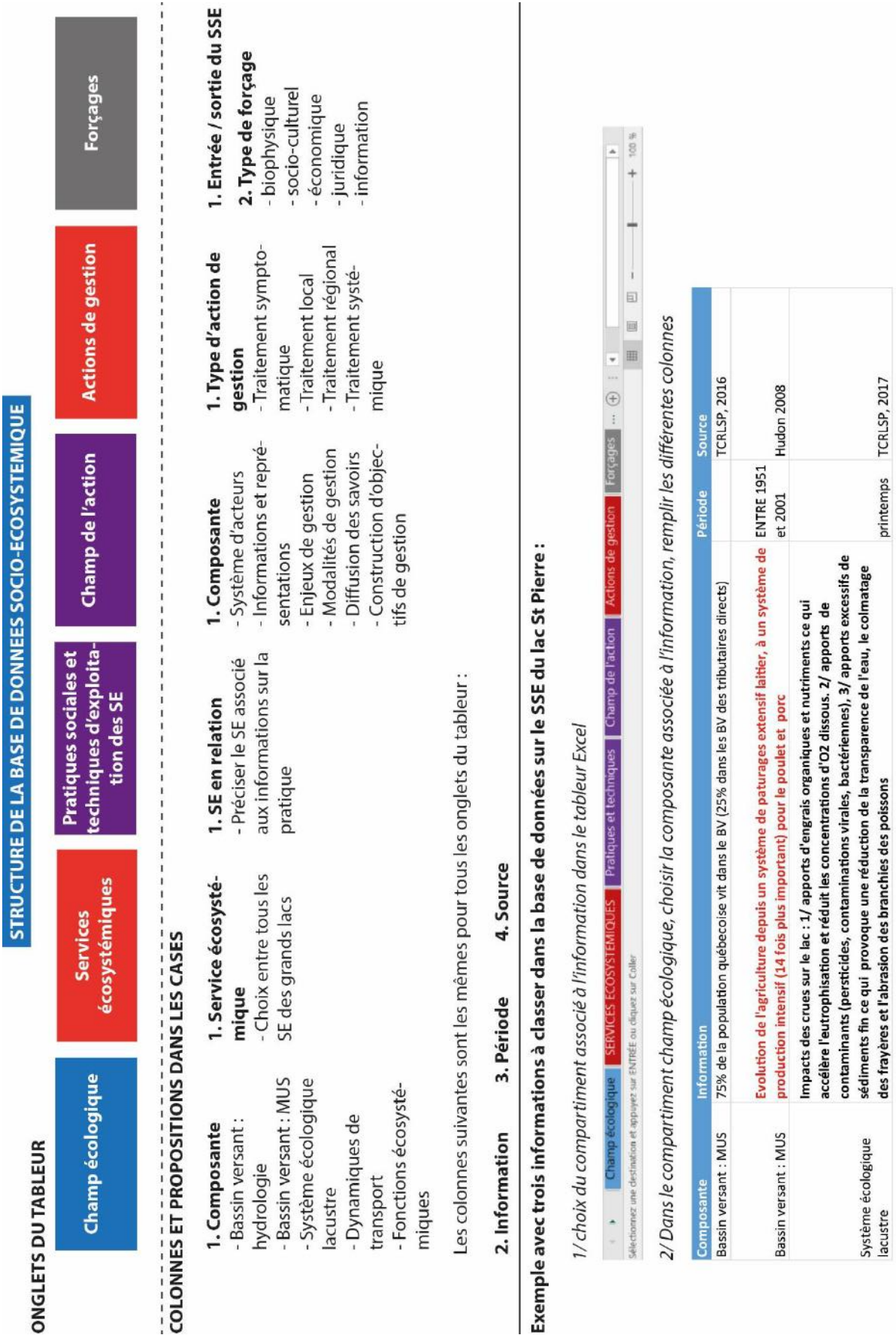


Figure 4-6 : Structure de la base de données socio-écosystémiques mise en place dans le cadre de l'étude

❖ Application de la base de données socio-écosystémiques à l'étude du lac Saint-Pierre

Une mobilité internationale de six semaines, entre septembre et novembre 2018, a été menée dans le cadre de l'étude du SSE associé au lac Saint-Pierre, dans la province du Québec au Canada. Pour soutenir cette étude, le thésard a été accueilli par le laboratoire d'économie écologique du professeur Dupras à Montréal. Plusieurs objectifs scientifiques étaient associés à cette mobilité et à l'étude du lac Saint-Pierre : (1) **tester la cohérence et l'applicabilité** du cadre théorique pluridisciplinaire d'analyse des impacts des pollutions sur la dynamique des services écosystémiques associés aux grands lacs, (2) **Affiner et mieux définir la liste des SE** associés aux grands lacs en profitant de l'expertise de spécialistes en économie écologique, (3) Etre **initié au logiciel INVEST** de modélisation des SE².

L'enquête réalisée a repris la méthodologie utilisée lors des ateliers rétrospectifs (approche par Pression – Etat – Réponse), adaptée à des entretiens individuels d'experts scientifiques et gestionnaires du lac Saint-Pierre (9 experts interrogés). L'ensemble des données récoltées des enquêtes et de la bibliographie ont été intégrées à la base de données socio-écosystémiques qui a permis de trier directement les informations et faciliter l'analyse. Par ce biais, il a été possible **en moins de deux mois** de réaliser un diagnostic du fonctionnement et des trajectoires d'évolution d'un SSE spécifique. Ceci montre tout l'intérêt de disposer d'outils pour organiser et synthétiser des informations multiples.

A partir des résultats de l'analyse du fonctionnement du SSE du lac Saint-Pierre qui en résulte et de celle réalisée pour le Léman, une publication est en cours d'écriture dont l'objectif est de comparer les trajectoires écosystémiques et sociétales de réponse aux problèmes de pollution du lac Saint-Pierre et du Léman. Celle-ci se base sur les résultats présentés en chapitre 6.3.3.

Conclusion du chapitre

Entretiens semi-directifs, ateliers participatifs, entretien anthropologique de récit de vie, analyse de données écologiques, réglementaires, issues d'archives : la méthodologie employée dans cette recherche mobilise des outils et méthodes issues de **plusieurs disciplines** visant à rapprocher des **données de différente nature** et les **intégrer au sein de modèles conceptuels**. Le travail de terrain s'est ainsi déroulé en trois temps : la récolte des données, la synthèse et leur intégration et traduction conceptuelle. L'approche a combiné à la fois des méthodes visant à récolter des données précises et très denses, par l'utilisation des récits de vie et la fouille d'archives, et des données de synthèses obtenues par la mobilisation de différentes expertises au travers d'entretiens et ateliers. Les ateliers participatifs sont, à ce titre, des méthodes qui ont permis de récolter rapidement un grand ensemble d'informations.

Aussi, la démarche relève d'une construction progressive de l'analyse conceptuelle, enrichie par différentes consultations d'experts et la présentation des travaux à de nombreux chercheurs de différentes disciplines. Ces approches ont permis d'appliquer une approche méthodologique transdisciplinaire qui a conduit à l'intégration de l'ensemble de ces informations socio-écosystémiques dans des modèles développés spécifiquement pour cette

²Le logiciel INVEST n'a pas été utilisé dans le cadre de cette thèse, il s'agissait d'un objectif personnel détaché de l'étude.

CHAPITRE 4

Démarche, informations et analyses

étude. Ces modèles sont alors apparus à la fois comme des **résultats, des moyens d'analyse et des outils méthodologiques de tri et de synthèse des informations**.

Les chapitres suivants présentent les résultats de cette étude, à savoir la traduction en termes de SE et de SSE de l'ensemble des informations récoltées et l'analyse de l'évolution de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs (chapitre 5) et de la construction d'un SSE des grands lacs (chapitre 6).

Chapitre 5. Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires



Panneau qu'il était possible de trouver au bord du Léman dans les années 1970

Les lacs sont des espaces convoités depuis toujours par les sociétés humaines du fait de la facilité offerte par ces milieux à satisfaire les besoins en ressources en eau, ressources alimentaires, d'espace, de défense et déplacements, mais aussi à présenter des opportunités symboliques (mythologie, identité), spirituelles, paysagères et de récréation. L'ensemble de ces SE rendus participant au bien-être humain et au fonctionnement des sociétés (Steinman et al. 2017). Ils représentent des facteurs clés de différenciation des territoires lacustres.

Les différents SE des grands lacs répondent également à des **exigences précises en matière de qualité de l'eau et des milieux lacustres** (Keeler et al. 2012) qui se caractérisent par des « *plages de qualités* » physico-chimiques, biologiques, sanitaires et sensibles (issues des représentations des usagers). La qualité de l'eau et des milieux d'un grand lac est donc associée à de multiples composantes.

Ainsi, en fonction des SE il est possible de définir une demande et une fourniture spécifiques en termes de qualités de l'eau et des milieux lacustres, ce qui nous amène à considérer les qualités de l'eau et des milieux comme une « *variable multidimensionnelle* » des grands lacs alpins.

Par ailleurs, comprendre comment ces qualités déterminent la capacité de ces écosystèmes à rendre des services et comment l'Homme en bénéficie constituent un défi majeur de l'étude des SE des grands lacs, et de manière plus générale des écosystèmes aquatiques (Keeler et al. 2012). Cette compréhension passe par l'analyse des relations entre le BV et le lac (Moss 2008), ce qui revient précisément à analyser comment le BV influence sur les qualités de l'eau et des milieux lacustres, et comment ces influences se répercutent sur les SE. C'est l'objet de ce chapitre.

Ce chapitre résulte est composé de trois parties distinctes visant à caractériser, modéliser, analyser les trajectoires des SE des grands lacs alpins associés aux qualités de l'eau et des milieux

Les informations et analyses présentées dans ce chapitre se réfèrent à la trajectoire méthodologique « *géo-historique* » (voir chapitre 4) visant à répondre à notre première hypothèse : ***les services écosystémiques rendus par les grands lacs ne sont pas invariants dans le temps. Ils se sont construits, ont évolué en réponse à l'évolution des usages des lacs, de la qualité de l'eau et de ses impacts sur la société et des réponses apportées par la société pour y répondre.***

5.1 Caractérisation et inventaire général des services écosystémiques des grands lacs alpins

Après avoir identifié les objectifs de l'étude, toute démarche d'étude des SE débute par un inventaire des services, leur définition et classification. Cette partie présente également les composantes de la fourniture et de la demande en SE et questionne leur variabilité spatiale.

5.1.1 Inventaire des services écosystémiques des grands lacs alpins

Tableau 5-1 : Liste des services écosystémiques d'approvisionnement des grands lacs alpins. Source : dénomination retenue de la CICES 2018

Type de SE	Nom du Service (libellé)	Définition du service	Exemple de processus biophysiques ou socio-économiques	Exemples de bénéficiaires directs
Approvisionnement	Eau potable (A1)	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 (A2)	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 (A3)	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 (A4)	Animaux ou végétaux prélevés en milieu naturel destinés 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 flottins à Evian	Artisans, industrie pharmaceutique, riverains, communes, artistes
	Ressources minérales ou propriétés de l'écosystème à des fins matérielles (A5)	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

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

Tableau 5-2 : Liste des services écosystémiques de régulation des grands lacs alpins. Source : dénomination retenue de la CICES 2018

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 (R1)	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 (R2)	Filtration, séquestration, stockage, épuration et traitement des déchets et substances toxiques d'origine anthropique	Autoépuration de l'eau et du substrat par les daphnées, les roselières, 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 (R3)	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 (R4)	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 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 (R5)	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'origine anthropique par la présence de parois rocheuses et formations végétales	Riverains, touristes, collectivités territoriales, industriels, usagers pouvant générer des nuisances pour les autres usagers

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

	Régulation du climat local - global et de la qualité de l'air (R6)	Régulation de la température et l'humidité de l'air à proximité des lacs. Atténuation des impacts du réchauffement climatique.	Régulation thermique sur les bords des lacs, stockage du carbone dans les sédiments du lac	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.
--	---	---	--	--

Tableau 5-3 : Liste des services écosystémiques de régulation des grands lacs alpins. Source : dénomination retenue de la CICES 2018

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 (C1)	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 collectives territoriales et acteurs du tourisme
	Interactions spirituelles, symboliques et autres avec l'environnement naturel (C2)	Eléments des écosystèmes qui ont une signification symbolique, sacrée, religieuse, qui résonne en terme 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, collectives territoriales, acteurs du tourisme
	Interactions scientifiques et éducatives avec l'environnement naturel (C3)	Caractéristiques des écosystèmes comme support 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 sensibilisations à l'environnement et l'éducation

Plus le nombre de SE à fournir par un écosystème est élevé, plus l'espace de fourniture de ces services et la biodiversité doivent être importants (IPBES 2018). Du fait d'un volume important des cuvettes lacustres, d'un temps de résidence des eaux s'étalant sur 6 à 12 ans, d'une biodiversité et des habitats remarquables et reconnus (présence de Zone Ramsar, Natura 2000, réserves naturelles, APPB), les grands lacs alpins se placent comme des « *fournisseurs de SE avec des niveaux élevés* ». Dans notre typologie, **14 SE différents** sont associés aux grands lacs alpins (Figures **Erreur ! Source du renvoi introuvable.5-2** ; 5-3).

Les grands lacs alpins produisent des **services d'approvisionnement** en biens indispensables aux activités humaines du territoire et précieux pour le bien-être humain. Ces SE profitent à un très grand nombre de bénéficiaires : plus de 1 200 000 habitants consomment l'eau des grands lacs alpins, l'activité de pêche professionnelle fait vivre 152 pêcheurs professionnels et la pêche amateurs attire plus de 10 700 pêcheurs chaque année. Les lacs offrent des énergies renouvelables aux industriels : l'hydroélectricité, l'énergie cinétique, la régulation thermique à partir de l'eau du lac pour refroidir quelques quartiers industriels et résidentiels de la ville de Genève, ou encore l'accélérateur à particules du CERN, entre autres exemples.

Le tourisme est un véritable moteur de développement économique des territoires lacustres qui génère un chiffre d'affaires annuel évalué à plus de 33 millions d'euros (HT) pour la pratique des activités nautiques seules (navigation + loisirs nautiques) et représente un parc d'hébergement touristique de plus de 4.3 millions de nuitées dans les campings et hôtels autour des trois grands lacs alpins, qui emploie plus de 2 500 personnes (Baguet et al. 2015). L'attractivité de ces grands lacs est permise par la qualité des **services culturels** rendus qui fournissent des paysages avenants, une eau aux propriétés visuelles singulières, des lieux de pratique des activités sportives, ludiques et récréatives, de sensibilisation à l'environnement et pour l'éducation en termes de mémoire et support des savoirs, des opportunités pour la détente, la spiritualité, les liens sociaux, le dépaysement, l'inspiration pour la créativité, l'art, la culture, la recherche scientifique, ou encore le ressourcement, le bien-être et la santé. Ces bénéfiques ne profitent pas aux seuls touristes et visiteurs passagers, mais aussi à un grand nombre de bénéficiaires, usagers ou riverains qui vivent autour des lacs et profitent d'un cadre de vie sain, attaché de valeurs et représentations, d'une identité et d'un sentiment d'appartenance aux territoires lacustres, rendus possibles par la présence de ces lacs.

La qualité des SE d'approvisionnement et culturels des milieux lacustres est déterminée par les **services de régulation** des qualités de l'eau et des milieux, dont certains processus associés sont spécifiques aux plans d'eau de grande taille comme la dilution et la décantation (qui contribue à atténuer les pollutions), les effets tampons par rapport au climat et événements extrêmes climatiques, l'interaction avec un écosystème riche en habitats et biodiversité ou encore pour les bénéficiaires de vivre dans un environnement sain, exempt de maladies et d'affections présentes sur d'autres régions du globe. Aussi, seul un grand lac peut fournir des SE de régulation de la qualité des eaux suffisant pour assurer un bénéfice de régulation des eaux usées traitées, et une partie des pollutions diffuses. Dans notre typologie, les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux regroupent les SE de filtration et purification de l'eau et des sédiments (R2), de lutte contre les parasites, espèces envahissantes et les maladies (R3) et de maintien des cycles de vie, habitats et patrimoine génétique (R4) qui fonctionnent en synergie.

❖ Les dis-services associés aux grands lacs alpins

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 devenir des dis-services**. La charge interne d'un lac est un processus écosystémique déterminant pour le **SE de filtration et purification de l'eau** ; cependant sous certaines conditions favorisées par des pollutions (eutrophisation) et le manque de brassage des masses d'eau favorisé par le réchauffement climatique, ce SE devient inefficace et accentue les phénomènes de pollutions (voir chap 1.1.2). Un effet de *feed-back* s'opère entre les SE de régulation et les fonctions écosystémiques : le SE de filtration et purification de l'eau devient un dis-service pour le système écologique lacustre en cas de « relargage » des polluants dans la colonne d'eau et vient ainsi impacter les fonctions qui en régulent les concentrations.

La bioaccumulation est un processus qui permet aux Oméga 3, nutriments et acides gras essentiels à une alimentation saine et de qualité, d'être emmagasinés dans les bio-ressources exploitées à des fins alimentaires. Ce processus contribue à la qualité gustative des poissons pour le SE d'approvisionnement en bio-ressources, mais provoque également la bioaccumulation de certains polluants persistants (micropolluants, PCB, métaux lourds). La pollution des grands lacs alpins ou le réchauffement climatique peuvent ainsi engendrer des dis-services.

Hors de ce contexte de perturbations, les grands lacs alpins possèdent quelques dis-services en relation avec le SE de lutte contre les parasites et les maladies, qui vont se traduire par des problèmes de santé (voir Annexe 5-1). A noter que la dilution de la dose infectante limite fortement le risque de contaminations bactériennes ou virales, et par conséquent les risques sanitaires sont moins importants sur un grand lac qu'un petit lac. Des nuisances peuvent également être liées à la « *puce du canard* », parasite trématode (genre *Trichobilharzia*) mesurant environ 0,5 mm et peut s'infiltrer sous la peau des baigneurs et engendrer des démangeaisons bégnines.

Dans cette étude, seuls sont considérés les SE affectés par des phénomènes de dégradation des qualités de l'eau et des milieux. Les dis-services n'ont pas fait l'objet d'une étude spécifique.

Ainsi, dans les analyses qui vont suivre, 7/14 services sont étudiés :

- le service d'approvisionnement en eau potable (A1) et en bio-ressources à des fins alimentaires (A3). Pour le SE A3, nous focalisons notre analyse sur les pratiques de pêches commerciales et de loisir ; la chasse au gibier d'eau n'est pas étudiée ;
- les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux, à savoir le service de filtration et purification de l'eau et du substrat (R2), le service de lutte contre les parasites, espèces envahissantes et maladies (R3) et le SE de maintien des cycles de vie, habitats et patrimoine génétique (R4) ;
- les caractéristiques objectives des SE culturels sont étudiées, le caractère subjectif de ces services est parfois mentionné mais n'a pas fait l'objet d'une enquête approfondie (qui aurait nécessité une étude sociologique ou anthropologique sur les valeurs et représentations associées aux grands lacs alpins). Le SE d'interactions scientifiques et éducatives avec l'environnement naturel (C3) ne fait pas l'objet d'une étude spécifique.

5.1.2 Analyse comparée de la fourniture et de la demande en SE des trois grands lacs alpins

Dans le cadre de l'atelier sur l'évaluation de la fourniture et de la demande en SE (voir chap 4.2.2.3), une estimation collective des niveaux de SE et comparée entre les grands lacs alpins a été réalisée. Voici ce qui peut être retiré de cette expertise (voir Figure 5-1).

Le rapport entre la fourniture et la demande en SE est assez similaire entre les trois grands lacs alpins avec une fourniture en SE généralement suffisante pour soutenir la demande de la plupart des SE. Néanmoins, les avis d'experts mettent en évidence plusieurs caractéristiques intrinsèques à chaque système lacustre entraînant de la variabilité dans le rapport fourniture/demande en SE :

- **L'état trophique** des grands lacs alpins peut influencer sur la fourniture en SE. Le lac d'Annecy est qualifié d'ultra-oligotrophe, ce qui engendre une productivité halieutique moins importante que les deux autres lacs, en transition entre un statut mésotrophe et oligotrophe. A noter que les stocks de poissons restent importants sur le lac d'Annecy malgré ce statut trophique (Perga et al. 2016). Les impacts de l'état trophique sur la fourniture en eau potable et SE culturels ont disparu avec la ré-oligotrophisation des lacs. Sur le lac du Bourget des **blooms de cyanobactéries toxiques** surviennent depuis les années 1990, il s'agit d'un phénomène hérité de la période d'eutrophisation qui limite (voire interdit) l'accès aux SE d'approvisionnement en eau potable et les SE culturels pour des raisons sanitaires sur certains secteurs touchés en été.
- **La morphologie du lac** (taille, forme et volume) génère quelques différences en termes de diversité de SE. Ainsi, de par la taille plus importante de sa cuvette lacustre, le Léman présente une fourniture légèrement plus diversifiée en SE. Par ailleurs, le linéaire côtier est plus long, plus facile d'accès que pour les autres lacs, ce qui génère une plus grande population vivant autour et une demande accrue en SE.
- Il est estimé que l'état écologique de ces trois lacs est bon ou très bon. Cependant, la **fourniture en SE de régulation** est moyenne ou forte, mais ne semble pas satisfaire totalement la demande. Ainsi, malgré la restauration de ces lacs, des pressions subsistent sur les écosystèmes lacustres, et en partie des **impacts hérités** des pressions passées (désoxygénation du fond, charge interne, perte d'habitats et d'espèces), les rendant plus fragiles aujourd'hui aux pressions à venir (Jacquet et al. 2014). Ces SE de régulation pilotant l'ensemble des SE des grands lacs alpins, on peut envisager des attentes sociétales fortes sur ces SE.
- Enfin, la **différence d'image ou de notoriété** entre chacun des grands lacs alpins détermine la demande de certains SE. Ces lacs ont une image de lacs avec une eau de très bonne qualité, associée à une qualité paysagère, environnementale importante et unique (le lac d'Annecy est réputé « *lac le plus pur d'Europe* »). Cette notoriété est héritée de l'histoire de la restauration de ces lacs et est un critère identifié lors de l'évaluation pour indiquer une importance forte sur la demande en SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux. Les SE culturels n'ont pas été analysés en profondeur dans cet atelier, mais de manière orale il a été possible de mentionner le peu de nuisances visuelles et olfactives associées aux plans d'eau, la préservation des paysages forestiers autour du lac du Bourget, la réputation internationale des villes de

Genève et d'Annecy qui participent à la qualité environnementale naturelle et culturelle de ces lacs, et l'importance forte de la demande en SE culturels qui en découle. Cependant, certains secteurs de ces lacs sont victimes de cette notoriété de par les phénomènes de « *surfréquentation estivale* » sur le plan d'eau et le littoral.

Les résultats présentés ici indiquent des tendances qui semblent cohérentes avec les données d'enquêtes récoltées auprès des autres acteurs, usagers et gestionnaires des grands lacs alpins. Cette représentation (Figure 5-1) met en avant les enjeux associés aux lacs et peut offrir une nouvelle manière d'appréhender la gestion des grands lacs alpins, en reliant notamment le **développement de certaines pratiques et activités** associées aux SE avec la **capacité des écosystèmes lacustres** à soutenir ce développement. Ces résultats mettent en avant que la gestion des grands lacs alpins doit considérer deux menaces associées à l'exploitation des SE : (1) la recherche de **maximisation de la demande** en SE, qui peut conduire à des déséquilibres entre fourniture/demande et menacer l'écosystème, et (2) les risques associés à la **concentration spatiale de la demande en SE** autour des pôles urbains provoquant une pression croissante sur la fourniture dans ces espaces. Ces observations sont confirmées par Watson et collaborateurs (2019).

Notre analyse des niveaux de SE apporte quelques ouvertures intéressantes mais trouve sa limite dans la mono-disciplinarité des experts interrogés (tous écologues ou biologistes impliqués dans le suivi des grands lacs alpins). Il conviendrait de reconduire cette évaluation avec des scientifiques en sciences humaines et sociales pour avoir une évaluation plus précise du rapport fourniture/demande et pour approfondir davantage l'évaluation des SE culturels, ainsi qu'avec les acteurs de la gestion des lacs et usagers, porteurs d'autres points de vue. La comparaison entre les analyses de ces différents types d'acteurs apporterait des informations sur les différences de représentation des grands lacs alpins.

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

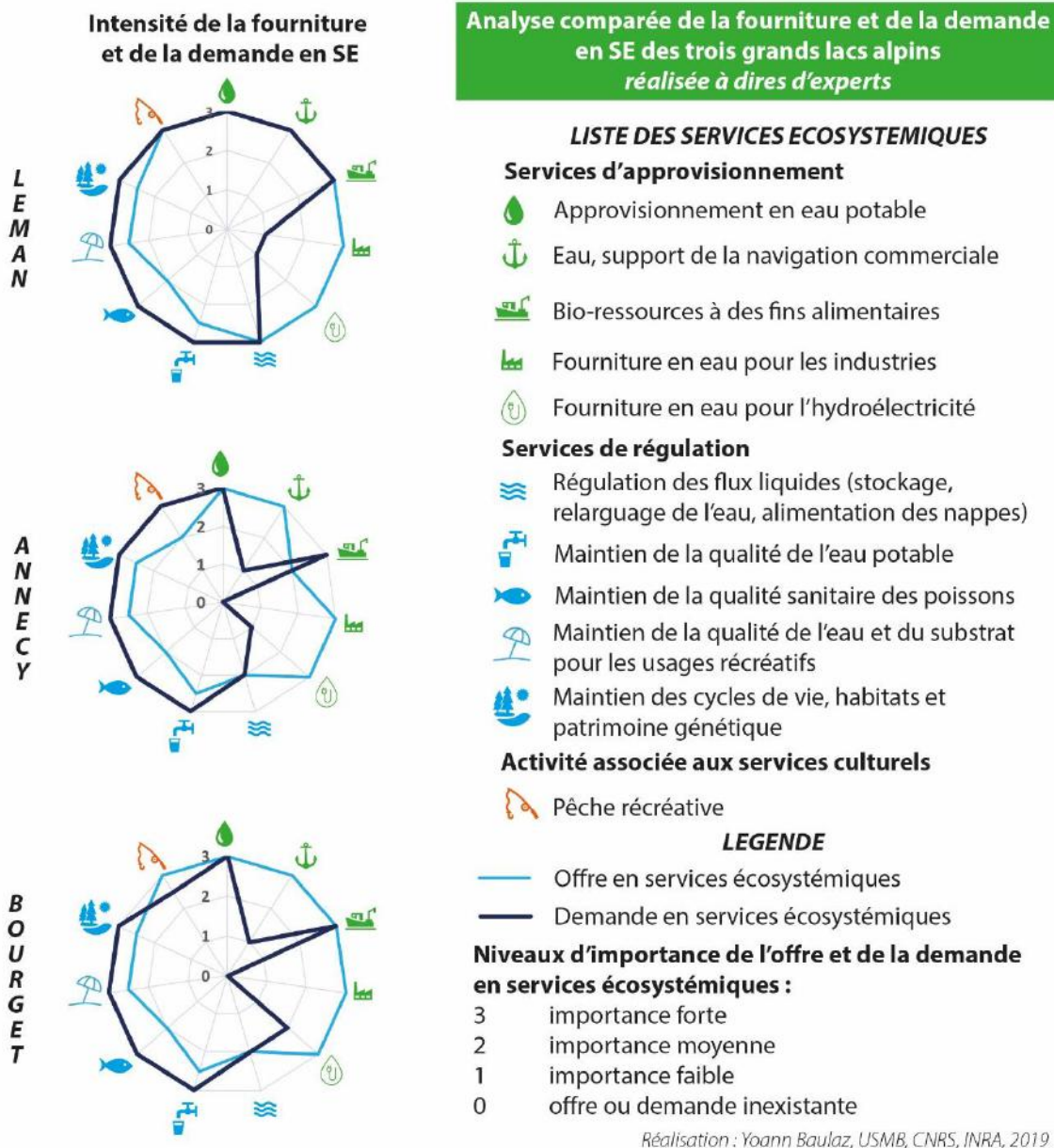


Figure 5-1 : Evaluation à dire d'experts de l'importance de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins ; la liste des SE a été simplifiée pour l'évaluation participative

5.1.3 Variabilité spatio-temporelle des SE des grands lacs alpins et relations avec les qualités de l'eau et des milieux

Il existe une grande variabilité spatiale et temporelle de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins. C'est-à-dire que chaque SE possède une **aire de fourniture et de demande** spécifique qui évolue au cours de l'année ou de manière interannuelle. L'aire de fourniture correspond à l'unité spatiale à la source des SE et l'aire de demande est l'espace de consommation ou d'utilisation des SE (Burkhard et al. 2014). Ces variabilités sont liées aux propriétés bio-physiques et territoriales locales que nous venons d'évoquer. Dans cette partie, nous analysons la géographie de plusieurs SE à partir **d'analyses cartographiques** des aires de fourniture et de demande et d'observations sur leur évolution. Nous questionnons enfin

l'importance de l'**accessibilité aux SE**, ses déterminants biophysiques et sociétaux et dans ce contexte, le rôle de la gestion des grands lacs alpins.

❖ La variabilité spatio-temporelle de la fourniture en SE

Sur la carte en Figure 5-2, nous avons spatialisé la fourniture du SE A3 de **trois espèces principalement capturées** par la pêche de loisir sur le lac d'Annecy : le corégone (féra), l'omble-chevalier et le brochet. Ces données ont été obtenues à partir d'informations fournies par l'Association « Annecy Lac Pêche » et les dires des pêcheurs interrogés.

Les trois espèces étudiées sont très dépendantes de la **température de l'eau du lac et la disponibilité en nourriture**, si bien que les aires de captures de ces trois espèces se distinguent suivant un gradient de profondeur des masses d'eau. L'omble-chevalier est un poisson d'eau froide qui se rencontre essentiellement en milieu pélagique et benthique à des profondeurs excédent 40 m, tandis que le corégone se pêche essentiellement en dessous de la thermocline, sur une profondeur comprise entre 20 et 40 m. Le brochet se retrouve en milieu littoral, depuis la berge et jusqu'à 20 m de profondeur, au-dessus de la thermocline, tout comme les perches et le gardon (Frossard et al. 2018). Tous les secteurs du lac situés à ces profondeurs ne présentent pas le même potentiel de fourniture du SE : certaines portions du littoral sont peu intéressantes pour la capture du brochet par exemple. Il est difficile d'estimer les raisons de cette variation des stocks le long du littoral : l'état des zones refuge (herbiers, roselières), d'alimentation et de fraie pour les espèces semblent être les hypothèses principales (Périal and Vonlanthen 2014).

Par ailleurs, certains secteurs du lac d'Annecy présentent un intérêt pour la pêche de loisir sur une plus longue période que d'autres en raison des déplacements des bancs de poisson. Le bout du petit lac entre la Plage de Doussart et le lieu-dit « *Le Câble* » et la portion à l'ouest du port de Saint-Jorioz, jusqu'aux « *Grands Blancs* » sont ainsi les secteurs où la durée de la période de pêche est la plus favorable à la capture de corégone. La cartographie des aires de fournitures de ce SE peut ainsi nous donner une double information sur les variations à la fois spatiales et temporelles du SE.

Cet exemple nous apprend que la fourniture de certains SE, comme le SE A3 dépendent fortement des **cycles de vie des espèces et de l'état de la biodiversité et des habitats**. Cela signifie **une synergie forte** avec le service de maintien des cycles de vie, habitats et patrimoine génétique ainsi que le SE de lutte contre les parasites, espèces envahissantes et les maladies. La fourniture de ces SE est principalement déterminée par le **zonage écologique** du plan d'eau. Ils se spatialisent entre la zone littorale, la zone pélagique, la zone de surface et la zone benthique car chacun de ces espaces présente des conditions physiques particulières (lumière, profondeur, pression, température, hydrologie) et la présence d'habitats et espèces emblématiques (ex : les roselières, la flore de milieux humides, l'avifaune en zone littorale, les salmonidés, daphnées en zone pélagique, la méiofaune à l'interface eau-sédiments, les écrevisses en zone benthique) (Figure 5-4). L'ensemble de ces paramètres déterminent la répartition des espèces, et en réponse, les pratiques de pêche vont s'adapter, les bénéficiaires se spatialiser sur les grands lacs en suivant la présence des espèces de poisson.

Les aires de fourniture varient donc également **en fonction des pratiques de pêche**. Ainsi, les aires de fourniture de ce SE pour la pêche professionnelle (non représentées sur la carte) sont légèrement différentes de celles de la pêche de loisir (les pêcheurs professionnels capturent

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

la féra dans des masses d'eau supérieures à 20 m au centre du lac par exemple), car les pêcheurs ne mobilisent pas les mêmes engins de pêche et aux mêmes périodes de la journée (les professionnels pêchent au filet et de nuit).

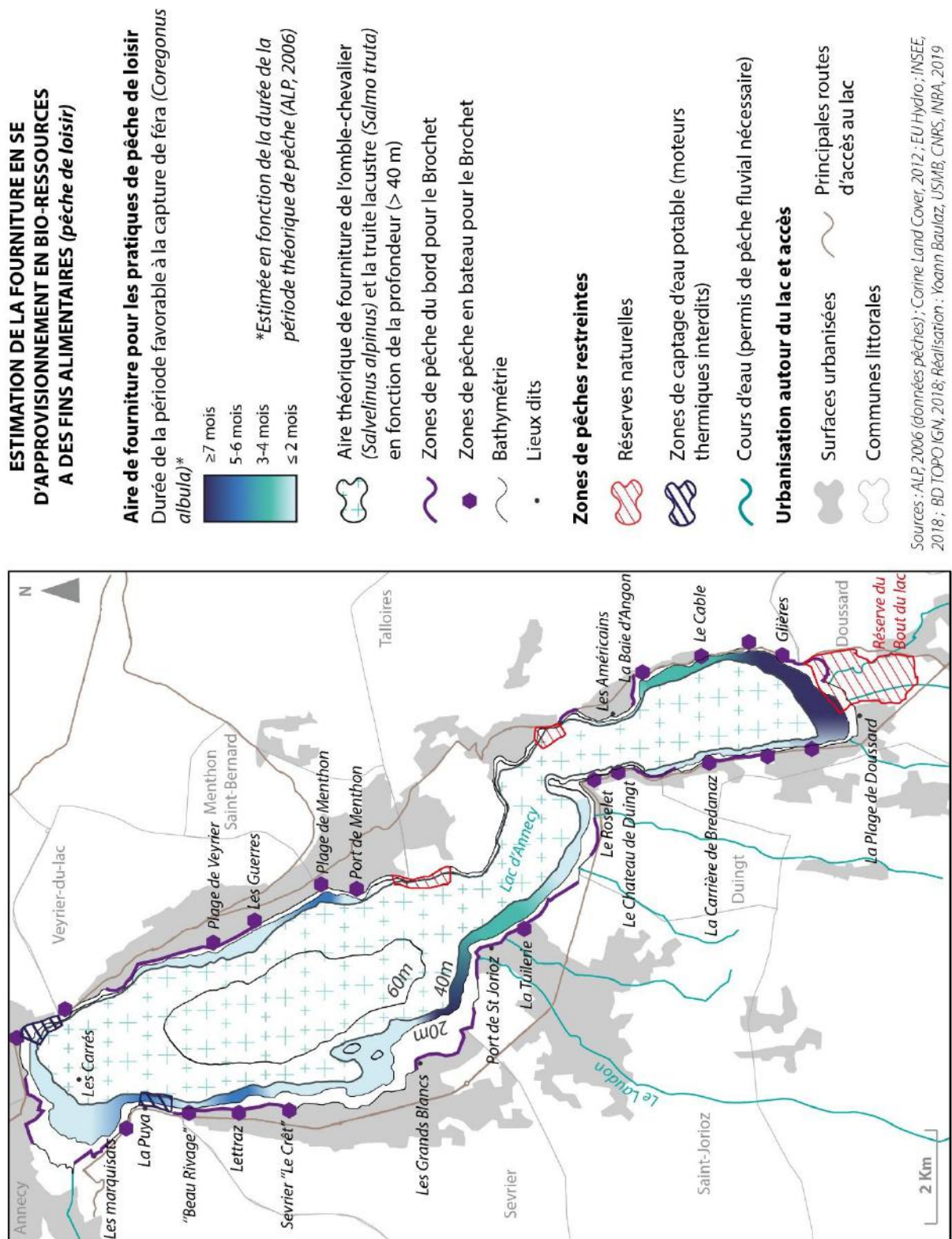


Figure 5-2 : Carte de spatialisation de la fourniture en SE d'approvisionnement en bio-ressources à des fins alimentaires pour la pêche de loisir

D'autres SE ont une relation moins importante avec les SE R4, déterminé par les interactions biotiques et davantage avec le SE R2, lié aux fonctions épuratoires du lac. C'est notamment le cas de **l'approvisionnement en eau potable**.

L'aire de fourniture en SE A1 correspond à **la superficie du plan d'eau**, l'eau y est prélevée à une profondeur suffisante pour qu'elle conserve une température homogène toute l'année (l'eau potable doit conserver une température inférieure à 10°C) et ne soit pas trop chargée en substances dissoutes (Baguet et al, 2015). Au lac d'Annecy, le captage s'effectue à 27 m, ce qui permet d'être en dessous de la thermocline et dans la zone aphotique, qui présente une faible biomasse algale. La fourniture du SE R2 est associée aux fonctions de contrôle biologique et physique qui permettent de **réguler les concentrations en MES et polluants**. L'action de ces SE est complétée sur les grands lacs alpins par un traitement de filtration ou d'ultrafiltration dans les stations de pompage (chapitre 2.2.1). Un autre SE de régulation a une importance forte, le SE de régulation R3 qui veille au maintien de la **qualité sanitaire** de l'eau et limite le développement de bactéries envahissantes comme les cyanobactéries sur le lac du Bourget par exemple. Ces organismes prolifèrent à la profondeur des prises d'eau potable dans le lac et présentent des risques sanitaires. Dans ces situations, l'eau potable ne peut plus être prélevée au lac.

Les proliférations de biomasses planctoniques et bactériennes sont plus importantes l'été, tout comme **les variations de température de l'eau**. La fourniture du SE A1 est alors plus faible l'été, voire nulle dans le cas de risques sanitaires, comme cela s'est produit à plusieurs reprises sur le lac du Bourget depuis 1994 (Jacquet et al. 2005).

La question de la variation du niveau des lacs n'est pas problématique pour l'instant car elle est régulée artificiellement (chap 2.2.1) et les apports d'eau sont suffisants pour maintenir tous les usages. Cependant, les **dérèglements climatiques** pourraient générer à l'avenir des **antagonismes** entre SE A1 et A2 (hydroélectricité) et culturels en période de sécheresse.

La fourniture des SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux est déterminée par les flux d'eau et de matières, notamment polluantes originaires du **BV**. On considérera donc dans cette étude que l'aire de fourniture de ces SE correspond à celle **du plan d'eau et de ses berges**, où les zones humides et de roselières jouent un rôle important de filtration et d'habitat, mais également de manière indirecte **à l'échelle du BV** (Figure 5-4). Afin de réduire l'impact des territoires à l'amont du lac, il est nécessaire d'instaurer **l'assainissement dans le BV**. Ce faisant, on réduit la demande en SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux pour qu'elle s'adapte à la capacité de fourniture de l'écosystème. **Deux situations** s'observent dans les grands lacs alpins : (1) un ensemble de STEP sont instaurées dans l'ensemble du BV pour traiter les eaux usées avant leur entrée dans le lac, comme au Léman, (2) les eaux sont collectées et traitées en une seule STEP avant rejet à l'aval du lac, c'est le cas du lac d'Annecy (Figure 5-3). Le lac du Bourget est un « *entre-deux* » : une partie des eaux est épurée dans le BV, une autre collectée.

La fourniture des SE des grands lacs alpins est également soumise à des **variations temporelles** pluriannuelles en relation avec des caractéristiques hydrodynamiques : le temps de séjour des eaux qui régule la capacité de pollution et de dépollution, le brassage hivernal qui conditionne la réoxygénation du lac, les caractéristiques biologiques et dynamiques des peuplements piscicoles. Le réchauffement climatique est un autre facteur de variation des SE sur une échelle pluriannuelle.

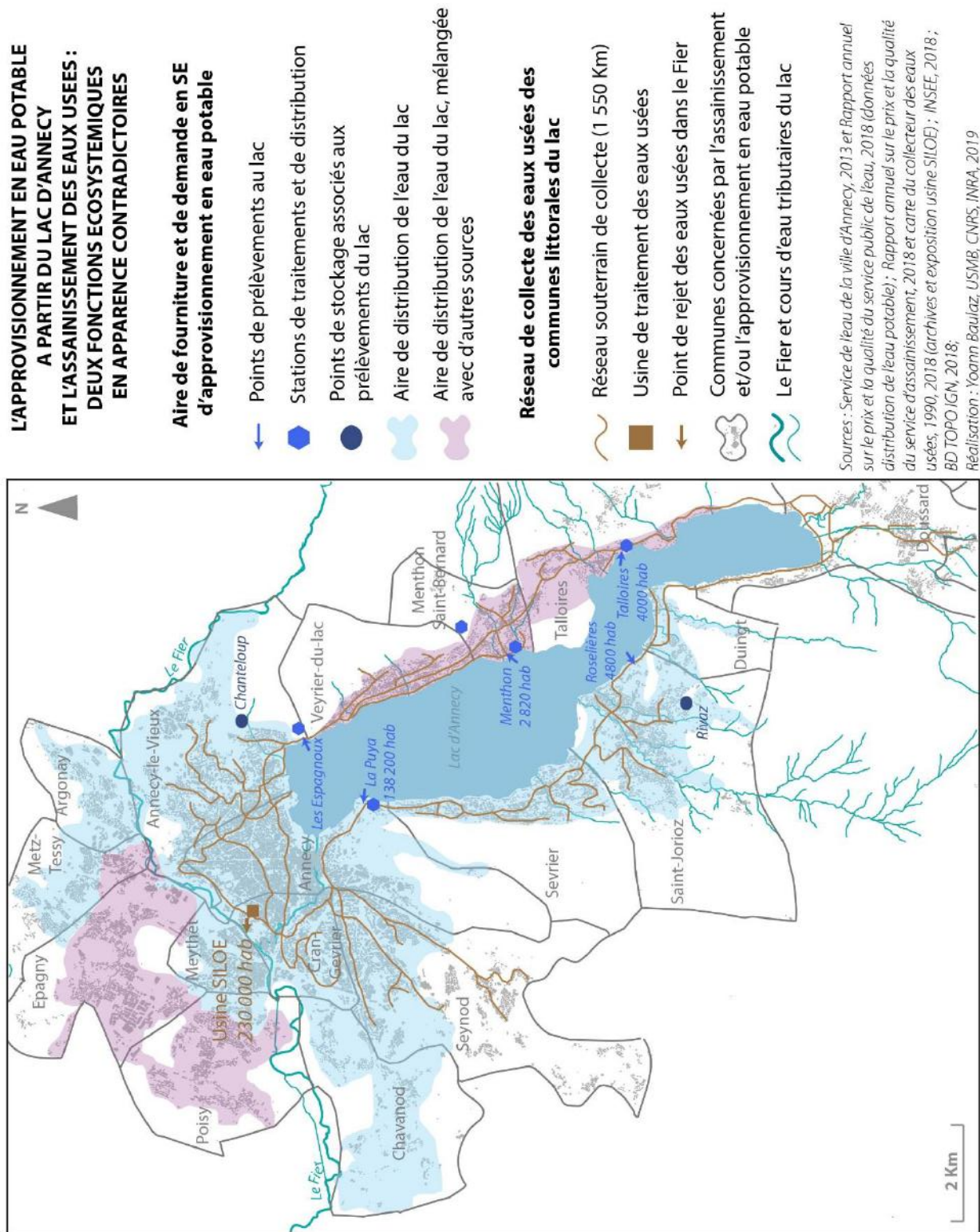
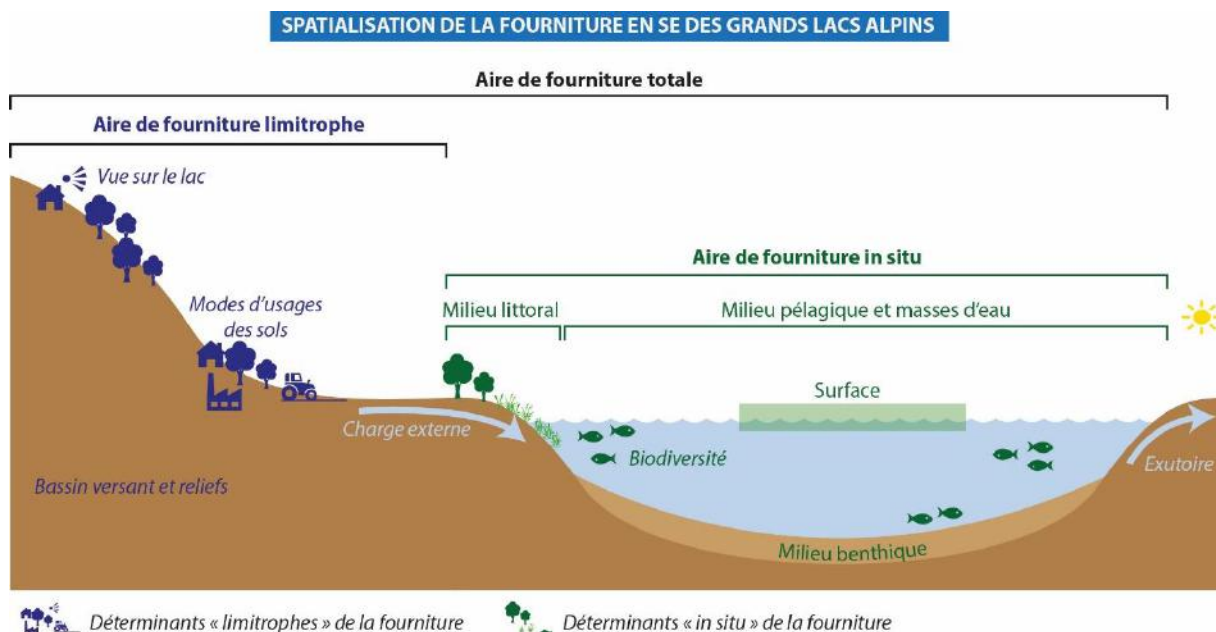


Figure 5-3 : Carte du réseau de collecte des eaux usées municipales et de spatialisation de la fourniture et de la demande en SE d'approvisionnement en eau potable du lac d'Annecy

L'aire de fourniture en SE culturels est plus difficile à établir, du fait qu'elle dépend des pratiques socio-culturelles. L'aire de fourniture en SE d'interaction physique et récréative avec les lacs (C1), pour les pratiques utilisant le lac comme support, correspond à **l'emprise du lac** car elles nécessitent un contact avec le plan d'eau. Par contre, les pratiques utilisant le lac comme décor (chap 2.2.4) possèdent une aire de fourniture correspondant à celle de l'aire de vue sur le lac, qui est liée à la présence de reliefs autour du lac et à la présence de structures végétales ou anthropiques qui peuvent restreindre cette vue (Figure 5-5). Tout comme les SE de régulation, les SE culturels possèdent **une aire de fourniture « in situ »** et **une aire de fourniture « limitrophe »** (Figure 5-4).

Par ailleurs, les variations de la fourniture des SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux semblent impacter le SE C1 uniquement dans trois situations portant atteinte aux pratiques utilisant le lac comme support : (1) la présence de **nuisances** visuelles, olfactives, (2) de **risques sanitaires** ou (3) d'atteintes à la **biodiversité patrimoniale**. Hormis ce contexte, l'enquête a montré que les atteintes aux qualités de l'eau et des milieux ne diminuaient pas la fourniture du SE C1 (Duclos, 2018).

L'aire de fourniture, les variations spatiales et les relations avec les qualités de l'eau et des milieux du service d'interactions spirituelles, symboliques et autres avec l'environnement naturel (C2) sont plus difficiles à établir car elles reposent sur des **éléments subjectifs** liés aux valeurs socio-culturelles attachées aux grands lacs alpins. L'aire de fourniture correspondrait à **l'emprise du lac**, mais devrait prendre en compte également l'aire d'influence du lac sur **« l'identité géographique »** au sein de laquelle les populations locales se sont appropriées l'image du grand lac. L'influence d'un lac sur le bien-être humain recoupe également des **valeurs de non-usage** (chap 3.1), dont seules des approches sociologiques ou anthropologiques permettraient de caractériser et d'appréhender leur spatialité.



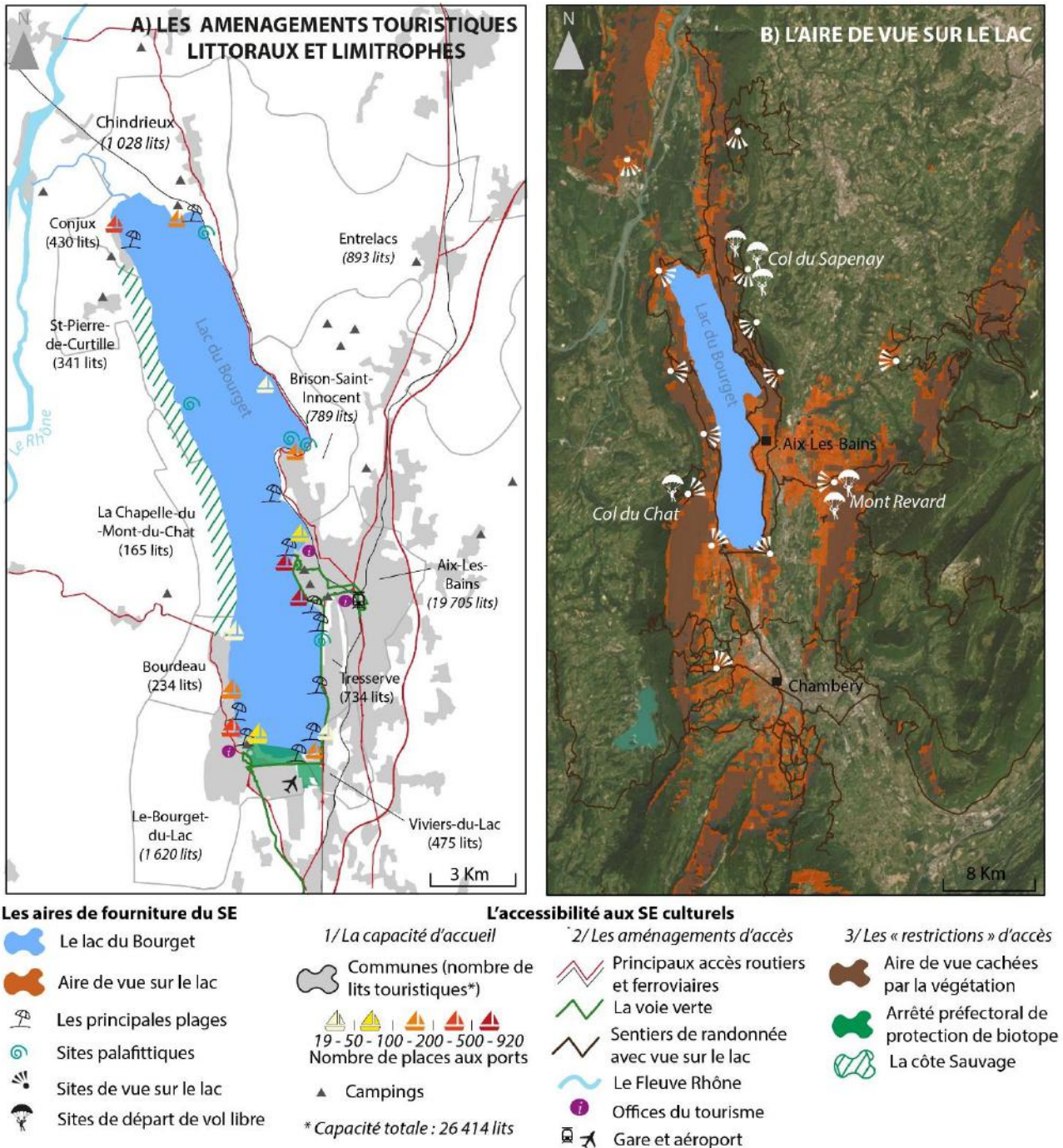
Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 5-4 : Schéma de l'aire de fourniture en SE des grands lacs alpins et ses déterminants

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

LES AMENAGEMENTS TOURISTIQUES ET L'AIRE D'INFLUENCE VISUELLE : DEUX COMPOSANTES MAJEURES DE L'ACCES AUX SE CULTURELS



Sources : A) A partir de Duclos, 2018 ; BD TOPO 2018 ; CorineLandCover, 2012 ; INPN, 2018 ; SMBT, 2018 ; INSEE, 2018 ; B) BD ORTHO 2018 ; BD Alti ; PDIPR 73 et 74. Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 5-5 : Carte de la fourniture et de l'accès au SE d'interactions physiques et récréatives avec l'environnement naturel du lac du Bourget

❖ La variabilité spatio-temporelle de la demande en SE des grands lacs alpins

Les SE se spatialisent également selon une **aire de demande**. Pour certains SE, celle-ci est située accolée au lac et concentrée au niveau des pôles urbains, c'est le cas du SE A1 (Figure 5-3). Pour d'autres, cette aire de demande en SE est beaucoup plus éloignée et peut même s'étendre à l'échelle mondiale pour les SE culturels. L'étendue de « *l'aire de la demande en SE* » (Figure 5-6) est alors liée à **l'attractivité du lac, les propriétés de la fourniture en SE, les qualités de l'eau et des milieux et les spécificités du lac par rapport aux territoires adjacents** : par exemple, le Léman commence à être réputé pour la pêche aux gros poissons, notamment le brochet, ce qui attire des bénéficiaires éloignés de toute la région Rhône-Alpes et de Suisse. Les limites exactes de cette aire de demande sont difficiles à établir, car fortement associées à des informations subjectives. Ceci étant, dans une étude sur les SE rendus par les lacs dans le monde, Allan et collaborateurs (2017) ont observé que les bénéficiaires principaux des SE rendus par les plans d'eau sont situés dans une zone inférieure à 10 Km de celui-ci. Nous mobiliserons donc cette évaluation ici.

A partir de ces informations, il est possible de délimiter différentes aires de demande en SE des grands lacs. En premier lieu, une **"aire de demande in situ"** correspondant à l'emprise spatiale du plan d'eau où sont extraits les SE consommés là où ils sont produits (SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux, SE A2, A3, C1). Sur cet espace, le lac tient la place la plus importante dans le paysage, ce qui en fait un terrain de jeu des pratiques socio-culturelles qui utilisent le lac comme support.

Ensuite, **"l'aire de demande littorale"**, qui ceinture le lac entre les routes qui permettent d'en faire le tour et le lac lui-même, correspond à la zone la plus aménagée, qui peut être occupée par des ports et être très artificialisée dans les centres urbains littoraux, comme c'est le cas sur le lac du Bourget (Figure 5-5). On y retrouve l'essentiel des équipements associés aux activités nautiques (ports, plages, bases de loisirs), à la découverte des lacs (musées, zones naturelles protégées), les prestataires de campings, restaurants, voire hôtels au bord du lac. Les activités de loisir terrestre influencées par la présence du lac (vélo, randonnée, plage ...) se concentrent dans cette aire. Celle-ci peut être très réduite en fonction de la topographie, comme dans les parties Ouest du lac du Bourget (côte sauvage) et nord-est, difficiles d'accès. Dans ce cas, l'aire littorale s'étend jusqu'aux milieux forestiers et barres rocheuses.

Au-delà de la route littorale, on entre dans **"l'aire de demande limitrophe"** qui s'étend sur 10 Km à l'intérieur des terres, où sont localisés les principaux bénéficiaires des SE des grands lacs. Cette limite est fixée d'après les travaux de Allan et collaborateurs (2017), mais mériterait d'être estimée à partir d'une enquête spécifique. **L'aire de vue sur le lac** est généralement comprise dans cet espace (Figure 5-5 - au-delà de 10 Km, si une vue sur le lac est encore possible, le plan d'eau ne représente généralement plus l'élément principal du paysage). Cette aire de vue est tout particulièrement importante pour **les lacs de montagne ou de piedmont**, où le relief et la pente du BV et des moyennes montagnes autour fournissent à la fois des *espaces de vue* qui confèrent à ces écosystèmes une aire d'influence visuelle étendue, mais également des paysages qui s'étendent sur **différents plans** : le littoral, le plan d'eau, les reliefs et massifs de moyenne montagne et le ciel. Les reliefs alpins et l'implantation de l'urbanisation à l'aval du lac d'Annecy, la présence d'un massif forestier étendu sur les rives abruptes de la montagne de l'Épine qui tombe dans le lac du Bourget sont des éléments des MUS qui contribuent à satisfaire une image « *sauvage, naturelle* » des grands lacs alpins, paramètre d'attractivité clé pour la demande en SE culturels (CEN 2017). A l'inverse, les

massifs forestiers sur les reliefs autour des lacs réduisent la fourniture en points de vue sur les grands lacs (Rudzewicz et al.2020).

Enfin, l'«*aire de demande éloignée*» s'étend au-delà des 10 Km du lac et correspond à l'espace de localisation des bénéficiaires indirects du lac, à savoir les consommateurs des SE d'approvisionnement en bio-ressources et les bénéficiaires directs de certains SE : interactions physiques et récréatives avec les grands lacs (touristes, habitants hors de l'aire de demande limitrophe), interactions scientifiques et éducatives avec l'environnement naturel, les bénéficiaires du SE de régulation du climat local et global. Théoriquement, cette aire de demande peut s'étendre «*au monde entier*» et peut être «*promue*» par les acteurs du tourisme et collectivités locales. Une enquête approfondie devrait être menée pour identifier les principales régions et centres urbains d'où proviennent la plupart des bénéficiaires des SE culturels (touristes essentiellement).

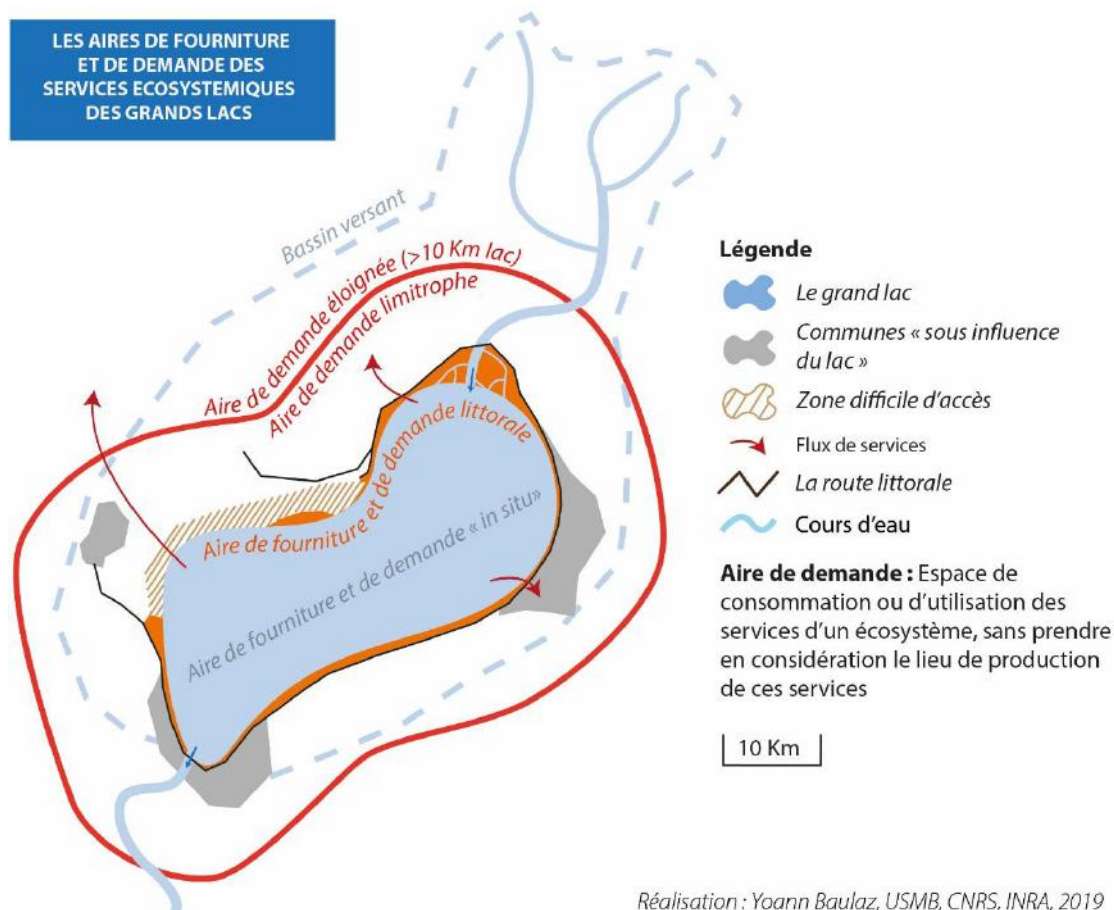


Figure 5-6 : Spatialisation de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs

La demande varie dans le temps : elle peut survenir **punctuellement, de manière régulière, s'échelonner dans le temps ou bien être latente**, et ne **s'exprimer que dans le futur** (Rigolet 2016). La demande en SE culturels est notamment fluctuante en fonction du flux de touristes en période estivale.

Les relations entre **qualités de l'eau et des milieux** et demande en SE sont moins évidentes que dans le cadre de la fourniture. Néanmoins, les atteintes sur les SE des grands lacs peuvent porter préjudice à **l'image des grands lacs** (SE C2), ce qui peut avoir pour conséquence de

réduire la demande en SE culturels C1 et d'approvisionnement A3. Il existe donc des synergies entre le SE culturel C2 et ces SE.

- ❖ La variabilité spatio-temporelle des SE : une composante clé de l'accès aux SE

Les aires de fourniture et de demande des SE sont partagées par plusieurs SE. Cette proximité des aires de fourniture et de demande peut favoriser des antagonismes entre SE et conduire à des conflits entre bénéficiaires (ex : SE C1 contre A3). Ces conflits peuvent par ailleurs s'exprimer uniquement sur une période donnée du fait d'une demande ponctuelle accrue pour ces SE, ou d'une fourniture plus réduite. **La variabilité spatio-temporelle des SE est ainsi une composante clé de l'accessibilité aux SE. Prendre en compte cette accessibilité permet d'assurer le partage des différents SE antagonistes et représente un enjeu de la gestion des SE des grands lacs alpins.**

L'accès est déterminé par les composantes de la fourniture qui conditionnent **l'accès physique et normatif** aux SE : certaines zones de fourniture nécessitent une embarcation, des engins particuliers ou peuvent présenter des obstacles physiques ou interdictions réglementaires qui limitent l'accès au SE. L'accès peut ainsi être **optimisé** à certains endroits avec des aménagements mettant en valeur les SE et par l'entretien des aires de fourniture. Sur les grands lacs alpins, l'installation de bancs et l'aménagement d'un belvédère sont des prolongements du bord des lacs sur les hauteurs et permettent de rendre accessible un point de vue sur les lacs (Figure 5-5, B). A l'inverse, des aménagements peuvent veiller à **restreindre l'accès physique** (ex : entretien des roselières (Figure 5-7), ou **des règlements** (ex : règlement



Figure 5-7 : Photographie des piquets de protection autour des roselières du lac du Bourget (source : flickr.fr)

de la navigation). Ces actions ont pour but d'optimiser certains SE et limiter les antagonismes spatiaux.

L'accessibilité aux SE est à la fois « **affectée par** » et « **permet de lutter contre** » les **problèmes de pollution sur les SE**. Les **pollutions restreignent les aires de fourniture** des SE, ce qui engendre un **report spatial** des bénéficiaires sur des aires non impactées, ou **des reports d'espèces**, ce qui peut engendrer des antagonismes entre SE (conflits entre différentes

pratiques de pêche par exemple) et des difficultés d'accès (concentration des bénéficiaires dans certains espaces, engorgement des routes). Par ailleurs, les pratiques mobilisées par les bénéficiaires pour accéder aux SE peuvent être plus ou moins impactées par les problèmes de pollution (exemple : les pêcheurs ne subiront pas les mêmes contraintes de pollutions en fonction de l'espèce de poisson qu'ils recherchent). Mais à l'inverse, en restreignant l'accès à certaines pratiques polluantes (exemple : interdiction des bateaux à moteurs sur le lac d'Aiguebelette ; interdiction d'accès aux bateaux à moteur dans les zones de prises d'eau potable à Annecy), moduler l'accessibilité des SE devient alors un **moyen d'action de la gestion**.

L'accès aux SE régule également la demande en SE, car plus un site (ex : une plage) est **facile d'accès, plus il peut supporter une demande forte**. L'accès aux plages par exemple peut être régulé en opérant sur les moyens de transports et voies de communications, le nombre de places de parking, ou par un accès payant, comme c'est le cas sur plusieurs plages du lac d'Annecy (voir Annexe 5-2).

La « *régulation temporelle* » de la demande en SE revient à mettre en place des **quotas annuels** ou à imposer une régulation par le marché. Enfin, il est également possible de **promouvoir l'accès** à certains SE et/ou certaines pratiques sociales et techniques d'exploitation des SE pour attirer de nouveaux types de bénéficiaires (exemple : promotion de l'écotourisme ou tourisme de nature autour du lac d'Aiguebelette).

La réglementation de la pêche constitue un bon exemple de gestion basée sur une régulation de l'accessibilité à un SE d'approvisionnement pour réduire les antagonismes entre plusieurs SE : limitation de la pêche en période de frai des poissons et interdiction de pêche la nuit (antagonisme avec le SE R4), ou dans certains secteurs du lac (antagonismes avec des pratiques touristiques associées au SE C1 ou SE A1).

L'ensemble de ces éléments montrent que les **SE ne sont pas invariants dans le temps et l'espace**. Ils évoluent en fonction de **paramètres biophysiques** du lac, mais également des territoires autour et à l'amont. On observe dans les grands lacs alpins que la fourniture de certains SE peut être « *déportée* » dans les reliefs et le BV. L'aire de demande en SE se structure alors à différentes échelles spatiales dont il a pu être possible de définir une typologie. Ainsi, ces aires de fourniture et de demande se superposent les unes sur les autres et représentent « *l'aire d'influence d'un grand lac* » sur le territoire. Spatialiser cette aire d'influence ou cette aire de fourniture et de demande en SE invite à se poser la question de l'attractivité et l'accessibilité au lac. L'accessibilité des SE est une composante « *hybride* » des SE, à la fois déterminée par des composantes biophysiques et sociétales qui modifient les pratiques et peuvent engendrer des adaptations de la part des bénéficiaires. Cette idée renvoie également aux questions de **gestion des usages des plans d'eau**, ainsi qu'aux **valeurs et représentations** véhiculées par ces objets. Il existe ainsi des enjeux majeurs de la gestion des lacs à considérer les multiples variabilités spatiales de cette aire d'influence lacustre. Cela doit entrer dans les schémas de gouvernance et pourrait aider à définir une nouvelle échelle de gestion des plans d'eau, mais ne l'est pas encore.

Les impacts des pollutions sur les SE peuvent ainsi être appréhendés à différentes échelles spatiales et temporelles. On a vu notamment que la pollution peut restreindre l'aire de fourniture des SE, réduire l'accessibilité ou l'attractivité d'un grand lac et conduire à des reports spatiaux ou d'espèces. Par ces effets, les pollutions peuvent donc exacerber les

antagonismes spatiaux entre SE, générer des conflits, diminuer l'attractivité d'un lac. Tous ces effets peuvent avoir des répercussions importantes sur l'économie locale et dans ce contexte, les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux ont une place capitale pour atténuer les impacts des pollutions. On comprend alors que l'étude des relations entre pollutions, SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux, et SE d'approvisionnement et culturels devient un enjeu majeur de la gestion des grands lacs.

5.2 Modélisation de la relation avec les qualités de l'eau et des milieux et les SE des grands lacs alpins

L'étude des bouquets de SE, révélés autour des problèmes de pollution, est rendue possible par une adaptation du modèle en cascade des SE. Ce modèle permet de soutenir la démarche de co-évaluation des SE (chap 3.3) et apporte un cadre à l'analyse rétrospective des impacts des pollutions sur les SE. Dans cette partie, nous présentons l'adaptation de ce modèle au cas des grands lacs alpins et la démarche d'application rétrospective proposée.

5.2.1 Adaptation de la cascade des SE aux grands lacs alpins

Le modèle en cascade des SE (voir chap 3.3) représente un outil d'analyse permettant d'opérer une distinction claire entre les composantes de la fourniture et de la demande en SE. Cependant, pour interpréter les relations entre SE et qualités de l'eau et des milieux lacustres et leur évolution dans le temps en réponse aux problèmes de pollution, ce modèle linéaire a besoin d'être adapté et complété. Il doit notamment prendre en compte quatre éléments centraux dans le cadre de l'étude des SE des grands lacs alpins pour cette étude : (1) représenter explicitement les **relations entre SE d'approvisionnement, culturels et les SE de régulation**, (2) faire apparaître les **forçages biophysiques issus du BV** et le **contexte socio-économique et juridique** permettant d'en contrôler les impacts, (3) considérer les effets de « **feed-back** » (voir chap 3.2.2) entre SE et fonctions, (4) considérer **l'accessibilité aux SE**.

Le modèle en cascade adapté au cas des grands lacs alpins (Figure 5-8) considère deux compartiments principaux, le premier correspondant au **système écologique lacustre** au sein duquel les fonctions écosystémiques fournissent des SE. Le second représente le **système socio-économique des grands lacs alpin** matérialisé par un ensemble de bénéficiaires, qui tirent profit des bénéfices rendus par le lac par le biais de pratiques sociales et techniques d'exploitation des SE. La relation SE-bénéfices matérialise le lien entre la fourniture et la demande en SE, ce qui est cohérent vis-à-vis de la définition des SE de Costanza et collaborateurs (1997) choisie (chapitre 3.2.1) qui différencie les bénéfices dérivés des SE, de ceux qui sont réellement exploités (c'est pourquoi la relation SE-bénéfices est en pointillé noir).

Certaines demandes en SE, notamment celles qui exploitent les biens matériels (ex : pêche) ou les régulations du lac (ex : assainissement) peuvent générer en retour des **perturbations sur le système écologique** (*feed-backs*). Celles-ci sont susceptibles de modifier les fonctions écosystémiques et potentiellement d'avoir des répercussions sur l'ensemble des SE. Afin de maintenir le niveau des divers SE dans un état satisfaisant, des **actions de gestion** doivent être mises en place pour limiter les impacts notamment en ajustant la demande à la fourniture en

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

SE. C'est l'objet de nombreuses actions de gestion qui sont prises en tenant compte du contexte socio-économique et juridique (forçages).

La relation atmosphère – BV - lac s'inscrit dans ce cadre et constitue un autre forçage à gérer, d'origine biophysique, représenté par la charge externe (essentiellement les flux hydrochimiques portés par les affluents dans le cadre des grands lacs alpins), qui peut être une source de perturbation pour le système écologique lacustre et les SE.

Les paragraphes ci-après présentent en détail la cascade appliquée aux grands lacs alpins en effectuant des « zooms » sur les composantes de la fourniture et de la demande.

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

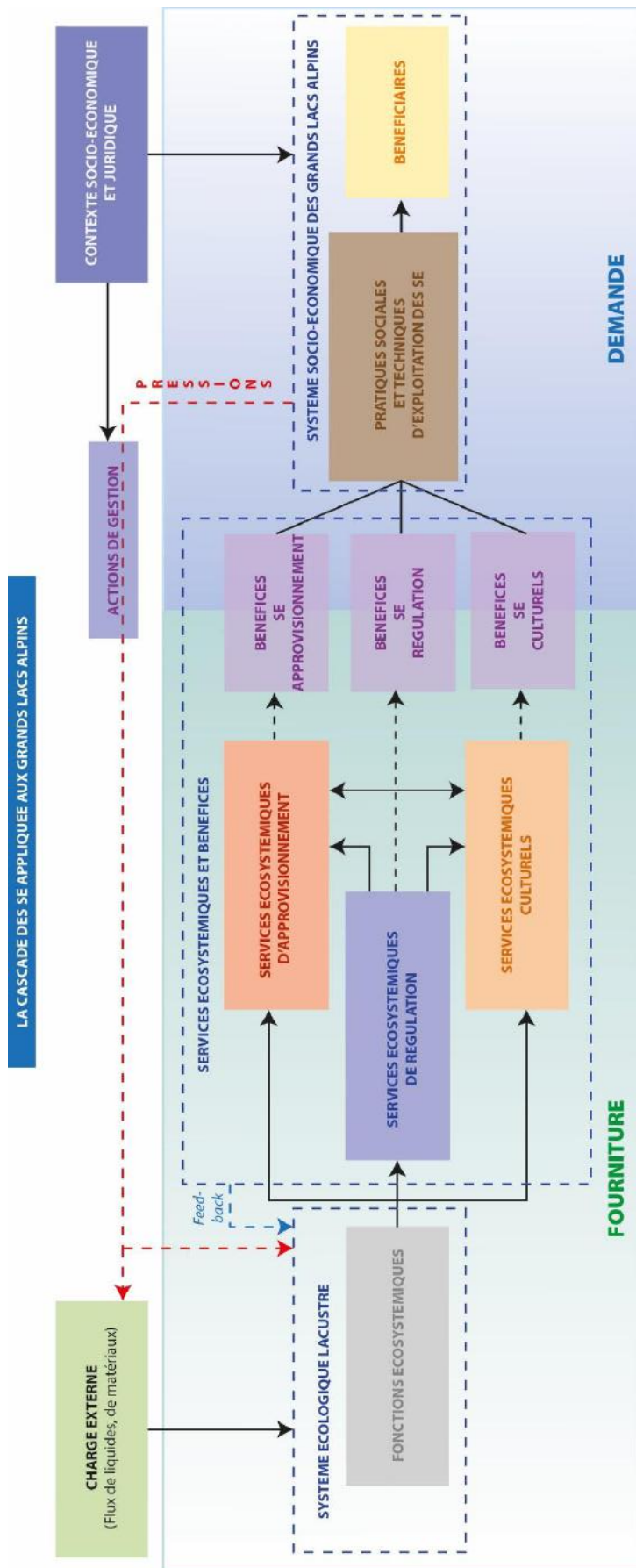


Figure 5-8 : Adaptation du modèle en cascade des SE de Haines-Young & Potschin 2010 au cas des grands lacs alpins

5.2.2 Zoom : application de la cascade à l'analyse de la fourniture en SE

Au sein du système écologique lacustre, il existe de multiples relations entre les différentes fonctions écosystémiques. Les **fonctions écosystémiques** des grands lacs alpins ont été présentées au premier chapitre et classées selon la typologie de De Groot et al. (2010) (chap 1.1.3). Au sein d'une même catégorie, les fonctions possèdent bien souvent les mêmes déterminants biophysiques et chimiques, c'est pourquoi elles sont regroupées en *clusters*¹. Des relations d'interdépendance entre les différents clusters sont représentées. On remarque alors que les fonctions de production, de régulation et d'habitat sont ainsi **interdépendantes** ; les fonctions d'information par contre sont déterminées par les trois autres types de fonctions, mais n'influencent pas ces dernières.

Ces relations d'interdépendances nous permettent d'envisager les effets des pollutions sur les fonctions écosystémiques des grands lacs. Les **fonctions de régulation** ont ainsi une importance forte car elles interviennent dans la capacité de résistance du système écologique lacustre aux apports de la charge externe en atténuant, diluant, sédimentant, réduisant, stockant les apports polluants qui entrent dans les grands lacs. Il s'agit donc du premier type de fonctions impactées par les pollutions.

Une fois la capacité de régulation des pollutions dépassées, des impacts se manifestent soit par des dysfonctionnements généraux qui affectent à la fois les **fonctions de production et d'habitats** du fait de modifications du réseau trophique et de la biodiversité (ex : eutrophisation), soit par des impacts ciblés sur certaines espèces, amplifiés par les processus de bioconcentration et bioaccumulation des polluants dans la chair des poissons (cas des polluants persistants). Ce deuxième type d'impacts peut avoir des répercussions sur la santé humaine, mais **sans nécessairement générer d'impacts sur les fonctions de production ou d'habitat du lac**, ce qui limite leur détection. Enfin, les **fonctions d'information** sont impactées à partir du moment où des nuisances visuelles, olfactives, des risques sanitaires ou une perte d'habitat ou d'espèces emblématiques sont détectables par les usagers, ce qui survient au moment où les fonctions de production, ou d'habitats ou les deux subissent des changements majeurs.

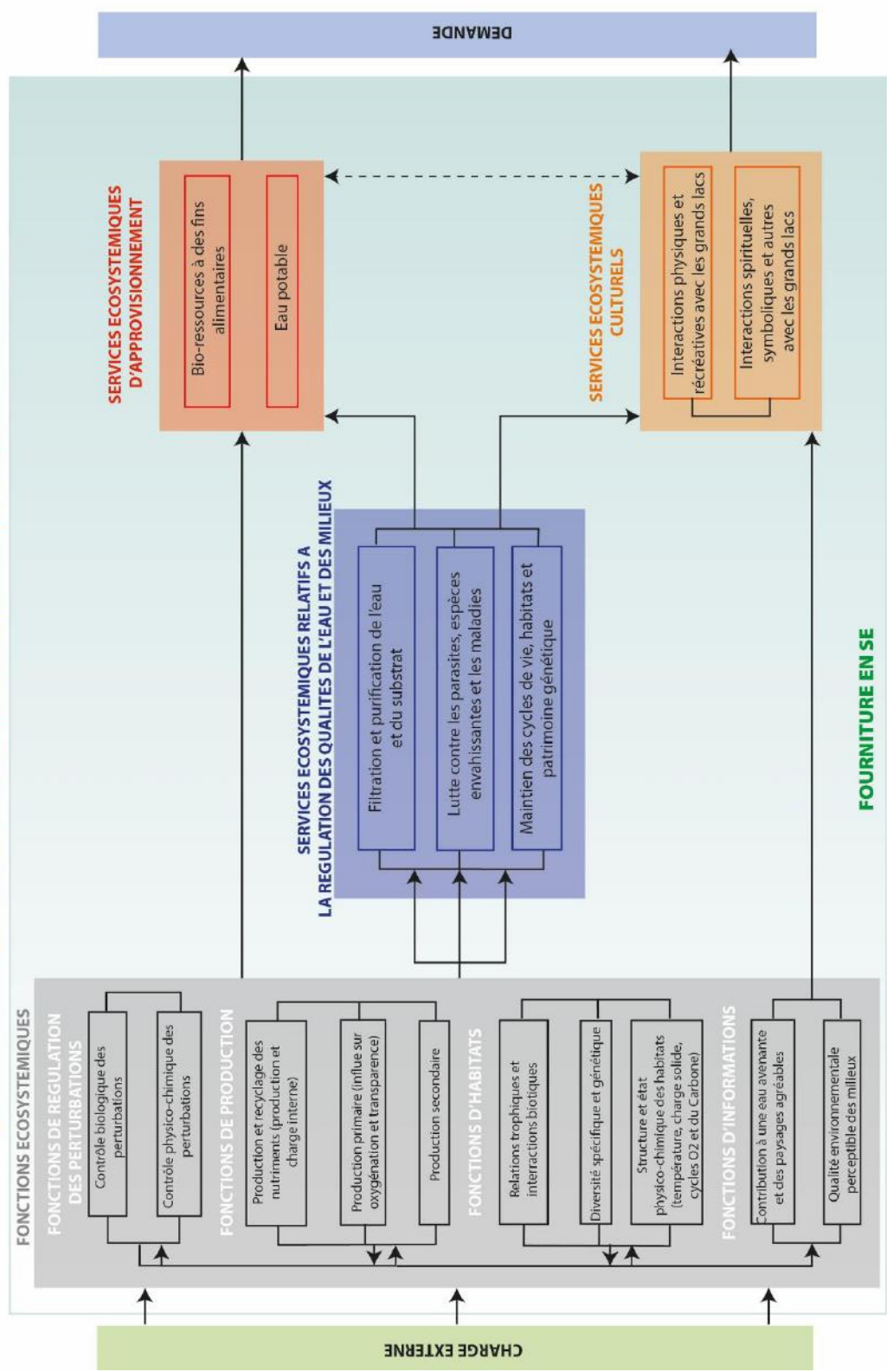
La partie 5.3 présente en détail la transmission des impacts entre fonctions écosystémiques et SE à partir des chroniques de l'eutrophisation et des micropolluants des grands lacs alpins.

¹ traduction : « agrégat » en français

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

FOURNITURE EN SE DES GRANDS LACS ALPINS RELATIFS AUX QUALITES DE L'EAU ET DES MILIEUX LACUSTRES : LES RELATIONS ENTRE FONCTIONS ET SERVICES ECOSYSTEMIQUES



Sources : Dires d'experts issus de l'atelier UMR Carrel 2 du 24/02/17, complété à partir de Costanza et al., 1997; Fletcher et al., 2011; De Groot et al., 2002; 2010; Schoenn et al., 2013. Réalisation : Yoann Bauloz, USMB, INRA, CNRS, 2018.

LEGENDE

- Services écosystémiques et fonctions écosystémiques
- Cluster (association synergique) de fonctions ou services
- Impacts des pollutions
- Associations

Figure 5-9 : Adaptation du modèle en cascade à la fourniture en SE des grands lacs alpins : relations entre fonctions et SE des grands lacs en relation avec les qualités de l'eau et des milieux

5.2.3 Zoom : application de la cascade à l'analyse de la demande en SE

On dit généralement que, pour qu'un SE existe, il faut qu'une demande sociale lui soit attribuée, c'est-à-dire qu'il procure un ou de multiples avantages à un ou plusieurs bénéficiaires (Puydarrieux et al. 2015). Pour chaque SE est ainsi associée une ou plusieurs demandes spécifiques représentées par les relations entre SE – pratiques – bénéficiaires dans la cascade des SE (voir Figure 5-10).

Les grands lacs alpins rendent un nombre important de bénéfices. Ces bénéfices sont classés selon la liste des **composantes du bien-être** selon le (MEA 2005) (voir chap 3.3.1). Les SE d'approvisionnement participent ainsi essentiellement à la **santé humaine** en donnant accès à une alimentation saine, adéquate, une eau potable de qualité, et apportent des **éléments essentiels pour une vie agréable** aux bénéficiaires : les bio-ressources alimentaires et l'eau potable génèrent des revenus et du bien-être pour les bénéficiaires directs et consommateurs. Les SE de régulation apportent de la **sécurité** aux populations riveraines, participent à **l'épuration des eaux usées traitées** et pollutions diffuses, permettent **d'habiter dans un environnement sain et propre**. Enfin, les SE culturels contribuent activement aux **« bonnes relations sociales »**, offrent l'opportunité de profiter des valeurs récréatives, spirituelles et culturelles associées aux grands lacs alpins et sont des éléments clés de l'attractivité de ces écosystèmes.

Les SE satisfont plusieurs composantes du bien-être humain et plusieurs types de bénéficiaires. Par exemple l'approvisionnement en bio-ressources est bénéfique pour la santé et la capacité d'accès à une nourriture de qualité pour les pêcheurs professionnels. Ce SE offre également des opportunités d'entretenir de bonnes relations sociales pour la pêche de loisir. En conséquence, les bénéficiaires vont accéder à ce SE par le biais de deux types de pratiques différentes : à la fois des engins et outils de la pêche professionnelle (filets, nasses) et des engins et outils de la pêche de loisir (fils, hameçons, nasses). Les **pratiques** impliquées dans l'exploitation du SE sont différentes entre types de bénéficiaires, de même que les droits et règlements d'usages. Ces différentes pratiques ont été présentées dans le chapitre 2.2.

Les relations entre SE et bénéficiaires peuvent par ailleurs être **directes ou indirectes** en fonction de la présence d'un intermédiaire entre le SE fourni et les consommateurs (MEA 2005). L'exploitation du SE d'approvisionnement en bio-ressources par les pêcheurs professionnels entraîne une vente aux grossistes, sur les marchés (*« en direct »*) ou aux restaurateurs et hôteliers, ce qui profite à plusieurs bénéficiaires indirects, alors que les pêcheurs de loisir bénéficient de ce SE pour leur consommation personnelle et familiale. Les SE peuvent alors profiter à un nombre plus ou moins important de bénéficiaires en fonction des pratiques.

Un écosystème qui apporte de nombreux avantages est associé à un grand nombre de types de bénéficiaires, ce qui peut engendrer des risques accrus de perturbations sur les SE et d'antagonismes. La gestion des grands lacs peut alors agir directement sur la demande en SE en limitant le nombre de bénéficiaires, ou en mettant en place une réglementation qui régule les pratiques socio-économiques et techniques d'extraction des SE (l'accès aux SE).

Dans le cadre de cette étude, seuls les bénéficiaires directs seront considérés.

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

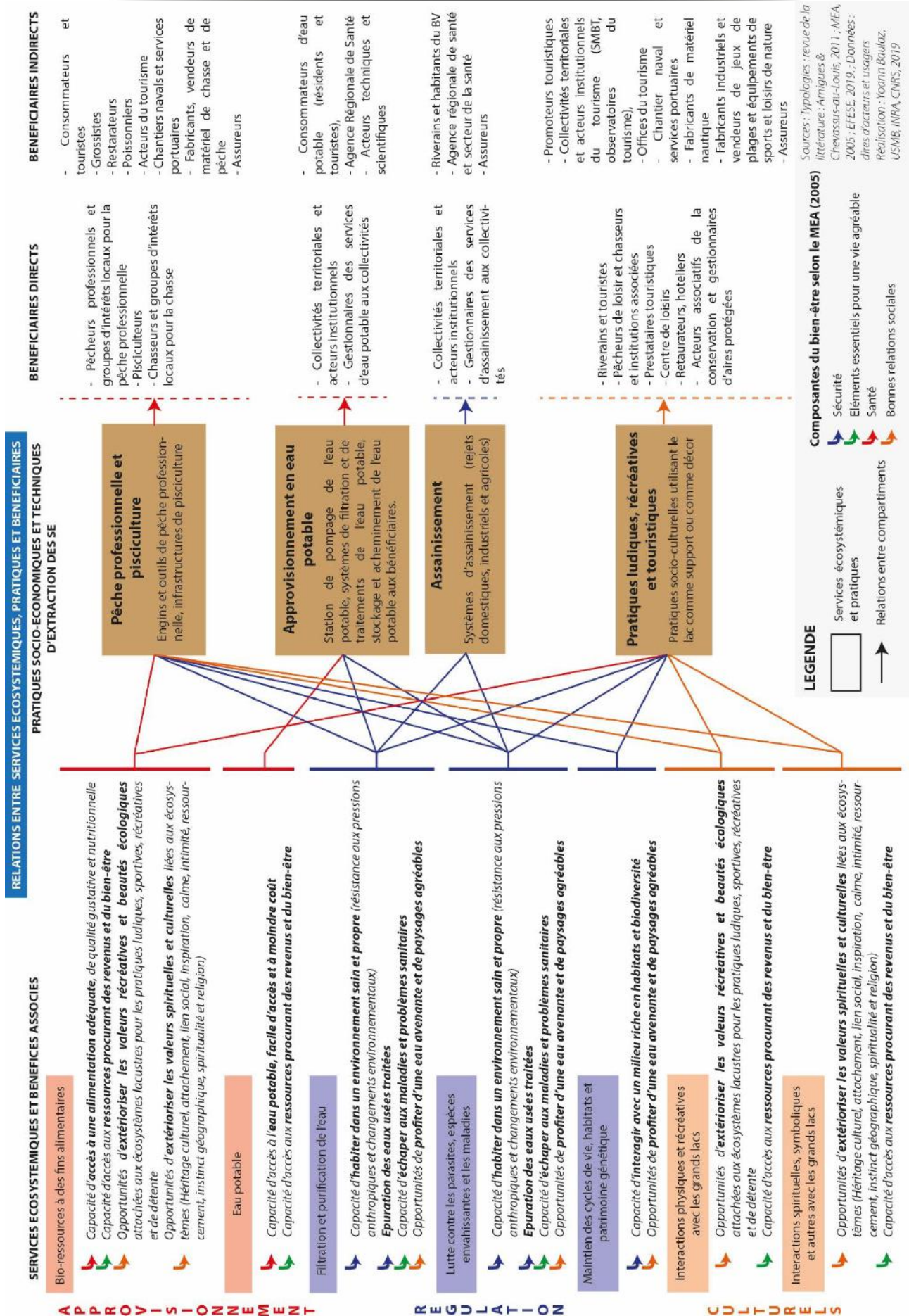


Figure 5-10 : Relations entre services, pratiques et bénéficiaires

5.2.4 Modélisation de la cascade des SE des grands lacs soumis aux problèmes de pollution

La partie précédente nous a permis de présenter l'adaptation conceptuelle de la cascade des SE pour l'étude des grands lacs alpins. Toutes les notions mobilisées (fourniture, accès, demande), les composantes identifiées (système écologique lacustre, pratique, système socio-économique) **apportent des outils et un vocabulaire** permettant de modéliser les SE et les caractériser.

Depuis 1950 est observée à l'échelle mondiale une pression croissante des activités humaines sur les écosystèmes aquatiques et des impacts (Meybeck 2002). C'est pourquoi, à partir du modèle en cascade des grands lacs alpins, nous proposons une typologie simple pour représenter et analyser ces évolutions en termes de SE.

❖ Typologie des impacts des pollutions sur les fonctions écosystémiques

Au fur et à mesure de l'évolution des phénomènes de pollutions, se produit une « *diffusion* » et une « *persistance* » des polluants et leurs impacts sur les fonctions écosystémiques des grands lacs. Cela nous conduit à dégager une **typologie des impacts de la pollution** sur les fonctions écosystémiques en se basant sur ces deux caractéristiques. Cette typologie peut apporter des informations sur la compréhension des phénomènes **de dégradation et de restauration** des lacs et leurs répercussions sur les SE. Aussi, en période de dépollution, le phénomène inverse intervient, si bien que cette typologie permet à la fois d'analyser les trajectoires des dégradations et de restauration des fonctions. L'adaptation du modèle en cascade permet de **représenter graphiquement et de modéliser** l'évolution des pollutions et restaurations sur les SE. L'étude de ces processus permettra de mieux comprendre les relations entre fonctions et SE et éventuellement d'identifier des bouquets de SE.

La typologie proposée comporte cinq classes d'impacts (Impact 0 à Impact 4) sur les types de fonctions, depuis un état de la fonction « *non impacté* », avec un maintien de la fourniture en SE à un niveau satisfaisant, jusqu'à un niveau d'impacts « *généralisés et permanents* » pouvant provoquer une perte de certains SE. Voici la définition de chacune des catégories d'impacts :

Impact 0 (I0) : Pas d'impacts sur les fonctions, la fourniture en SE est satisfaisante. Ce niveau d'impact correspond à l'état initial du lac, avant l'émergence des premiers symptômes des pollutions ou bien à l'état final de la restauration lorsque le fonctionnement optimal des fonctions pour les SE est retrouvé. A ce stade, soit la pollution n'affecte pas le lac, soit les fonctions de régulation sont en mesure de disperser, stocker et dégrader les polluants, qui se retrouvent en faible concentration dans le lac, avec un niveau presque indétectable.

Impact 1 (I1) : Impacts locaux – épisodiques. Fonction impactée localement, dégradation localisée et ponctuelle des SE de régulation sans que cela ne remette en cause la capacité de l'écosystème à fournir les SE. Pas d'impacts sur les SE d'approvisionnement ou culturels détectables ou bien de manière ponctuelle et non persistante. Ce niveau d'impact doit alerter que la capacité de résistance du lac face à une pollution commence à être dépassée.

Impact 2 (I2) : Impacts locaux – permanents. Impacts forts, localisés avec de fortes variations interannuelles ou saisonnières, qui montrent une tendance générale à la dégradation. Une ou plusieurs fonctions d'une même catégorie peuvent être impactées, ce qui génère des

changements pouvant être observés par des effets de seuil, ce qui est souvent le cas pour les fonctions d'information (fig 11, A). Le niveau des SE de régulation est inférieur au niveau potentiel, avec toutefois de fortes variations possibles, ce qui génère une dégradation notable des SE d'approvisionnement et/ou des SE culturels qui se traduit (1) par une perte de quantité ou (2) de diversité de biens disponibles pour les SE d'approvisionnement, ou (3) la présence de nuisances sanitaire, visuelle et/ou olfactive. Une perte d'accessibilité à certaines pratiques sociales ou techniques d'exploitation des SE peut également être observée.

Impact 3 (I3) : Impacts étendus – épisodiques. Impacts forts, étendus sur les fonctions, des variations interannuelles ou saisonnières peuvent néanmoins toujours être observées. Des changements profonds de la fourniture des SE s'observent sur de larges zones du lac. Le niveau des SE de régulation et des SE d'approvisionnement et/ou culturels sont inférieurs au niveau potentiel, mais certains secteurs du lac ou certains déterminants des SE peuvent rester épargnés. Les bénéficiaires sont la plupart du temps capables d'adapter leurs pratiques sociales et techniques d'exploitation des SE pour faire face aux perturbations. Ces adaptations prennent la forme de reports spatiaux ou d'espèces (voir chap 5.1.3). Ces adaptations peuvent engendrer une surexploitation localisée d'un SE d'approvisionnement ou culturel, qui vient accélérer les phénomènes de dégradation due à la pollution. Des feed-back entre SE de régulation et fonctions écologiques peuvent émerger également (ex : libération de la charge interne en polluants). Les dégradations sont visibles sur plusieurs SE, ce qui peut affecter l'image du lac et les représentations des acteurs et bénéficiaires des SE vis-à-vis de l'état du lac. Le passage de I2 à I3 peut être visible par effet de seuil.

Impact 4 (I4) : Impacts généralisés – persistants. Impacts majeurs, sur l'ensemble des fonctions d'une même catégorie. Une stabilisation des impacts sur les fonctions à leur niveau maximum est observée en réponse à l'émergence d'un nouvel état du lac dégradé et de ses SE. Ce nouvel état du lac ne permet pas de fournir tous les bénéfices recherchés par les bénéficiaires et entraîne à terme la disparition des SE impactés ou l'apparition de dis-services si aucune action n'est entreprise. Le maintien de ce niveau d'impact sur les fonctions est néfaste pour le bien-être des bénéficiaires.

L'intégration de cette typologie dans le modèle en cascade des grands lacs alpins rend possible la visualisation des impacts des pollutions sur la fourniture en SE (Figure 5-11). Cette modélisation va nous permettre d'analyser l'évolution des impacts des pollutions sur les grands lacs alpins et d'identifier, au cours des phases de pollution et de restauration, la transmission des perturbations entre fonctions et SE.

LEGENDE DE LA MODELISATION DE LA CASCADE DES SE

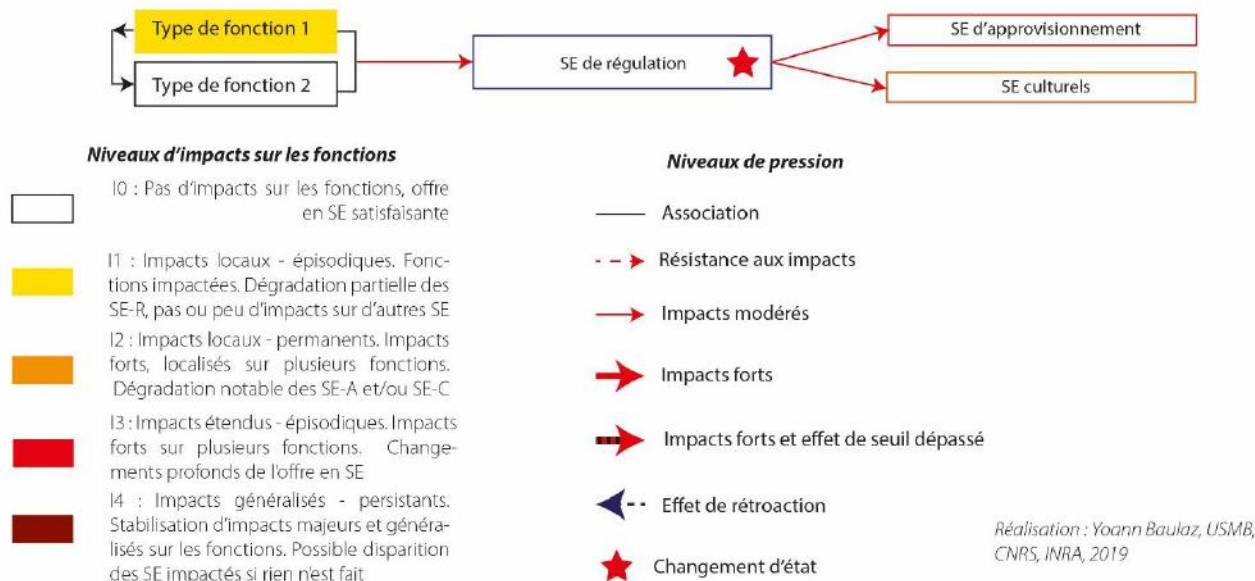


Figure 5-11 : Représentation des impacts des pollutions sur les fonctions écosystémiques et SE

5.3 Chroniques des SE des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : le rôle des services de régulation

Cette partie a pour but d'analyser l'évolution de la fourniture en SE au cours de la phase de pollution et de restauration de l'état des grands lacs alpins à partir de l'adaptation du modèle en cascade que nous venons de décrire. Cette rétrospective permettra de tester notre adaptation de la cascade des SE des grands lacs et de fournir une nouvelle interprétation de l'évolution des pollutions des grands lacs alpins par le prisme des SE.

Des chroniques détaillées de l'évolution du processus de pollution et dépollution des grands lacs alpins vont être proposées. A partir de ces chroniques, on identifiera les conséquences des modifications sur la demande et les adaptations en termes de pratiques que les bénéficiaires des SE impactés ont pu mettre en place. Cette partie se découpe ainsi en quatre phases :

1. Dans un premier temps un état des lieux des SE des grands lacs alpins avant l'émergence des problèmes de pollution au début du XXème siècle. Cet état des lieux est mis en regard de l'évolution historique des SE des grands lacs alpins.
2. Une seconde partie décrit étape par étape les impacts de l'eutrophisation sur les SE du Léman. La même étude a été menée pour les lacs d'Annecy et du Bourget, elles sont présentées en Annexe 5-3 et Annexe 5-4. Dans cette analyse, il s'agira d'interpréter, en termes de relations entre fonctions écosystémiques et SE, l'ensemble des informations récoltées sur l'évolution de la trajectoire écologique d'impact et de réponses aux phénomènes de pollution. Chaque fonction écosystémique lacustre peut être suivie au travers d'un ensemble d'indicateurs d'état ou d'impacts (voir la liste des indicateurs dans les fiches descriptives des fonctions écosystémiques au chapitre 1.1.3) qui, pour la plupart, sont renseignés au sein des rapports de suivi des grands lacs

alpins. L'évolution de ces indicateurs nous informe sur les trajectoires des fonctions et SE des grands lacs.

3. La troisième partie concerne les impacts des problèmes de micropollutions qui ont affecté les trois grands lacs alpins. Les ateliers rétrospectifs constituent la base de cette analyse.
4. Enfin, une synthèse de l'évolution de la fourniture en SE du Léman est proposée, intégrant les informations des trajectoires d'impacts et de restauration décrites dans les deux parties précédentes.

5.3.1 Les SE du passé

Les grands lacs alpins sont utilisés par l'Homme depuis plusieurs milliers d'années. Au fil de l'histoire, on observe une diversification des usages des plans d'eau et de leur aire d'influence (Figure 5-14). Nous proposons une analyse historique des SE des grands lacs alpins à travers les siècles. Parmi les services actuels, l'utilisation de **bio-ressource pour la pêche** est certainement l'un des plus anciens dont on puisse retrouver des traces sur les trois grands lacs alpins. Dès le néolithique déjà, la perche et le corégone avec le brochet constituent les espèces principalement pêchées, au moyen de techniques variées : au filet, à la ligne, à la nasse ou au harpon (Gillet 2017, Malgat 2018). Bien qu'il soit difficile de le prouver, on peut supposer une utilisation des lacs pour **l'alimentation en eau potable**, et l'utilisation des bois flottés et arrêtes de poissons pour la **construction d'outils**. L'eau pouvait servir également à la toilette corporelle et **l'hygiène**. Bien sûr, parmi les services les plus importants pour l'époque, on retrouve la **fourniture d'espaces de construction** des habitations sur pilotis au niveau des fonds sableux littoraux et les **opportunités simplifiées de défense** face aux animaux sauvages terrestres et d'attaques par les autres populations humaines. Par ailleurs, il est probable que les habitations de ces populations aient été construites sur l'eau (Figure 5-12) pour **évacuer facilement leurs déchets** et "eaux usées" dans l'eau. La **régulation du climat local** par les lacs peut être un autre service qui a contribué à l'implantation des villages sur ces zones. Pour ce qui est des services culturels, des traces indiquent des usages des lacs en tant que **lieux de cultes religieux ou spirituels** à cette époque (Nieloud-Muller 2019).



Musée des palafittes d'Unteruhldingen (Allemagne), Duval, juin 2017

Figure 5-12 : Reproduction d'habitations palafittiques dans un parc archéologique

Ces populations étaient fragiles face aux aléas climatiques et **dis-services lacustres**. La montée des eaux associée à l'épisode de réchauffement climatique vers - 800 av JC a poussé les palafitteurs à la désertion des berges des lacs.

Dans l'antiquité, les peuples gaulois et romains vont délaisser les berges des lacs pour s'implanter à l'intérieur des terres. Les cours d'eau des BV possèdent des régimes torrentiels qui entraînent de fortes variations des niveaux des grands lacs alpins d'une amplitude saisonnière de 2 m en moyenne, pouvant atteindre 7 m en crue. Ces variations découvrent et recouvrent alternativement les grèves en faveur de l'implantation de zones humides qui réduisent l'accès aux lacs (Corboud, 1997 in Tarpin et al. 1999). Par endroits les rives escarpées sont instables, peuvent provoquer des mouvements de terrain et les pentes abruptes des contreforts des massifs alpins obligent les populations à s'éloigner des plans d'eau et à s'installer sur les plaines alluviales entre les rivages lacustres et les moyennes montagnes ; ces zones sont par ailleurs plus fertiles pour les activités agricoles. **La pêche** est une activité de subsistance secondaire par rapport à l'agriculture, malgré une beine des lacs poissonneuse et riche en biodiversité.

A l'époque romaine, les grands lacs alpins se trouvent au centre d'un important réseau de communication gallo-romain entre les villes actuelles de Genève, Lausanne, Nyon, Annecy, Aix-les-Bains, Lyon (Lugdunum, capitale des Gaules), Seyssel. De nouveaux SE font alors leur apparition : **l'eau support de la navigation** devient le service le plus important (hormis pour le lac d'Annecy où cet usage n'a jamais été très développé) ; les vestiges d'une importante **activité portuaire commerciale** sur le Rhône près du lac du Bourget **et militaire** au niveau de la ville de Genève depuis - 200 av JC en attestent.

Le Léman est également une **zone frontière** entre les populations gauloises (allobroges) et celtes (helvètes). Des traces de cultes sont également retrouvés sur les berges du Léman en - 80 av JC, indiquant l'existence de **valeurs spirituelles ou religieuses attachées aux lacs** (Tarpin et al. 1999).

Les rivages lacustres resteront presque inoccupés jusqu'au XIXème siècle et les débuts du **tourisme lacustre**. Dès la fin du XVIIIème siècle (siècle des lumières), les **SE culturels** prennent de l'importance grâce aux peintres, romanciers et poètes de la Renaissance, puis on assiste à un engouement romantique au XIXème siècle pour les lacs du Bourget et le Léman (ex : Lamartine, Balzac, Eugène Sue, Georges Sand). Durant toute cette période, hormis les villes portuaires, les sociétés sont davantage tournées vers la montagne et l'urbanisation se développe autour des routes reliant les principales villes en périphérie desquelles l'agriculture continue de se développer.

Les premiers problèmes de **dégradation des qualités de l'eau et des milieux** apparaissent au début de l'ère industrielle et l'accélération du développement démographique. Les eaux usées sont rejetées directement dans les cours d'eau, ce qui a pour conséquence de rendre insalubres les lacs et certaines zones humides. Annecy est par exemple connue au début de l'ère industrielle pour être une ville sale, « *souillée* » par la présence d'un abattoir en centre-ville qui attire les « *charognes* » et le développement de bactéries dans le Thiou. L'hygiène et la santé publique deviennent un enjeu majeur, amplifié par un tourisme grandissant rendu possible par l'arrivée du train et la création d'un syndicat d'initiative visant à promouvoir la

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

ville d'Annecy comme destination de vacances aristocratiques. La peur des noyades, tempêtes, naufrages et les maladies bactériennes comme la poliomyélite participent à une **crainte générale pour les grands lacs alpins**, qui ne seront que peu investis par les sociétés humaines jusqu'à la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e siècle. L'aménagement des ports pour le transport de personnes pour un tourisme aristocratique (ex : 1839 premières excursions organisées pour les baigneurs et touristes sur le lac du Bourget – Belle 2014) vont entraîner une lente et progressive appropriation des bords de lac (Gauchon 2019).

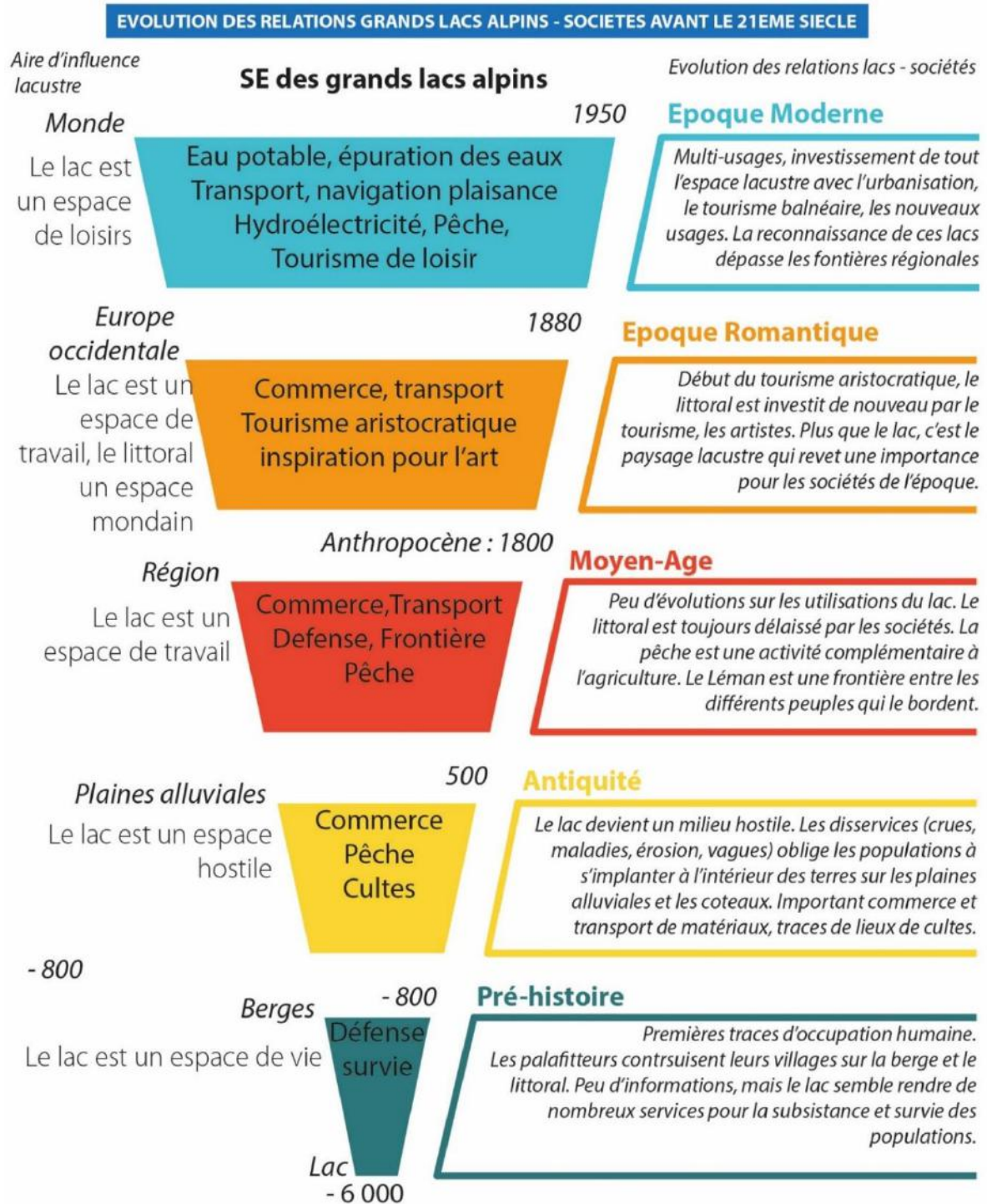
Le XX^e siècle est à l'inverse marqué par un investissement important de l'espace lacustre et de ses littoraux, avec l'apparition des pratiques de plages autour des années 1930 (Vernex 1989). C'est à cette période qu'apparaissent les premiers problèmes d'eutrophisation.



Figure 5-13 : Promenades sur le Grand Port d'Aix-les-Bains (début XX^e) et aménagement de la plage d'Aix-les-Bains (années 1930). Source : Belle 2015

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions :
caractérisation, modélisation et trajectoires



Réalisation : Yoann Baulaz, CNRS, INRA, 2019

Figure 5-14 : Evolution des SE des grands lacs depuis les premiers peuplements autour des lacs

5.3.2 L'eutrophisation, la grande affaire des grands lacs au XX^{ème} siècle

L'objet de cette partie porte sur l'analyse des chroniques de l'eutrophisation et de la ré-oligotrophisation des grands lacs alpins par le prisme des SE. L'adaptation du modèle en cascade va nous servir de cadre d'interprétation pour étudier l'évolution des relations entre fourniture et demande autour des bouquets de SE associés aux qualités de l'eau et des milieux. Cette partie est construite à partir d'une **multitude de sources** : (1) données écologiques, conclusions et recommandations issues des rapports de suivi des grands lacs alpins et articles scientifiques rédigés depuis les premières analyses des qualités de l'eau et des milieux, jusqu'à aujourd'hui, (2) ateliers de travail et entretiens avec les chercheurs qui ont participé à l'écriture de ces rapports, (3) interviews d'experts spécifiques, questionnaires et (4) consultation de nombreux articles de presse, comptes-rendus des assemblées générales de l'association ASL (Association pour la Sauvegarde du Léman) qui a largement participé à la lutte contre les pollutions du lac depuis le début des années 80, ainsi que de divers documents. **La triangulation des sources** a été réalisée dans la mesure du possible pour réduire les incertitudes associées aux données historiques.

L'eutrophisation est une pollution généralisée du plan d'eau qui se traduit par des impacts sur tous les types de fonctions écosystémiques et les services. Si rien n'est fait, l'eutrophisation du lac peut mener à une saturation des SE, l'apparition de dis-services et éventuellement une perte irréversible. Ce cas extrême n'a jamais été atteint pour les grands lacs alpins du fait de la mise en place d'actions de gestion qui ont permis une restauration des SE dans un état satisfaisant malgré un changement d'état de l'écosystème.

L'origine dominante de cette pollution pour les grands lacs alpins est représentée par des **flux croissants de pollutions ponctuelles domestiques** en réponse au développement démographique qui a plus que triplé dans les BV et autour des grands lacs alpins depuis le début du XX^{ème} siècle (voir Figure 5-15). Les pollutions d'origine diffuse ont joué un rôle secondaire dans le phénomène d'eutrophisation des grands lacs alpins.

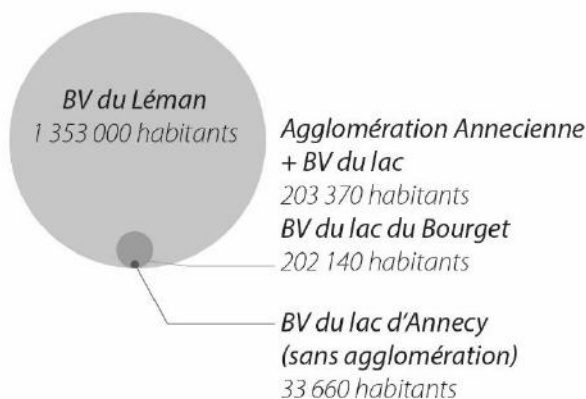
Par ailleurs, le développement de l'agriculture intensive, l'évolution des modes de vie des ménages (l'augmentation du niveau de vie, l'arrivée de la machine à laver le linge, l'amélioration des systèmes sanitaires dans les habitations, l'arrivée de nouveaux produits qui nécessitent de nouvelles filières d'élimination), l'arrivée du tout-à-l'égout et la construction de routes dans le BV accroissent **la connectivité entre le BV et le lac** ainsi que le **taux de nutriments** émis dans le BV. Le phosphore est le facteur limitant de la croissance des algues qui est le moteur de l'eutrophisation dans les lacs. Un être-humain éliminant 2g de phosphore par jour, les concentrations de ces nutriments sont alors proportionnelles au nombre d'habitants situés dans le BV.

C'est alors que surviennent entre 1940 et 1960 de manière presque simultanée pour les grands lacs (et un grand nombre de lacs et grands lacs sur la planète) les premiers symptômes de l'eutrophisation.

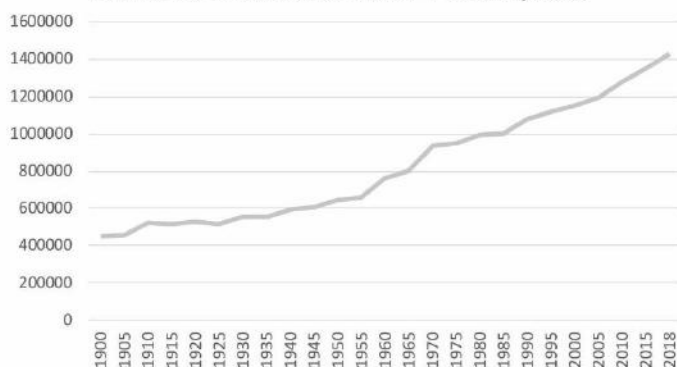
La chronique de l'eutrophisation du Léman peut être récapitulée dans la Figure 5-16. Cette frise chrono-systémique met en lien les impacts du phénomène d'eutrophisation sur les composantes de la fourniture et la demande en SE, en différenciant l'évolution des impacts sur les fonctions écosystémiques (partie A), des impacts sur la demande (partie C) et une synthèse sur les impacts sur les SE au centre (partie B).

**Evolution démographique des communes
des BV des grands lacs alpins depuis 1900**

**Représentation des rapports entre la démographie
des trois BV des grands lacs alpins en 2015**



**Evolution démographique du BV du Léman
(environ 275 communes suisses + 62 françaises)**



**Evolution démographique des BV des lacs d'Annecy (avec et
sans l'agglomération à l'aval du lac) et du Bourget**

(Agglomération Annecy : 34 communes ; BV Annecy : 18 communes ;
BV Bourget : 54 communes)

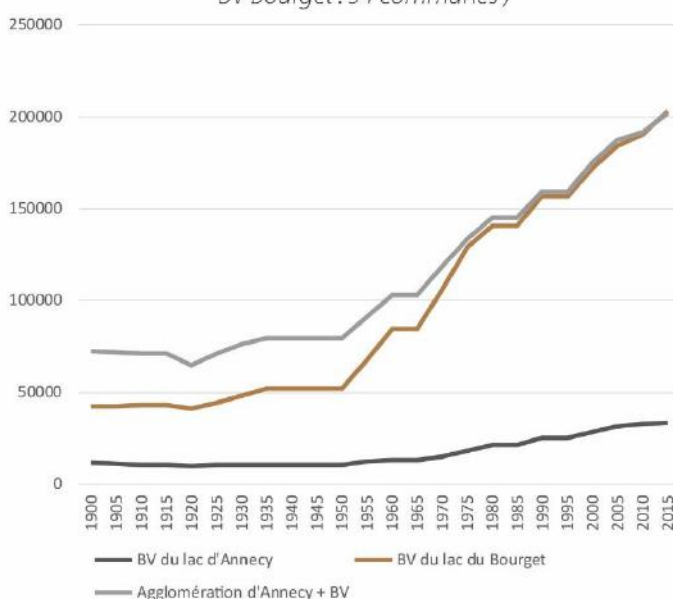


Figure 5-15 : Evolution démographique dans les BV des grands lacs alpins depuis le début du XXème siècle

Sources : INSEE, 2018 ; OFS, 2017 ; Pietu, 2004 ; Service cantonal de statistique des cantons de Genève, de Vaud et du Valais
Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

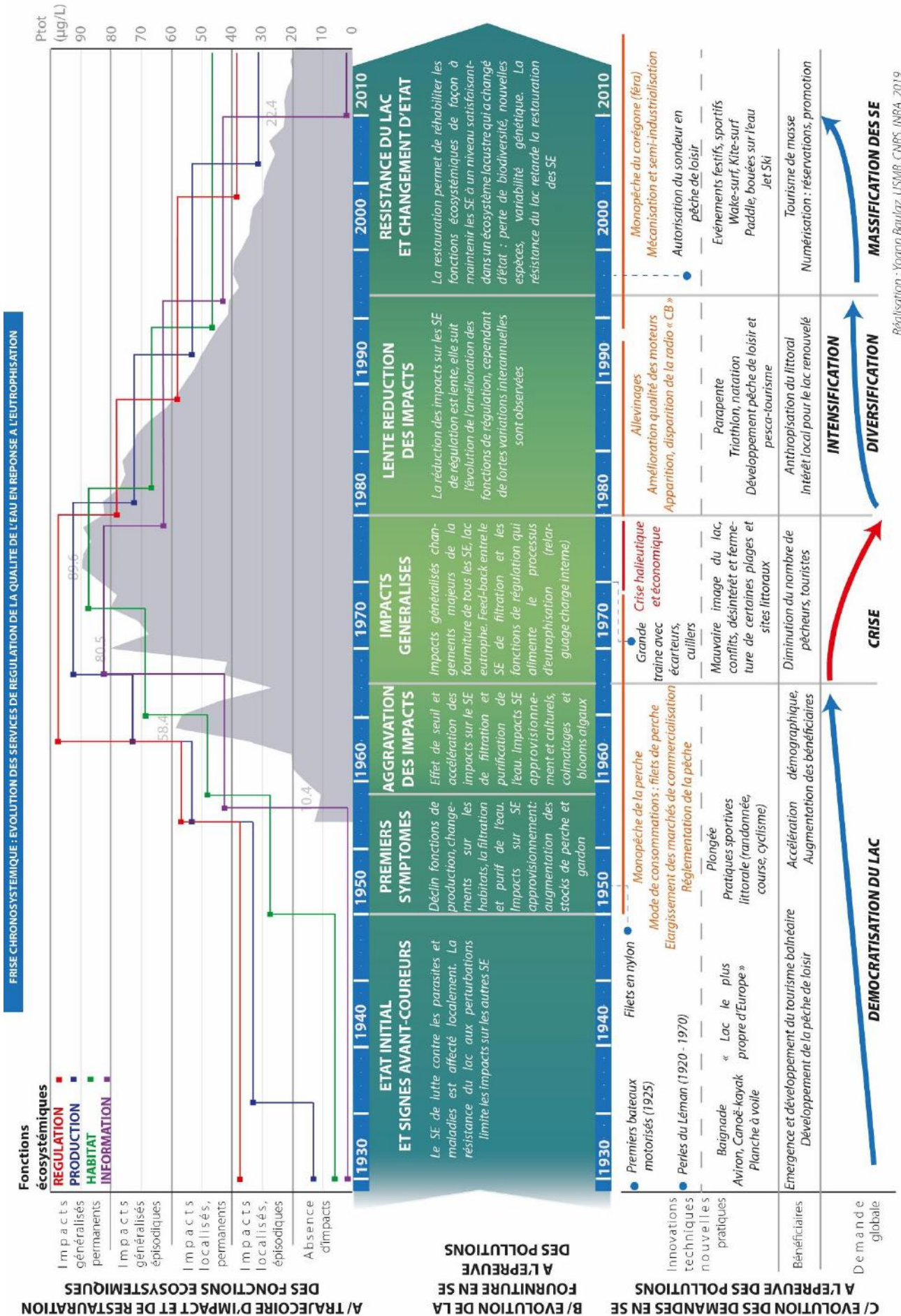


Figure 5-16 : Frisse chronosystème d'évolution de la fourniture et de la demande en SE à l'épreuve des pollutions

❖ Etat initial et signes avant-coureurs (1912 - 1950)

Depuis Forel à la fin du XVIII^{ème} siècle, et jusqu'à l'entre-deux guerres, le Léman est réputé pour être l'une des nappes d'eau les plus pures et les plus claires d'Europe (Roch 1992), il est surnommé « *le bleu Léman* » du fait de sa couleur bleu turquoise (IV sur la gamme des teintes de l'eau des lacs de Forel, voir encadré 1-5 au chapitre 1). La société locale commence à investir l'espace lacustre, et l'on observe une démocratisation du lac : celui-ci n'est plus uniquement un espace de travail et devient de plus en plus un espace de loisir (Figure 5-16, C). Le lac est attractif par sa beauté qui profite à un **tourisme balnéaire naissant**, plutôt aristocratique et de villégiature dans un premier temps, avant que n'apparaissent les pratiques ludiques utilisant le lac comme support. Par ailleurs, le lac est utilisé par la pêche professionnelle, il alimente en eau potable les villes de Genève et de Lausanne et est surplombé par un BV rural qui n'est pas encore très urbanisé, hormis au niveau des centres urbains de Genève et Lausanne mais qui est déjà occupé par une population de plus de 400 000 habitants.

De nombreux biologistes et limnologues s'intéressent au Léman depuis le début du XIX^{ème} siècle, avec notamment des écrits sur les populations animales et végétales du Léman, les diatomées (Brun en 1879 et Forel en 1900), des descriptions des communautés algales et phytoplanctoniques, les bactéries (notamment des études de Pasteur), sur les poissons du lac, la découverte d'organismes benthiques en 1867, les premières analyses physico-chimiques en 1808, les macrophytes, sans oublier les travaux de Forel (CIPEL 1984).

Au niveau des perturbations sur les SE que l'on peut noter dans les écrits anciens, à la fin du XIX^{ème} siècle, Seiler note que « *l'eau présente une composition chimique excellente [mais] [...] variable* ». Toutefois, en 1884 une grave épidémie **de typhoïde** due à la consommation d'eau du lac polluée par des égouts touche Genève ; des traces de **contaminations bactériennes d'origine fécale** sont détectées plus tard en 1896 au large d'Ouchy. A la fin du XIX^{ème} siècle sont mentionnées plusieurs inquiétudes au sujet de **vers-parasites des poissons** et l'existence **d'épizooties** qui déciment les perches en grand nombre. On relève également un épisode de **sur-pêche des corégones** à la fin du XIX^{ème} siècle (Gagnaire 1988).

Les premiers témoins de dégradation des qualités des eaux et des milieux au XX^{ème} siècle apparaissent en 1912 avec la détection de contaminations bactériennes fécales observées dans la rade de Genève qui témoignent d'une atteinte aux **fonctions écosystémiques de régulation**. Le développement de ces organismes pathogènes, associé au déversement d'eaux usées dans le BV (tout comme l'eutrophisation), montre une inefficacité du contrôle biologique des perturbations et met en danger le service de lutte contre les parasites et les maladies, avec de possibles répercussions sur le SE d'approvisionnement en eau potable (Figure 5-17). A Genève, des mesures préventives sont engagées pour lutter contre ces impacts qui menacent l'alimentation en eau potable de la ville (déplacement de la prise d'eau potable à partir du lac et construction d'un système de filtration et désinfection de l'eau potable en 1932). Plus tard, en 1927 est identifiée l'apparition subite de deux algues vertes nouvelles dans le plancton du lac - il est difficile toutefois de faire un véritable lien entre ce phénomène et l'eutrophisation du Léman (CIPEL 1984). L'émergence de l'eutrophisation se caractérise alors par des impacts locaux, ponctuels sur les fonctions écosystémiques, avec des effets réduits sur les SE du fait de la capacité de résistance du lac.

A partir de 1945, des publications scientifiques (Dienert en 1913 puis Hubault, Vivier, Novel et Dussart dès 1945) mettent en garde contre une possible pollution du lac après l'observation d'un accroissement par quatre des nitrates entre 1936 et 1954 (impacts localisés sur les fonctions de production figure 5-17). Ces mises en garde scientifiques ne seront pas prises au sérieux car la société n'a pas conscience de la pollution en développement.

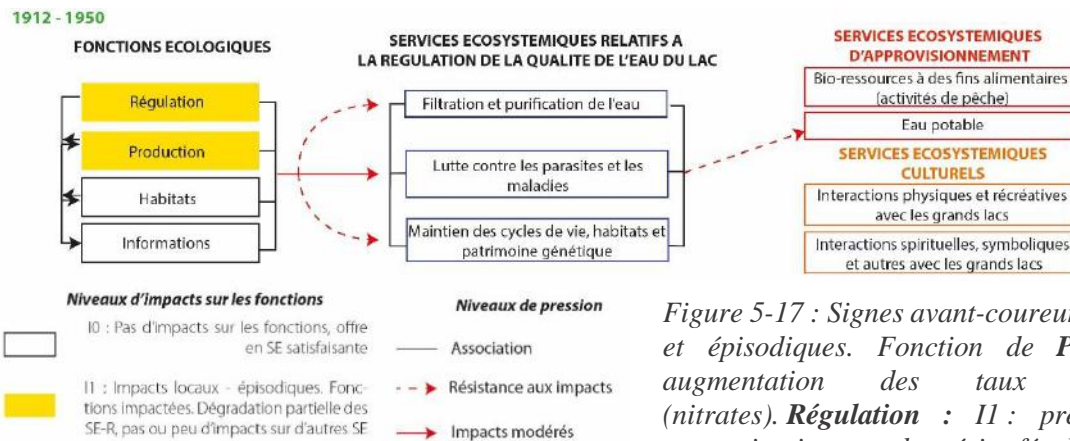


Figure 5-17 : Signes avant-coureurs : impacts locaux et épisodiques. Fonction de **Production** : I1 : augmentation des taux de nutriments (nitrates). **Régulation** : I1 : premiers signes de contaminations aux bactéries fécales

Pas d'impacts sur les SE observés, la pollution n'est pas perçue.

❖ Premiers symptômes (1951 - 1959)

Ce sont les usagers qui alertent en premier de la pollution du Léman. En 1949, les pêcheurs professionnels se plaignent d'une diminution des captures des salmonidés entre 1948 et 1952 (les captures de corégone et omble-chevalier diminuent plus de deux fois) et d'une augmentation de celle des gardons. Cette baisse peut être attribuée à un impact sur les **fonctions de production** : un changement dans la qualité et quantité de la production primaire en défaveur des salmonidés - espèces de milieu oligotrophes - mais en faveur du gardon - espèce de milieu méso-eutrophe (Zhang 1989, Massol et al. 2007, Pinay et al. 2013a). On observe également une réduction des **fonctions d'habitat** : l'oxygène commençant à manquer dans le fond du lac à certains endroits limite la décomposition de la matière organique qui se dépose et comble les zones de frai des salmonidés, réduisant l'efficacité de la reproduction (Touchart 1993). Les études récentes en paléolimnologie viennent confirmer cet impact (Jenny et al. 2013).

La hausse de la production primaire provoque à partir de 1955 le développement massif d'algues vertes qui recouvrent les galets du fond du lac, se déposent sur les filets des pêcheurs et provoquent une diminution des captures (les filets sont visibles par les poissons). Ces blooms algaux sont peu visibles, localisés et épisodiques, ils affectent à la fois le **SE de filtration et purification de l'eau** (MES dans l'eau) et le **maintien des habitats** (Figure 5-18).

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

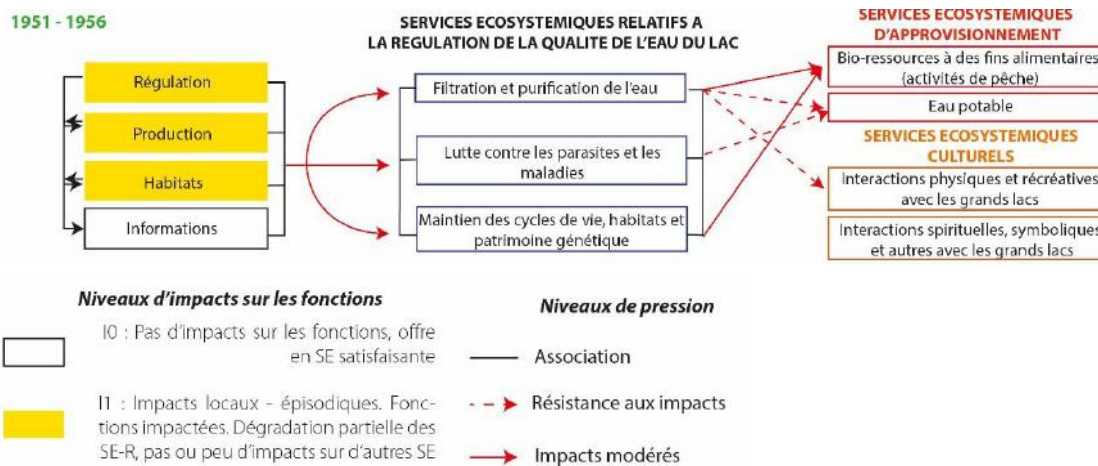


Figure 5-18 : Premiers symptômes : impacts locaux-épisodiques. **Production** : II : hypothèse d'un changement dans la qualité et quantité de la production primaire. Attention : manque d'informations pour le prouver. **Régulation** : II pas d'évolutions observées. **Habitats** : II début de la désoxygénation benthique

Le SE d'approvisionnement en bio-ressources pour les pêches répond très rapidement aux perturbations, avec une diminution des stocks à partir du moment où les fonctions de régulation de production et d'habitat montrent des premiers signes d'impacts à l'eutrophisation.

❖ Aggravation des impacts (1959 - 1963)

Le développement urbain dans le BV et sur les pourtours du Léman ne cesse de croître, le taux de P dans le lac augmente alors et dépasse la capacité de résistance du lac. Un diagnostic annuel d'état du lac est instauré en 1957 et permet d'attester d'une aggravation rapide du phénomène d'eutrophisation avec un premier pic de concentration en P en 1963-64 (qui s'élève à plus de 58.4 µg/L de P) et une évolution du statut trophique d'oligotrophe à mésotrophe à partir de 1960.

Durant cette période, sur les zones littorales, on commence à observer des accumulations importantes de biomasse algale qui se décompose peu, accompagnées de proliférations d'algues de couleur brunâtre et d'une réduction de la transparence de l'eau en période estivale dès 1957 (CIPEL 1964, 1966, 1968, Barroin 1990). Par ailleurs, le taux de contaminations bactériennes d'origine fécale s'accroît d'années en années dans les échantillons à partir de 1958 et sont observées dans un nombre de plus en plus important d'échantillons prélevés au lac. Cela indique que les impacts sur les **fonctions tendent à se généraliser** : l'analyse mentionne que le Petit-Lac est la zone la plus polluée du lac, suivi du Haut-lac, avec de fortes variations interannuelles (voir Figure 5-19 - (CIPEL 1964, 1984, Rapin and Gerdeaux 2013).

Des **changements d'habitats** s'opèrent : sur le littoral les herbiers à macrophytes s'étalent et gagnent en densité et dans le domaine pélagique les communautés phytoplanctoniques et zooplanctoniques changent et s'accroissent à partir de 1959 (dominance d'espèces méso-eutrophes dès que la concentration en phosphore dépasse 30 µg/L entre 1963 et 1965), ce qui porte atteinte à toute la chaîne trophique (Lachavanne 1980, Pinay et al. 2013a). Ces changements d'habitats ont pour conséquence de modifier fortement la **fourniture en SE d'approvisionnement en bio-ressource à des fins alimentaires** : les captures d'espèces oligotrophes (corégones, brochet) chutent progressivement (les corégones ne représentent

que 7% des captures totales de poisson à partir de 1963, contre une part supérieure à 15% dix ans auparavant – Gagnaire 1988) et celles des espèces privilégiées en milieux eutrophes augmentent fortement (gardons, perches). **La demande en SE s'adapte** : la perche devient un produit de pêche intéressant (sous l'impulsion d'un effet de mode pour les filets de perche et de la consommation de poisson sous forme de filets fris – mode des « *ginguettes* ») dont les captures connaissent des niveaux records (Gagnaire 1988).

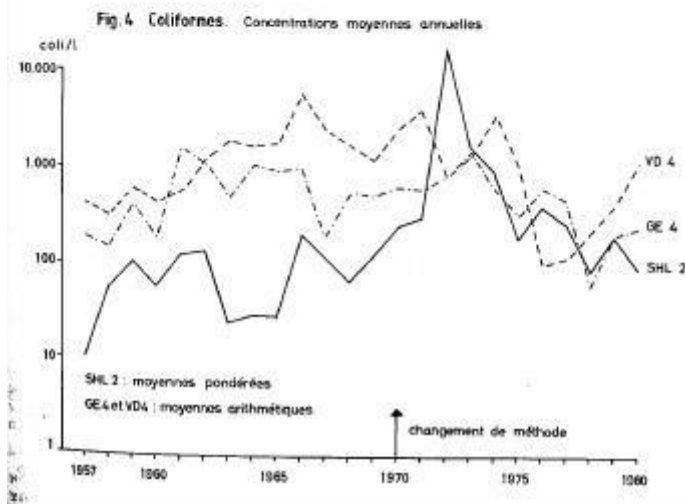
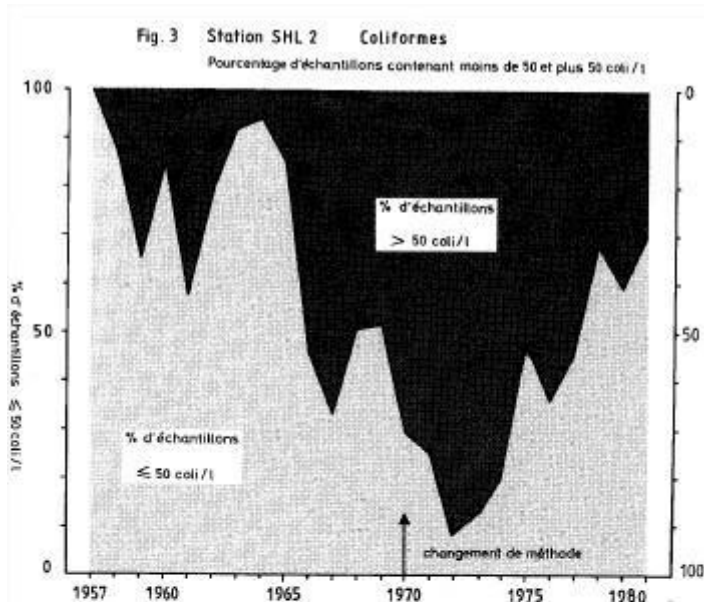


Figure 5-19 : Résultats des mesures d'échantillons de coliformes fécaux dans les stations de prélèvement du Léman entre 1957 et 1981 (CIPEL 1984)

Tous ces signaux sont des symptômes caractéristiques d'un début d'eutrophisation. Les **fonctions écosystémiques de régulation** ne peuvent plus assurer un contrôle biologique et physico-chimique des perturbations efficace : les contaminations bactériennes fécales augmentent, se généralisent. L'état trophique global évolue, ce qui accentue les changements dans les **fonctions de production**, marqués par l'augmentation de la biomasse littorale et planctonique, la diminution de la transparence et des changements dans les communautés de producteurs primaires et secondaires. Ces évolutions se répercutent sur les **fonctions d'habitats** : la structure et l'état des habitats changent (herbiers à macrophytes, communautés de plancton pélagiques) ainsi que les relations trophiques et interactions biotiques (changement dans la part des espèces dominantes dans les captures). Les modifications de transparence, couleur de l'eau, le développement de macroalgues et les risques sanitaires liés aux contaminations bactériennes génèrent des nuisances et finissent par affecter les **fonctions d'information** (Figure 5-16, A).

Ces impacts sont importants sur l'ensemble des fonctions (Figure 5-20),

avec toutefois de fortes variations interannuelles. Ces évolutions suffisent à modifier les niveaux de **SE de régulation**, avec des répercussions sur les SE d'approvisionnement et culturels liés. Le « **SE pêche** » est le premier affecté et semble être « favorisé » par les hausses des captures de perches qui répondent à l'importante demande en cours sur cette espèce. La fourniture en **SE culturels** diminue du fait d'une dégradation visuelle, olfactive de l'eau et des risques sanitaires qui entraînent la fermeture de plusieurs plages à la baignade sur différents

secteurs du littoral. Enfin, une inquiétude s'élève autour des risques sanitaires possibles (bactéries fécales) sur le **SE d'approvisionnement en eau potable**.

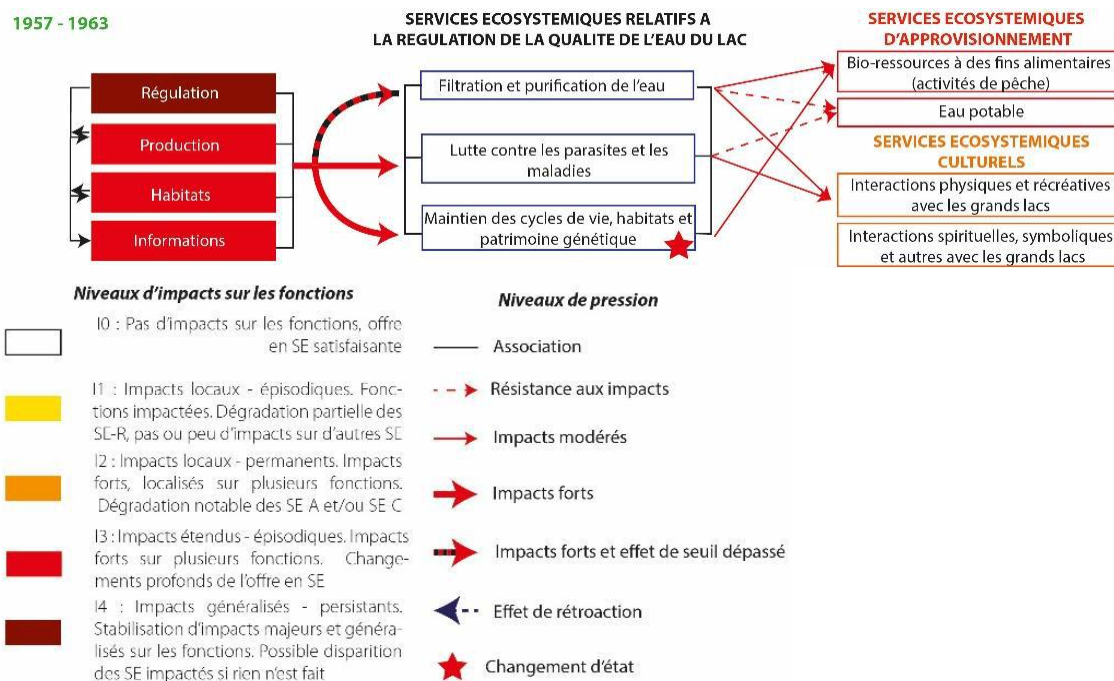


Figure 5-20 : Aggravation des impacts – impacts étendus

Régulation : I2 : tendance confirmée à la réduction des fonctions de production (transparence) ; I4 : augmentation annuelle des bactéries sur la plupart des stations du lac et effet de seuil sur l'évolution des concentrations en P avec un passage à l'état eutrophe pour l'ensemble du lac.

Production : I3 : réduction de la transparence moyenne et accumulations de biomasse ponctuellement.

Habitats : I3 : changement dans la structure et état des herbiers à macrophytes et des communautés phytoplanctoniques, zooplanctoniques et piscicoles en domaine pélagique.

Informations : I3 : changement de la qualité visuelle, olfactive de l'eau, risques sanitaires sur certains sites littoraux, réduction de la transparence globale.

Impacts sur les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux, changement des composantes de la fourniture en SE de maintien des habitats et d'approvisionnement en bio-ressources, réduction de la fourniture en SE culturels et risques plus élevés sur la fourniture en SE d'approvisionnement en eau potable.

❖ Impacts généralisés (1964 - 1980)

A partir de 1965 apparaît un phénomène caractéristique de "suralimentation" du lac par le phosphore : des proliférations spectaculaires de macrophytes et phytoplancton verts et bruns, accompagnées d'une invasion du lac par des blooms de cyanobactéries à partir de 1967-68 à différents endroits du lac. La fameuse cyanobactérie filamenteuse, *Oscillatoria rubescens*, forme des nappes de "fleurs d'eau", c'est-à-dire des couches de matières organiques dans la zone euphotique du lac. Ces développements massifs d'algues et bactéries sont les symptômes d'une **grave eutrophisation** (Figure 5-22).

Le diagnostic physico-chimique et biologique confirme cette aggravation brutale de l'état du Léman, avec la plupart des éléments surveillés et analysés depuis une quinzaine d'années conduisant aux mêmes conclusions caractérisées d'un lac eutrophisé à son stade le plus grave. Ces phénomènes sont très visibles dans le Léman, ce qui surprend du fait du volume du plan d'eau que l'on pensait "*trop grand pour être pollué*". Les indicateurs décrits ci-après attestent que le niveau de **toutes les fonctions écosystémiques** du lac est en déclin de manière généralisée et permanente (CIPEL 1984, Roch 1992, Pourriot and Meybeck 1995, Pinay et al. 2013b) :

- Les concentrations en P restent à des niveaux caractéristiques d'un état trophique eutrophe malgré une légère diminution du taux de P suite au pic de 1959, en raison d'un brassage complet du lac. La concentration en P augmentera de nouveau drastiquement à partir de 1967 (avec des fluctuations interannuelles liées aux températures et aux apports du BV), propulsée à plus de 80 µg/L en 1970 par la libération de la charge interne en P sous l'effet de la désoxygénation benthique (date exacte du premier relargage de la charge interne méconnu) qui remet en suspension les charges de phosphore stockés dans le fond du lac. On peut interpréter ce phénomène comme un *feed back* entre le SE de filtration et purification de l'eau et les **fonctions de régulation** (Figure 5-23). En condition hypoxique, le SE devient un **dis-service** pour le lac et vient aggraver la pression sur les fonctions de régulation, le contrôle physico-chimique de la charge dissoute et solide en phosphore se retrouvant totalement inefficace. Le contrôle biologique est également fortement impacté par de fortes augmentations de contaminations en bactéries fécales à partir de 1965 (détection de coliformes fécaux dans plus de un échantillon prélevé sur deux), un niveau maximum atteint entre 1970 et 1973 (niveau de germes 14 fois supérieur aux moyennes de 1957 – 1960, puis 6-7 fois supérieur après 1977), mais également par l'arrivée de cyanobactéries et des efflorescences de microalgues colorées nuisibles pour l'homme ou les écosystèmes.
- Au niveau des **fonctions de production**, la production primaire est "*boostée*" par l'accroissement du phosphore, avec des « *pics* » amorcés dès 1966 qui s'accroissent jusqu'en 1976, le taux maximal de P atteint dans le lac (Figure 5-21). Les communautés de producteurs primaires changent et tendent à se stabiliser à partir de 1968 avec une augmentation des peuplements de « *phytoplankton eutrophe* » qui prennent la place sur les diatomées. La structure des communautés et la production secondaire sont bouleversées en réponse à l'augmentation de productivité primaire.
- Les **fonctions d'habitats** évoluent sous le coup des changements dans les fonctions de production et de régulation. La prolifération végétale et leur décomposition dans le milieu entraînent une surconsommation de l'oxygène, conduisant à une **hypoxie généralisée** du fond du lac (voir chap 1.3.3). Les habitats de l'ensemble du lac sont modifiés à partir de 1973 (Figure 5-23) : **en zone littorale**, la surface et densité du substrat colonisé par les herbiers augmentent fortement, la diversité des espèces est réduite, les espèces typiques de milieux eutrophes dominent et plusieurs espèces indésirables font leur apparition (la moule zébrée arrivée en 1962 connaît une expansion maximale en 1972, la brème fait son apparition en 1971 et l'épinoche

prolifère en 72-73 - espèces indicatrices de milieux eutrophes²). Du fait de la réduction de la transparence, la limite de colonisation des herbiers passe de 8 - 12 m à 6 - 7 m³. Les **habitats benthiques** sont modifiés avec le développement d'espèces de milieux pauvres en oxygène.

- Enfin, les **fonctions d'informations** sont impactées à partir du moment où les propriétés visuelles (la transparence moyenne diminue de moitié en 15 ans et tombe à 4.5 m en 1970), olfactive (pourrissement des macroalgues) et sanitaires (cyanobactéries, bactéries fécales qui causent des urticaires et empoisonnements) du lac se dégradent. La pratique de certains usages n'est alors plus permise et la perception globale du lac évolue.

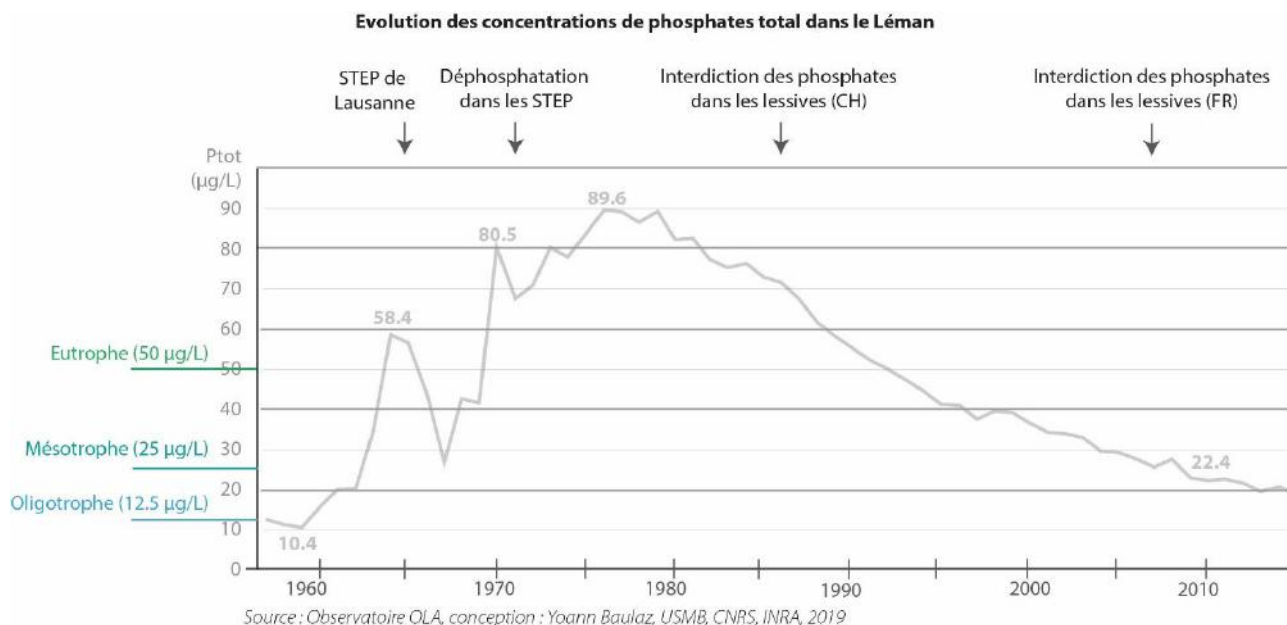


Figure 5-21 : Evolution du taux de P dans le Léman

A cette époque, tous les SE associés aux qualités de l'eau et des milieux du lac sont impactés, et cela se répercute sur la **demande globale en SE** (Figure 5-16, C). Outre la qualité visuelle de l'eau qui se dégrade, les eaux stagnantes dans certaines baies se transforment en véritables "cloaques" envahies en surface par des nappes huileuses de "fleurs d'eau", de cyanobactéries et par endroits d'agglomérats de paquets de macro-algues en surface, qui se retrouvent jusqu'à une vingtaine de mètres de profondeur. Ces macro-algues pourrissent en surface et sur les plages, dégagent des gaz et mauvaises odeurs ; les impacts cumulés de la dégradation visuelle, olfactive, sanitaire de l'eau condamnent plusieurs plages à la fermeture. Ces blooms algaux s'étendent également en profondeur et colmatent les filets des pêcheurs et les tuyaux d'alimentation en eau potable à partir du lac pour la ville de Genève. L'hypoxie généralisée du fond du lac et les changements de composition du plancton provoquent une forte mortalité des poissons nobles dont les carcasses s'ajoutent aux autres déchets d'algues sur le littoral (Dires d'experts - écologues ; CIPEL 1968, Siegenthaler 1983, Roch 1992).

Cette pollution n'est pas favorable pour l'image du "bleu Léman", les valeurs qu'on lui accorde et le tourisme : Les macro-algues se collent sur les coques des bateaux, gênent la navigation,

² A noter que l'anthropisation du littoral, qui est tout particulièrement importante sur le Léman, et la fixation du marnage sont d'autres facteurs d'impact sur les herbiers.

³ Sources : Messenger 27/1/76 ; Messenger 16/2/73 (référence complète : voir annexe 4-14)

le **SE d'interactions spirituelles, symboliques et autres** avec les grands lacs est menacé, le lac devient un exemple de lac eutrophe au niveau international par l'OCDE (Mermod 1979). La demande en SE est « *en crise* », et les pertes d'attractivité du lac se répercutent sur le nombre de bénéficiaires (Figure 5-16, C). Pour faire face à ces problématiques, des opérations de ramassages des déchets sur l'eau et sur les plages s'opèrent à proximité des plages et des ports du Léman (en 1968, plus de 500 tonnes d'algues filamenteuses sont récoltées près de Genève, après essorage) (Figure 5-22).

De manière paradoxale, l'eutrophisation est très favorable à certaines espèces cibles de la **pêche**, notamment la perche dont les captures atteignent plus de 1 150 t en 1971. Cependant, cet effet semble limité jusqu'à un certain seuil au-delà duquel les effets cumulés d'une grave eutrophisation, du colmatage des filets, d'une surpêche en réponse à la spécialisation de la filière sur la perche et d'une succession de printemps froids (mauvaise reproduction), entraînent une diminution par plus de 4 fois des captures en 1976 jusqu'en 1981 (deux fois moins importante qu'avant les débuts de l'eutrophisation).



Figure 5-22 : Symptômes d'une grave eutrophisation (Source : ASL 1983)

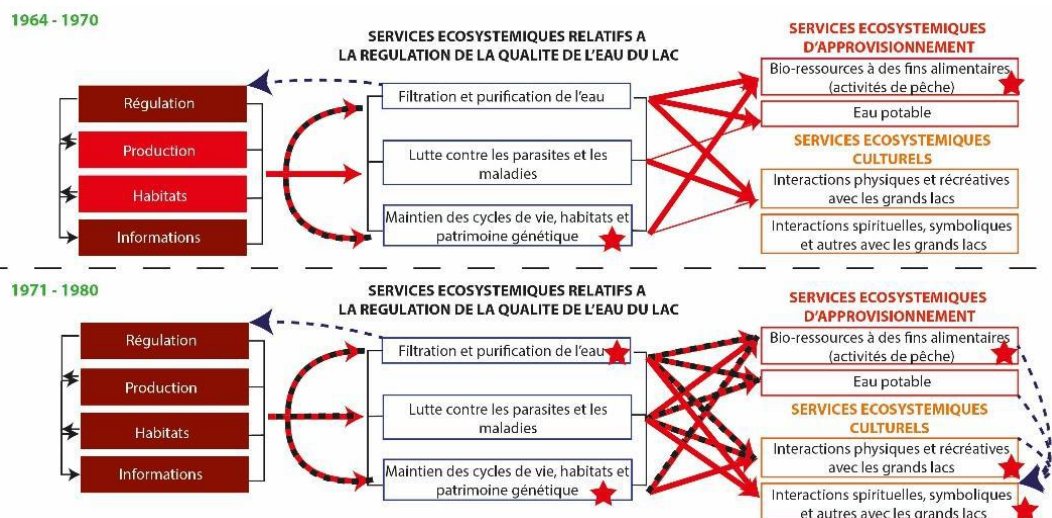


Figure 5-23 : Impacts généralisés et persistants

Régulation : I4 : passage au niveau trophique eutrophe, relargages de la charge interne en P pendant les hivers ; généralisation des contaminations bactériennes fécales

Production : I3 : passage à un état trophique eutrophe ; I4 : stabilisation des producteurs primaires phytoplanctoniques typiques de milieux eutrophes

Habitats : I3 : les macrophytes pérennes enracinées et immergées dominant en zone littorale et la désoxygénation benthique se généralise, changement de l'ensemble du réseau trophique, changement de la diversité spécifique et génétique avec l'apparition d'espèces de milieux eutrophes ; I4 : Tous les types d'habitats du lacs se détériorent

Information : I4 : importants développements de macro-algues en décomposition sur les plages, cyanobactéries, fleurs d'eau, interdiction d'accès à un nombre important de plages

Tous les SE en relation avec les qualités de l'eau et des milieux sont impactés, leur niveau de fourniture est au plus bas de toute l'histoire de l'eutrophisation : on observe une véritable crise de la fourniture et de la demande en SE.

- ❖ Restauration progressive du milieu et des SE et temps des controverses (1980 – aujourd'hui)

L'ensemble des processus de dégradation de la qualité des eaux s'est déroulé sur une vingtaine d'années et a impacté alternativement **les services d'approvisionnement en poisson**, puis en **eau potable**, et les **services culturels** enfin (Figure 5-16, B). Dans ce laps de temps, de grands efforts de diagnostics globaux de l'état des qualités de l'eau et des milieux ont été mis en place et des stations de mesures en continu sur les principaux affluents du lac sont installées dès 1976. Bien que les causes, symptômes de l'eutrophisation soient connus dès le début des années 1960, et les recommandations de la CIPEL soient très claires sur la nécessité d'installer des systèmes de déphosphatation dans les STEP, il faudra attendre véritablement le début des années 1970 pour que les actions d'épuration des eaux et de déphosphatation soient véritablement mises en œuvre. La phase d'amélioration de l'état général du lac s'amorce à la fin des années 1970 et s'explique par trois actions de gestion majeures mises en place au cours de la période 1970 - 1990 : (1) la **construction de STEP** dans l'ensemble du BV du Léman afin d'arrêter le déversement des eaux usées sans traitement dans

les cours d'eau, (2) la mise en place de **procédés de déphosphatation** (Figure 5-24) et (3) **l'interdiction de l'utilisation des phosphates** dans les lessives en Suisse en 1986.

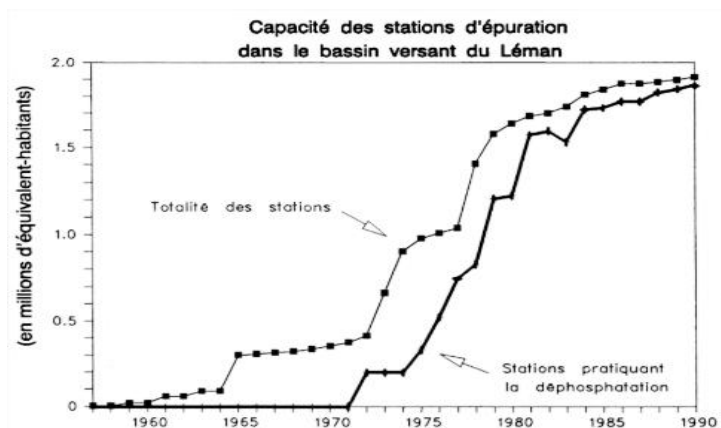


Figure 5-24 : Evolution de la capacité des STEP du BV du Léman en équivalent habitants et de la déphosphatation (Rapin 1992)

Les premiers signes d'amélioration se manifestent à la fin des années 1970 (Figure 5-21). La diminution des symptômes extrêmes de la pollution va très rapidement pouvoir être observée, mais les impacts vont rester importants et étendus pour l'ensemble des fonctions du lac sur une période entre 9 et 12 ans. Voici en détail la chronique de la restauration des fonctions écosystémiques du Léman (sources : rapports CIPEL depuis 1957 à 2000 ; Meybeck 1978, Lachavanne 1989, Barroin 1990, 1995) :

Retour au niveau d'impact 3 étendus - épisodiques :

1979 : La réduction des contaminations bactériennes d'origine fécale est le premier témoin d'une amélioration de l'état du lac. Les contaminations fécales, bactéries et virus pathogènes diminuent fortement au centre du lac, ainsi que dans de nombreux échantillons d'eau prélevés tout autour du lac. Cependant, dans le même temps, du fait de l'augmentation démographique, de problèmes de surcharge des STEP et de dysfonctionnements, on va observer de fortes concentrations de germes toxiques au-dessus des normes de qualité sanitaires pour les plages et l'eau potable, notamment dans la partie nord-est du lac entre Rolle et le Bouveret où certains sites de pompage d'eau potable nécessitent un traitement spécifique contre les bactéries pathogènes⁴. Par ailleurs, 1978 est la dernière année d'observation des fleurs d'eau toxiques, leur fréquence d'apparition deviendra rare ensuite. Ces différents phénomènes ont un impact fort sur la contribution à une eau avenante et vont entraîner une légère restauration des **fonctions d'information** à de nombreux endroits du lac.

⁴ Il est à noter que les contaminations bactériennes fécales et toxiques sont favorisées par l'enrichissement des eaux en nutriments, par la désoxygénation des eaux, mais ne découle pas directement de l'eutrophisation. En effet, il s'agit de deux phénomènes distincts mais avec une source commune : le déversement des eaux usées sans traitement dans les milieux naturels. Ayant une source commune, la détection de contaminations bactériennes fécale peut alerter d'une possible pollution à l'eutrophisation et de son évolution (aggravation, diminution) dans le temps.

1980 : Après quatre années de stagnation des concentrations moyennes en phosphore dans le lac, celles-ci entament enfin leur régression en réponse à la mise en place de l'assainissement dans l'ensemble du BV du Léman et de la déphosphatation 10 ans auparavant. 1980 marque le début de la diminution des impacts des phosphates sur les **fonctions de régulation**.

1981 : c'est au tour des **fonctions de production** d'évoluer, avec une réduction de la production primaire mesurée relativement tôt dès 1976 et de la production secondaire en 1981. Ces deux fonctions restent toutefois à un niveau élevé et conservent les caractéristiques d'un lac eutrophe.

1982 : la biologie et **les habitats** du lac répondent à l'évolution de la physico-chimie, ce qui se traduit par des changements dans la diversité du plancton avec la restauration des stocks de poisson suite à leur baisse vertigineuse depuis 1975. Hormis ce rétablissement bénéfique pour les pêcheurs du lac, les herbiers littoraux et la zone benthique ne présentent pas d'évolutions.

Les atteintes aux fonctions se stabilisent sur une longue période avec des symptômes généralisés, malgré une diminution progressive des flux de phosphore entrant au lac.

Retour au niveau d'impact 2 locaux – permanents :

1989 : **Les fonctions de régulation** évoluent rapidement, ce qui met en évidence l'efficacité des actions de gestion entreprises. En 1989, les concentrations de phosphore passent sous le seuil des 60 µg/L dans l'ensemble du lac et les concentrations en orthophosphates dans les 10 premiers mètres est nulle la moitié de l'année, ce qui démontre que le contrôle biologique et physico-chimique se rétablit.

1992 : Peu d'années après suivent les **fonctions de production**, avec en 1992 des changements très importants dans la diversité des communautés de producteurs primaires et secondaires. Cette année-là, neuf nouvelles espèces de plancton inféodées aux milieux mésotrophes - oligotrophes apparaissent et prennent la place des espèces typiques de milieux eutrophes. Le phénomène similaire s'opère avec le zooplancton en milieu pélagique. On note également une diminution de 25% de la production primaire cette même année. Il s'agit de témoins importants de la réoligotrophisation du lac.

1994 : Les changements importants dans la production primaire et secondaire entraînent une évolution dans les **habitats** du lac. Les observations montrent un changement dans les communautés de vers benthiques (espèces oligotrophes) et la mesure d'une demande en oxygène moins importante dans l'ensemble du lac. Par ailleurs, après plus de 30 ans de quasi disparition des espèces de poissons nobles, les captures de corégones, brochets et omble-chevaliers commencent à augmenter, tandis que les captures moyennes de perches sont deux fois moins importantes qu'en 1975, en pleine eutrophisation. Ces différents indicateurs montrent que la biologie du lac change en réponse à l'amélioration de l'état trophique.

1996 (manque de données⁵) : on peut noter une amélioration importante de la qualité sanitaire des plages avec une interdiction de baignade sur 5% des plages uniquement et sur une courte période de l'année.

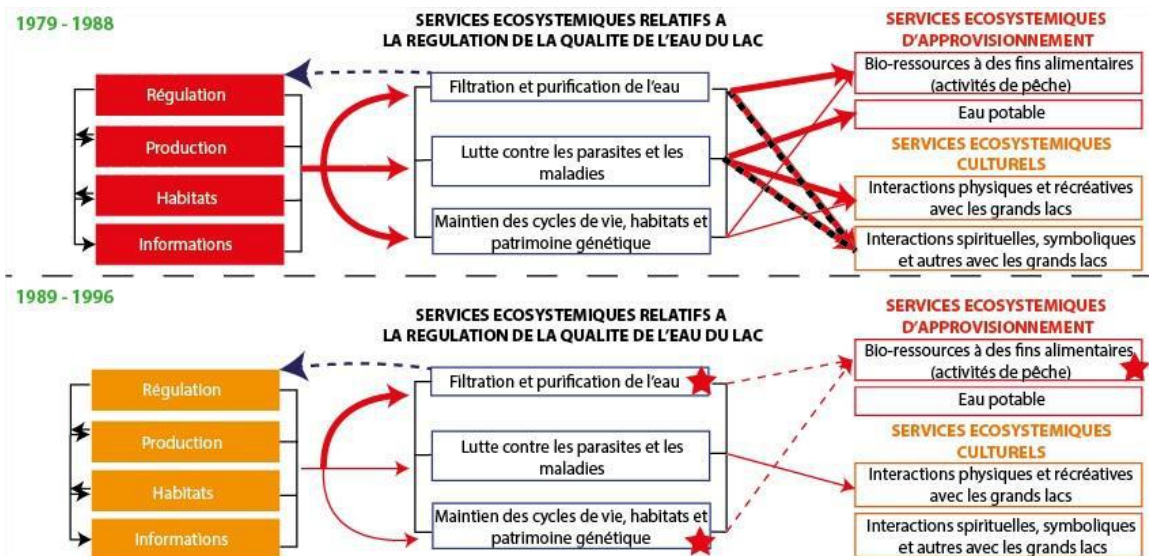


Figure 5-25 : Lente réduction des impacts

Régulation : I3 : Réduction des concentrations de P et réduction localement des contaminations fécales ; I2 : Réduction de P, concentration en orthophosphates pratiquement nulle la moitié de l'année

Production : I3 : Réduction de la production primaire et secondaire ; I2 : Changements dans la diversité du plancton avec apparition d'espèces de milieux oligotrophes-mésotrophes et disparition d'espèces de milieux eutrophes, 25% de diminution de la production primaire et développement de communautés de zooplancton oligotrophe

Habitats : I3 : Restauration des stocks de poissons oligotrophes ; I2 : Amélioration des habitats benthiques et moins de demande en oxygène pélagique qui tamponnent l'impact de la désoxygénation benthique;

Informations : I3 : Réduction des risques sanitaires globaux, mais localement de fortes concentrations de germes toxiques au-dessus des normes de qualité sanitaires pour les plages subsistent, fin des phénomènes de fleurs d'eau toxiques ; I2 : interdiction de baignade sur 5% des plages durant une courte période de l'année

La réduction des impacts sur les SE de régulation est lente, de fortes variations interannuelles des impacts subsistent. Après 1989, plusieurs changements dans les déterminants des SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux attestent d'un retour à une fourniture en SE caractéristique de lac mésotrophe-oligotrophe.

⁵ à cette époque les mesures de bactériologie sur les plages ne sont pas effectuées toutes les années, ce qui entraîne un risque d'erreur possible sur la date exacte. Les données sont également difficiles à obtenir pour renseigner de la qualité visuelle de l'eau et des paysages lacustres.

❖ Résistance du lac et changement d'état

Alors qu'il n'aura fallu que 6 ans pour que l'état trophique évolue vers l'eutrophie, la réoligotrophisation du Léman va être bien plus longue et s'étaler sur plus de 40 ans. On pourrait même considérer que cette réoligotrophisation n'est toujours pas complète aujourd'hui.

Les fonctions écosystémiques du lac vont se rétablir doucement du fait de la capacité de résistance du lac qui agit ici comme un *dis-service*. Ce n'est qu'à partir de 2004 que les **fonctions de régulation** s'améliorent avec une diminution de P en dessous de 30 μL et en 2015 en dessous de 20 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Les **fonctions de production** suivent la même tendance avec une augmentation de la diversité taxonomique du phytoplancton à partir de 2006 (CIPEL 2007). Les **fonctions d'informations** par contre, se remettent totalement du fait que plus aucune trace de contamination bactérienne fécale n'est identifiée à partir de 2010 (CIPEL 2017).

Ce retour à un bon état des fonctions d'information va permettre l'apparition d'un **feed back positif** sur les SE, car elle participe à l'amélioration de l'image du lac. A partir des années 2000, de nouvelles pratiques utilisant le lac comme support se développent (Kite-surf, Wake-surf, paddle ...) et la fréquentation du lac augmente (Figure 5-16). Cependant, ces évolutions pourraient engendrer à l'avenir de nouvelles menaces en réponse à un phénomène de sur-fréquentation du petit lac (rade de Genève), des berges et routes d'accès au lac.

Les **fonctions d'habitat** ne suivent pas les mêmes tendances de restauration que les autres fonctions. En premier lieu, les désoxygénations benthiques persistent, et ce encore aujourd'hui, ce qui signifie la subsistance d'une menace de relargage de la charge interne du lac en polluants stockés dans le fond du lac. Mais aussi, il s'opère un changement fort des communautés piscicoles du lac avec une augmentation des populations de corégones qui modifie le contrôle biologique au sein du réseau trophique. Durant toute la période d'eutrophisation et le début de la réoligotrophisation, le phosphore est l'un des principaux paramètres de contrôle de la composition taxonomique et l'abondance des communautés phytoplanctoniques et zooplanctoniques (contrôle « *bottom-up* » du réseau trophique). Mais à la fin des années 1990, un effet de contrôle « *top-down* » du réseau trophique s'opère à l'échelle saisonnière en réponse au développement du corégone : la consommation du zooplancton, notamment des daphnées (principal taxon zooplanctonique du Léman) par ces poissons va limiter le contrôle des populations de phytoplancton (Anneville et al. 2019). Le réseau trophique est alors modifié. La prédation du corégone sur les daphnées pourrait donc avoir des conséquences sur plusieurs SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux. Les daphnées ont notamment deux rôles importants dans le fonctionnement des grands lacs : (1) en tant que producteurs secondaires, elles apportent de la nourriture aux consommateurs de niveaux plus élevés et **régulent la composition taxonomique des producteurs primaires**, (2) ce sont des **organismes filtreurs** importants en milieu pélagique qui ont un effet positif sur la transparence. Le risque à long terme est de **favoriser un développement du phytoplancton, de réduire la transparence et d'impacter la disponibilité en ressources pour les poissons**. Ces changements sont favorisés par les effets de la ré-oligotrophisation du lac, favorable aux salmonidés, couplés par les effets du **réchauffement climatique** (dires d'experts). Cette évolution des populations de corégones est alors bénéfique pour le SE d'approvisionnement

en bio-ressources pour les pêches à court terme (plus de captures), mais génère un dis-service qui affecte les fonctions d'habitat et de filtration et purification de l'eau.

En réponse à l'évolution des stocks de corégones, une **monopêche** se développe au tournant des années 2000 (le corégone représente 73% des captures totales des professionnels en 2014 – statistiques pêche OFEV 2017), accentuée par un phénomène de mécanisation des pratiques de pêche visant à rentabiliser le travail des pêcheurs professionnels (Figure 5-16 : Frise chronosystémique d'évolution de la fourniture et de la demande en SE à l'épreuve des pollutions. Les captures de pêche importantes dans les années 2010 (les quantités de corégone pêchées sont multipliées par plus de 10 fois entre 1993 et 2013) questionnent sur une possible surpêche du corégone, néanmoins cela n'est pas confirmé par les scientifiques et l'action des pêcheurs semble au contraire limiter les impacts du contrôle top-down du réseau trophique engendré par le développement des corégones.

Ainsi, on observe que les actions engagées dans la restauration du Léman, couplées avec les effets du réchauffement climatique font évoluer le système écologique lacustre vers un **nouvel état**, marqué par l'apparition de nouvelles espèces, un changement du fonctionnement trophique, des impacts hérités des pressions passées et un changement de la variabilité génétique de certaines espèces. Ces effets sont cependant peu visibles, car tous les usages du lacs sont de nouveau possibles. Il ne faudrait donc pas parler de « *restauration* » du Léman, mais d'évolution vers un nouvel état favorable aux usages.

1996 - 2018

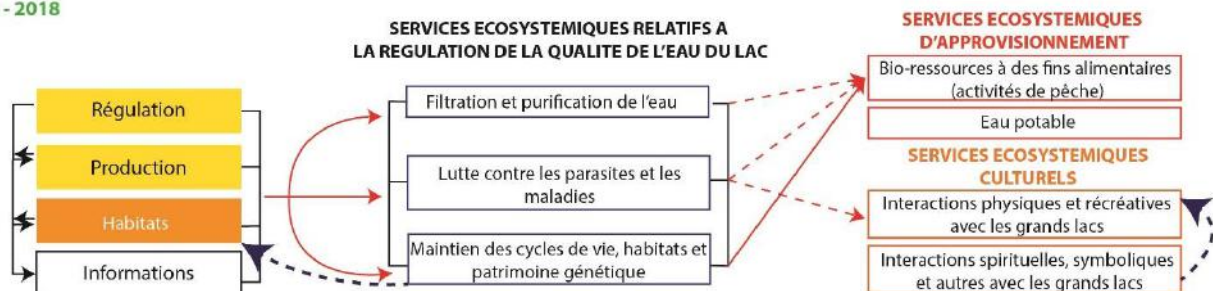


Figure 5-26 : Etat actuel

Régulation : I1 : le lac devient mésotrophe à partir de 2004,

Production : I1 : changement de l'indice de Bretum et augmentation de la richesse taxonomique du phytoplancton

Habitats : I2 : désoxygénation benthique toujours présente. La prolifération des corégones entraîne une prédation importante sur les daphnées, qui déséquilibre le réseau trophique. Il s'agit d'une menace pour les SE de régulation : filtration et purification de l'eau et de maintien des cycles de vie.

Information : I0 : à partir de 2010, toutes les plages présentent un indice bactériologique satisfaisant pour la baignade.

5.3.3 Les pollutions aux micropolluants

❖ Le rapide épisode de pollution au mercure du Léman

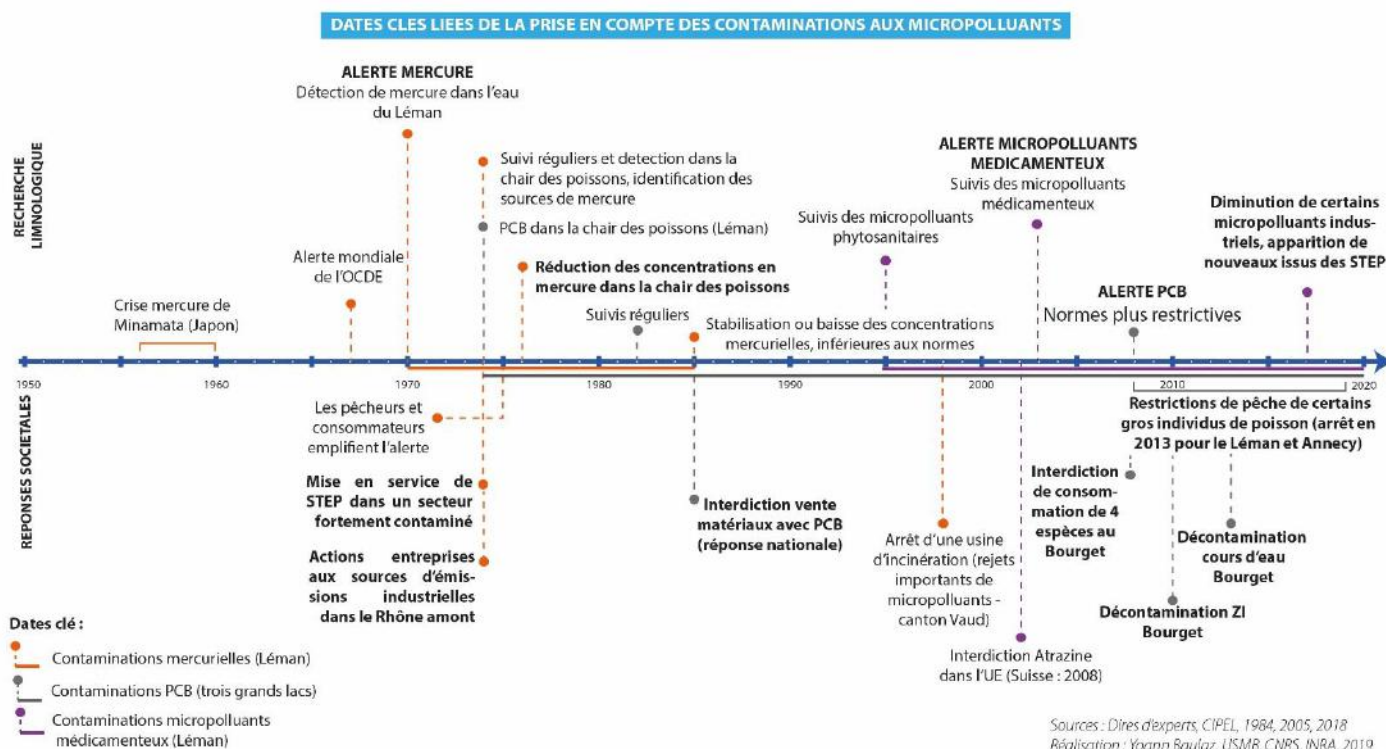


Figure 5-27 : Trajectoire de prise en compte des micropollutions dans les grands lacs alpins

Les ateliers participatifs rétrospectifs et les rapports de suivis des lacs nous permettent de reconstruire les trajectoires des contaminations aux micropolluants dans les grands lacs alpins. Trois types de micropolluants ont affecté les grands lacs alpins (Figure 5-27) : (1) le Léman a subi une contamination au **mercure**, très rapide entre 1970 et 1985, (2) une contamination aux **PCB** qui a affecté les trois lacs au début des années 2000, avec des impacts plus importants sur le lac du Bourget, et (3) une contamination aux **micropolluants médicamenteux** pour le Léman détectée dès 2005 (pas de données sur les autres lacs).

L'alerte mondiale aux contaminations mercurielles lancée par l'OCDE en 1967 et les divers accidents survenus de par le monde (voir chap 1.3.3) vont inciter certains scientifiques impliqués dans la CIPEL à effectuer des mesures en 1970 pour déterminer si le lac est contaminé. Ils détectent une contamination des poissons supérieure aux normes européennes et de l'OMS et lancent **l'alerte locale** (Figure 5-28, impacts généralisés permanents). A partir de 1973, le laboratoire cantonal de chimie de Genève confirme cette alerte, un suivi annuel est mis en place à partir de 1974 dans les eaux du lac ; poissons, sédiments et les principales sources sont rapidement identifiées dans le BV : des usines en Valais (région de Viège et Monthey) déversent des quantités importantes de mercure (10-15 kg par jour) dans le Haut-Rhône et les boues d'épuration des STEP (Figure 5-27). Les industriels concernés agissent très rapidement, **avant même que les premiers résultats des études sur le mercure soient publiés** dans les rapports de suivi du lac (CIPEL 1975), ce qui permet de réduire les apports journaliers de mercure au lac en dessous de 1 kg. Des **améliorations des teneurs en mercure** sont détectables dès 1976 dans la chair des poissons (Figure 5-28, impacts localisés permanents).

En 1975 (CIPEL 1975), des études spécifiques sur les risques sur la santé humaine de la consommation de poissons contaminés du Léman sont menées basées sur des recommandations de l'OMS. Ce rapport met en avant qu'il faudrait consommer quotidiennement une quantité de poisson supérieure à 1.5 kg de perche (dose moyenne : 219 ppb) ou 1.4 kg de gardon (dose moyenne : 276 ppb) ou 0.75 kg de lotte (dose moyenne : 450 ppb) pour que le mercure ingurgité soit susceptible d'engendrer des risques sanitaires⁶. Ces quantités étant importantes, **les pêcheurs** sont les principales populations exposées, mais aucun cas d'empoisonnement au mercure n'a été recensé.

En 1985, les concentrations mercurielles dans l'eau, les sédiments et les poissons se stabilisent ou diminuent en dessous des normes de sécurité (Figure 5-28, absence d'impacts).

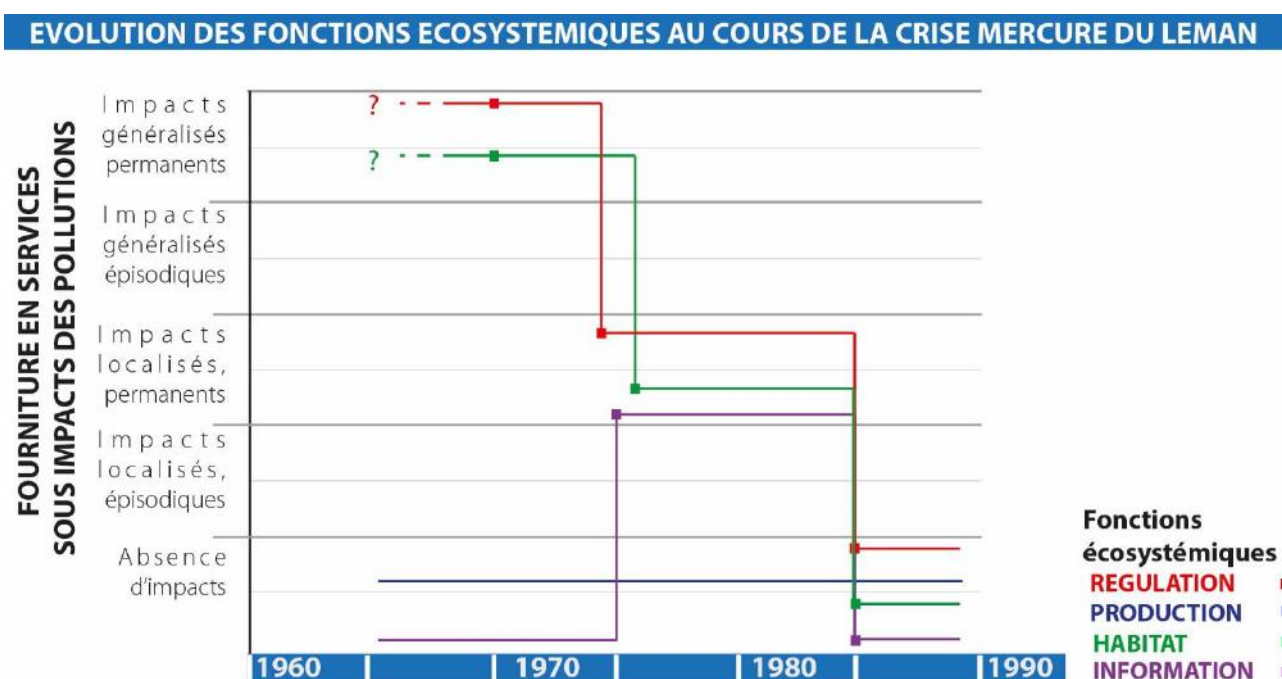


Figure 5-28 : Impacts de la pollution mercurielle sur les fonctions écosystémiques du Léman

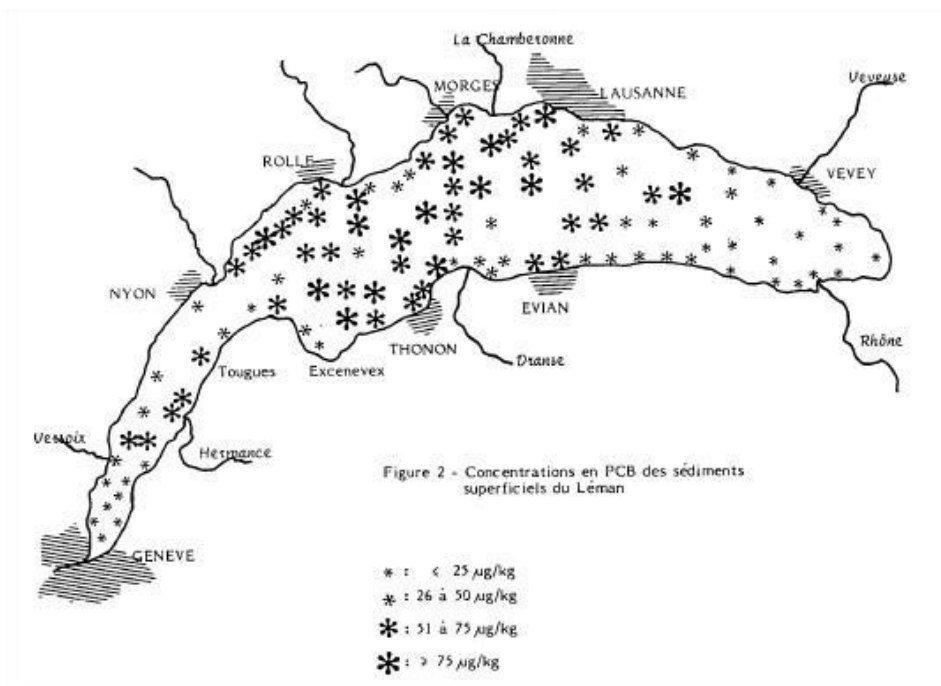
❖ Les contaminations aux PCB : une alerte à retardement ?

Des analyses des concentrations de PCB et autres métaux lourds dans la chair des poissons du Léman sont également entreprises en même temps que celles du mercure. **Les suivis réguliers des PCB** seront mis en place à partir de 1985 bien que quelques études à partir de 1978 soient réalisées sur les poissons (en 1979 et 1981 : les perches contiennent en moyenne 187 – 260 ppb de PCB et les lottes 294 – 456 ppb) et sur les sédiments (entre 9 et 103 µg/kg, moyenne : 47 µg/kg). La variabilité spatiale des contaminations ressemble à celle pour le mercure, avec une plus grande contamination dans la région de Versoix-Hermance, à proximité de STEP et décharges. La comparaison avec la pollution en PCB et DDT avec les grands lacs Américains et le lac de Constance montre que la pollution du Léman est importante (Figure 5-29) mais il existe un **manque de connaissances sur la toxicité de ces produits** à cette époque, et les contaminations des poissons restent en dessous des tolérances légales de l'époque pour l'alimentation (1000 µg/kg) (CIPEL 1995).

⁶ Ils mentionnent également que la cuisson sous forme de friture diminuerait d'environ 40% la concentration de mercure.

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires



La problématique des PCB émergera de nouveau à partir de 2006 (Pour le Léman : Figure 5-30, impacts localisés épisodiques), du fait de la détection de PCB dans la chair des poissons des trois grands lacs alpins et d'un **durcissement de la norme en vigueur concernant la teneur maximale en PCB dans les aliments** (une norme 6 à 7 fois plus restrictive que celle de l'ancien arrêté de 1988).

Cette problématique est tout particulièrement forte **au lac du Bourget**, considéré comme le lac naturel le plus contaminé en PCB de France au niveau des sédiments (valeur 40 fois plus élevée que celle du Léman) et des poissons (jusqu'à 2 fois la valeur de la norme européenne de 8 pg/g). En réponse à cette contamination, **une interdiction de consommation et de commercialisation** de l'omble chevalier, du

TABLEAU 1 - Comparaison des teneurs en PCB et pp'DDE des sédiments de divers lacs (µg/kg)

Lac	pp'DDE		PCB		Référence
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	
Léman (1983)	4.2	2.8	47	24	Nos résultats
Léman (1978)	3.7	2.0	43	28	3
Supérieur	1.7	2.2	9	8	3 - 14
Michigan	5.4	8.4	10	16	3
Huron	3	4	13	10	3
Erié	8.2	11.4	95	114	3 - 14
Ontario	12.7	12.5	57	56	3
Constance	0.3*	0.2	136*	93	15

* Moyennes de 7 sédiments côtiers

Figure 5-29 : Carte de distribution des contaminations aux PCB dans les sédiments du Léman et tableau de comparaison des teneurs en PCB et DDE des sédiments de plusieurs grands lacs (CIPEL 1985)

corégone, du gardon et de l'anguille est instaurée. Cette interdiction a un impact économique important sur la pêche professionnelle dont les captures de corégones représentent 24% des captures totales. Une seconde campagne de mesures a permis de lever l'arrêté sur le corégone

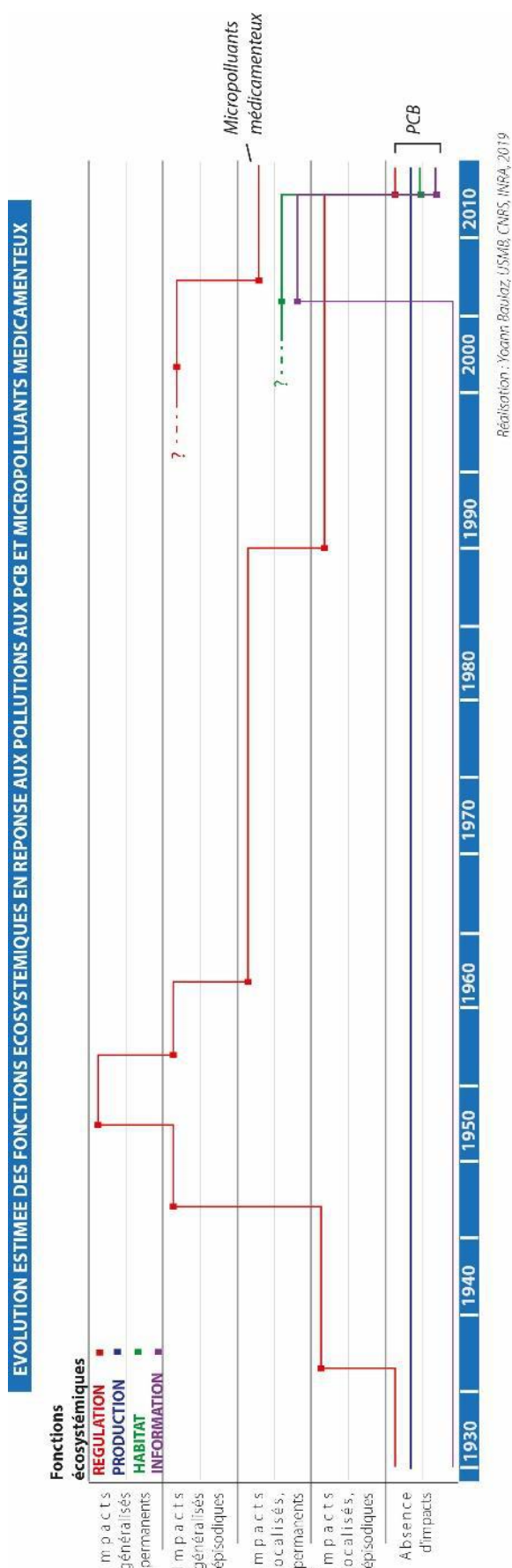


Figure 5-30 : Estimation de l'évolution des fonctions écosystémiques du Léman en réponse aux contaminations aux PCB et micropolluants médicamenteux (réalisée à partir de fig 5-30)

en 2009 (CISALB 2011) et une taille maximale de capture de l'omble et des truites lacustres est établie sur les lacs Léman et d'Annecy, levée en 2013, mais pas sur le lac du Bourget. Du fait de ces changements réglementaires la pêche à la traîne (spécifique de la capture de l'omble chevalier) par les pêcheurs de loisir du lac du Bourget est peu à peu délaissée. **Ici, la pollution engendre une perte de pratiques.**

Les sources de la pollution aux PCB pour le lac du Bourget sont essentiellement concentrées autour d'une ancienne usine de production de transformateurs électriques au Pyralène située au bord de la rivière du Tillet. En 2010 et 2013 des actions de décontamination de la zone industrielle et du cours d'eau sont menées pour réduire les apports de PCB au lac.

Les sources de PCB sur le lac d'Annecy sont indirectes, et proviendraient **d'apports atmosphériques** de PCB originaires du lac du Bourget (dires d'experts, Reigner et al, 2015), du fait de la forte capacité de volatilisation de ces polluants entre l'air et l'eau (chap 1.3.3).

Par ailleurs, ces produits sont très persistants dans l'environnement. Ainsi, les périodes de contaminations les plus importantes en PCB dans les écosystèmes lacustres sont antérieures à 1985, date d'interdiction de vente de ces produits (Figure 5-30). Cependant la quantité diminue faiblement depuis cette période et peut même augmenter ponctuellement du fait des arrivées atmosphériques non négligeables pour ce polluant (dires d'experts). Il est également possible que la

CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions :
caractérisation, modélisation et trajectoires

réoligotrophisation des lacs ait favorisé la contamination du phytoplancton et des poissons par les PCB dans les grands lacs alpins (Dachs et al. 2000). **En conséquence, l'alerte des impacts des PCB est déclarée plus de 50 ans après la période de contamination (Figure 5-30).**

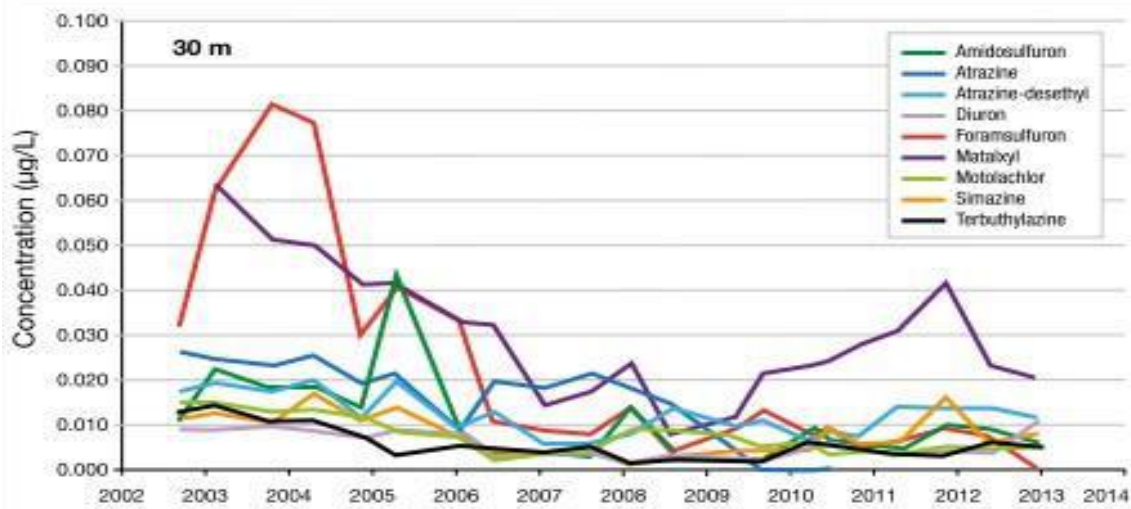


Fig. 1 - Evolution de la concentration de micropolluants régulièrement détectés à la profondeur de prélèvement des stations de pompage pour la production d'eau potable. [Source CIPEL]

Fig 2 - Flux d'enrichissement en PCB des sédiments lacustres du Léman et des lacs d'Annecy et du Bourget [source E. Naffrechoux]

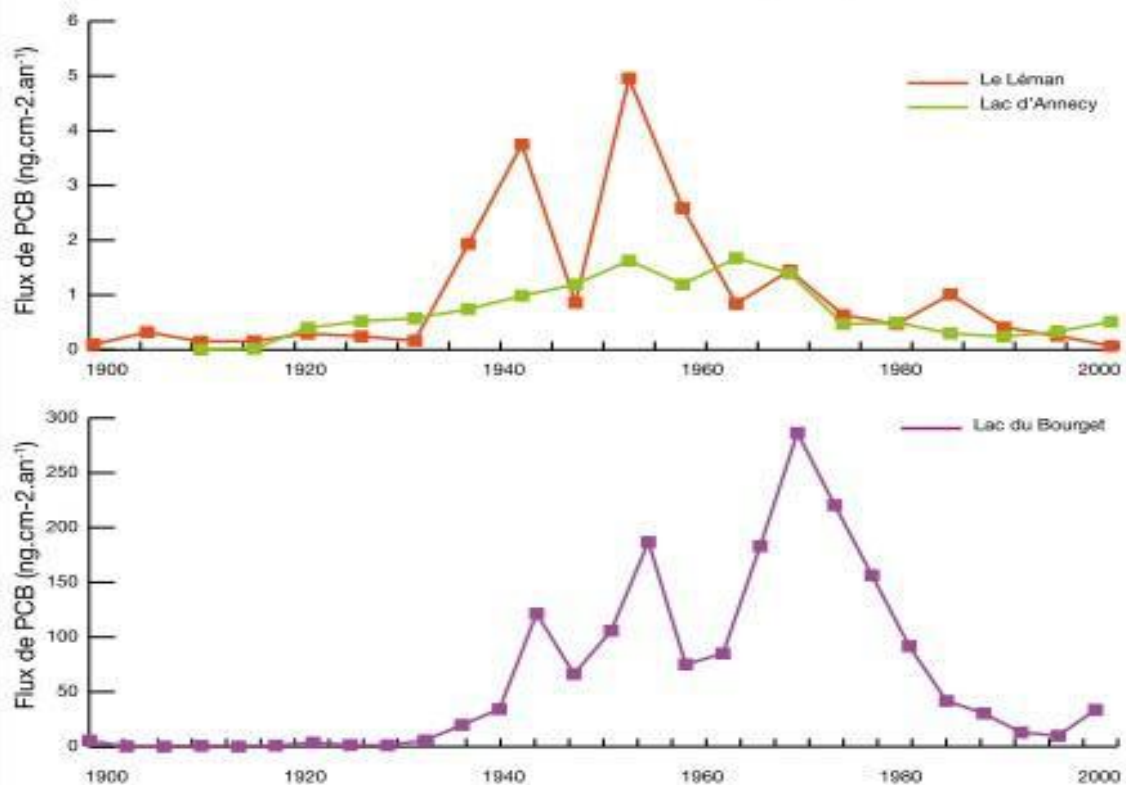


Figure 5-31 : Evolution de la concentration en micropolluants dans le Léman et en PCB pour les grands lacs alpins (Reignier et al, 2015)

❖ Les micropolluants, les nouvelles menaces

Depuis le milieu des années 1990, de nouveaux micropolluants émergents sont détectés dans le Léman (Figure 5-31), il s'agit en premier lieu de micropolluants issus de l'utilisation de **produits phytosanitaires** en agriculture et pour l'entretien des jardins (publics et chez les particuliers). Les concentrations de ces produits dans le lac ont toujours répondu aux exigences requises pour les eaux de boisson (CIPEL 1995) et sont en diminution depuis le début des années 2000 suite à **l'interdiction dans le BV français** de l'utilisation des produits phytosanitaires pour l'entretien des espaces verts.

Cependant, une autre problématique inquiétante émerge en 2005 pour le Léman associée aux **micropolluants médicamenteux** (Figure 5-31). Un suivi d'une dizaine de substances révèle la présence dans les eaux de plusieurs principes actifs médicamenteux utilisés en tant que relaxant musculaire, anesthésique, antiépileptique, antidiabétique, anesthésiant ou encore comme anti-inflammatoire. Cette pollution est difficile à traiter car (1) il n'existe **pas de valeur de référence** permettant d'estimer les impacts de ces médicaments sur les écosystèmes et sur la santé humaine du fait d'un manque de connaissances, notamment sur de possibles effets cocktails, (2) présence **de sources variables** à la fois diffuses (traitements animaux en agriculture) et ponctuelles (industrie pharmaceutique, hôpitaux, eaux usées), (3) des **milliers de nouvelles molécules** potentiellement « *micropolluantes* » sont mises sur le marché chaque année. La variabilité des sources de pollution fait de la question des micropolluants médicamenteux une problématique complexe qui ne peut être résolue uniquement par l'application de procédés techniques d'épuration des eaux spécifiques dans les STEP (CIPEL 2013).

Au niveau local, des mesures ont été prises par les **industries pharmaceutiques** pour réduire les émissions ayant permis une réduction des flux entrants au lac (Figure 5-31) et au niveau du **gouvernement français**, un plan de lutte contre les micropolluants (2016 – 2020) est en vigueur. Il serait nécessaire de sensibiliser les populations à une réduction de la consommation de médicaments à la juste dose, sans rejet des excédents dans les éviers et toilettes et mettre en place des traitements par filtre à charbon dans les STEP ou procédés d'ozonation qui permettraient de réduire de 25 à 80% les charges de micropolluants déversés dans le Léman (CIPEL 2013). Ces procédés techniques engendrent par contre des coûts importants, ce qui limite leur mise en application. Enfin, la pollution par les **micropolluants plastiques** issue de la dégradation des déchets dans le BV est une problématique émergente qui nécessite d'être mieux suivie et documentée.

De par les caractéristiques physiques spécifiques communes à tous les types de micropolluants (effets nocifs à faibles concentrations, particules fines de forte densité, forte persistance dans l'environnement, transmission dans les chaînes trophiques), ces produits vont avoir des impacts similaires sur les SE. A la différence de l'eutrophisation, qui est une **pollution qui affecte l'ensemble des fonctions et SE des grands lacs**, les micropollutions vont avoir des **impacts réduits sur quelques types de fonctions** : les fonctions de régulation vont en premier lieu être affectées, puis les fonctions d'habitat, mais essentiellement quelques espèces, notamment celles situées en haut des réseaux trophiques. Les fonctions d'information sont affectées à partir du moment où des risques sanitaires sont avérés. Les SE d'approvisionnement et culturels vont être affectés par cette pollution par le biais de normes et non d'atteintes majeures sur les écosystèmes.

Les contrôles physico-chimiques des perturbations associées aux **fonctions de régulation** vont jouer un rôle important en limitant la dispersion des polluants dans l'eau. On observe alors généralement un gradient de contamination décroissant à partir des sources d'émissions des pollutions dans l'écosystème, visible au niveau des sédiments des lacs. Par contre, comme ces produits sont peu dégradés dans l'environnement, leurs concentrations dans les sédiments peuvent perdurer et contaminer peu à peu de nouvelles zones du lac avec les courants et brassages. Tout comme pour le phosphore, une partie des micropolluants peut être stockée dans les sédiments, mais également remobilisée par le relargage de la charge interne. Ces processus physico-chimiques peuvent ainsi agir à la fois en tant que services et dis-services pour le lac.

Les micropolluants sont des pollutions qui **gènèrent des risques sanitaires** à l'issue d'une exposition répétée ou durant une longue période de temps. Ces particules vont se positionner dans la colonne d'eau ou sédimer dans le fond des lacs, elles vont pénétrer dans les réseaux trophiques par les consommateurs primaires et contaminer peu à peu l'ensemble du réseau trophique par **bio-concentration** et **bio-amplification**. L'homme se situant en bout de réseau trophique peut potentiellement recevoir la charge en micropolluants la plus élevée. Les **SE d'approvisionnement en eau potable et en bio-ressources** vont être les SE les plus sensibles à ce type de pollutions.

Bien que non visibles, les micropolluants peuvent avoir de forts impacts sur **la demande en SE**, car ils peuvent entraîner des limitations d'accès ou des interdictions de pratiques, comme c'est le cas pour la pêche au lac du Bourget. De manière plus générale, ces limitations d'accès peuvent générer des impacts indirects sur **l'image globale du lac** et des réductions du SE d'interactions spirituelles, symboliques et autres avec la biodiversité.

5.3.4 La fourniture en SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux sous contraintes des pollutions

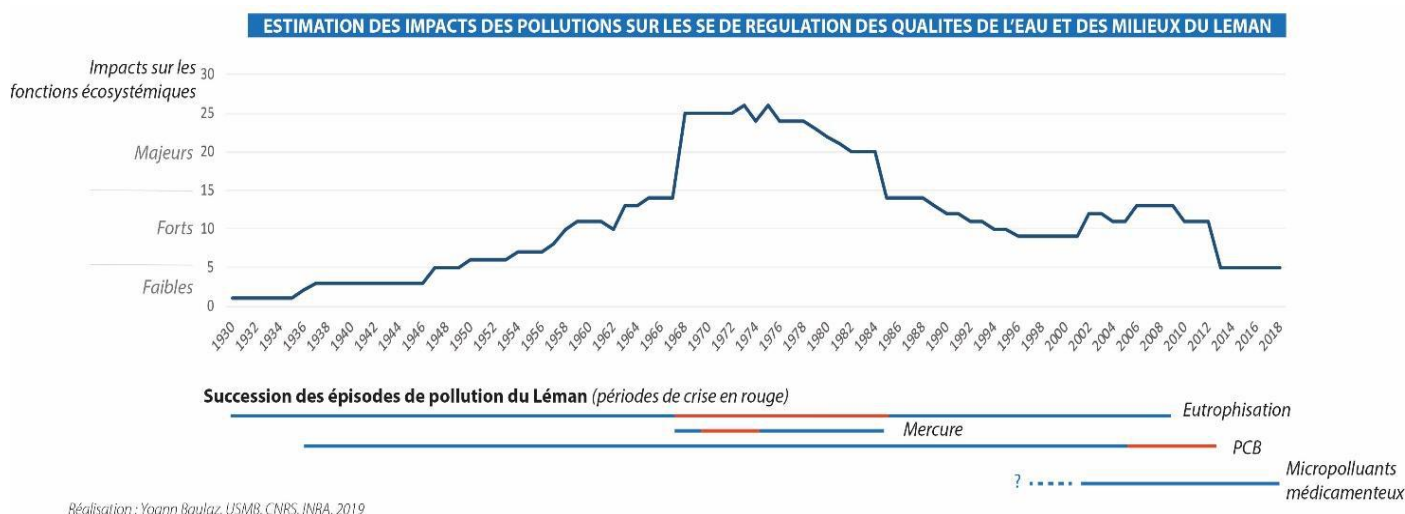


Figure 5-32 : Trajectoire d'impact écologique sur la fourniture en SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux du Léman

Les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux des grands lacs alpins ont subi une série **d'impacts majeurs cumulés** depuis le début du XXème siècle qui ont gravement affecté

leur niveau de fourniture. En conséquence, la fourniture des SE d'approvisionnement et culturels en synergie avec eux a été réduite.

A partir de nos estimations des impacts des pollutions et dépollutions sur les fonctions écosystémiques du Léman, il est possible de dégager une **trajectoire d'impact et de réponse écologique des grands lacs aux pollutions** (Figure 5-32). Cette courbe a été réalisée à partir de la somme des niveaux d'impacts estimés sur les fonctions écosystémiques de chacune des pollutions du Léman (ajout des impacts estimés des courbes Figure 5-16, Figure 5-28 et Figure 5-30). Cette représentation donne une estimation des **tendances d'évolution** des fonctions écosystémiques sous impact des pollutions. Cette modélisation rend possible la mise en évidence des périodes d'impacts cumulés sur les fonctions écosystémiques des grands lacs. De par les relations intrinsèques entre les fonctions écosystémiques et les SE de régulation, il est possible d'interpréter cette courbe comme une **estimation de l'évolution de la fourniture des SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux**.

Ainsi, on observe une diminution constante des niveaux des SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux entre les années 1930 et les années 1970, affectés à la fois par les effets de l'eutrophisation, des contaminations aux PCB et mercurielles, une stagnation des impacts à leur plus haut niveau durant toute la décennie 1970, avant la diminution progressive des impacts. Deux **crises majeures** liées aux pollutions ont affecté ces SE pour le Léman (Figure 5-32) : une première survenue dans les années 1970, caractérisée par les impacts cumulés au plus fort de l'eutrophisation et des pollutions mercurielles et une seconde crise au début des années 2000, liée à la prise en compte des problématiques de micropolluants phytosanitaires, médicamenteux et plastiques. Entre ces deux crises, il y a un manque de connaissances des impacts des PCB sur les fonctions d'habitat, si bien que la crise PCB pourrait avoir démarré bien plus tôt en réalité. La courbe d'impact présentée dans la Figure 5-32 est donc associée à un **niveau d'incertitude** fort lié au manque de données à certaines périodes.

Les crises sur les **bouquets de SE associées aux qualités de l'eau et des milieux** ont eu des répercussions fortes sur le bien-être des bénéficiaires, l'état global du lac et son image et on remarque que **les impacts ne sont pas revenus à leur niveau le plus bas** avant 1930. Une nouvelle crise va peut-être survenir dans un avenir proche, liée aux problèmes de micropollution médicamenteuse, dont les effets sur les fonctions d'habitat sont méconnus aujourd'hui, accentués dans un contexte de réchauffement climatique.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a mis en avant que les **SE des grands lacs alpins ne sont pas invariants dans le temps** et sont très dépendants des qualités de l'eau et des milieux, mais pas uniquement. La succession de pollutions qu'ont subi les grands lacs alpins ont fortement modifié les fonctions écosystémiques et ont nécessité la mise en place d'actions de gestion visant à réguler les charges polluantes entrant aux lacs. Les impacts sur les SE prennent part à différentes échelles, tant spatiales que temporelles, ce qui permet de confirmer l'importance de l'étude des aires de fourniture et de demande en SE.

La gestion des grands lacs a eu pour effet de restaurer ou préserver les SE d'approvisionnement et culturels, mais des nuisances subsistent toujours sur les SE de régulation. Paradoxalement, la qualité retrouvée de l'eau et des milieux lacustres semble participer fortement à l'attractivité des territoires lacustres, ce qui fait émerger de nouvelles

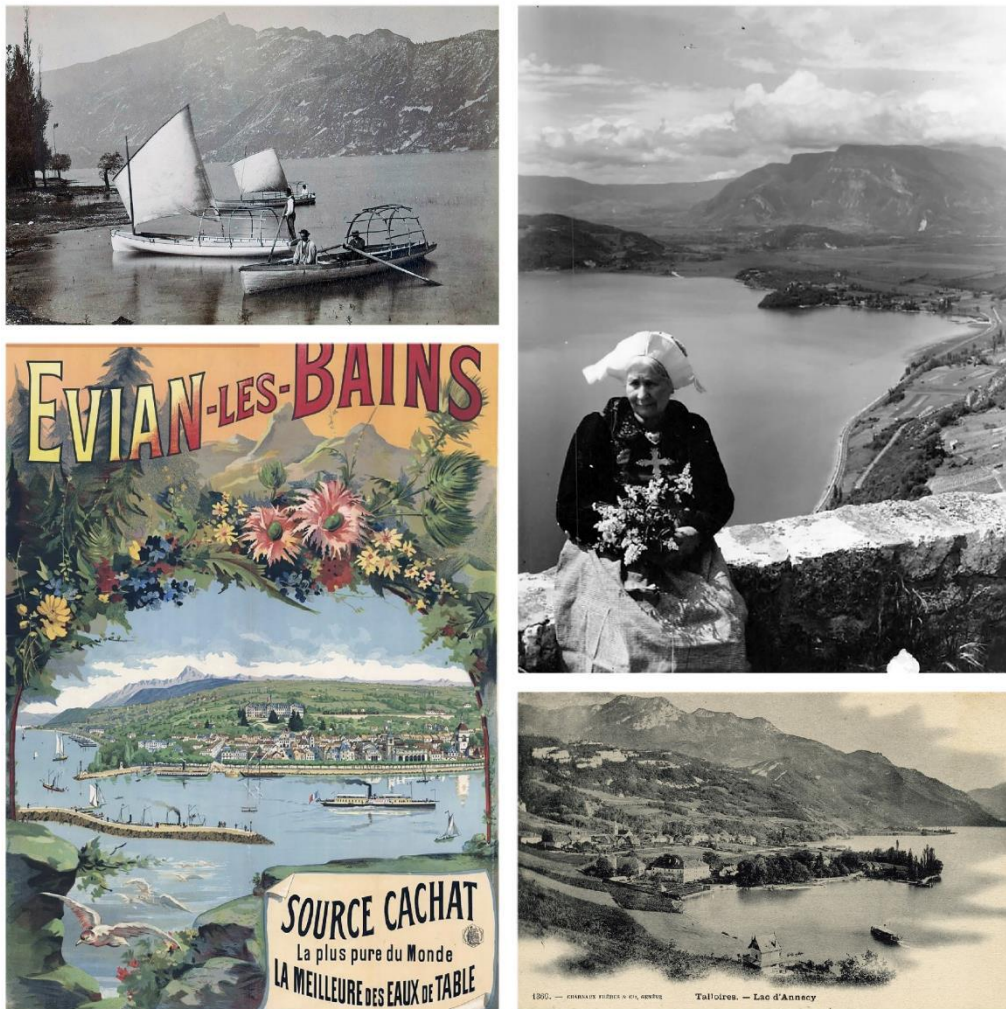
CHAPITRE 5

Services écosystémiques des grands lacs alpins à l'épreuve des pollutions : caractérisation, modélisation et trajectoires

pratiques, de nouveaux bénéficiaires mais également de nouvelles problématiques. De plus, le lac n'a pas retrouvé son état pré-eutrophisation et il « *hérite* » des impacts des pressions passées, semblant évoluer vers un nouvel état qui questionne les conditions de la durabilité de la gestion des lacs.

L'adaptation du modèle en cascade des SE a permis d'évaluer à un instant « *t* », ou bien dans une approche rétrospective les impacts des pollutions sur le bouquet de SE associés aux qualités de l'eau et des milieux. La modélisation de l'évolution des fonctions écosystémiques a mis en avant la trajectoire d'impact et de réponse écologique aux perturbations. Cette modélisation facilite **l'analyse des trajectoires d'impact et de réponses écologiques** aux perturbations. En revanche, le modèle en cascade semble insuffisant pour envisager les trajectoires de réponses sociétales. Un modèle conceptuel plus large, prenant en compte le système de gouvernance des SE est à développer. C'est l'objet du chapitre 6.

Chapitre 6. Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des services écosystémiques à l'épreuve des pollutions



Archives des grands lacs alpins (avant 1950) : Barques de pêcheurs au lac du Bourget ; Belvédère de la Chambotte (Bourget) au début du siècle ; Affiche promotionnelle des eaux d'Evian ; Talloires et le lac d'Annecy

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

La succession des problèmes de pollution qu'ont subi les grands lacs de pays développés depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle s'est apparentée à une véritable « *course d'obstacles* » à laquelle il a fallu faire face (Meybeck 1990). Il en résulte, au fil du temps, des changements d'état du système, à des degrés plus ou moins forts, si bien que les **SSE sont instables et jamais stabilisés**.

Analyser le fonctionnement d'un SSE revient à étudier les interactions et dynamiques entre chacun de ses compartiments. La complexité de la tâche nécessite l'utilisation d'un modèle conceptuel pour cadrer les analyses et synthétiser les informations. Ce modèle peut prendre plusieurs formes, l'une des plus courantes étant une représentation schématique du SSE. La difficulté de ces schématisations est d'être en mesure de modéliser l'état et le fonctionnement d'un SSE qui est dynamique.

Tout ceci souligne le contexte d'incertitude opérationnel et scientifique dans lequel s'inscrit ce chapitre. Son objet est de répondre aux questions suivantes en relation avec l'hypothèse 2 : *Comment modéliser le système grand lac – BV – société pour qu'il réponde aux enjeux de la gestion ? Comment appliquer un tel modèle ? Quelles sont les variables et interfaces qui composent le SSE des grands lacs ?* Ce chapitre issu de la fusion des deux trajectoires méthodologiques (chap 4.1.3) va conduire à considérer le territoire lacustre comme un SSE.

Pour parvenir à **mieux anticiper les problématiques** découlant des relations société-écosystème, il est nécessaire de développer un nouveau cadre conceptuel d'analyse des SSE, car ce type d'outil manque à l'étude des grands lacs (Carpenter et al. 2007, Abbott et al. 2019). L'objectif est de construire un **modèle** qui organise et croise les informations nécessaires à l'analyse fonctionnelle du système grand lac – BV – société : **le modèle SOALP** (*Social ecological systems, alpine lakes and Pollutions*). Il repose sur un couplage de deux sous-modèles : **le modèle en cascade des SE et le MTF** (chapitre 3). Notre démarche cherche à appliquer ce modèle dans une approche rétrospective pour analyser la construction des SSE. Pour ce faire, nous allons analyser **l'imbrication des dynamiques d'impacts et de réponses** écologiques et sociétales aux pollutions. Cette approche nous conduira à mobiliser les trajectoires (1) d'impact sur les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux développées au chapitre 5.3.4 et (2) les trajectoires sociales « *représentation – action* » qui ont fait l'objet de quelques travaux présentés en chapitre 1.3.3.

Le modèle conceptuel va être appliqué aux SSE des grands lacs alpins et du lac Saint-Pierre (LSP). Nous verrons que l'analyse fonctionnelle de ces SSE permet d'identifier les facteurs endogènes ou exogènes qui modifient la dynamique des bouquets de SE, d'où une ouverture vers **la gestion intégrée et adaptative**. La gestion adaptative a pour but de maintenir et améliorer l'état des SE affectés par les activités humaines pour les générations présentes et à venir, ainsi que de prévenir les dommages futurs sur les écosystèmes et les SE (Pahl-Wostl 2007).

Ce chapitre est alors composé de trois parties : une première qui présente la structure et les composantes du cadre conceptuel d'étude des SSE des grands lacs, une seconde proposant plusieurs applications de ce cadre, une dernière qui met en avant les composantes du système à partir des enseignements tirés des applications.

A noter : ce chapitre a fait l'objet d'un article en cours de soumission à People and Nature : « Le socio-écosystème du Léman : modélisation et portée générale ». Le but de cet article est de présenter le cadre conceptuel du SSE grands lacs alpins - BV - société.

6.1 Structure et composantes du SSE SOALP

❖ Les spécificités du modèle

Les SE et SSE sont des concepts complémentaires et imbriqués, les SE étant souvent vus comme des productions des SSE (Berkes and Folke 1998). Le concept de SSE est néanmoins plus large et vise à décrire les divers types d'interactions entre systèmes sociaux et écologiques, mais aussi entre le SSE considéré et les systèmes adjacents (prise en compte des forçages) et enfin à inclure la gouvernance du système.

Il n'existe probablement pas de cadre conceptuel généralisable et applicable à l'ensemble de tous les cas traités comme des SSE. En ce qui concerne les grands lacs, il n'existe pas non plus de cadre d'application coordonnant les concepts de SE et de SSE et intégrant correctement à la fois les dynamiques du système écologique (BV et lac) et du système social (bénéficiaires des SE et gestion), malgré l'intérêt scientifique croissant pour l'étude des SE des grands lacs (Allan et al. 2017, Sterner et al. 2020).

Considérant l'ensemble de ces points, il a été décidé de développer un cadre conceptuel spécifique analytique du fonctionnement du SSE des grands lacs alpins. Le modèle en cascade des SE adapté au cas des lacs dans le chapitre précédent est intégré à ce cadre conceptuel. Les relations qualités des eaux et des milieux et SE (chapitres 5) ainsi que l'état de l'art sur le système grand lac - BV - société et les concepts de SE et SSE aident à définir un « *cahier des charges* » qui fixe les attendus suivants de notre cadre conceptuel :

- (1) Développer un **point de vue intégratif** entre deux sous-systèmes, l'un écologique et l'autre social.
- (2) Considérer l'écosystème comme un fournisseur SE (Binder et al. 2011) et **situer les SE à l'interface entre les deux sous-systèmes**, ce qui suppose d'inclure l'accessibilité aux SE et les pratiques.
- (3) Considérer l'ensemble des composantes et interactions du SSE aboutissant à **la production, la régulation et la valorisation des SE** fournis par le plan d'eau.
- (4) Prendre en compte la relation forte entre les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux et les SE d'approvisionnement et culturels (chapitre 5), nous invitant à prendre en compte les **bouquets de SE** (dis-services inclus) et les multiples échelles spatiales et temporelles pertinentes dans ce contexte.
- (5) Etre orienté « *action* » (chap 3.3) pour aider à concevoir et organiser des **outils opérationnels** en relation avec le suivi et la gestion adaptative des grands lacs alpins.

Ces attendus sont à mettre en œuvre en tenant compte des **spécificités fonctionnelles du milieu** considéré. En plus de forçages classiques climatiques, sociaux-économiques et des pressions dues aux pratiques appliquées à l'écosystème lui-même, le modèle conceptuel doit rendre compte de deux traits fonctionnels majeurs de ce SSE :

- (1) La forte dépendance vis-à-vis des **hydrosystèmes amonts dans le BV et aval** (posée en terme de risques relatifs à la qualité et surtout à la quantité d'eau).

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

(2) **La non coïncidence entre les aires de fourniture et demande en SE**, c'est-à-dire considérer les territoires à l'amont des lacs qui contrôlent la qualité des eaux et la distribution des bénéfiques et bénéficiaires des SE des grands lacs (chap 5).

Il est courant de donner un nom aux modèles conceptuels des SSE. L'ensemble des points listés ci-avant définissent la spécificité de notre modèle et ses grandes propriétés et en conséquence, nous avons décidé de l'intituler : "*the social-ecological systems of great alpine lakes and pollution*" (le modèle SOALP)

❖ Les modèles conceptuels de base : la cascade des SE, le MTF et les trajectoires

En fonction de ces contraintes et des attendus, nous avons fusionné et modifié deux cadres conceptuels des SSE et des SE : (1) le cadre conceptuel du **Management and Transition Framework (MTF)** qui est utilisé pour l'analyse des politiques publiques et dont l'objectif est d'apporter une meilleure compréhension des systèmes de gouvernance de l'eau et des processus de transition vers une gestion durable de cette ressource (Pahl-Wostl et al. 2010) qui a été présenté dans le chapitre 3, et (2) l'adaptation du **modèle en cascade des SE** proposée en chapitre 5. Chacun de ces deux modèles présente des spécificités intéressantes dans le cadre de notre étude. La cascade des services propose un **cadre structuré** d'étude des SE des grands lacs, permettant de différencier les fonctions écosystémiques des SE notamment, mais n'est pas suffisante pour l'étude du système social et de la gouvernance du système. A l'inverse, le modèle MTF développe en profondeur les composantes du **système social et de la gouvernance** des écosystèmes aquatiques et décortique les facteurs qui conduisent à la mise en place d'actions de gestion. La complémentarité de ces deux cadres conceptuels permet de répondre en partie à nos attentes. Cependant, aucun d'eux ne traduit la grande **dépendance du lac à son BV** et MUS associés dans la fourniture des SE. Ils ne prennent pas non plus en compte **les forçages** et relations entre le SSE grand lac et les systèmes adjacents et niveaux d'organisation territoriaux qui l'englobent. Les forçages et les composantes du BV seront alors inclus à la modélisation.

De manière permanente et à des degrés plus ou moins forts, des changements d'état du système surviennent en réponse à des forçages exogènes et des modifications internes de ses composantes, si bien que les SSE sont instables et jamais stabilisés. De plus, leurs composantes sont capables de s'adapter aux changements d'état du système, ce qui rend leurs dynamiques presque imprédictibles (Levin 1998, Walker et al. 2002). Pour soutenir **l'analyse rétrospective** de l'évolution des SSE des grands lacs, nous allons étudier l'imbrication des trajectoires écologiques et sociales d'impact et de réponse aux perturbations.

6.1.1 La structure du modèle

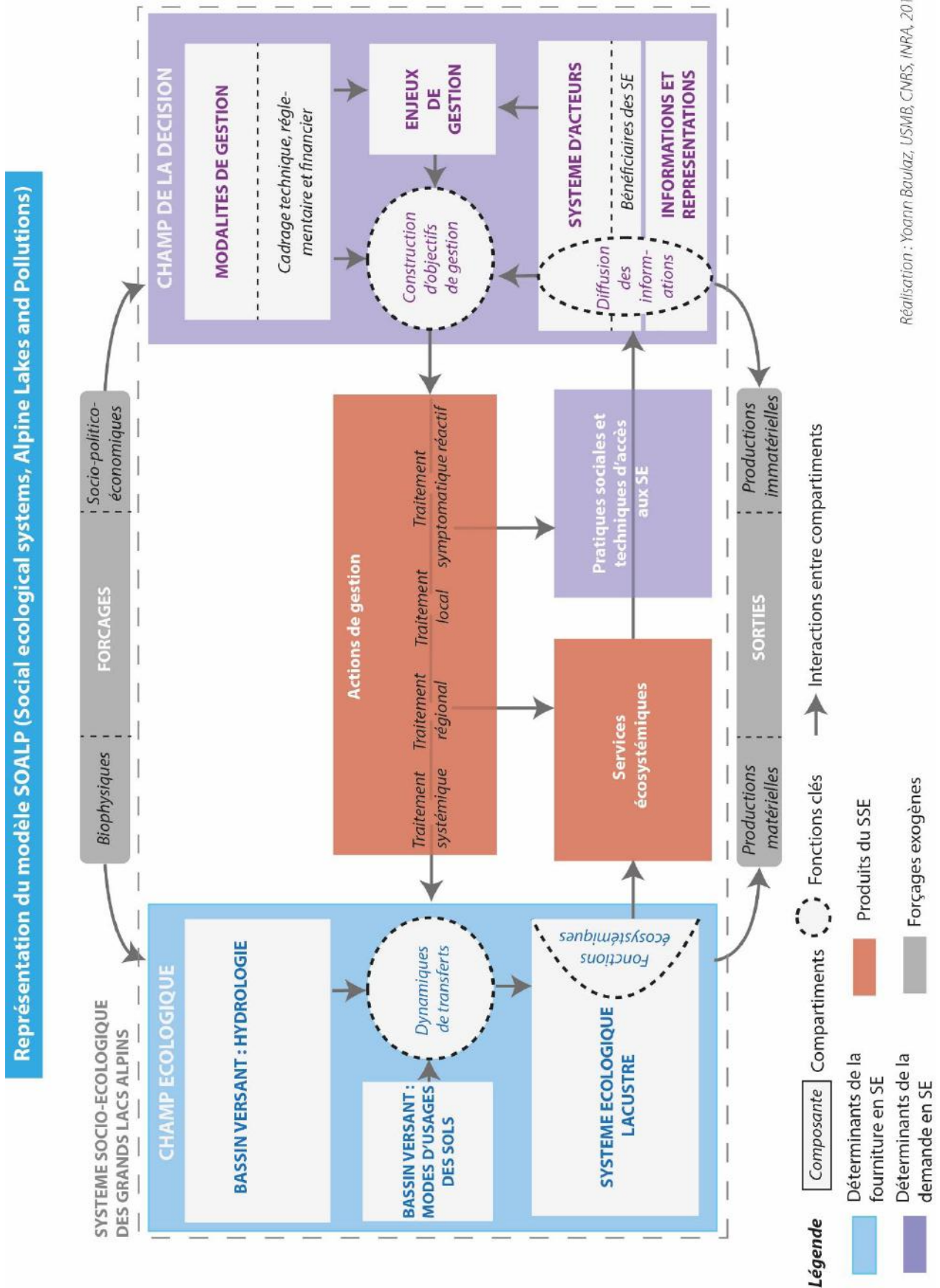


Figure 6-1 : Représentation du SSE des grands lacs alpins : le modèle SOALP (Social ecological systems, Alpine Lakes and Pollution)

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

❖ Compartiments et composantes

Le cadre conceptuel SOALP (Figure 6-1) est un **organigramme** des compartiments, composantes et interactions constituant le SSE grand lac - BV – société. La schématisation retenue met en évidence les éléments qui structurent ce système comme lieu de production, d'utilisation des divers SE fournis par le système écologique lacustre et comme lieu de production d'actions de gestion visant à réguler les perturbations sur les SE.

Les **compartiments** figurent dans des rectangles colorés. Ils représentent des ensembles d'objets de nature soit biophysiques (bassin versant : hydrologie, système écologique lacustre), soit sociaux (système d'acteurs, informations et représentations, enjeux de gestion, modalités de gestion), soit mixtes (bassin versant : MUS). Ces compartiments ont à la fois un fonctionnement propre et en interaction avec les autres compartiments du système. Ils sont constitués de **composantes** (en italique) dont certaines sont spécifiées dans la figure (exemples : bénéficiaires des SE, typologie des SE, typologie des actions de gestion), d'autres émergeront des applications du modèle dans la partie suivante 6.2.

❖ Interactions et fonctions clés

Les **interactions**, (représentées par des flèches) mettent en relation d'interdépendance les compartiments ; elles sont portées par des flux d'énergie (comme le recours à certaines pratiques et techniques d'exploitation des SE), de matière (ex : transferts hydro-chimiques entre le BV et le lac) ou d'informations (ex : des connaissances scientifiques). L'étude des modifications et émergence de ces interactions, face à un phénomène de dégradation de la qualité de l'eau et des milieux, constitue le fondement de l'application de SOALP.

Les interactions pilotent des **fonctions clés** (figurées dans des ronds pointillés) agissant soit dans le domaine social (construction d'objectifs de gestion qui résultent d'interactions entre les enjeux de gestion, les modalités de gestion ; la diffusion des informations qui est déterminée par les SE rendus par les lacs, les informations et représentation du plan d'eau et le système d'acteurs) ; soit dans le domaine écologique (les dynamiques de transferts, influencées par l'hydrologie du BV et les MUS du BV ; les fonctions écosystémiques). Ces fonctions clés sont d'une grande importance car elles assurent la stabilité du SSE et son fonctionnement dynamique. Les **dynamiques de transfert** entre le BV et le lac déterminent l'essentiel de la charge externe (quantités, qualité, types), notamment en termes de pollutions ; les **fonctions écosystémiques** fournissent les SE du lac nécessaires au bien-être des bénéficiaires ; la **diffusion des informations** influe sur les agissements des acteurs du SSE, tant des bénéficiaires des SE sur leurs manières d'exploiter les SE, que des acteurs de la gestion en les aidant à faire des choix. Enfin, la **construction d'objectifs de gestion** représente l'arène où sont décidées les actions de gestion à mettre en place.

Ces quatre fonctions clés sont associées, sous forme de **chaînes causales**, à des flux d'eau, de polluants et des états biophysiques, des SE avec des logiques d'acteurs aboutissant à intervenir sous la forme d'actions de gestion, sur les flux matériels, voire à l'amont sur les stocks. La gouvernance des SSE des grands lacs vise à diagnostiquer les problématiques qui affectent les SE, anticiper les menaces et prendre des décisions sur les actions à engager, en prenant en compte les différents enjeux des acteurs, et à organiser la mise en place des actions. Ce faisant, la gestion va générer des **bouclages** dans le SSE par les actions menées aux sources des pollutions ou sur les composantes de la fourniture, de l'accès ou de la demande

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

en SE. Souvent ces chaînes et bouclages ne sont pas linéaires et provoquent des **rétroactions**, c'est-à-dire des changements dans d'autres compartiments reliés.

Les dynamiques d'évolution des bouclages des SSE se caractérisent par des effets retardateurs, par le cumul des divers types d'inerties (écologique, administrative, de prise de conscience...), ou par des accélérations. **La trajectoire du système** est alors affectée par des ruptures, des attentes, résultant souvent à la fois de changements progressifs dans le champ du système écologique et des prises de conscience parfois brutales dans le champ du système social.

❖ Le champ écologique et le champ de la décision

Les compartiments identifiés et les fonctions clés forment deux grands champs, chacun homogène en termes de nature des interactions : (1) **le champ écologique**, qui correspond à l'ensemble fonctionnel BV – grand lac dont résulte la fourniture de SE, (2) **le champ de la décision**, associée à la demande en SE et produit des actions de gestion.

Le **champ écologique** correspond à un sous-système de composantes biophysiques et territoriales organisées en trois compartiments (1) le système écologique lacustre (2) l'hydrologie du BV et (3) les MUS du BV. Au cœur de ce champ, l'écosystème lacustre, sa biodiversité, ses habitats et les processus écologiques associés, interagissent pour produire des fonctions écosystémiques qui fournissent les SE ; cette conception reprend le modèle en cascade. Les deux composantes BV (hydrologie et MUS) produisent la dynamique de transfert vers le lac de flux d'eaux associés à des charges solides et dissoutes, polluantes incluses. Ce transfert résulte de l'interaction hydrologie – MUS déterminée par les sols et l'aménagement du territoire du BV.

Le **champ de la décision** est défini en reprenant les propositions de Pahl-Wostl et al. (2010 : "action arena" p 575) comme « l'ensemble des processus de gestion et d'apprentissage [...] permettant de répondre à un problème politique spécifique centré sur une fonction sociale », dans notre cas, de gouvernance du grand lac et de ses SE. Notre représentation est simplifiée par rapport à la version initiale de Pahl-Wostl et collaborateurs avec quatre compartiments, à savoir (1) le système d'acteurs, qui inclut les bénéficiaires des SE, (2) les savoirs et représentations, (3) les enjeux de gestion du SSE et (4) les modalités de gestion, qui s'apparentent aux possibilités d'actions de la gestion, à savoir le cadrage technique, financier, réglementaire. L'interaction entre ces trois compartiments permet la construction des **objectifs de gestion** du SSE et la production d'actions de gestion.

❖ Les compartiments d'interface

Les interfaçages société - écosystèmes sont assurés par trois compartiments entre les deux champs : (1) les **services écosystémiques** fournis par le système écologique lacustre, (2) les **pratiques sociales et techniques** qui sont une composante de la demande, déterminante pour l'accès aux SE pour les bénéficiaires (ce qui explique le sens de la flèche sur le schéma), (3) les **actions de gestion**, qui sont les mesures concrètes de gestion, applicables sur le BV, le lac, ou la demande en SE (bénéficiaires, champ de la décision, pratiques sociales et techniques d'exploitation des SE, informations et représentations).

6.1.2 Les limites du système

Les limites du système considéré correspondent à **l'aire d'influence des SE des grands lacs**. Elles associent l'aire de fourniture en SE, qui correspond à l'unité hydrologique BV-Lac, sur laquelle s'est calée le périmètre de la gouvernance de l'eau et une frontière sociale, plus diffuse et fluctuante, celle de l'aire de demande en SE (voir chap 5.1.3). Cette dernière est sous-tendue par la distribution des usages et les projets de développement qui résultent de la proximité du lac. Elle est bien entendu plus ou moins arbitraire et ajustée aux objectifs d'étude. Elle se matérialise par la répartition spatiale des bénéficiaires directs des SE rendus par les lacs ; il s'agit donc d'une limite qui évolue en fonction du service et des usages considérés.

Mais les limites sont poreuses, **le SSE n'étant pas indépendant** des autres systèmes qui l'entourent ou au sein desquels il est imbriqué (ex : Etat, Europe, système fluvial du Rhône). Le système est ouvert, il possède des entrées et des sorties (de matières, énergies, informations) (Young et al. 2006, Liu et al. 2007). Les entrées représentent des **forçages exogènes** biophysiques (ex : climat, précipitations ...) qui agissent notamment sur le champ écologique, et socio-économiques, culturels (ex : normes socio-culturelles, marchés économiques, informations scientifiques globales, lobbies économiques, lois et règlements ...) agissant sur les deux champs. **Les sorties** sont des productions exportées du SSE : matérielles (ex : poissons, énergie hydraulique, flux biophysiques aux exutoires, biens transformés ...), et immatérielles (image issue des SE culturels d'interactions spirituelles, symboliques et autres avec les grands lacs).

6.1.3 Les productions du SSE : les SE et les actions de gestion

Dans notre conceptualisation, **les SE sont une des productions du SSE**. Ils sont considérés comme des produits des grands lacs utilisés par le système social. Ils sont au cœur du modèle et en conséquence, toute modification majeure du SSE entraîne des changements plus ou moins critiques de la fourniture ou de la demande en services et in-fine de l'équilibre fourniture-demande d'un service ou d'un bouquet de SE (Roche et al. 2016). Il en résulte des besoins de gestion visant à rétablir cet équilibre en fonction des informations sur le milieu, acteurs et institutions. Interpréter les SE comme une production du système offre la possibilité d'analyser les impacts des actions de gestion à la fois sur l'écosystème, les bouquets de SE et le système social associé (Lescourret et al. 2015).

La seconde production de ce système représente les **actions de gestion** mises en œuvre pour traiter les pollutions ou les perturbations sur le système qu'elles qu'en soient les origines. Une typologie de ces actions est présentée en début de partie suivante 6.2.1 (Tableau 6-1).

6.2 Applications du modèle SOALP

Trois applications différentes du modèle sont réalisées. La première consiste à éprouver la caractéristique dynamique de SOALP et vérifier son utilisation pour des **approches rétrospectives**. Dans la seconde, nous analysons les dynamiques d'un **SE spécifique** (SE approvisionnement en bio-ressources pour les pêches, qui sera dénommé ici « *SE pêche* ») face aux évolutions des composantes du SSE. Les résultats attendus de cette application permettent d'identifier les composantes du SSE engendrant des dynamiques de la fourniture

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

et de la demande du SE et de porter un regard systémique sur le fonctionnement de ce SE dans une optique d'aide à la gestion adaptative. Cette application est menée dans le cadre d'une approche comparée de l'évolution des pêches dans les lacs Léman et d'Annecy. Enfin, la dernière application consiste à appliquer le modèle à un SSE situé dans un contexte différent de celui des grands lacs alpins : le **lac Saint-Pierre** au Québec. Cette dernière application vise à tester la portée générale du modèle et son opérationnalité à d'autres problématiques que celles que connaissent les grands lacs alpins.

Dans les trois cas, les applications seront réalisées en se référant aux trajectoires écologiques et sociales d'impact et de réponse aux pollutions.

6.2.1 Modélisation des trajectoires sociales représentation – action

Dans les SSE complexes, la construction d'une gouvernance pour faire face aux perturbations sur les SE va s'opérer par étape, selon des trajectoires de décisions itératives déterminées d'une part grâce à **l'évolution des représentations des phénomènes** et de leur prise en compte par les acteurs, et d'autre part avec la **mise en place d'actions** concrètes de lutte contre les perturbations. La construction d'un système de gouvernance et la mise en place des actions de gestion peuvent alors être étudiées au travers l'analyse des **trajectoires sociales de représentation des perturbations – action de lutte**. L'étude de ces trajectoires nous permettra d'identifier les grandes phases d'évolution du SSE des grands lacs.

Pour y parvenir, nous avons choisi de nous référer au modèle d'analyse des « *trajectoires sociales de qualité des eaux* » proposé par Lestel et collaborateurs (2017) et présenté au chapitre 1.3.3. Selon leur modélisation, ces trajectoires « *combinent la position de la société vis-à-vis des problèmes et son évolution temporelle sur deux axes principaux, la connaissance du problème et sa perception, d'une part, et l'action menée par la société d'autre part* » (Lestel et al. 2017 p. 2). La formalisation de ces trajectoires peut alors prendre la forme d'un diagramme d'évolution des perceptions – action en réponse aux perturbations.

Pour une application à l'étude des SSE des grands lacs alpins, nous avons légèrement adapté la typologie des trajectoires sociales mentionnée au chap 1.3.4. Notre adaptation propose notamment une typologie des actions de gestion mises en place sur le SSE. Le Tableau 6-1 présente les adaptations de cette typologie.

La trajectoire sociale peut être comparée à la trajectoire écologique développée au chapitre 5.3.4. Cette comparaison permet de comprendre les effets des pollutions à la fois sur le système écologique lacustre et sur la société. La Figure 6-2 correspond à la légende de la comparaison des trajectoires écologiques et sociales qui sera utilisée pour l'application 6.2.2 et 6.2.3. Cet outil rend possible l'analyse de la construction et complexification du SSE des grands lacs en réponse aux problèmes de pollution.

CHAPITRE 6

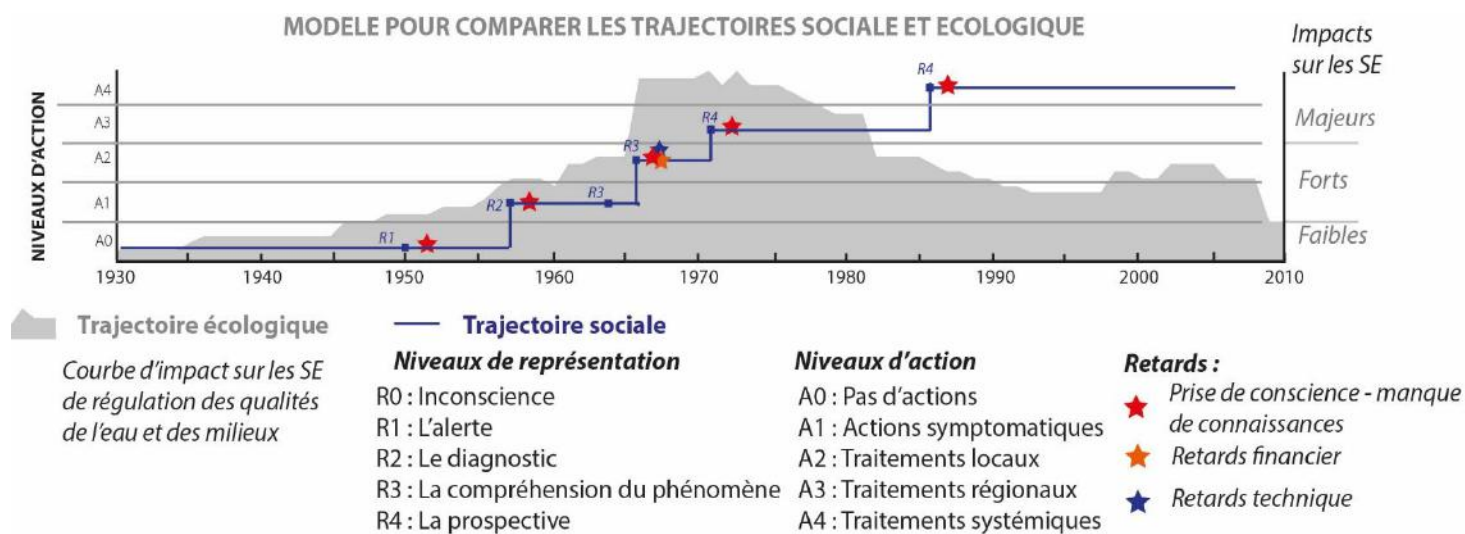
Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Tableau 6-1 : Adaptation de la typologie des trajectoires sociales de Lestel et al. 2017

Phases de perception ou d'action	Définition de la perception De Lestel & Meybeck, 2017	Définition de l'action De Lestel & Meybeck, 2017	Adaptation de la définition de la perception (on privilégie le terme de « représentation »)	Adaptation de la définition de l'action
<i>Niveau 0</i>	La perception est encore impossible car le phénomène ne fait pas encore l'objet d'une description consensuelle (scientifique ou non)	Action non déclenchée par la société	R0 : Inconscience. La représentation est encore impossible car le phénomène ne fait pas encore l'objet d'une description consensuelle (scientifique ou non)	A0 : Manque d'action. Les actions ne sont pas déclenchées, le milieu se dégrade
<i>Niveau 1</i>	le phénomène a été décrit scientifiquement ou de manière profane mais son caractère problématique sur le bassin considéré n'est pas une conviction partagée, c'est souvent à ce stade que les lanceurs d'alerte précurseurs <small>interviennent</small>	action déclenchée mais peu efficace sur le milieu qui continue à se dégrader rapidement	R1 : L'alerte. Le phénomène est décrit scientifiquement ou par les bénéficiaires des SE qui identifient les premiers symptômes sur le SSE. Les causes, origines du phénomène ne sont pas reconnues.	A1 : Les traitements symptomatiques. Des actions de gestion sont mise en place sur le lac et/ou son littoral en réaction à une perturbation spécifique visant à traiter les nuisances par le biais d'actions rapides.
<i>Niveau 2</i>	la perception partagée d'un problème et sa mise à l'agenda politique entraînent une mise en place de la surveillance du problème pour en connaître les impacts, les causes et les	action partiellement efficace : le milieu se dégrade moins vite	R2 : Le diagnostic. Perception partagée du problème, les impacts sur le SSE sont avérés. Des diagnostics des impacts, des causes et remèdes sont mis en place.	A2 : Les traitements locaux sur la charge polluante. Les actions sont localisées aux principales sources de la pollution qui entre dans le lac : le milieu se dégrade moins vite.
<i>Niveau 3</i>	la connaissance est considérée comme bonne et suffisante pour entraîner l'action, s'il y a consensus pour le faire	action totalement efficace : le milieu se rétablit partiellement	R3 : la recherche de consensus. Les connaissances sur la pollution sont considérées comme suffisantes pour entraîner l'action, s'il y a consensus pour le faire.	A3 : Les traitements régionaux sur la charge polluante : les actions sont menées sur la majorité des sources de pollution pour réduire au maximum la charge externe polluante entrant au lac : le milieu se rétabli partiellement.
<i>Niveau 4</i>	la connaissance est excellente, des modèles permettent de tester des solutions et/ou de faire des scénarios complexes de changement sur les bassins (Climat, usages du sol etc.)	L'action poussée visant au rétablissement complet du milieu est encore rarement notée.	R4 : L'anticipation. A ce stade, les connaissances sur le problème de pollution, ses causes sont excellentes pour permettre de tester des solutions et/ou faire des scénarios complexes de	A4 : Les traitements systémiques. Mise en place d'actions globales du SSE ce qui suppose en général de fixer comme objectif de réhabiliter la qualité de l'eau et des milieux en supprimant une source du phénomène pour restaurer, maintenir ou optimiser des bouquets de SE.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions



Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 6-2 : Modèle type de trajectoire sociale comparée à la trajectoire écologique obtenue pour le Léman.

6.2.2 Application rétrospective : construction du socio-écosystème du Léman sous contrainte des pollutions

Le premier modèle de gestion des lacs émerge autour des années 1930-50 avec une approche de la protection de "l'eau ressource". Il repose principalement sur des enjeux de partage des ressources entre usagers et ne considère pas ou peu la question de sa qualité. Par ailleurs, les lacs sont considérés dans la gestion au même titre que tout objet aquatique, leurs spécificités écosystémiques et d'usages ne sont pas prises en compte (chap 1.3.3). Il faudra attendre le **DCE** dans les années 2000 pour que des protocoles de suivi systématiques des lacs soient mis en place (Bouleau et al. 2017). Avant cette date, la gestion des problématiques des lacs relève d'une dynamique "bottom-up" érigée au niveau des collectivités locales qui diagnostiquent les problèmes et informent les niveaux administratifs supérieurs, et fournissent en retour un cadrage scientifique et technique et/ou des financements à l'action (Servettaz 1977, Pietu 2004).

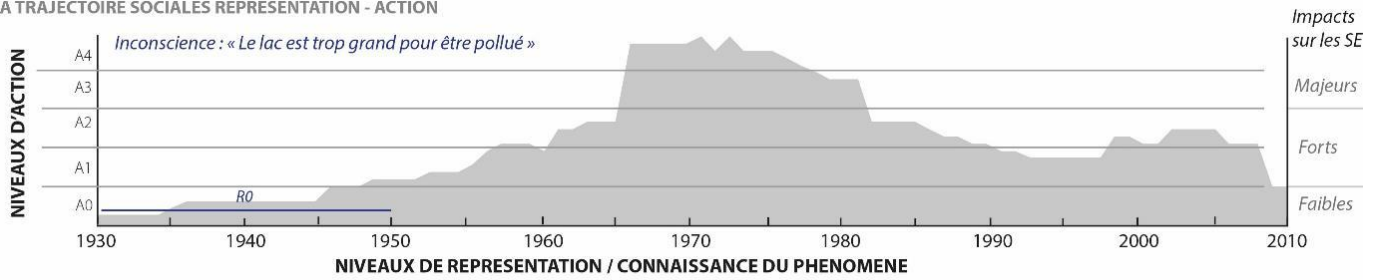
L'eutrophisation étant la **première problématique de pollution globale** subie par les grands lacs alpins, elle a donc nécessité l'instauration d'un système de gouvernance à l'échelle du lac pour organiser les acteurs et mettre en place des actions de lutte. Le SSE des grands lacs alpins s'est alors construit et complexifié en réponse aux problèmes de pollutions ; il a notamment conduit à la mise en place progressive d'un champ de la décision. Le cas de la construction du SSE du Léman est présenté ici, l'analyse des trajectoires sociales représentation – action et de la trajectoire écologique nous servent de guide pour analyser cette progression et le modèle SOALP nous aide à représenter les évolutions. Les périodes retenues pour analyser les différentes phases d'évolution de cette trajectoire sont les mêmes que celles de l'analyse des impacts de l'eutrophisation sur les SE du Léman (chap 5.3.2).

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

- ❖ Etat initial et signes avant-coureurs de dégradation des qualités des eaux (< 1950)

LA TRAJECTOIRE SOCIALES REPRESENTATION - ACTION



Réalisation : Yoann Boulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 6-3 : Trajectoire sociale représentation - action à l'état initial. La trajectoire sociale 1930-1950 est représentée par la courbe bleue ; la trajectoire écologique globale des impacts sur les SE figure en fond grisé).

Dans la première moitié du XXème siècle, l'existence de phénomènes de contamination fécale est connu à Genève, mais les autres contaminations du lac sont asymptomatiques (effet tampon du lac) faute de références scientifique et/ou médiatique (Figure 6-3, impacts faibles). La **perception du phénomène est donc nulle** (Figure 6-3), d'autant plus que l'on considère à cette époque que "le lac est trop grand pour être pollué" (dires d'experts, atelier rétrospectif).

REPRESENTATION DU SSE DU LEMAN A L'ETAT INITIAL (< 1950)

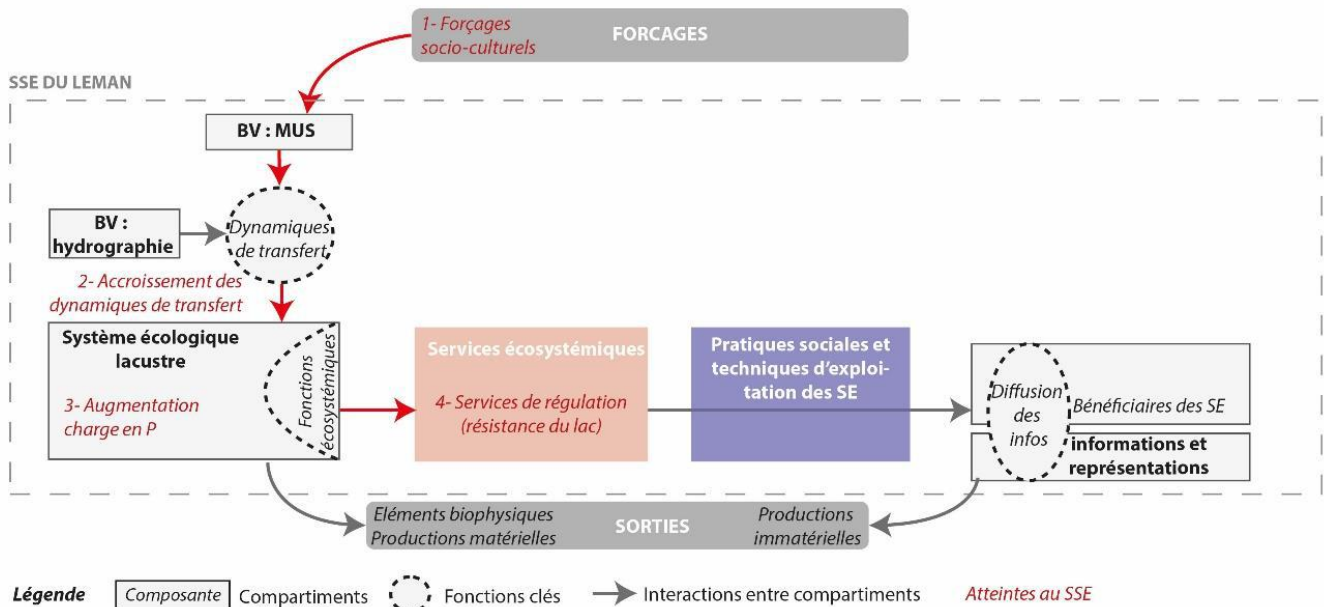


Figure 6-4 : Représentation du SSE à l'état initial et premiers processus de dégradation

Si on utilise le modèle SOALP pour modéliser la situation de l'époque, on constate que la représentation du SSE se limite à une chaîne causale. Cette chaîne met en jeu les MUS du BV qui sont modifiés du fait de forçages socio-culturels (Figure 6-4, atteinte 1) : l'accroissement de la population et de l'urbanisation, associé à un changement des normes socio-culturelles et du mode de vie (apparition des machines à laver le linge et lessives phosphatées), provoquent une **dynamique accrue de transfert au lac** en éléments fertilisants (P) et contaminants microbiens fécaux par le tout-à-l'égout (Figure 6-4, atteinte 2). Dans le lac, cela entraîne probablement un accroissement de la charge interne en P bio-disponible, mais celle-

CHAPITRE 6

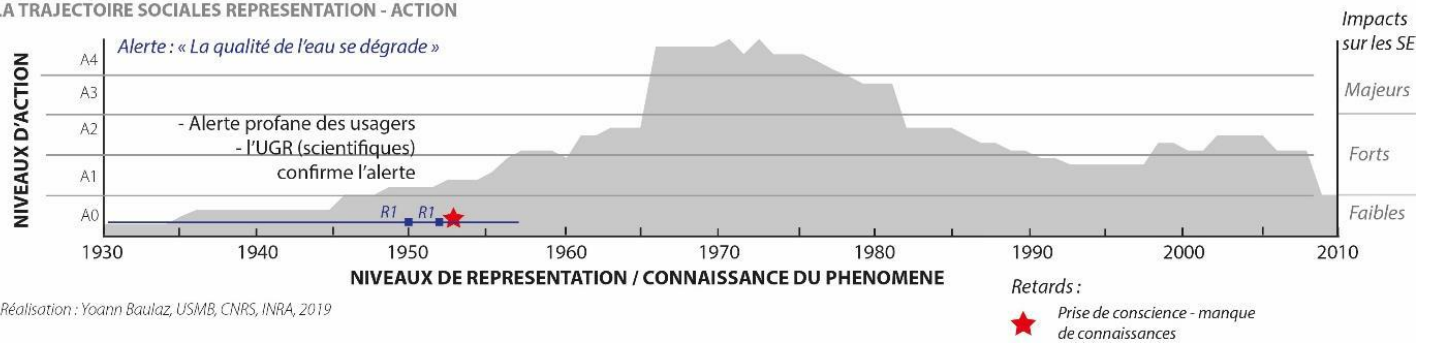
Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

ci ne dépasse pas la capacité tampon du lac (assurée par les SE de régulation) (Figure 6-4, atteinte 3).

Le SSE est composé d'une chaîne causale de processus biophysiques entre le BV et le lac. Le système écologique lacustre rend des services à des bénéficiaires, qui en tirent profit par le biais de pratiques et l'utilisation de savoirs locaux (Figure 6-4). Il n'existe pas de système de gestion globale du lac, chaque usage étant géré séparément. **Le manque de perception de la pollution, de connaissances sur ce problème et de traitement des eaux usées entraîne le Léman dans une dynamique non durable.**

❖ Alerte (1950 - 1959)

LA TRAJECTOIRE SOCIALE REPRESENTATION - ACTION



Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 6-5 : Trajectoire sociale représentation – action pendant la phase d'alerte et trajectoire écologique (légende : fig 6-2)

La détection des premiers symptômes de l'eutrophisation s'opère dans les années 1950, soit 20 ans après le début du développement démographique (Rapin et al. 1995). Deux types de **lanceurs d'alertes** (profane et scientifiques – Figure 6-5) vont être mis en relation et influencer les uns par rapport aux autres : les pêcheurs font part de leurs inquiétudes à l'Union Générale des Rhodaniens (UGR), société savante qui avertit de l'action néfaste des eaux usées et résiduares déversées dans les eaux du bassin du Rhône sur la santé. D'autres alertes scientifiques telle que la thèse de René Monod de 1956 sur la bactériologie et le plancton et le limnologue Emile Novel (Novel 1948, Monod 1956) mettent en avant d'autres changements

REPRESENTATION DU SSE DU LEMAN AU MOMENT DE L'ALERTE (1950 - 1959)

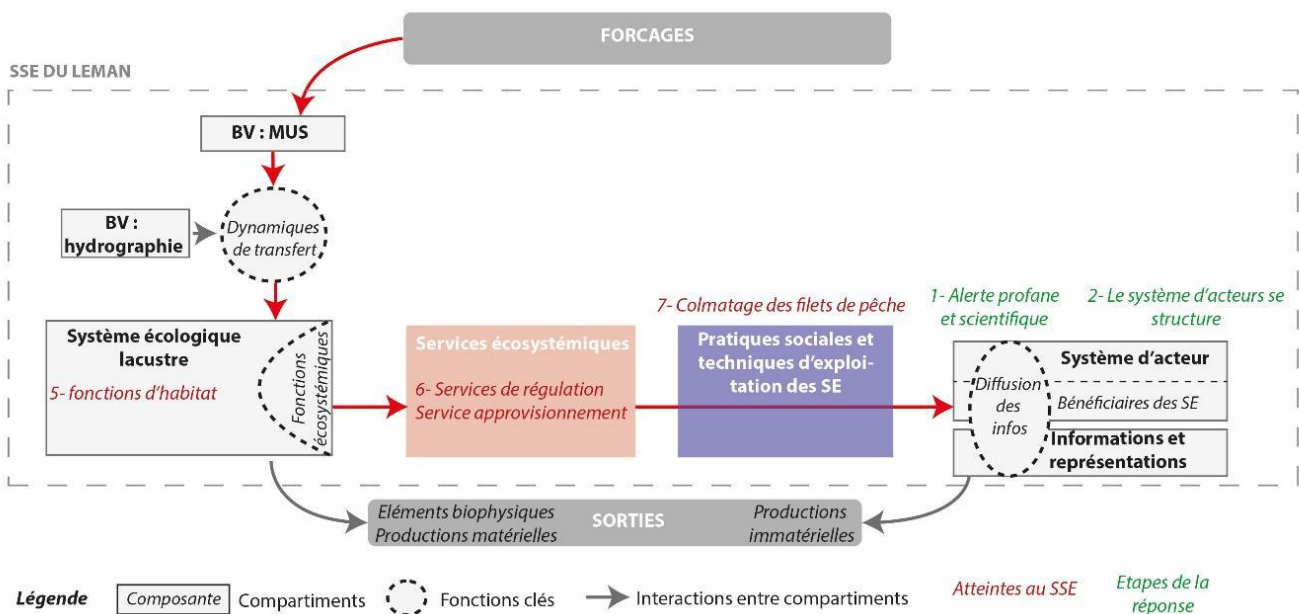


Figure 6-6 : Représentation du SSE à l'étape de l'alerte de l'eutrophisation

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

physico-chimiques et biologiques caractéristiques de l'eutrophisation ainsi que les contaminations bactériennes - déjà identifiées depuis 1912 (dires d'experts écologues ; Novel 1948, Roch 1992, Rapin 2008).

Concrètement, le seuil d'alerte est franchi (1) d'une part quand **la pêche professionnelle ne peut plus adapter ses pratiques** à l'accumulation d'algues sur les filets ou à la baisse de captures d'espèces à forte valeur commerciale (Barroin 1990), (2) d'autre part quand **les scientifiques font le constat des perturbations** associées à un niveau trophique excédant les possibilités de résistance du lac (fonctions d'habitat – Figure 6-6).

Consciente de la nécessité de diagnostiquer le problème à la fois côtés suisse et français, l'UGR organise la création (en 1952) de « *la Commission du Léman* » (plus tard renommée la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman - CIPEL)¹ chargée d'étudier l'influence des eaux usées sur le Léman. **Cette structure va devenir l'organisme coordinateur de la gestion du lac** (chap 2.3.4).

❖ Aggravation des impacts (1959 – 1963) et diagnostic de l'eutrophisation

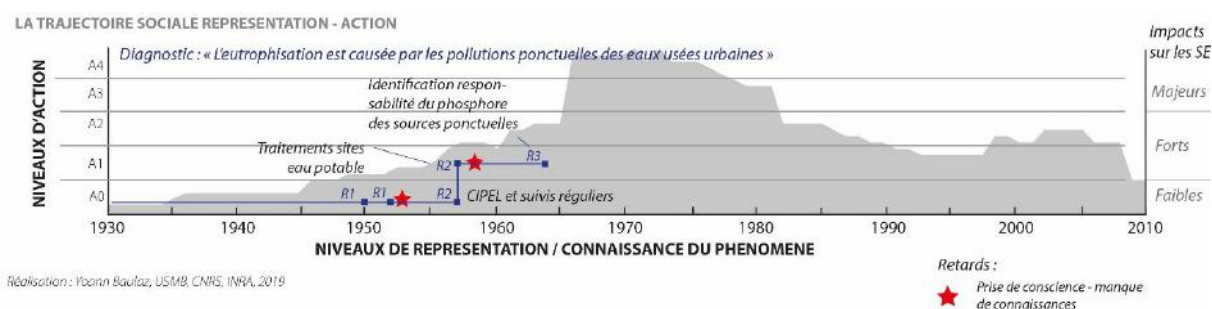


Figure 6-7 : Trajectoire sociale représentation - action au cours de la phase d'aggravation des impacts et trajectoire écologique (légende : fig 6-2)

En 1960, les membres de l'UGR proposent à leurs gouvernements respectifs d'officialiser leur commission, qui devient alors une structure inter-gouvernementale dont l'objectif est de coordonner les efforts de protection des deux pays (Figure 6-7, réponse 2 - CIPEL 1964, Roch 1992). Le monitoring limnologique coordonné par la CIPEL se structure et donne désormais des informations sur l'aggravation de la santé du lac au public et aux collectivités territoriales locales et Etats. Rapidement, le diagnostic de l'eutrophisation est posé publiquement, la responsabilité de celle-ci attribuée au phosphore et à sa source principale dès 1964 : **les pollutions ponctuelles issues des eaux usées urbaines** (Figure 6-7).

Avec le soutien d'un organisme public franco-suisse (la CIPEL), les études sur **le diagnostic des causes et origines** de la pollution vont alors bénéficier de moyens financiers plus importants et se pérenniser dans le temps. Une gouvernance globale du lac peut alors émerger, pour construire des objectifs et actions de gestion entre parties prenantes. Cela peut être

¹ Ce programme est initié par les hygiénistes riverains du Léman et membres de l'UGR (dont le docteur F.M.Messerli, chef du Service d'hygiène de la ville de Lausanne ; Paul Vivier, Bernard Dussart, tous deux limnologues et directeurs successifs de la SHL à Thonon-les-Bains - aujourd'hui UMR CARRTEL ; Emile Novel, et René Monod). Le protocole de suivi systématique étendu à l'ensemble du lac réalisé depuis 1957 est repris par la CIPEL, il comporte le suivi de : la transparence, le pH, l'oxygène et sa saturation, l'ammoniaque, les nitrites et nitrates, le phosphore total (CIPEL 1964). Ce suivi est conduit par un ou plusieurs laboratoires français et suisse.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

représenté par l'adjonction du compartiment « *champ de la décision* » au niveau du modèle SOALP (Figure 6-8, réponses 3 et 4).

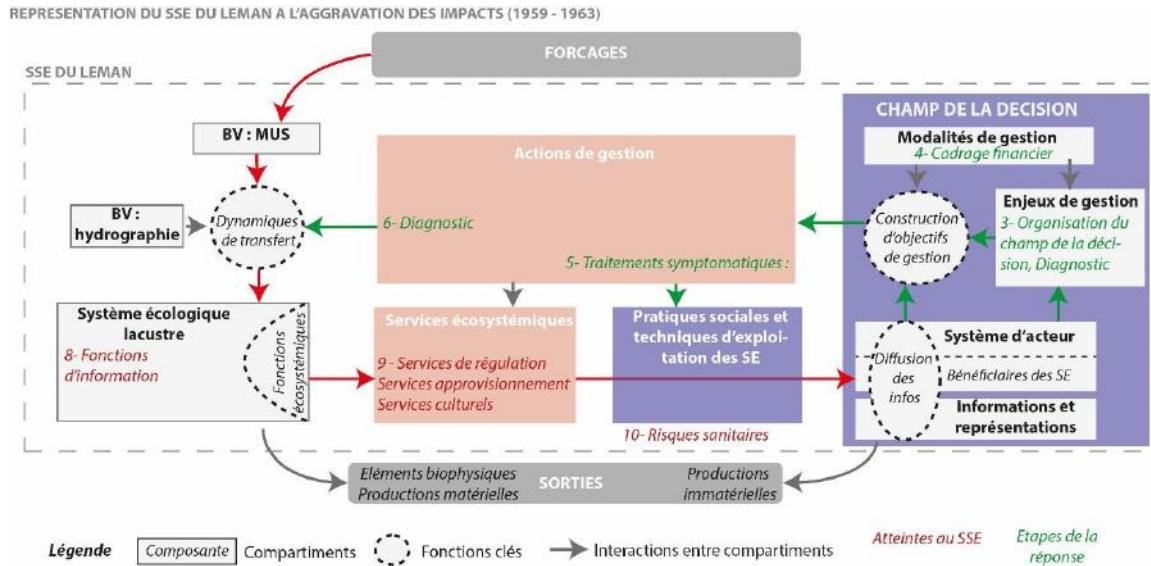


Figure 6-8 : Complexification du SSE du Léman à l'aggravation des impacts de l'eutrophisation

La problématique soulevée par les lanceurs d'alerte, puis par la CIPEL, se heurte d'abord au **scepticisme des décideurs**. Pour compléter son diagnostic et le rendre opérationnel, la CIPEL émet un certain nombre d'objectifs de gestion sous forme de **recommandations de gestion** aux Etats. La CIPEL met en avant la nécessité de traiter tous les sites de prélèvement d'eau potable à partir du Léman (filtration, chloration) pour faire face à la contamination microbienne (Figure 6-8, atteinte 10). Cette recommandation d'action est émise dès le début des diagnostics de pollution, alors que les connaissances sur l'état du BV et de l'assainissement des eaux usées sont encore incomplètes. Il s'agit d'une proposition de **traitement symptomatique**, visant à réduire les impacts du phénomène sur les SE plutôt que d'une action sur les causes (Figure 6-8, A1 ; Figure 6-8, réponse 5).

La CIPEL recommande également de renforcer les études sur les impacts des détergents sur la biologie du lac et préconise d'intervenir rapidement dans la lutte contre la pollution par la construction de STEP (CIPEL 1964, 1968, Pourriot and Meybeck 1995).

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

❖ Impacts généralisés (1967-1980) et STEP dans le BV

LA TRAJECTOIRE SOCIALE REPRESENTATION - ACTION

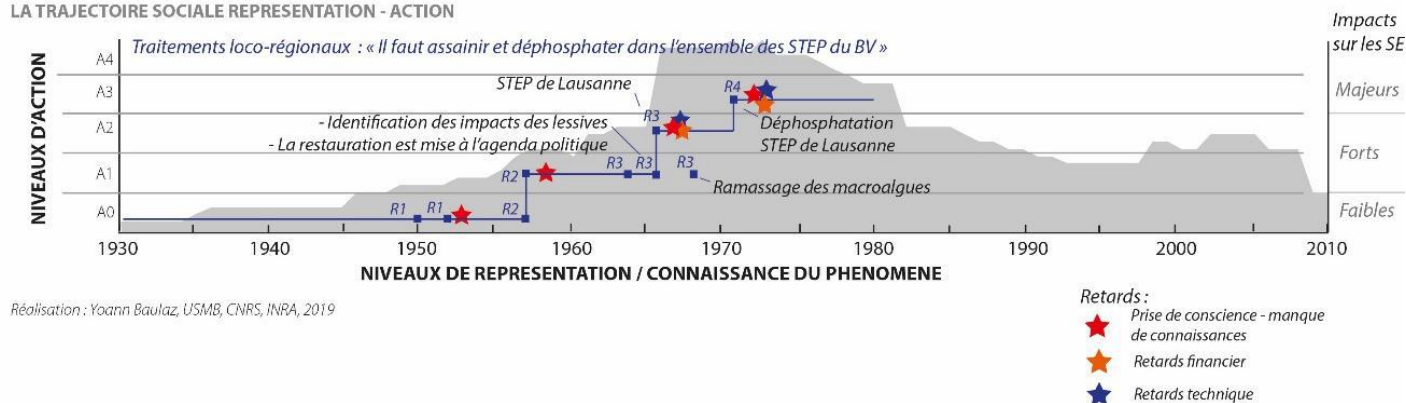


Figure 6-9 : La trajectoire sociale représentation - action associée à la période des impacts généralisés et trajectoire écologique (légende : fig 6-2)

L'état du Léman s'aggrave fortement à partir des années 1960 où il atteint rapidement un niveau eutrophe, générant des impacts chroniques, généralisés à l'ensemble du lac, et des impacts majeurs sur les SE associés aux qualités de l'eau et des milieux. A cette époque émerge également la **crise mercure** qui accentue les impacts. L'ensemble des SE étant en déclin, (Figure 6-10, atteintes 11 et 12) cela a pour conséquence une image négative du lac qui s'exporte au-delà des limites du SSE : le Léman devient un exemple réputé de lac eutrophe, à l'échelle mondiale (Figure 6-10, atteinte 13). Au cours de cette époque, les représentations du phénomène et les actions de gestion évoluent par plusieurs phases.

Dans le rapport de la CIPEL de 1966, sont mentionnés les impacts possibles des lessives phosphatées dans l'eutrophisation et les besoins de déphosphatation dans les STEP. C'est la première fois que les lessives sont « mises en accusation ». **Le diagnostic est alors complet** : les sources, causes et remèdes du phénomène sont connus (Figure 6-9, R3), la lutte contre la pollution du Léman est **mise à l'agenda politique** des collectivités territoriales tant du côté suisse que français.

Cependant, le diagnostic et ces recommandations ne sont suivis que sept ans plus tard (1971) car de lourdes **controverses et une longue prise de conscience retardent l'action** et l'objectif d'un assainissement total du Léman et de son BV est alors reporté pour 1982. D'autres retards à l'action se succèdent (CIPEL 1966, 1968, 1984, Balian 1994, Pourriot and Meybeck 1995, Rapin 2008) : la construction des STEP et la déphosphatation sont retardées non seulement par le **manque de conscience** des acteurs du BV de leur responsabilité dans la pollution du lac, mais aussi par les manques de **moyens financiers** et des **soucis techniques**. Ceux-ci surviennent avec la gestion des nouvelles STEP (réseaux non séparatifs, déphosphatations partielles dans certaines STEP du fait d'un manque de moyens et connaissances de la part des agents d'entretien). Se pose enfin la question de l'élimination des boues d'épuration. L'ensemble de ces éléments : retards techniques, politiques, financiers, problème de connaissances génèrent un retard d'environ une dizaine d'années sur la diminution des charges externes de P (Figure 6-9, les retards sont représentés par des étoiles).

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

REPRESENTATION DU SSE DU LEMAN LORS DES IMPACTS GENERALISES (1967 - 1980)

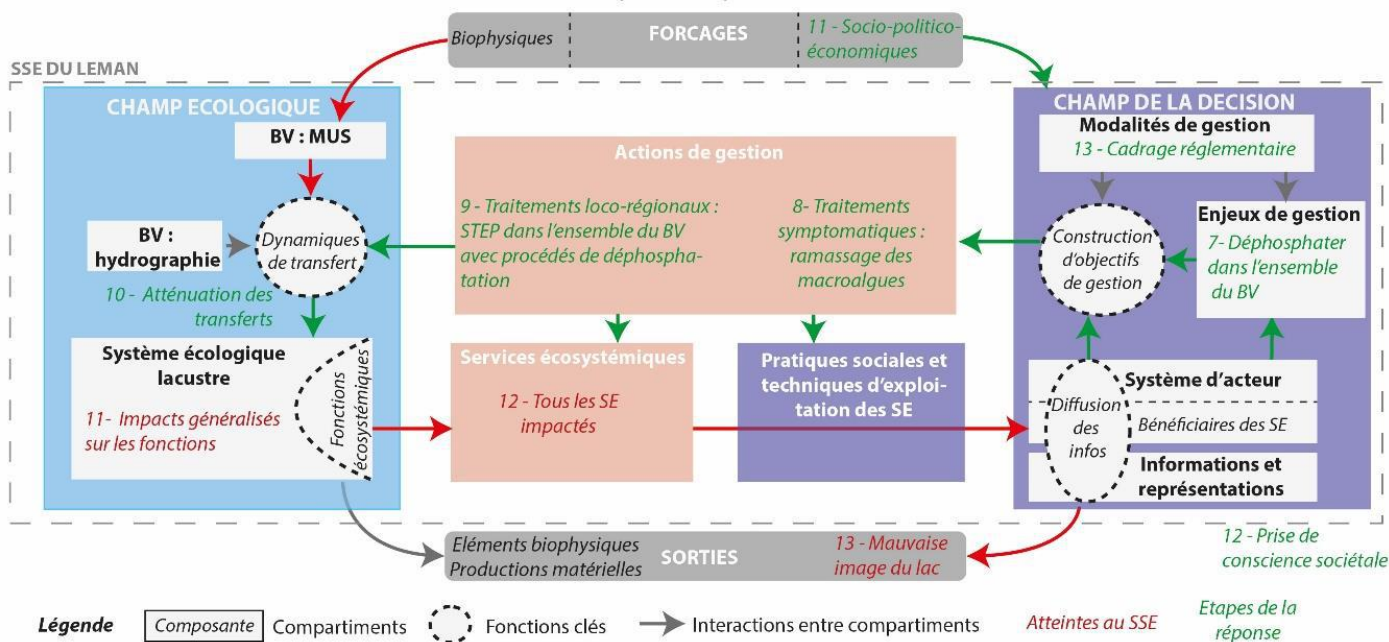


Figure 6-10 : Représentation du SSE lors des impacts généralisés

Comme aucun substitut au tripolyphosphates (TPP) dans les lessives n'existe avant la fin des années 1970, la CIPEL recommande l'épuration des eaux dans le BV avant leur entrée dans le lac. La gouvernance s'élargit désormais avec la nécessaire prise en compte de l'amont du lac, ce qui se traduit dans la modélisation de SOALP par l'apparition d'un véritable **champ écologique** recoupant le lac, son BV, et les MUS (Figure 6-10, réponse 7). L'action s'ouvre à de nouveaux types de traitements : **locaux-régionaux**.

Les traitements locaux (Figure 6-10; réponse 9), instaurés progressivement à partir du début des années 1960 avec quelques STEP construites par les cantons de Vaud et du Valais, seront opérationnelles à partir de 1966. On cherche ici à réduire le plus rapidement possible la pollution en traitant localement les **principales sources** de pression (la STEP de Lausanne reçoit les eaux usées d'environ 50% des habitants du BV).

L'assainissement et la déphosphatation se mettent en place progressivement dans la décennie 1970 à l'échelle de **l'ensemble du BV du Léman**, tant du côté suisse que français, ce que nous nommons **les traitements régionaux**. En parallèle, une ordonnance fédérale suisse est votée en 1975 (le 8/12/1975) relative au déversement des eaux usées, demandant à toutes les STEP en amont d'un lac d'avoir un rejet maximal de 1 mg de phosphore/L d'eau épurée (Figure 6-10, réponse 13). Cette mesure réglementaire accélère la mise en place du traitement régional en Suisse. En France, les actions sont plus longues à se mettre en place : un important chantier de raccordement des réseaux d'assainissement des villes du Bas-Chablais à la STEP de Thonon est engagé. Mais l'installation de la déphosphatation survient seulement en 1980 côté français du fait de problèmes techniques liés aux mélanges des eaux urbaines et industrielles (Mermod 1979 ; Messenger, 11/11/1977 - presse). L'ensemble de ces actions locales et régionales permettent d'atteindre la capacité de traitement des STEP du BV du Léman de 1 700 000 EH en 1980 (Rapin 2008).

La pollution est finalement reconnue et comprise grâce à un cadrage scientifique et à la mobilisation d'acteurs. L'action des scientifiques et la mobilisation d'ONG (création de l'ASL

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

en 1980 – encadré 2-2), institutionnels, bénéficiaires des SE, médias locaux et personnalités politiques locales permettent une prise de conscience sociétale (Figure 6-10, réponse 12). La mobilisation bénéficie aussi de **forçages exogènes** (Figure 6-10, réponse 11) : relais médiatiques au niveau national en pleine émergence du mouvement environnementaliste et de références scientifiques locales (l'eutrophisation s'observe sur d'autres lacs à l'échelle des Alpes, étudiés par la SHL, l'institut Forel : les lacs de Nantua, Paladru, de Neuchâtel en Suisse) et de connaissances de bibliographie mondiale sur l'eutrophisation (les grands lacs Nord-Américains notamment, des fleuves...) par les chercheurs.

L'activation de ces différents compartiments du SSE aboutit à la mise en place des traitements de lutte contre l'eutrophisation dans l'ensemble du BV du Léman. Ainsi se réalise **un premier bouclage dans le SSE** qui conduit à une diminution des charges en P dans le lac (trajectoire écologique figure 11 ; Figure 6-10, réponse 10).

❖ Lente réduction des impacts et traitements systémiques (> 1980)

« Gardons-nous conscience, mes Chers Amis, que nous avons la chance de résider dans une des plus belles régions du monde. Et je dis une, parce que je ne les connais pas toutes, mais pour moi, c'est la plus belle ! Et c'est la plus belle grâce au LAC ! Essayez, par l'imagination, de remplacer le lac par des collines, des prairies, des bois : le paysage deviendra finalement banal.

Le jour où l'individu, avant de verser son huile de vidange dans le fossé, ou l'huile de la boîte à sardines dans l'évier, ou choisir sa marque de lessive, suspendra son geste et comprendra qu'il peut et doit faire autrement, là nous aurons, et le LAC, aura gagné ! »

Allocution de M. Le Maire de Messery Bernard Espinasse lors de l'assise communale du 16 octobre 1987

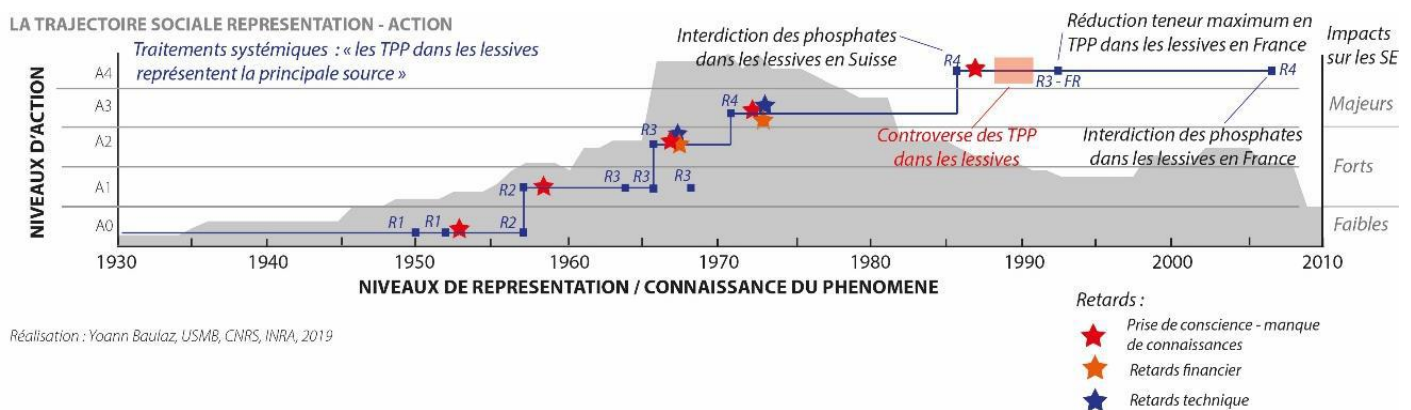


Figure 6-11 : La trajectoire sociale représentation - action au cours de la lente réduction des impacts et trajectoire écologique (légende : fig 6-2)

Dans les années 1980, les charges en P restent très élevées avec des impacts majeurs sur les SE (Figure 6-11, trajectoire écologique). Les traitements locaux-régionaux s'avèrent insuffisants, il est indispensable de **réduire le nombre de sources** de pollution.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Les substituts des phosphates dans les lessives ayant fait preuve de leur innocuité et leur efficacité, la **suisse interdit la présence des TPP dans les lessives en 1986**. Par cette interdiction, il s'agit implicitement de remettre les flux apportés au lac à un niveau où l'intervention du SE de filtration et purification de l'eau suffit pour réguler les niveaux de P. Cette décision fédérale permet l'élimination de la principale source de P dans le lac (en réponse, réduction par deux des concentrations de P dans le lac entre 1985 et 1987) et représente un **traitement de type systémique** qui améliore la fourniture en SE (Figure 6-11, réponse 17). La France choisit de ne suivre la Suisse dans son interdiction et une **controverse** s'engage d'ampleur nationale opposant les collectivités locales et l'ASL (chap 2.3.3) aux grands groupes industriels français producteurs de lessive soutenus par le gouvernement français (Barroin 1990). Ce n'est qu'en 2007 (Grenelle de l'Environnement) que les TPP dans les lessives seront interdits en France.

REPRESENTATION DU SSE DU LEMAN A LA REDUCTION DES IMPACTS (1980 - 2007)

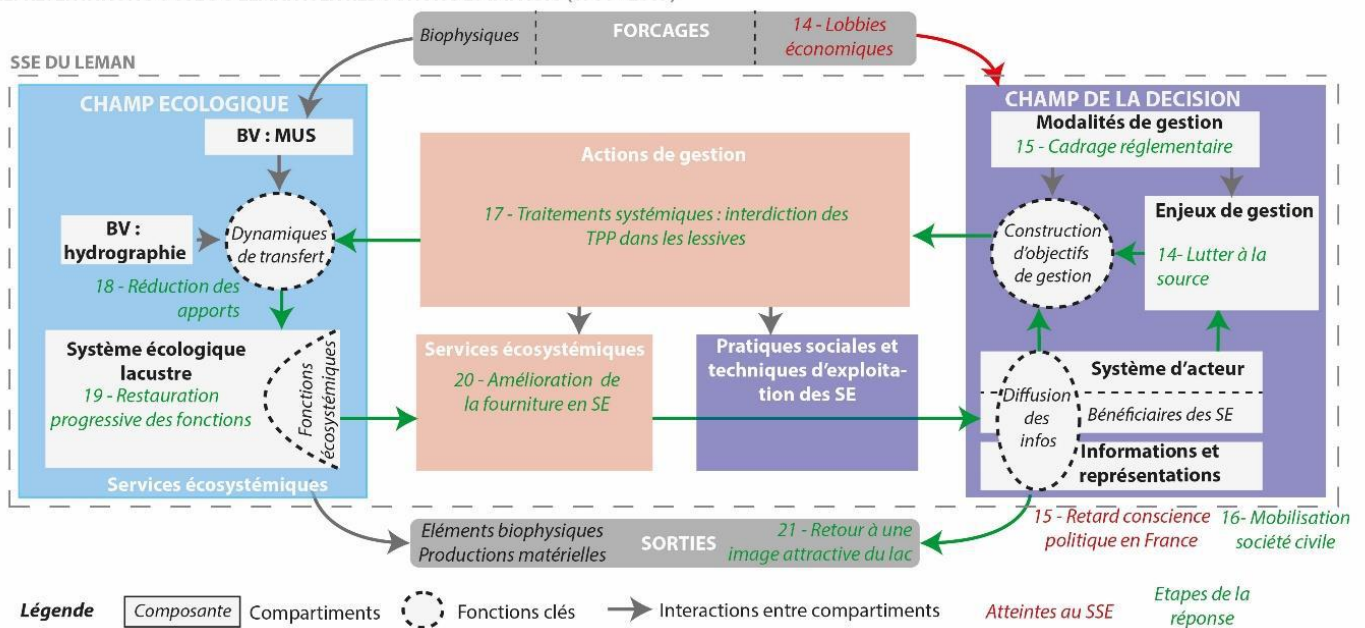


Figure 6-12 : Représentation du SSE du Léman à la réduction des impacts de l'eutrophisation et la mise en place de traitements systémiques

Le bouclage s'opère dans le SSE par la réduction que ce traitement systémique produit sur les transferts au lac (Figure 6-12, réponse 18) ; une **nouvelle inertie intervient** (Barroin 1990, Carpenter et al. 2007) au niveau du système lacustre (temps de séjour de l'eau, facteurs biotiques) à l'issue de laquelle s'accélère enfin la baisse de la teneur en P du lac et marque le début de la réoligotrophisation. Elle s'accompagne d'une réhabilitation des niveaux de services de régulation des qualités de l'eau et des milieux et les SE en synergie avec eux, y compris impliqués dans l'image globale du lac (Figure 6-12, réponses 20 et 21). La réduction des contaminations mercurielles dans la chair des poissons en dessous des seuils d'impacts sanitaires participe à ces améliorations.

Durant cette phase, on observe alors une part **d'auto-organisation sociétale et d'apprentissage** avec la montée en puissance de la société civile au travers d'associations de défense de bénéficiaires, de défense de l'environnement et acteurs de la conservation, se mobilisant pour faire pression auprès des acteurs publics dans le but d'accélérer l'action (Figure 6-12, réponse 16). Ces acteurs locaux vont d'ailleurs jouer un rôle majeur dans la

controverse qui va les opposer aux grands groupes industriels lessiviers français (Figure 6-12, atteintes 14 et 15 - Barroin 1990).

❖ Nouvelles menaces (1990 – 2019)

Durant le cycle de pollution - restauration que l'on vient d'évoquer, l'écosystème et les activités humaines évoluent. Si l'eau retrouve une charge en P signant une **ré-oligotrophisation** du plan d'eau, le fonctionnement écologique a changé irréversiblement (autre réseau trophique, évolution génétique ...) et se trouve soumis à une **évolution des forçages**, en premier lieu climatiques dont les effets apparaissent dès la fin des années 1990. Puis on assiste à l'apparition de nouveaux types de menaces à partir des années 2000, représentées par des cocktails de polluants à basses concentrations, associés à des flux de micro-plastiques (Reignier et al. 2015) et à des modifications d'écosystèmes dues au changement climatique, à l'apparition d'espèces invasives et à des changements importants des communautés piscicoles qui remettent en cause le fonctionnement des réseaux trophiques (Anneville et al. 2019). Outre des effets propres et des effets synergiques encore mal évalués, cette association de perturbations semble par ailleurs en mesure de remettre en cause les améliorations obtenues antérieurement (CIPEL 2018).

Par ailleurs, **les micropolluants**, souvent d'origine diffuse, à très forte variabilité spatiale et temporelle, sont difficiles, coûteux, voire impossibles à contrôler par des traitements régionaux purement technologiques à l'échelle du SSE. Les actions de lutte contre ces polluants supposent notamment de prendre en compte les propriétés écosystémiques et leurs effets sur les SE de chacune de ces molécules, mais qui sont nombreuses et en croissance permanente.

En outre, le **système social évolue** également dans la phase de ré-oligotrophisation du lac : l'urbanisation se poursuit, le tourisme estival est de plus en plus important (et le P continue de s'accumuler dans le BV, notamment dans les sols, et accroît la charge interne du lac faisant craindre à terme une possible activation de la pollution diffuse - Dorioz and Trevisan 2007). De nouveaux débats apparaissent : ils concernent la biodiversité, l'écotoxicité des micropolluants (chap 5.3), et la baisse des captures des poissons nobles attribuée par les pêcheurs au manque de P, la sur-fréquentation du lac et l'urbanisation du littoral, l'apparition de nouvelles pratiques, essentiellement touristiques qui peuvent générer de nouveaux conflits entre usagers ou la perte et le manque de ressources en eau. Ces évolutions représentent d'autres menaces sur les SE qui vont prendre une importance de plus en plus forte à l'avenir.

Un contrôle via un encadrement plus approfondi de certaines activités humaines sur le lac ou le BV et les modes de vie (ex : inciter à réduire la consommation de médicaments, interdiction des sacs plastiques dans les magasins) devient, à terme, indispensable. Mais un **manque de connaissances** sur les impacts sur les fonctions d'habitat et la santé humaine ainsi que sur les actions à mettre en place limitent l'action. Aussi, l'émergence et l'évolution de ces nouvelles menaces sont très dépendantes d'évolutions sociétales et/ou réglementaires qui dépassent largement le domaine de compétences des instances décisionnelles du SSE. On observe alors que la gestion des grands lacs est de plus en plus amenée à gérer **des problématiques issues de forçages exogènes** et ne possède pas les moyens d'action suffisants, localement, pour agir sur leurs sources.

Conclusion

Le système de gestion du Léman s'est créé et a évolué sous contrainte des épisodes de pollution. C'est le bouclage pollution - dégradation des SE – action - restauration des SE, qui a permis **de construire le SSE et a entraîné sa complexification au cours du temps**. La trajectoire du SSE résulte ainsi d'une **coévolution** entre composantes sociale et écologique du système, elle a conduit à produire des SE et de la gestion visant à maintenir leur état. Ce type de fonctionnement est souvent reconnu comme crucial dans les dynamiques des SSE (Carpenter et al. 2007). Le **modèle conceptuel SOALP** permet de représenter ces bouclages et facilite la compréhension des phénomènes, leur prédiction et la prise en compte des forçages exogènes ; ce qui permet d'envisager une application à la gestion adaptative des grands lacs alpins. Il permettrait aussi d'identifier de nouveaux indicateurs socio-économiques, culturels et techniques permettant d'évaluer l'influence des composantes sociétales sur la fourniture et la demande en SE.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

6.2.3 Comparaison des trajectoires sociales représentation/action des trois grands lacs alpins

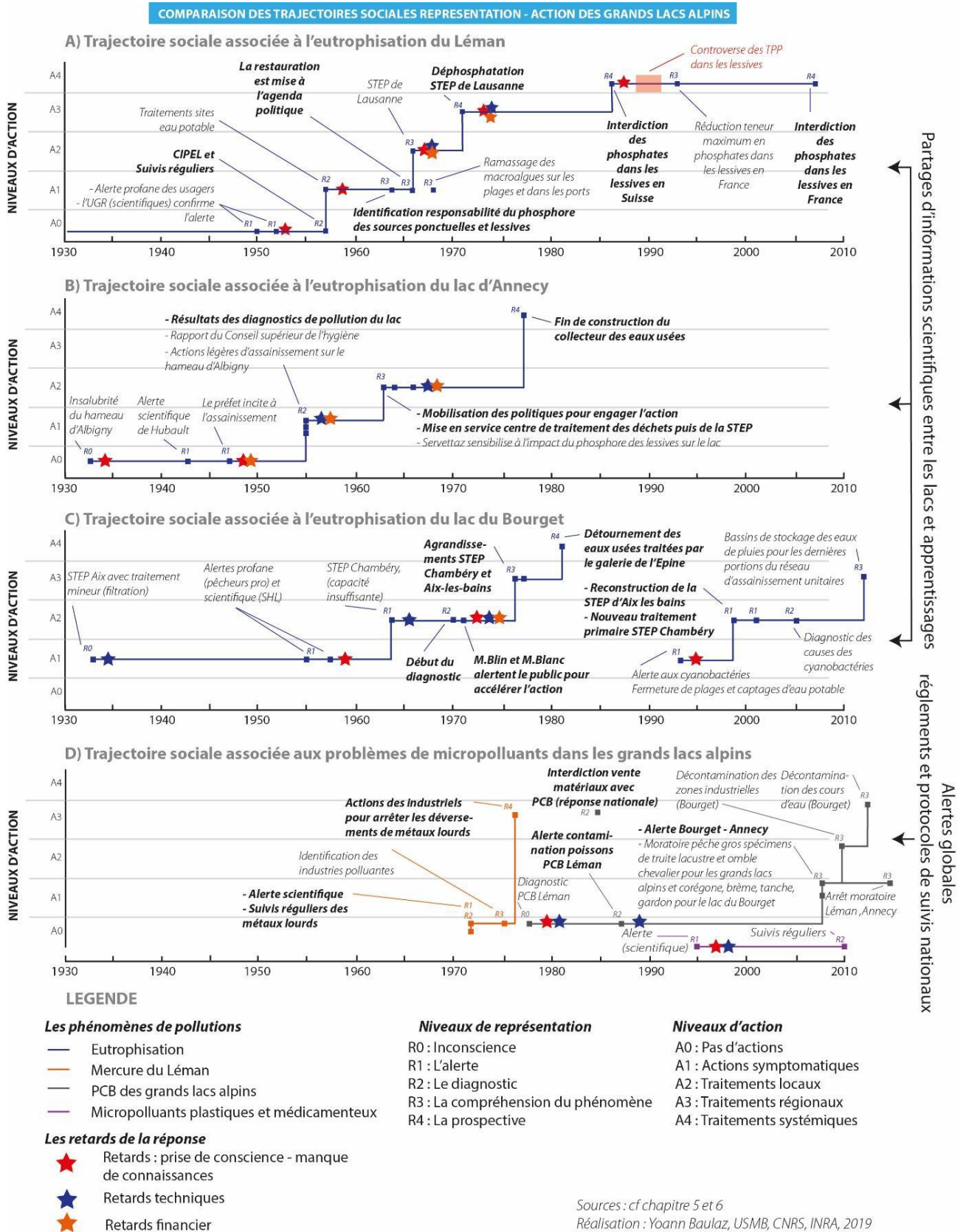


Figure 6-13 : Trajectoires de représentation - action des grands lacs alpins face aux problèmes de pollution

Sources : cf chapitre 5 et 6
Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

L'**eutrophisation** est la grande affaire de la gestion des grands lacs alpins au cours du XX^{ème} siècle. Cette problématique émerge entre les années 1930-1950 et a nécessité la mise en place d'actions de gestion de lutte contre les dégradations des SE qui en découlent. Par la suite, ces trois grands lacs alpins ont subi plusieurs épisodes de pollutions aux micropolluants dont les effets ne sont pas totalement résorbés aujourd'hui pour certaines (chap 5.3) La réponse sociétale aux pressions subies s'est développée au travers d'étapes successives initiées par une **alerte** des phénomènes de dégradation des qualités de l'eau et des milieux, suivies d'un **diagnostic** et d'un ensemble **d'actions de gestion**. Bien qu'étant situés dans une même écorégion marquée par une intensité de développements économique et social similaires, les trois grands lacs alpins n'ont pas atteint aujourd'hui les mêmes stades de restauration de leur état. Hormis des spécificités hydrologiques, écologiques et territoriales qui ont modifié la composition et l'intensité de la charge polluante entrante dans le lac et qui explique en partie ces différences (chap 2), les trajectoires sociales de représentation-action de lutte contre les pollutions n'ont pas été les mêmes (Figure 6-13). La prise en compte des problématiques de pollution et la mise en place des actions ne se sont pas déroulées avec la même rapidité, les types de traitements choisis ont été différents, ce qui a engendré des périodes de pollution et de dépollution plus ou moins longues en fonction des lacs.

L'analyse comparée des représentations des phénomènes d'eutrophisation révèle une **alerte plus précoce** sur les lacs Léman et d'Annecy (représentation R1, Figure 6-13 : A, B, C). Pour les trois lacs, elle est constituée d'une « *double alerte* » à la fois scientifique et profane, légèrement plus tardive sur le lac du Bourget. Un **retard dans la prise en compte du phénomène** d'eutrophisation s'observe à la suite de ces alertes, marqué par un manque de considération pour les questions environnementales et un manque d'institution en charge de la gestion du lac à même de demander un diagnostic.

Dans l'attente d'un **diagnostic complet** (R2), chacun de ces lacs met en place des **traitements symptomatiques** permettant de poursuivre l'exploitation des SE des grands lacs (Action A1, Figure 6-13, A, B, C) mais peu efficaces sur le long terme. Le passage à des actions atténuant la dégradation de l'écosystème nécessite l'identification de la nature du problème, auquel s'ajoute une seconde condition : l'existence de moyens techniques et financiers pour agir.

De nouveaux retards sont générés avec la mise en place des **traitements locaux-régionaux** liés au manque de références scientifiques et médiatiques locales ou globales et au manque de **conscience de la responsabilité des acteurs du BV sur l'état du lac**.

Le **traitement systémique** final de l'eutrophisation permettant de réduire les sources de pollution (actions d'interdiction des phosphates ou détournement des eaux usées) nécessite des changements importants dans les comportements des habitants du BV, dans les pratiques des usagers des lacs ou du BV, qui supposent l'existence de solutions de remplacement. La mise en place de ces actions se heurte alors à des retards pouvant être à la fois d'ordre technique et d'ingénierie, financier ou de prise de conscience (usagers réfractaires à changer de pratiques), parfois exacerbés par des conflits entre usagers et lobbies économiques.

Le choix d'agir directement à la source, le plus tôt possible est la solution choisie sur le lac d'Annecy avec la construction d'une ceinture de récolte des eaux usées et de traitement en un seul point. Cette solution a limité les retards entre chacune des phases et permis **une restauration plus rapide du lac**. Au Bourget, le **retard initial de prise de conscience politique**

de la pollution a retardé toute la chaîne de réponses, ce qui a provoqué la mise en place de traitements sur un lac très dégradé et une restauration bien plus longue.

La restauration des grands lacs a profité également **d'effets accélérateurs de l'action**. Point commun de chacun de ces systèmes : la présence de **personnalités politiques locales** qui ont joué un rôle majeur de sensibilisation des populations et usagers. Ces personnalités (P.L. Servettaz et C. Bosson à Annecy ; M. Blin et M. Blanc au Bourget, P. Jacquier et les membres de l'UGR au Léman) ont par ailleurs été les moteurs de l'action en fédérant les parties prenantes de la gestion et en amenant à considérer la protection des lacs comme des enjeux majeurs des territoires, parfois accompagnés d'une vision à long terme (Servettaz 1977). Il est à noter le rôle d'un **acteur commun** aux trois grands lacs alpins qui a pu diagnostiquer l'eutrophisation et jouer un rôle important dans l'alerte et le diagnostic : la SHL (actuellement UMR CARTELE, INRA), qui participe au suivi de chacun des trois écosystèmes lacustres. Le partage d'informations entre SSE des grands lacs alpins par le biais de ces acteurs a favorisé, par la suite, la mise en place d'actions rapides sur le lac du Bourget.

De ce fait, le lac du Bourget est le lac ayant mis en place le plus tardivement les actions, mais pour lequel le passage entre les actions de niveau 2 à 4 (Figure 6-13, C) a été le plus rapide car il a su profiter de l'expérience acquise sur la lutte contre l'eutrophisation des autres grands lacs alpins (notamment Annecy) et du partage des informations scientifiques.

D'autres forçages ont influé positivement sur les décisions : des **forçages** juridiques (ex : loi sur la déphosphatation dans les STEP en Suisse – Figure 6-10), socio-culturels (montée du mouvement environnementaliste – Figure 6-10) et aujourd'hui certains cadrages juridiques nationaux (contrats de BV) et internationaux (DCE) qui proposent des protocoles et des outils de planification de l'action.

L'histoire de la restauration des grands lacs alpins et les trajectoires sociales représentation-action concordent avec les observations faites par Lestel et collaborateurs (2017) (voir chap 1.3.3). Les trajectoires d'eutrophisation, "*en forme d'escalier*" sont typiques **des trajectoires d'indécision**, tandis que la trajectoire associée aux problématiques de métaux lourds du Léman prend la forme d'une « **trajectoire d'alerte** », avec une identification rapide des sources, un consensus global sur les risques associés à la pollution et une action technique rapide et relativement facile à mettre en place (épuration à la sortie des sources industrielles des polluants, existence de produits de substitution). La trajectoire des pollutions aux PCB ressemble davantage à une « **trajectoire d'acceptation** » car, pendant longtemps, cette pollution est restée insoupçonnée du fait d'un manque de suivi de ces polluants, de moyens techniques pour le mettre en place et de connaissances sur leurs impacts (voir chap 5.3 pour plus de détails sur les trajectoires).

Enfin, depuis les années 2000, les **nouvelles** pollutions associées aux micropolluants plastiques et médicamenteux ne permettent pas à l'heure actuelle de voir émerger une « *forme* » des trajectoires sociales représentation-action. La phase de diagnostic est en cours. Il se peut qu'elle soit très longue, retardée à la fois par un **manque d'informations** sur les impacts de ces polluants sur les habitats naturels, la biodiversité et la santé et de **moyens techniques** pour suivre ces polluants correctement, tant ils sont nombreux. Néanmoins, nous pouvons émettre l'hypothèse que cette problématique suit la tendance d'une **trajectoire d'acceptation**, dans la mesure où, dans le futur, les traitements seront entrepris le jour où les moyens techniques et connaissances nécessaires auront été réunis. Cette question des

micropolluants pourra suivre une **trajectoire d'alerte** si la découverte d'un risque majeur sur les écosystèmes, ou sur la santé humaine, est identifiée et nécessite la mise en place rapide d'actions. Etant donné les risques sanitaires associés à ce type de pollutions, la **trajectoire d'indécision** est moins probable et nous pouvons nous attendre à moins de retards associés à des prises de conscience. Ceci étant, chaque année sont produits des milliers de nouveaux micropolluants potentiels, dont on ne connaît pas les effets sur le long terme pour la plupart (Metz and Ingold 2014). La trajectoire de réponse aux micropolluants pourrait être associée à une succession de **retards techniques** pour lutter contre chacun des types de contaminants.

Les résultats présentés dans cette partie montrent par ailleurs que la typologie des trajectoires sociales de représentation-action et les travaux réalisés dans le cadre de l'article de Lestel et collaborateurs (2017) sont applicables aux écosystèmes des grands lacs.

6.2.4 SOALP : Application à l'étude du SSE du Lac Saint-Pierre, un lac fortement soumis aux pollutions diffuses de son BV

Le modèle SOALP (Figure 6-1) est appliqué à l'étude du lac Saint-Pierre (LSP) au Québec (voir chapitre 2.4 et annexe 2-7 pour une présentation du lac et chapitre 4.2.3 pour la méthodologie utilisée pour l'étude de ce lac). L'objectif est de tester la capacité de SOALP à **organiser la récolte et le traitement synthétique des informations**, dans un contexte radicalement différent de celui des grands lacs alpins : lac de plaine peu profond, BV de taille continentale, connexion avec un grand fleuve mondial qui le traverse (le Saint-Laurent), forte influence des pollutions diffuses d'origine agricole, situé au Canada. Notre analyse porte sur le SSE du LSP dans son ensemble ; elle prend en compte tous les SE, leurs interactions et les facteurs qui influencent leur état, pour aboutir à un diagnostic global des principales menaces pour ces SE et des verrous à leur restauration. Une attention particulière est portée à l'étude des interfaces et fonctions clés du modèle afin de concentrer l'analyse directement sur les phénomènes mis en évidence comme essentiels lors de l'élaboration de SOALP. Le plan de cette partie en témoigne : elle est structurée autour des fonctions clés et des forçages du système. L'ensemble des éléments de synthèse mis en évidence dans cette partie sont représentés au sein du schéma du modèle SOALP dans la figure 6-14 en fin de chapitre.

Comme pour les grands lacs alpins, les problèmes du LSP émergent à l'intensification du développement urbain et agricole du BV dans les années 1950. L'histoire des interactions LSP – BV – société depuis cette époque est le « *matériau d'application du modèle* », pour, et ce dans un laps de temps court sur le terrain (inférieur à deux mois), décrypter les processus de transmission des causes et effets dans le SSE et identifier les facteurs mobilisés dans les réponses sociétales aux problèmes de pollution. Les outils complémentaires déjà utilisés pour le Léman (étude des trajectoires écologiques et sociétales, analyse rétrospective) sont également mis en œuvre dans la perspective de sorties opérationnelles (recommandations de gestion et identification de verrous à l'action).

❖ Les forçages externes du SSE du lac Saint-Pierre

Le LSP et ses tributaires sont situés dans les basses plaines du **fleuve Saint-Laurent** qui concentre la partie la plus peuplée et développée du **Québec**. Le BV du lac est extrêmement étendu (990 000 km²) du fait de sa configuration : le BV du lac est inséré dans le BV du fleuve, il concentre 60% de la province du Québec, la majorité de sa surface est située aux USA et est

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

peuplé de 3.3 millions d'habitants. Le lac est situé à la confluence de 11 tributaires directs formant un « *sous-bassin versant* » qui est **l'échelle de gestion** du lac choisie.

Sur le plan climatique, toute la région est marquée par de puissants épisodes de pluies, de neige et de crues qui contraignent fortement l'agriculture et, *a contrario*, bénéficient à certains usages du lac.

A ces forçages hydro-climatiques s'ajoutent le rôle du Saint-Laurent sur la **navigation commerciale** (transit d'environ 5 000 navires par an, puissant lobby des armateurs) et les facteurs socioéconomiques poussant au développement d'une **agriculture très intensive** modifiant profondément l'hydrologie de surface sur le BV des tributaires.

A partir de 1950, l'agriculture évolue, passant d'un modèle pastoral laitier avec des paysages de prairies permanentes, vers un modèle intensif basé sur des cultures annuelles très gourmandes en intrants (soja, maïs) et l'élevage porcin industrialisé. Plusieurs facteurs permettent d'expliquer cette évolution et le succès économique de l'intensification (dires d'experts, agronome, sociologue) : (1) les **conditions agro-climatiques** de la région sont propices à l'agriculture intensive (précipitations, ensoleillement, sols fertiles) et offrent la possibilité aux agriculteurs de changer de pratiques ou types de cultures pour s'adapter aux marchés ; (2) ce territoire, à **proximité des grandes villes** (Montréal ...) est riche de connaissances agronomiques, d'innovations et en performance ; (3) proximité des **points de vente**, marchés économiques et bénéficiaires des produits agricoles ; (4) **politique** de protection des terres agricoles ; (5) promotion par le gouvernement québécois dans les années 1980 de **l'autosuffisance alimentaire** (slogan : « *Nourrir le Québec* ») et d'une gestion des produits agricoles basée sur l'offre (quotas de production, soutiens financiers) ; (6) **puissant syndicat agricole unique** (Union des Producteurs Agricoles – UPA).

❖ Dynamiques de transfert des flux polluants

L'engorgement en eau des terres et les courtes saisons de croissance des produits agricoles sont parmi les contraintes les plus fortes de l'agriculture du Québec. Les importantes crues au printemps engendrent des risques **d'inondations et d'érosion** des terrains. En conséquence dans les BV des tributaires, des drainages agricoles sont aménagés et de nombreux cours d'eau canalisés, dragués, endigués, rectifiés et re-calibrés pour favoriser l'écoulement des eaux.

Ces aménagements sont nécessaires à l'intensification de l'agriculture, qui elle-même entraîne des épandages considérables de nutriments et phytosanitaires, favorise les pratiques de monoculture sur de grandes parcelles, accentue l'érosion par le tassement des sols, la mauvaise qualité des bandes riveraines et la transformation des paysages (Beaulieu 2008 ; dires d'experts sociologue). La densité du réseau hydrographique est en conséquence très élevée², d'où **une forte capacité de transport** de l'eau, des sédiments, des polluants, et corrélativement une diminution des qualités de l'eau et des milieux. Il en résulte un **fort degré de connectivité** entre le BV et le lac, BV qui s'apparente à un système de drainage gigantesque avec **une capacité restreinte d'épuration** des eaux par les zones végétales et zones humides. Les forçages encouragent cette dynamique car l'agriculture actuelle ne peut pas être viable sans ce réseau de cours d'eau agricoles artificialisés dans **cette région plate, aux sols argileux, qui ne se draine pas naturellement** (Beaulieu 2008). A proximité du lac, l'autoroute 40

² Evolution de 1 km de cours d'eau par km² en moyenne en 1956 à 1.6 km en 2008 (Beaulieu 2008)

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

bouleverse le régime hydrique du littoral avec la construction de 300 conduites de drainage qui augmentent localement le système de transfert de polluants au lac (Lévesque, 2018 in De la Chenelière et al, 2014). Une partie des contaminations chimiques du lac (chlorures notamment) proviennent de cette source.

Malgré de nombreuses actions de luttes contre les **pollutions ponctuelles** dans les années 1970, les sources de ces pollutions restent variées (industries, agroalimentaires, centres urbains) avec des systèmes de collectes des eaux usées dégradés qui mélangent les eaux usées et pluviales et surchargent les STEP en période de crues. Les eaux du LSP sont également contaminées par des **bactéries fécales et virus**, du fait de l'absence de procédés de désinfection de la STEP de la ville de Montréal (usine de désinfection en cours de construction) et du fait d'un traitement primaire uniquement dans la plupart des STEP en amont du lac.

La charge externe transférée au lac est alors composée d'un **cocktail** classique d'éléments nutritifs, micropolluants, métaux lourds (charge largement réduite depuis les années 1970), de contaminants fécaux et matières en suspension **issues d'apports de sources diffuses agricoles et de sources ponctuelles**. La dynamique de transfert de ces polluants dans le champ écologique est très forte en raison de l'intensité de la connectivité entre le BV et le lac et le manque de zones tampon.

❖ Fonctions écosystémiques du système écologique lacustre

Le LSP, grand lac (335 km²) fluvial méromictique peu profond, gelé en hiver, présente une **large plaine inondable littorale** (288 km²) dont le paysage est composé de marais, marécages, canaux et petits lacs. L'amont du lac est occupé par **un delta et un archipel** d'une centaine de petites îles (l'archipel de Sorel), dont quelques-unes sont urbanisées et agricoles (De Koninck 2000). Il s'agit de la plus grande étendue de marais et de marécages du Saint-Laurent, qui est à la fois le support d'activités agricoles et d'une **biodiversité exceptionnelle et emblématique** participant à la fourniture des SE du lac.

Les processus écosystémiques du lac sont largement déterminés par la **géomorphologie et l'hydrologie lacustre** : trois masses d'eau aux propriétés physico-chimiques distinctes s'écoulent dans le lac et ne se mélangent pas. Elles sont alimentées par des rivières distinctes, possèdent des **temps de séjour, des qualités de l'eau et des milieux différents**, dont l'état suit un gradient amont/aval au sein du lac (Hudon and Carignan 2008). L'essentiel de l'eau du lac (70%) transite par la **masse d'eau située au niveau du chenal central de navigation**, qui est la plus profonde (11 m) et présente le plus fort débit. Elle est mésotrophe en raison des actions de restauration des écosystèmes des grands lacs américains menées depuis les années 1950 et est la moins polluée. La **masse d'eau au nord**, à très faible débit et peu profonde, est la plus contaminée par les pollutions chimiques, les contaminations fécales et les nutriments. **La masse d'eau au sud**, essentiellement contaminée par la rivière la plus polluée du Québec (Yamaska), présente un très faible débit, est peu profonde et possède les conditions optimales pour le développement de cyanobactéries benthiques³. Le faible débit des masses d'eau du nord et du sud est à relier avec la faible profondeur du lac et l'obstruction des courants par les herbiers à macrophytes (dires d'experts, biologiste, géographe).

³ Présence d'eaux brunes, fortes concentrations de carbone organique dissous, débit de l'eau réduit et peu de luminosité – direx d'experts, limnologue, écologue

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

De par sa position géographique et la vaste superficie de son BV, le lac stocke de manière plus ou moins temporaire des contaminants (Langlois and Sloterdijk 1989). En réponse, les **fonctions écosystémiques de régulation** sont insuffisantes, les **fonctions de production** sont réduites par les apports massifs de nutriments et matières en suspension qui diminuent la transparence. Il en résulte des dégradations importantes dans les habitats du lac : les herbiers sont en régression depuis 2005 environ (MDDEFP 2013 ; direx d'expert biologiste) et le comblement de certaines parties du lac sont observées (un envasement généralisé du lac était la crainte des années 1990 - Francoeur 2004, presse). En conséquence de ces évolutions, l'une des principales problématiques du lac est la **perte des fonctions d'habitats**, qui se répercute sur l'ensemble des réseaux trophiques : la diminution de la biomasse des plantes aquatiques entraîne une diminution de l'abondance des crustacés benthiques, source d'alimentation pour les poissons emblématiques du lac : la perchaude (*Perca flavescens*), le grand brochet (*Esox lucius*). D'autres espèces de poissons aux préférences similaires en termes d'habitats sont également en déclin : le crapet de roche (*Ambloplites rupestris*), le crapet-soleil (*Lepomis gibbosus*) et le méné à tache noire (*Notropis hudsonius*). Ces atteintes aux populations piscicoles sont considérées comme un **témoin de la dégradation globale de l'écosystème** (Dauphin and Jobin 2016).

La perte d'habitats concerne également la plaine inondable : depuis 1964, plus de 4 000 ha d'habitats fauniques ont été anthropisés, majoritairement transformés en parcelles pour les cultures annuelles intensives. Les milieux écologiques de prairies humides sont les plus touchés et en lien direct avec la réduction de la perchaude. Autre marqueur, entre 1970 et 2010 on enregistre une diminution de 70% des **populations d'oiseaux champêtres** (Jobin et al. 1994). Ces atteintes ont des conséquences visibles qui affectent les **fonctions d'informations** : la faible transparence de l'eau, la perte de biodiversité fonctionnelle et emblématique, la contamination fécale, la destruction d'habitats. En bref, la qualité environnementale globale du lac en se détériorant, engendre des nuisances.

L'ensemble des fonctions écosystémiques du lac sont donc dégradées et ceci à différents degrés en fonction des masses d'eau. La séparation relative des masses d'eau dans le lac **limite la propagation des atteintes à l'écosystème** de l'une à l'autre (Hudon and Carignan 2008), mais on peut émettre l'hypothèse qu'elle provoque également une **différentiation spatiale des fonctions écosystémiques** et réduit la capacité de résistance du lac aux changements.

❖ Production du SSE : les SE

De longue date, le LSP rend de nombreux SE, au premier rang desquels se trouvent **l'approvisionnement en bio-ressources** pour la pêche et la chasse, **l'eau utilisée à des fins matérielles** en tant que support de la navigation commerciale, les **SE culturels d'interactions physiques et récréatives pour les activités de loisir**. Le **lac et ses îles** en amont sont notamment des sites privilégiés pour la chasse aux gibiers d'eau, à la sauvagine, aux grenouilles et le piégeage du rat musqué, l'observation des oiseaux (Langlois and Sloterdijk 1989, He et al. 2016). Les **zones humides littorales** représentent des aires de fourniture en SE d'approvisionnement en bio-ressource, du fait de leur utilisation en agriculture, sylviculture, aquaculture, pour la cueillette (ex : champignons, bois, végétaux) ou la production de fibres (roseaux par exemple). Les retombées économiques annuelles de l'ensemble des SE marchands produits par le lac (l'agriculture et la navigation ne sont pas prises en compte) s'élèvent à plus de 630 500 000 \$CA, soit plus de 1 million de \$CA/ha de lac et certains SE

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

d'approvisionnement sont utilisés par les communautés autochtones pour leur **subsistance** (He et al. 2016).

Le battement des vagues créé par la **navigation commerciale** provoque de l'érosion sur les berges qui participe à la diminution de la couverture et densité des herbiers à macrophytes. Cette érosion est limitée en hiver par la présence des glaces sur le lac qui protègent les berges, mais ces glaces représentent un **dis-service** pour la navigation puisqu'elles nécessitent d'être brisées pour ouvrir le passage des bateaux. A ce titre, plusieurs îlots artificiels ont été créés de chaque côté du chenal à partir des sédiments dragués pour son entretien et le niveau du lac a été relevé artificiellement. Par ailleurs, les aménagements répétés pour creuser le chenal et l'entretenir contribuent largement à la séparation des masses d'eau car **ils concentrent l'écoulement des eaux** du Saint-Laurent dans le chenal principal. Cette masse d'eau traverse ainsi le lac sans diluer les polluants et son temps de séjour dans le lac est inférieur à un jour (Hudon and Carignan 2008). L'effet de séparation des masses d'eau est accentué par la présence des macrophytes sur les zones peu profondes qui favorisent également une sédimentation et un envasement important des masses d'eau du nord et du sud (sédimentation de 190 300 t/an - Carignan and Lorrain 2000). Le SE associé à la navigation commerciale a donc des **antagonismes** importants avec les bouquets de SE associés à la régulation des qualités de l'eau et des milieux, les SE de régulation des crues. La navigation réduit également **l'accessibilité aux SE** liés à la pêche (le chenal de navigation procure toutefois une nouvelle niche écologique pour le Doré noir - *Sander canadensis*) et les SE culturels en raison des restrictions d'usage de la voie navigable sur le Saint-Laurent. Les effets attendus des dérèglements climatiques (forçage biophysique) risquent de réduire le niveau d'eau, d'accroître l'érosion et d'exacerber ces antagonismes.

L'agriculture littorale est une activité importante qui bénéficie des SE du LSP. Cependant, cette agriculture est un maillon incontournable de la chaîne d'impacts des pollutions sur le lac Saint-Pierre : 1/ elle génère des pollutions directes par émission de produits phyto-sanitaires, 2/ apporte des éléments fertilisants en excès dans les milieux naturels, 3/ génère des concentrations élevées de matières en suspension et accentue les processus érosifs littoraux et 4/ ses pratiques culturales ne sont pas compatibles avec les besoins biologiques des espèces aquatiques (mise à nu des sols pendant la période de fraie) (dires d'experts).

Le cumul de ces différentes pressions, accentué par les effets générés par les pratiques agricoles de l'ensemble des BV des tributaires du lac, contribue à **l'envasement du lac et le déclin de la perchaude** (Carignan and Lorrain 2000, Chapdelaine and Duchesne 2009, MDDEFP 2013).

L'effondrement de la population de perchaudes témoigne de la détérioration préoccupante de cet écosystème exceptionnel (TCRLSP 2017). Cette espèce est capturée par la **pêche commerciale** au moyen de filets depuis le XIXème siècle et est devenue l'espèce majoritaire dans les captures à partir de 1960 (MDDEFP 2013, Lévesque 2018). **Les modes de pêche de loisir** généralement pratiqués sur le LSP se répartissent entre la pêche en eau libre en embarcation, la pêche à gué et la pêche à quai, la pêche blanche. A partir des années 1980, la pêche de loisir devient l'activité récréative la plus populaire du lac, mais a considérablement réduit depuis. Il existe aussi des pratiques de **pêche de subsistance** pour les communautés autochtones (MDDEFP, 2013). Cependant à partir de 1994 est observé **le déclin des stocks de perchaude** avec une diminution critique des juvéniles dès le début des années 1990, et en

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

2008, seulement 12.3 tonnes de perchaudes sont prélevées au lac, comparativement aux 300 tonnes pêchées dans les années 1980 (dires d'experts). Avant la mise en place d'un moratoire en 2012, la perchaude était l'espèce la plus recherchée par les pêcheurs lors de la saison de pêche hivernale (MDDEFP, 2013), mais le doré lui a succédé. Comme au Léman, les pratiques et techniques d'accès aux SE évoluent et la demande s'adapte aux conditions changeantes de la fourniture.

Une grande diversité de pratiques récréatives et de loisirs sont associées aux **SE culturels**, essentiellement des sports de glisse sur l'eau (kitesurf, planche à voile), de navigation en embarcations légères (kayak, rabska et autres embarcations), de navigation de plaisance et d'observation de la nature, notamment les oiseaux en période de migration. Les haltes migratoires de la grande oie des neiges et de la bernache du Canada engendrent chaque année des retombées directes et indirectes de plusieurs millions de dollars (He et al, 2016). Ceci étant ces SE sont affectés **par un manque d'accessibilité au lac** : 90% des rives sont privées et la disposition des longues parcelles culturelles perpendiculairement aux routes limite fortement l'accès au plan d'eau. Par ailleurs, il existe peu de rampes de mises à l'eau pour les pêcheurs et 40% de la surface du lac est interdite pour cause de risques suite à des **essais de tirs d'obus** tirés dans le lac après la seconde guerre mondiale (dires d'experts). **La baignade est interdite** du fait des contaminations bactériennes fécales et virales dans la partie nord du lac. Malgré ces problématiques, le lac participe à **l'identité locale et l'image du territoire, au bien-être moral et mental**, il est une inspiration artistique, un support intéressant pour les films documentaires de nature, un lieu de cohésion sociale (Godmaire & Sauvé, 2005 ; He et al, 2016)

Tous ces SE d'approvisionnement et culturels sont soutenus par d'importants SE de régulation : **lutte contre les crues et inondations, régulation des qualités de l'eau et des milieux, qualité du sol en zone inondable, maintien des cycles de vie, habitats et patrimoine génétique**. Les bandes riveraines et les marais agissent comme des filtres naturels, participent à la séquestration du carbone et la régulation du climat (dires d'experts). L'évaporation de l'eau, l'évapotranspiration des plantes et zones boisées peuvent atténuer les événements extrêmes de température localement, la force du vent, limiter la fonte des neiges et être bénéfiques à l'agriculture et limiter les phénomènes de crues, d'étiages et d'érosion (He et al. 2016). Les réseaux racinaires dans la plaine littorale et les macrophytes peuvent freiner la progression des pollutions et les contaminations d'organismes pathogènes (He et al. 2016). Enfin, tous ces habitats soutiennent la biodiversité indispensable à la fourniture de tous les SE **et à la résistance du lac** aux perturbations. Il est à noter que ces milieux génèrent deux **dis-services** : favoriser le développement des moustiques et le comblement du lac par la réduction de l'écoulement. A ce titre, les herbiers, captant les contaminants et les sédiments, provoquent le développement d'une charge interne relarguée à chaque crue, ce qui engendre des épisodes cycliques de contaminations importantes.

❖ Diffusions des informations, savoirs (et des « *intox* »)

La période 1988 - 2008 est une époque charnière pour le SSE : les impacts de la pollution sur les SE s'accroissent et se complexifient : des structures de gestion du LSP émergent alors et des outils et protocoles de suivi de la qualité de l'eau sont créés, ce qui **organise formellement le champ de la décision**. Comme pour le SSE des grands lacs alpins, la structuration du champ de la décision et la mise en place des actions de gestion se sont opérées par étape.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Dans la période de l'intensification agricole 1960 - 1980, **il n'existe pas de conscience populaire** des risques et des impacts des pollutions sur l'état de l'écosystème lacustre, la santé humaine et les SE rendus (dires d'experts, géographe). La crise mondiale du mercure de Minamata est **la première alerte** ; elle conduit à une action rapide et efficace à l'encontre des industries responsables à proximité du LSP. Par la suite, des suivis réguliers des Eléments Trace Métalliques et micropolluants (PCB, DDT) sont instaurés, les concentrations dans le LSP s'étant révélées inquiétantes (Langlois and Sloterdijk 1989). D'autres suivis du Saint-Laurent et des tributaires du lac sont instaurés à partir de 1979, puis un suivi physico-chimique de tout le fleuve à partir de 1988 dans le cadre du Plan d'action Saint-Laurent. Ce suivi révèle notamment que le phosphore est le facteur de l'eutrophisation (Lévesque 2018 ; direx d'experts écologues). Les suivis sont ensuite renforcés en 1996 avec la création d'un indice de qualité bactériologique des masses d'eaux et l'installation à partir de 2002 de stations de mesure en continu de l'évolution de la qualité de l'eau des trois masses d'eaux s'écoulant dans Saint-Laurent (dires d'experts, gestionnaires). Ceci étant, aucun suivi n'est instauré au sein du plan d'eau, les mesures s'effectuant à l'amont et à l'aval.

Finalement, dans le cadre du Plan d'action Saint-Laurent, apparaît l'organisme Stratégie Saint-Laurent qui **coordonne la gestion du fleuve** entre l'état fédéral, provincial et les collectivités locales (MDDEFP 2013). Le **Comité de Zone d'Intervention Prioritaire** du Lac Saint-Pierre (le comité ZIP-LSP) appartient à cet organisme ; créé en 1996, il a quatre missions principales de mise en valeur, restauration du lac, de sensibilisation des populations aux problèmes environnementaux et de coordination de la gestion du lac (MDDEFP 2013). C'est un acteur clé de la gestion du SSE du LSP.

Un autre acteur tient un rôle majeur dans la gouvernance du lac : les Organismes de Bassin Versant (OBV), structures créées à partir de 2002 pour consigner les problématiques environnementales des BV dans un **Plan Directeur de l'Eau** et **recommander aux collectivités des pistes d'actions et opérations d'aménagement** pour améliorer la qualité de l'eau des BV. Huit OBV sont impliqués dans la gestion du lac : cinq sur la rive nord et trois sur la rive sud (dires d'experts, gestionnaires).

Avant la fin des années 1990, il n'existe pas encore de **volonté politique** de restaurer globalement la qualité de l'écosystème lacustre et il est régulièrement avancé que les écosystèmes du Saint-Laurent, et par extension le lac LSP, ont la capacité d'épurer les eaux, de réguler les pollutions ou de les transférer à l'Océan Atlantique où elles seront diluées (dires d'experts, limnologues). L'histoire de la perchaude est centrale dans la prise en compte de la pollution et de ses impacts. La « *crise* » autour de la diminution des stocks de cette espèce va générer des conflits importants entre pêcheurs commerciaux et de loisirs et devenir tellement critique que les pouvoirs publics doivent engager des solutions. Il s'agit de la **deuxième alerte** de la dégradation de l'écosystème lacustre lancée à la fin des années 1990. Des suivis réguliers de l'espèce sont instaurés au début des années 2000 pour diagnostiquer cet effondrement des stocks, avec une **mobilisation croissante de la communauté scientifique** pour la dégradation du lac à partir de 1995 (Mingelbier et al. 2016 ; direx d'experts gestionnaires).

Les problématiques du LSP sont alors centrées sur l'effondrement de la perchaude. On accuse les pêcheurs professionnels d'être responsables d'une surpêche. Cependant, suite à l'identification des problèmes d'habitats (diminution des herbiers et espèces de poissons aux mêmes exigences écosystémiques que la perchaude), des changements forts dans le

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

diagnostic sont apportées en 2007, avec le lancement d'études portant sur les herbiers à macrophytes, la qualité de l'eau et les milieux de la plaine inondable du lac (dires d'experts). Cela provoque un « *virage* » dans les études sur le lac avec un intérêt pour l'ensemble de l'écosystème, la prise en compte de l'importance des zones humides et de la plaine inondable. Une **troisième alerte** des pollutions du lac est donc donnée vers 2012, mettant en avant la **dégradation majeure des habitats du lac et de sa plaine inondable**, notamment des zones de reproduction et d'alimentation des poissons. Cette alerte est lancée par le MDDEFP⁴ et les OBV, appuyée par les usagers du lac et les ONG (dires d'experts, gestionnaires, écologues). L'idée est également émise que les pollutions du lac sont nombreuses et véhiculées depuis des décennies dans l'immense BV et **qu'il est nécessaire d'agir à cette échelle si l'on souhaite restaurer le lac**. En parallèle est donc lancé un diagnostic plus général de l'état du lac et de la plaine inondable pour expliquer les diminutions des stocks de perchaude.

De nos jours, il existe des intérêts contrastés générateurs de **tensions entre parties prenantes** de la gestion à propos de l'avenir de la plaine inondable. Trois grands groupes d'intérêts constituent le système d'acteurs actuel (Lévesque et al. 2018) : (1) les acteurs en faveur de la **maximisation des rendements en agriculture** de la plaine inondable (acteurs du monde agricole, dont le MAPAQ⁵ et l'UPA), (2) des acteurs « **pro-conservation du lac** » (chercheurs, pêcheurs, usagers impactés par les dégradations du lac, ONG, le MELCC et le MFFP⁶), (3) les **agriculteurs** enfin qui mettent en avant leur contribution en respectant les lois et règlements, le manque de relations entre les différents ministères et que la source de nombreux problèmes du lac se situent dans le BV. Au niveau du territoire du lac, les populations riveraines, ONG locales environnementales et bénéficiaires des SE – notamment les pêcheurs – sont inquiets depuis longtemps par les problématiques du lac, la dégradation de l'écosystème et ses ressources et les conséquences sur la santé (Godmaire and Sauvé 2005 ; dires d'expert géographe). Ces acteurs locaux joueront par ailleurs un rôle important de **sentinelles du lac et d'éveilleurs publics** dans la prise en compte des pollutions et la sensibilisation à la grande biodiversité du lac (Godmaire and Sauvé 2005), bien qu'ils ne se sentissent pas toujours écoutés par les scientifiques et décideurs (dires d'expert, géographe). Malgré tout, le lac reste peu connu des grandes villes proches et l'on observe un **détachement de plus en plus fort** des populations locales néo-rurales. Ce détachement au lac par la culture locale se ressent dans les associations de protection et sensibilisation à l'environnement du lac, qui possèdent de moins en moins de membres (dires d'expert, géographe).

Cette succession d'alertes des dégradations du lac montrent que les problématiques de l'écosystème lacustre et des SE n'ont pas été suffisamment comprises et prises en compte par les décideurs en partie du fait d'un manque d'informations valides sur l'état du lac et de son fonctionnement et des inerties administratives (financements notamment) et des prises de décision. Tout ceci a conduit à une **compréhension tardive des problèmes de dégradation des qualités de l'eau et des milieux du lac**. Aussi, à l'heure actuelle des **manques de connaissances** sont toujours identifiés sur les impacts des activités humaines, sur les qualités de l'eau et des milieux, sur l'état des bandes riveraines, sur la plaine inondable, sur les herbiers à macrophytes. Un manque de connaissances réside également sur les mesures compensatoires à mettre en place pour favoriser un développement durable de l'agriculture

⁴ Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques

⁵ Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

⁶ Ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

littorale et dans le BV du lac. La **complexité du réseau d'acteurs** et les conflits limitent la prise de décisions.

❖ Construction d'objectifs de gestion

La complexité du réseau d'acteurs, le partage du BV entre les Etats-Unis et le Canada, la propriété du LSP à l'Etat provincial et la fragmentation des domaines de compétences des collectivités territoriales impliquées dans la gestion du lac, de son littoral, de son BV et de ses usages limitent le **degré d'autonomie** du SSE. Pour y faire face, le MELCC lance en 2013 une Stratégie d'Intervention pour l'Avenir du lac Saint-Pierre visant à déterminer et mettre en œuvre un plan d'actions destiné à améliorer l'état de santé du lac tout en permettant la cohabitation des usages. Pour mettre en place cette stratégie, une **Table de Concertation Régionale de la zone du lac Saint-Pierre** (TCRLSP) est instaurée en 2014. Les TCR visent à mettre en place et harmoniser la gestion intégrée du Saint-Laurent dans le cadre du Plan d'action Saint-Laurent. La TCRLSP est administrée par le comité ZIP du lac Saint-Pierre, c'est un organisme de pilotage des suivis du lac et de mise en relation des parties prenantes de la gestion du lac (70 organismes membres). Le choix de **réduire le domaine d'action** de cet organisme aux sous-bassins versants des 11 tributaires du lac a été adopté pour faire face à l'immensité du BV et se concentrer sur les principales sources de pollution du lac.

Sur cette base, elle met en place des **comités de travail** pour étudier certaines thématiques spécifiques, organise des **concertations entre parties prenantes** de la gestion dans le but de concilier les idées, les intérêts de chaque structure et les actions, et **émet des recommandations** de gestion directement aux acteurs concernés, à qui revient la charge de suivre ou non ces recommandations. En outre, la TCRLSP organise chaque année un **forum citoyen** pour sensibiliser les acteurs locaux et riverains à l'état de santé du lac, porter à connaissance les actions engagées et recueillir les idées et intérêts des populations locales (TCRLSP 2016).

Des **enjeux forts** sont associés au LSP : (1) à la fois des enjeux économiques important autour de **l'agriculture**, qui est une activité importante à l'échelle du SSE, (2) en terme de **maintien des SE**, notamment pour la pêche, la pêche de subsistance, la navigation commerciale, (3) mais également en terme de **conservation** : le lac est classé en zone RAMSAR d'intérêt écologique et fait partie d'une réserve de Biosphère de l'UNESCO. Les atteintes à l'écosystème lacustre et la biodiversité, les changements de MUS et la présence de la voie commerciale de navigation remettent en cause ces classements (dires d'experts gestionnaires, écologues, Simoneau 2014). Prenant en compte ces trois enjeux exprimés par les acteurs en concertation, la TCRLSP a opté pour trois grandes orientations stratégiques qui cadrent ses recommandations : (1) protéger les milieux naturels fonctionnels pour la faune, (2) restaurer les habitats essentiels du littoral, (3) accompagner les agriculteurs dans l'instauration de nouvelles pratiques plus durables et compatibles avec les enjeux de conservation (TCRLSP 2017). Les enjeux et actions de gestion sont regroupés au sein du Plan Général Régional du Lac Saint-Pierre modifié tous les 5 ans qui organise l'action au travers d'un **plan de suivi**, une **priorisation des recommandations** de gestion et **des échéanciers**.

Plusieurs **obstacles à l'action** sont par ailleurs identifiés, notamment le **manque de cadrage réglementaire** pour la gestion spécifique de l'écosystème lacustre, juridiquement rattaché au fleuve Saint-Laurent et le non-respect de certains règlements. En effet, trois textes de loi (la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables – PPRLPI ; le Règlement

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

des exploitations agricoles – REA et le Code de gestion des pesticides – CGP) interdisent les activités agricoles dans les plaines inondables et l'épandage de matières fertilisantes et pesticides dans les cours d'eau ou près de ceux-ci. L'agriculture a néanmoins toujours été présente et tolérée au LSP car elle fournissait des zones de reproduction et d'alimentation pour les poissons, les oiseaux migrateurs et générait des gains économiques pour les agriculteurs. Avec l'intensification des pratiques agricoles et la disparition des pâturages, les règlements n'ont pas évolué et l'agriculture intensive sur le littoral a pu se développer et s'étendre. Cependant, il est très difficile aujourd'hui de retourner vers l'ancien modèle de pratiques agricoles en raison de l'évolution des forçages socio-économiques. Malgré les caractéristiques uniques de la zone inondable et du lac (superficie, intérêt pour la conservation), les activités agricoles ne font pas l'objet d'un encadrement spécifique, ces activités bénéficient d'aides financières et assurances contre les crues et aléas naturels comme n'importe quel autre espace agricole soumis à ces événements (TCRLSP 2017). L'action au LSP est néanmoins motivée au niveau des gouvernements car elle peut servir d'appui à des **évolutions réglementaires à l'échelle de la Province du Québec**.

Aussi, les OBV, la TCRLSP **manquent de moyens financiers et humains** pour réaliser des expertises et des suivis réguliers de l'écosystème lacustre. Des moyens manquent également pour agir sur la réglementation et mettre en place les actions qui sont des opérations coûteuses. Récemment, une somme importante de 15 millions de dollars canadiens, financée par le MELCC, est allouée à la réhabilitation de l'écosystème lacustre : 12 millions dédiés à la restauration faunique et 4-5 millions à la création d'un pôle d'expertise multidisciplinaire sur la gestion du littoral du lac Saint-Pierre et la recherche de nouvelles pratiques agricoles permettant d'allier conservation et développement économique des territoires (dires d'experts ; http://fondationdelafaune.qc.ca/initiatives/programmes_aide/162).

❖ Actions de gestion :

Avant la fin des années 1990, peu d'actions sont engagées directement pour la protection et la restauration du lac. Des actions sont prises en premier lieu pour **optimiser certains services** comme la navigation entre 1930 et 1985 (construction d'îlots artificiels pour lutter contre les embâcles dans le lit du Saint-Laurent et hausse de la régulation du débit du fleuve), puis deux programmes sont mis en place à l'échelle du Québec pour **lutter contre les pollutions ponctuelles** (1978 : programme d'assainissement des eaux usées du Québec ; 1988 : programme de réduction des rejets industriels). Dans la continuité du programme d'assainissement, des émissaires de surverses et réservoirs souterrains sont construits dans le BV pour faire face aux surcharges dans les STEP. Avec la prise de conscience de la riche biodiversité du lac et des plaines inondables dans les années 1990, des **mesures de conservations** sont engagées avec la reconnaissance du système écologique lacustre comme zone humide d'importance internationale selon la Convention de Ramsar (1998), la création d'une Réserve de Biosphère (2000), la mise en place d'un réseau d'aires protégées de 250 Km² dans la plaine inondable et la restauration de marais par des associations locales.

Des traitements de **type loco-régionaux** visant à réguler les impacts des pêches sur le lac sont élaborés au début des années 2000. L'objectif de ces mesures est de mieux équilibrer la pression de pêche entre pêcheurs commerciaux et de loisir au travers du rachat de permis de pêche, la mise en place de quotas sur les captures et de périodes d'ouverture de la pêche (dires d'experts). Malgré les efforts engagés, la situation ne s'améliore pas et le MDDEFP décrète en 2012 un moratoire de cinq ans sur la pêche sportive et commerciale à la perchaude

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

au lac Saint-Pierre (MDDEFP 2013). C'est une mesure critique qui montre l'inefficacité des actions engagées pour améliorer les stocks de perchaude. Ce moratoire va entraîner une baisse des bénéfices des pêches. A l'issue des cinq années de moratoire, les diagnostics n'ont pas montré d'améliorations dans les stocks de l'espèce et le moratoire a donc été reconduit pour une période de cinq ans, jusqu'en 2021 (Lévesque 2018). Peu à peu, **la perchaude est devenue le symbole de la restauration du lac.**

La construction du champ de l'action s'opère essentiellement à partir des années 2000 et aboutit à la création de la TCRLSP. Depuis, plusieurs **diagnostics** ont été engagés dans la plaine inondable du lac, mais qui restent insuffisants. L'objectif maintenant serait de dépasser le diagnostic écologique classique pour qu'il soit davantage adapté à la gestion adaptative, prenant en compte l'ensemble des usages du lac et des facteurs de stress générés dans le BV. Le financement d'un pôle d'expertise multidisciplinaire participe à cet objectif.

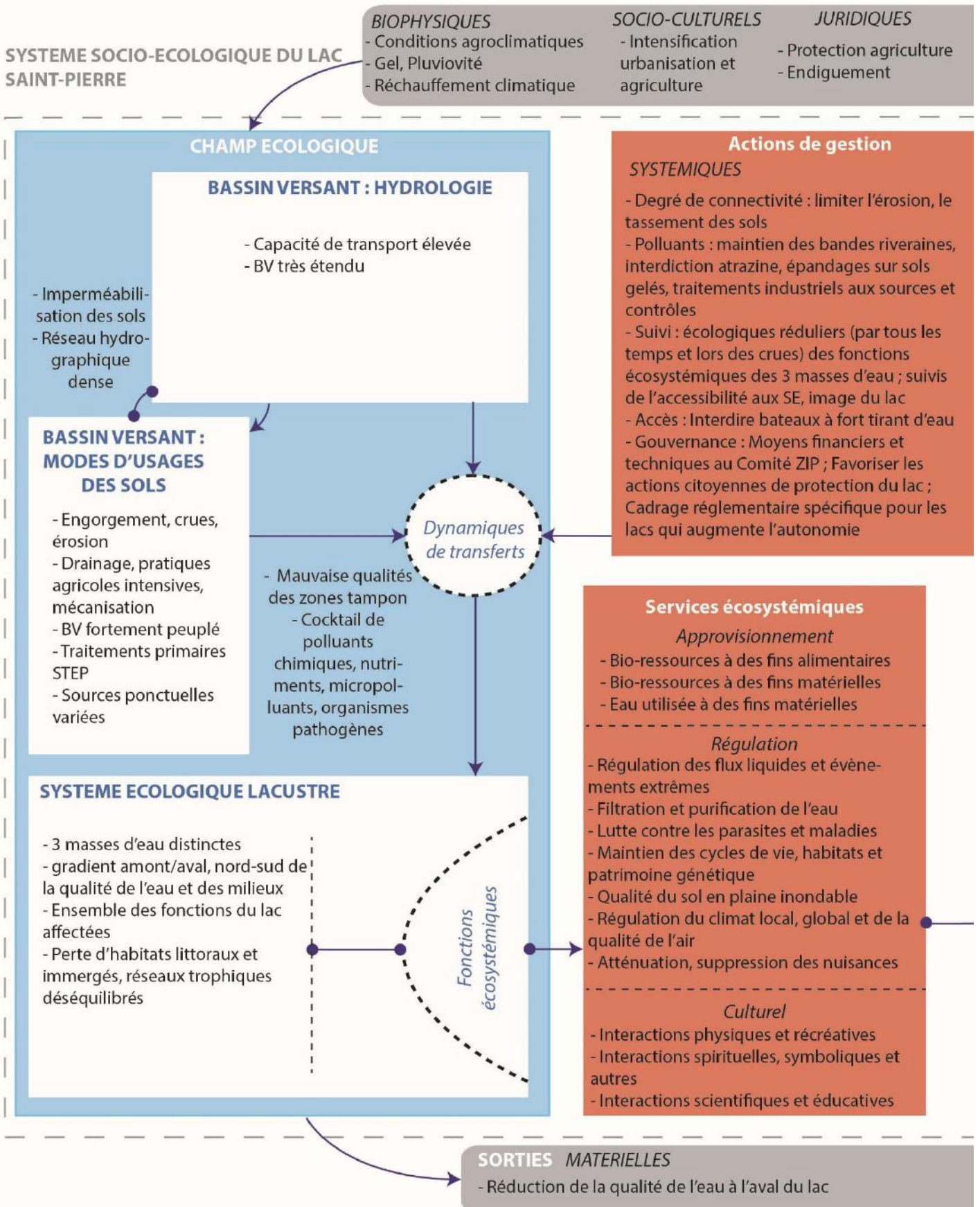
L'utilisation des SSE permet de réaliser un **diagnostic dynamique** et de faire apparaître les chaînes causales et les bouclages que peut initier la gestion du lac pour réduire les problématiques du LSP. A partir du modèle SOALP, nous pouvons dégager les principales menaces pour le lac à partir de chacun des compartiments du SSE. Ces menaces sont autant de leviers à l'action qui permettraient de limiter les atteintes aux fonctions écosystémiques du lac et amorcer sa restauration.

Le tableau 6-2 dresse une synthèse des traitements et ensemble d'actions qui sont proposées par les interlocuteurs enquêtés dans le cadre de cette étude. Ces informations peuvent être synthétisées avec la typologie des actions de gestion. Elles sont reprises également dans la Figure 6-14 suivante.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs :
un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Application du modèle SOALP au socio-écosystème du Lac Saint-Pierre (Québec, Canada)



Légende

- Composante Compartiments
- Fonctions clés Fonctions clés
- Interactions entre compartiments
- Déterminants de la fourniture en SE
- Déterminants de la demande en SE
- Forçages exogènes
- Produits du SSE

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Application du modèle SOALP au socio-écosystème du Lac Saint-Pierre (Québec, Canada)

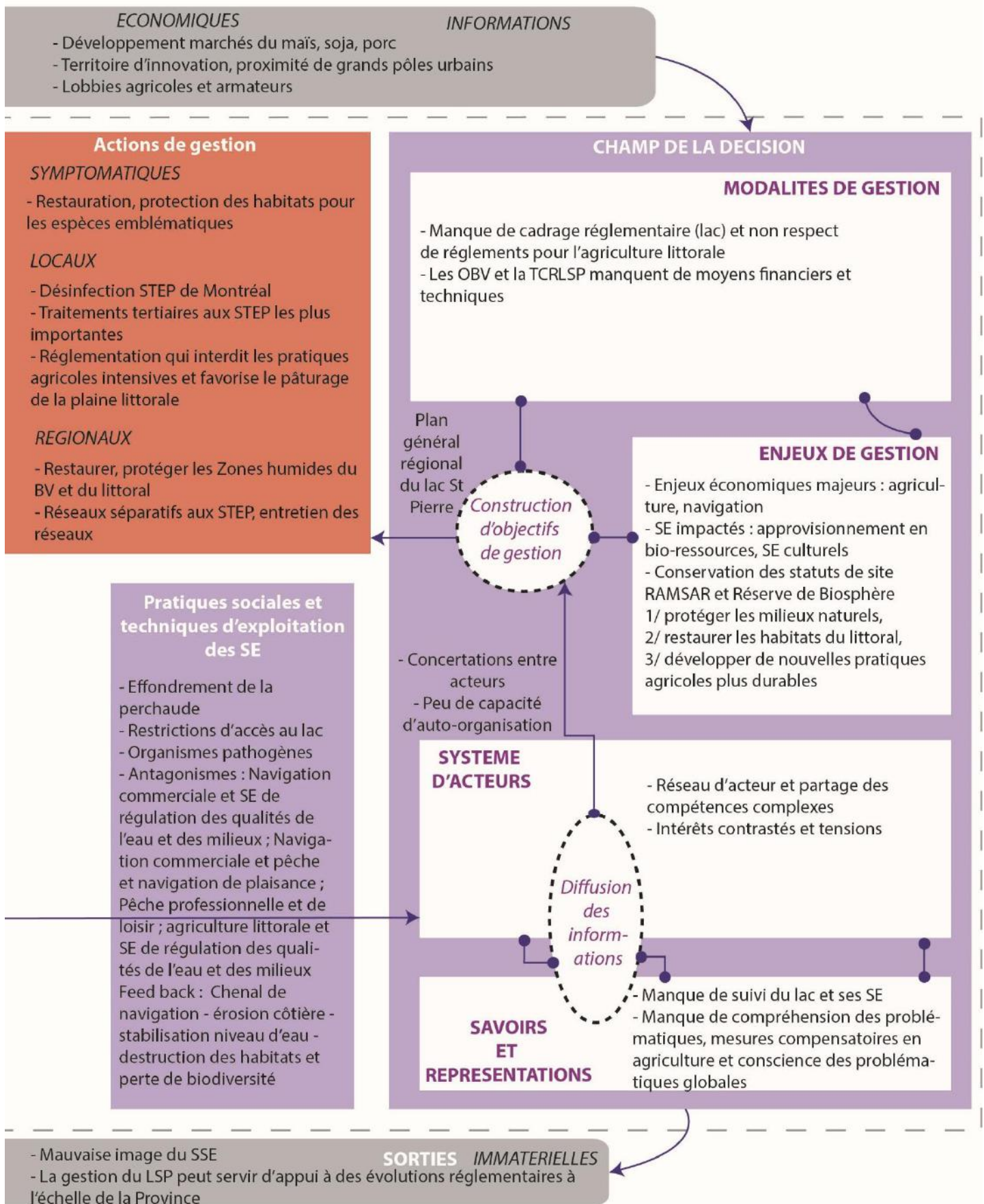


Figure 6-14 : Application de SOALP au SSE du lac Saint-Pierre

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Tableau 6-2 : Proposition d'actions de gestion à partir des dires d'experts rencontrés

Types d'actions	Descriptif de l'action
<i>Traitements symptomatiques</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Restauration des habitats littoraux et herbiers
<i>Traitements locaux</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Rachat de terres cultivées en plaine inondable • Réduction des rejets de nutriments des piscicultures • Traitement tertiaire de la STEP de Montréal (prévu pour 2020) et aux plus importantes STEP du BV • Davantage d'aménagements d'accès au plan d'eau
<i>Traitements régionaux</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Maintien d'un couvert végétal en période de crue dans le BV • Contrôle de l'écoulement des drains pour retenir le P sans favoriser l'écoulement de surface, • Entretien, restauration des bandes de rives et zones humides du BV (attention, possible relargage de la charge en contaminants accumulés) • Réseaux séparatifs des eaux usées et pluviales et meilleur entretien des réseaux d'assainissement
Traitements systémiques	<ul style="list-style-type: none"> • Modification des pratiques de fertilisation, de phytoprotection et de travail du sol pour qu'elles soient plus durables • Mise en place d'un cadre de gestion qui prescrit des pratiques adaptées aux particularités hydrologiques et écosystémiques • Réduction des pollutions à la source : éviter le sur-enrichissement, identifier les périodes d'épandage les moins à risque, favoriser les rotations des cultures, limiter les nutriments dans l'alimentation animale, favoriser la conversion des cultures • Adoption des pratiques culturales en semi-direct anti-érosives • Interdiction de l'utilisation de l'atrazine • Instauration de suivis réguliers des 3 masses d'eau du lac qui permettent de mesurer par tous les temps (notamment en période de crue) et renseigner l'état des fonctions écosystémiques de chacune des masses d'eaux du lac • Evolution de la réglementation pour limiter les pratiques intensives en agriculture littorale, qui favorise les pâturages et limiter la destruction des zones humides. • Allocations plus importantes de moyens financiers à la TCRLSP pour mettre en place des suivis plus importants, plus réguliers du lac • Favoriser le développement des actions citoyennes en faveur de la protection du lac • Définir d'une vision partagée entre parties prenantes (incluant les citoyens) à long terme d'évolution du SSE lacustre • Mise en place d'un cadrage réglementaire spécifique pour le lac

6.2.5 Composantes du SSE associées aux activités de pêche et élaboration de compromis entre fourniture et demande en SE

Dans cette partie, nous allons appliquer le modèle conceptuel SOALP à l'étude d'un service écosystémique spécifique : le SE d'approvisionnement en bio-ressources à des fins alimentaires (« SE pêche »). La pêche professionnelle est une activité traditionnelle des grands lacs alpins qui possède une place particulière dans le SSE. Au cours du XX^{ème} siècle se popularise une pêche de loisir, si bien que les deux types de pêches (professionnelle et de loisir) sont associées à différents bouquets de SE : à la fois une relation forte avec **les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux et avec les SE culturels**, dont les pratiques déterminent en partie les niveaux de demande et d'accès. Par ailleurs, nous avons vu en chapitre 5 que les perturbations subies sur le SE pêche sont souvent l'une des **premières manifestations visibles** des problèmes de pollution et que ces bénéficiaires participent activement aux alertes profanes.

De par les interactions multiples avec chaque compartiment du SSE, nous pouvons émettre l'hypothèse que l'analyse fonctionnelle de ce SE et l'étude de ses interactions avec les autres composantes du SSE feront émerger un nombre important de **composantes clés qui pilotent les pratiques d'exploitation des SE et les mécanismes généraux impliqués dans leur gouvernance**. L'étude de ce SE permettra d'explorer à la fois (1) la transmission des chaînes de causes à effet dans le SSE conduisant à modifier la fourniture et (2) les modalités d'adaptations de la demande à ces évolutions. Au travers d'une analyse des SE pêche des lacs d'Annecy et du Léman, l'objectif sera d'explorer les composantes du SSE permettant d'analyser l'évolution de ce service en réponse aux dynamiques du système et de cadrer des prospectives.

❖ Démarche d'application de SOALP

Cette analyse repose sur un **recueil des discours des pêcheurs professionnels et de loisir du Léman et du lac d'Annecy**, enquêtés sur les composantes du SE et leurs évolutions en réponse aux changements d'état du SSE. Comme démontrés dans les applications précédentes, ces changements d'état sont déterminés par les problèmes de pollution, l'évolution des usages des lacs et la construction de la gouvernance. Les informations recueillies sont complétées par des **données écologiques** sur les captures des espèces cibles des pêches et **des données réglementaires** relatives à la gestion de ces activités. Le couplage de ces différentes informations nous permettra de décrire tour à tour les interactions entre les compartiments du SSE et les **facteurs endogènes et exogènes** qui déterminent la fourniture et la demande en SE pêche. Cette partie étudie dans un premier temps l'influence des facteurs endogènes au système et dans un deuxième temps des facteurs exogènes au SSE.

Afin de conserver l'anonymat des personnes interrogées, les « *verbatim* » mobilisés dans cette analyse sont référencés par des numéros et synthétisés en Annexe 6-1. Chaque verbatim est associé au type de bénéficiaire du SE (pêcheur professionnel et de loisir) et le lac sur lequel il exerce ses pratiques (ex : « *professionnel Léman 1* » fait référence au premier pêcheur professionnel enquêté sur le Léman).

Dans cette partie le terme « *poisson* » fait référence aux poissons et écrevisses. La chasse au gibier d'eau, en tant que pratique associée au SE d'approvisionnement en bio-ressource, n'est pas considérée dans cette enquête.

❖ Les facteurs endogènes de changement d'état du SSE et leurs influences sur le SE

Les interactions entre compartiments du SSE participent directement ou indirectement à l'état du SE pêche. Dans le chapitre précédent ont été approfondies les relations entre le système écologique lacustre, les SE de régulation et les SE d'approvisionnement. Nous avons vu notamment que le SE pêche est fortement lié aux SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux, mais que ces relations ne sont pas linéaires en fonction des besoins spécifiques des espèces et des types de polluants. Dans cette partie, nous centrerons alors notre analyse sur les **facteurs endogènes qui déterminent l'accessibilité et la demande** en SE, sur les **modalités d'adaptation** face à des changements de la fourniture et sur le **rôle de la gestion** des pêches dans ce contexte.

Adaptations des pratiques d'accès à la variabilité de la fourniture en SE

La perche et la féra, le brochet, l'omble-chevalier sont des espèces aux besoins antagonistes en terme de régulation des qualités de l'eau et des milieux (amateur Léman 2) : la perche est une espèce de milieu mésotrophe-eutrophe tandis que les trois autres de milieu oligotrophe (Zhang 1989, Massol et al. 2007, Pinay et al. 2013). Les phases successives d'eutrophisation et de ré-oligotrophisation ont alors fortement modifié les stocks des espèces dominantes à des degrés divers. L'histoire de la pêche dans les grands lacs alpins est largement déterminée par **l'abondance de ces quatre espèces**.

Toutes ces espèces sont très prisées par les pêcheries et les perturbations des qualités de l'eau et des milieux peuvent engendrer des pertes économiques importantes pour les pêcheurs professionnels car elles influencent la fourniture du SE pêche et les marchés du poisson (demande en SE). Les bénéficiaires des SE sont capables d'**adapter leurs pratiques aux variabilités de la fourniture** et de capturer en priorité les espèces à forte valeur commerciale et celles qui sont présentes en plus grand nombre (professionnel Léman 2 ; professionnel Léman 3).

Hors de ce contexte de pollution, la fourniture en SE pêche est variable dans le temps et l'espace : la fourniture est plus importante dans certains secteurs et profondeurs de pêche et **certaines techniques sont mieux adaptées à certaines périodes de l'année** en fonction du cycle de vie des poissons et de la disponibilité en nourriture. **L'état des habitats** est une autre variable déterminante de la variabilité spatiale et temporelle de la fourniture. Par exemple à Annecy, les pêcheurs mentionnent que **l'aire de fourniture du SE** s'est réduite sur les espaces littoraux depuis les années 1980. En conséquence, les pratiques de pêche du bord sont en forte régression depuis cette époque (amateur Annecy 4).

La qualité de l'eau et des milieux peut entraîner une prolifération d'une espèce cible par rapport aux autres et engendrer un phénomène de **spécialisation des pratiques et techniques de pêche dans la capture de certaines espèces** (Professionnel Léman 3). Cependant ces phénomènes de « *mono-pêches* » rendent les bénéficiaires plus dépendants aux fluctuations de la fourniture du SE et sont plus vulnérables aux fortes baisses de l'espèce cible privilégiée. La réduction des captures de féra depuis 2015 sur le Léman inquiète beaucoup les pêcheurs professionnels spécialisés dans la capture de cette espèce depuis la fin des années 1990. La même dynamique s'était produite dans les années 1970 pour les perches (chap 5.3) et avait entraîné la perte d'un nombre important de bénéficiaires suite à la forte réduction de l'espèce.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Cette crise avait été aggravée par une évolution importante de la réglementation⁷ (Gagnaire 1988).

Les pêcheurs de loisir sont moins contraints par ces diminutions de stocks de poissons, mais celles-ci peuvent générer une perte **d'attractivité** pour le SE ou certaines pratiques et à terme une diminution des bénéficiaires (amateur Annecy 4).

Par ailleurs, **les antagonismes entre les différents SE réduisent l'accessibilité à certaines pratiques**. Le bruit, les vagues sont des nuisances pouvant être provoquées par des bénéficiaires des SE culturels (wake surf, plaisance...) qui gênent la pratique des pêcheurs de loisir. La sur-fréquentation du lac d'Annecy est notamment devenue une contrainte considérable l'été et beaucoup de pêcheurs de loisir stoppent leurs pratiques durant cette période (amateur Annecy 4).

Ces éléments montrent que les pratiques sociales et techniques d'exploitation des SE sont dépendantes de deux facteurs importants : d'une part l'accessibilité aux SE qui est associée à l'état des SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux, les antagonismes entre SE et d'autre part le niveau de demande en SE exprimé par les bénéficiaires directs (les pêcheurs) et indirects (les consommateurs). Ces facteurs associent le compartiment des pratiques sociales et techniques d'exploitation des SE avec celui des services écosystémiques d'une part et avec les bénéficiaires et le système d'acteur du SSE d'autre part. On remarque également qu'une modification de la fourniture en SE peut affecter l'ensemble de la « filière pêche » et vice versa.

L'accessibilité au SE est déterminée par l'évolution des techniques de pêche

Les contraintes qui pèsent sur l'accès au SE ne sont pas les mêmes en fonction des **caractéristiques techniques des engins de pêche utilisés**. Par exemple, à certaines périodes, des blooms phytoplanctoniques peuvent apparaître et colmater les filets des pêcheurs professionnels (Professionnel Léman 2). Les captures de féra des pêcheurs professionnels sont alors réduites, tandis que les pêcheurs de loisir qui utilisent des lignes pour capturer les poissons sont généralement moins impactés.

Les innovations techniques sont un autre facteur important de variabilité des pratiques de pêche. Au début du XX^{ème} siècle, la pêche professionnelle est une activité artisanale caractérisée par peu de moyens de pêches et des techniques qui ne permettent pas un rendement élevé. La pêche se pratique avec des barques en bois avec ou sans voiles et obligatoirement à deux pêcheurs minimum : pendant que l'un fait avancer l'embarcation avec des rames, le second pose et relève les filets. Les pêcheurs professionnels fabriquent bien souvent eux-mêmes leurs filets en chanvre, et plus tard en coton, qu'il fallait « *vitrioler* », c'est-à-dire plonger dans un bain de sulfate de cuivre afin d'éviter leur pourrissement, leur donnant une teinte verte caractéristique. L'apparition en 1952 du **monofil nylon imputrescible** pour la composition des filets va permettre d'augmenter le temps de travail productif (il n'est plus nécessaire de vitrioler les filets) et les rendements de la pêche, facilitant ainsi l'accès aux ressources du lac (Gagnaire 1988). **L'arrivée des moteurs sur les embarcations** en 1922 et **leur évolution** vers des moteurs toujours plus puissants au cours du siècle est une autre avancée très importante pour la pêche entraînant un gain d'autonomie (il n'est plus nécessaire d'être

⁷ Interdiction du double emploi

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

deux sur les embarcations) et l'accès à des ressources plus éloignées qui ont conduit depuis le début des années 2000 à des formes de « *mécanisation* » des pratiques de pêche favorisant la rentabilité et le confort de travail. Cela est surtout valable sur le Léman où « *aujourd'hui, tout jeune pêcheur investit dans un bateau [cabine] plutôt de type mer, plutôt que dans une barque traditionnelle de type lémanique, et il investit dans un vire-filets.* » (professionnel Léman 2). La pêche de loisir a également pu profiter de ces évolutions. **L'arrivée d'internet, des GPS, de l'écho-sondeur et des téléphones portables** sont d'autres innovations qui ont fortement modifié les pratiques et sont aujourd'hui presque devenues indispensables (amateur Léman 3).

Certaines activités de pêche de loisir nécessitent des **moyens matériels particuliers** (embarcation, engins de pêche spécifiques), pas accessibles à tous les pêcheurs pour des raisons économiques ou ne correspondant pas à leurs intérêts personnels. Le facteur « **préférences individuelles de pratiques par les bénéficiaires** » est alors un déterminant de l'accès et la demande au SE, car elle influe sur l'attractivité. Ce facteur est notamment très important pour l'étude de la pêche de loisir où l'on observe des formes de **spécialisations des lacs envers certaines pratiques** du fait des caractéristiques bio-physiques, paysagères et des espèces emblématiques présentes. Ainsi, depuis une dizaine d'années, le Léman devient réputé pour la « *capture de gros poissons* » (professionnel Léman 2). Certains pêcheurs de loisir mettent plutôt en avant la valeur gustative des poissons, différente selon les lacs (amateur Annecy, 3), tandis que d'autres bénéficiaires sont sensibles à certaines composantes paysagères (professionnel, Annecy 1 ; amateur Annecy 4) :

L'accessibilité au SE, la demande, les caractéristiques techniques et innovations et les préférences individuelles de pratiques par les bénéficiaires sont quatre facteurs qui déterminent le choix des pratiques pour l'exploitation des SE. La pression des pêches sur la fourniture est dépendante de ces choix.

Les facteurs qui déterminent la demande en SE pêche

Dans les grands lacs alpins, les pêches sont des activités qui demandent un certain savoir-faire obtenu par **l'appropriation d'informations spécifiques** sur l'exploitation du SE. Les pêcheurs professionnels et de loisir fréquentent beaucoup le lac, certains prétendent que c'est une condition impérative pour exploiter le SE (amateur Léman 3). De ce fait, ces usagers possèdent une grande quantité d'informations sur le lac et les pêches. Le verbatim suivant en est un exemple (parmi beaucoup d'autres) : « *Les meilleures conditions [pour pêcher en lac] : Faut que ça bouge un petit peu. C'est à dire qu'il faut qu'il y ait un [...] petit clapot ; qu'il y ait, pour les ombles, du soleil, impératif [...] ça donne des couleurs aux cuillers de surface. [...] Faut que le lac il soit assez agité pour la truite. [...] Si tu vois plonger les oiseaux dans un rayon d'1Km c'est que y'a du poisson. [...] Y'a les courants, [...] tous ces bouts de bois qui se baladent à plat, c'est que y'a beaucoup de courant [...] La couleur de l'eau : si c'est trop clair, c'est pas bon, si c'est trop blanc, l'eau de neige [chargée en pollen en surface], c'est pas bon. Ce qu'il faut, [...] faut pas qu'on voit le plomb à 2 ou 3 m pour que ce soit bon, [...] le bruit, la façon dont on travaille, le poisson va attaquer ou pas.* » (Amateur Léman 1).

Les informations associées à ce SE prennent la forme de **connaissances scientifiques** sur le fonctionnement des lacs, **juridiques** sur la réglementation des pêches et de la navigation et **profanes sur les pratiques** de pêche et du lac. Les informations scientifiques et juridiques sont diffusées essentiellement par des acteurs en charge de la gouvernance des pêches et/ou du

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

lac (SILA, DDT, AAPPMA) et des acteurs scientifiques. Les savoirs locaux/profanes sont obtenus par la **capacité d'auto-apprentissage** des bénéficiaires, par l'observation, la recherche personnelle et l'expérience ou encore par le **partage d'informations** entre bénéficiaires. Sur ce dernier point, on remarque néanmoins que de nombreux pêcheurs sont réticents à divulguer leurs techniques et leurs « *coins de pêche* » (amateur Annecy 4). Par ce biais, il y a une recherche de préservation du SE de la part des bénéficiaires.

Les bénéficiaires du SE pêche possèdent ainsi une quantité importante de savoirs profanes qui peut dans certains cas leur conférer une forme d'expertise. Ce rôle est reconnu par les autorités locales en charge de la gestion des lacs (dires d'experts – SILA, DDT) et s'observe sur d'autres écosystèmes où la littérature scientifique montre que les connaissances des pêcheurs peuvent offrir une vision fine de l'état actuel des écosystèmes et parfois l'unique source d'information historique des changements des écosystèmes locaux (Nguingui 2002, Johannes and Neis 2007, Le Fur et al. 2011). A ce titre, il est à souligner le rôle important qu'ont joué les pêcheurs de loisir et professionnels dans l'alerte et la prise en compte des problèmes d'eutrophisation des trois grands lacs alpins et leurs actions militantes auprès des collectivités afin que des solutions soient engagées (David 1967, Servettaz 1977; amateur Léman 3).

L'exploitation des SE mobilise également un ensemble de **valeurs**, à la fois économiques (ex : valeur marchande des produits halieutiques) ou socio-culturelles (ex : valeurs esthétiques) qui participent aux **représentations des grands lacs** par les bénéficiaires et leur attractivité. Les informations et représentations sont deux facteurs déterminant leurs pratiques : « *Quand vous pêchez la féra à la canne c'est un poisson qui se bagarre d'une façon extraordinaire, [...] quand vous pêchez à la traine et que vous faites une truite de 4 - 5 kg vous êtes en admiration devant ; vous pêchez des ombles chevaliers, c'est un poisson qui est très noble* » (Amateur Léman 2).

La diffusion d'informations dans le SSE est une variable essentielle qui détermine la demande en SE et les pratiques. Les connaissances et valeurs sont notamment importantes car elles influent sur la durabilité des pratiques des bénéficiaires. La diffusion des informations dans le SSE est alors un facteur clé pour l'exploitation des SE, mais également dans la gouvernance des pêches et du lac en général car elle soutient la possibilité de choix de gestion éclairés.

Les facteurs de contrôle de l'accessibilité et la demande en SE pêche

De par les synergies entre SE, les **traitements systémiques** visant à restaurer le lac vont avoir des effets importants sur les pêches. Cependant, en fonction des préférences de condition des milieux, les actions de gestion systémiques mises en place par le passé ont privilégié certaines espèces au profit d'autres, c'est pourquoi la restauration d'un lac face à l'eutrophisation ne provoque pas toujours une amélioration du SE de pêche (chap 5.3.2). A ce titre, les pêcheurs se demandent souvent si les grands lacs alpins ne seraient pas « *trop* » propres (Amateur Annecy 6). Des **compromis** entre gestion du lac et gestion des pêches sont à trouver (Amateur Léman 2).

Il existe également un certain nombre d'actions de gestion spécifique, qui ont pour but **d'équilibrer la fourniture et la demande** en SE pêche. Le problème posé par la pêche fournit un exemple de combinaison entre **traitements symptomatiques et locaux-régionaux** destinés à rétablir un SE d'approvisionnement par une action directe sur ces services.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Dans le Léman à partir de 1976 et jusqu'en 1982, la pêche va connaître une crise économique et halieutique sans précédent depuis le début du siècle. A la suite de cet épisode, la forme des prises de décisions autour de ce SE change et une réglementation franco-suisse se met en place pour encadrer l'exploitation et homogénéiser la législation des pêches entre les deux pays. Ces accords peuvent être vus comme la formalisation réglementaire de la combinaison entre traitements locaux-régionaux et symptomatiques relatifs à la pêche à l'échelle du Léman ; ils sont révisés tous les cinq ans. Ils comprennent : (1) le nombre de licences annuelles de pêche professionnelle et de loisir qui limitent **le niveau de la demande** en SE en régulant le nombre de bénéficiaires, (2) les périodes d'ouverture de la pêche, les zones de pêche et la réglementation sur les engins de pêche (type d'engin, maille des filets, taille, type d'embarcation, de moteurs ...) pour encadrer **l'accessibilité au SE** dans le temps et dans l'espace, (3) les quotas de pêche sur les espèces autorisées par type de pêche qui modulent le **niveau de fourniture disponible** du SE, et (4) les opérations d'alevinage qui constituent un traitement symptomatique permettant d'augmenter **le potentiel de SE** sur une ou plusieurs années, le plus souvent pour faire face à une diminution inhabituelle des stocks.

En amont de la mise en place de ces actions, se décide un ensemble **d'objectifs de gestion** construit au niveau local par les différentes parties prenantes de la pêche, notamment les associations d'usagers (APERA, AAIPPLA, AAPPMA), acteurs scientifiques impliqués dans le suivi halieutique et représentants des Etats propriétaires des lacs. Pour le Léman, nous venons de l'évoquer, **la gestion piscicole est coordonnée** entre les gouvernements français et suisse dont les dispositions sont listées au sein d'un document (Accord entre le conseil fédéral suisse et le gouvernement de la République française concernant la pêche dans le Léman du 20 novembre 1980). Une **commission consultative** réunissant des experts scientifiques, techniques et administratifs, veille à l'application de l'accord et émet des propositions visant à modifier le règlement d'application. **Les représentants des Etats** impliqués sont tenus d'appliquer ce règlement ; ils peuvent également imposer certaines dispositions supplémentaires, sous forme d'arrêtés préfectoraux pour la France.

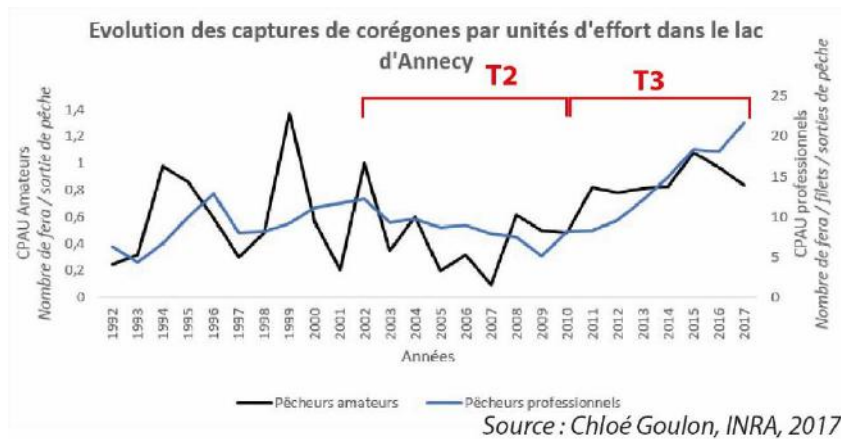
Sur le lac d'Annecy, la gestion des pêches est décidée par l'Etat au travers de la DDT, et de manière indirecte par le SILA, co-gestionnaire du lac, qui coordonne le suivi scientifique et piscicole du lac et qui possède quelques compétences déléguées en matière de protection des habitats naturels, équipements pour la navigation et de conciliation des usages sur le lac. **La gestion piscicole des lacs Léman et d'Annecy peut être qualifiée de « gestion scientifique » car le processus de délibération et de priorisation des actions de gestion est alors essentiellement mené par des experts.**

Les modalités d'adaptation de la gestion des pêches

Il est reconnu que les relations entre pêcheurs professionnels et de loisir peuvent être conflictuelles. Par exemple au début des années 2000 régnait **un conflit** important entre pêcheurs amateurs et professionnels du fait de l'épuisement des stocks de corégones (Professionnel Annecy 1) (Figure 6-15, T2). Une étude scientifique avait été engagée, mettant

en avant un partage inégal de la ressource entre catégories de pêcheurs et une pression de pêche sélective au niveau de la taille minimale de capture (limitée à 38 cm pour les amateurs et à 40 cm pour les professionnels) qui a entraîné une diminution de la croissance des corégones et à terme une diminution de la ressource.

Plusieurs adaptations réglementaires ont été données à cette crise : (1) la diminution du nombre de



Source : Chloé Goulon, INRA, 2017

Figure 6-15 : Evolution des captures par unités d'effort de corégone dans le lac d'Annecy.

pêcheurs professionnels (au nombre de deux depuis 2009 sur le lac), (2) la diminution du nombre de quotas de pêche des pêcheurs amateurs, (3) une taille légale minimale des captures de corégones réduite à 37 cm pour les deux catégories de pêcheurs (SILA 2012; Amateur Annecy 1). Les captures de corégones augmentent à l'issue de ces mesures (Figure 6-15, T3).

La gouvernance du SE pêche n'est pas évidente car ses enjeux dépassent le cadre de la pêche. Elle veille à maintenir un juste équilibre entre les espèces de poissons dont les dynamiques complexes sont multifactorielles, avec des dynamiques pluriannuelles variées en fonction des cycles de vie des espèces, mais où les pratiques de pêche ont un rôle majeur. Cette gouvernance passe également par une résolution de conflits entre usagers. **La gouvernance des pêches doit en conséquence toujours chercher un équilibre entre le respect des enjeux de la conservation de l'écosystème lacustre, les enjeux associés à la nécessité d'exploitation des différents SE ainsi qu'à leur préservation pour le futur.** Cela a entraîné parfois des évolutions de la réglementation, ayant nécessité des annulations ou ajustements quelques années plus tard. A titre d'exemples sur le Léman la suppression de la taille légale de capture des perches en 1960 considérées comme envahissantes, sous l'impulsion de l'eutrophisation, a été réinstaurée en 1980 à la suite de l'effondrement des stocks (Gagnaire 1988), ou plus récemment l'augmentation des tailles légales de captures du Brochet de 40 cm à 50 cm entre 1980 et 1995, puis leur diminution en 2001 à 45 cm (Annexe 6-2). Cet exemple montre également que la **gestion des SE peut parfois être expérimentale.**

Cependant, nous observons que la gestion piscicole permet de maintenir à la fois la profession de pêcheur et l'activité de loisir sur les deux lacs. **Cela est en partie rendu possible par le grand degré d'autonomie et d'auto-organisation au niveau local des acteurs impliqués dans la gouvernance du SE qui permet une organisation de l'action rapide en réponse à**

l'identification d'une pression sur les SE. Ces facteurs sont importants pour la durabilité du SSE car ils favorisent une gestion adaptative.

Les changements de réglementation du SE peuvent entraîner des changements indirects importants et **des rétroactions** dans différentes composantes du SSE, qui dépassent le cadre des pêches. L'exemple le plus parlant est certainement l'autorisation de l'utilisation de l'écho-sondeur⁸ (sondeur) en 1995 pour les pêcheurs de loisir et professionnels sur le Léman et seulement pour les pêcheurs de loisir sur Annecy. Il s'agit d'une autorisation réglementaire (arrêté préfectoral) autorisant l'accès à une innovation technique d'un appareil d'aide à la pêche qui a profondément modifié les pratiques de pêche, notamment pour les pêcheurs de loisir.

Avant son autorisation, les pêcheurs s'orientaient et se positionnaient sur le lac à partir de repères visuels sur le littoral (forme du littoral, présence d'un bâtiment spécifique, végétation en bordure de lac ... - Amateur Léman 3 ; Amateur Annecy 4), ils cherchaient la présence d'oiseaux piscivores en surface pour accéder aux aires de fourniture du SE et se rapprochaient des autres pêcheurs de loisir qui semblaient avoir des « touches ». Ils pouvaient également utiliser des mires pour mesurer des distances sur le lac et des fils à plomb pour les profondeurs (Professionnel Léman 1 ; Amateur Léman 1). L'utilisation de l'écho-sondeur a entraîné l'apparition d'une **pratique de pêche beaucoup plus individualiste** de « *traque au poisson* », où les pêcheurs s'éloignent les uns des autres pour trouver le poisson, et n'ont plus besoin d'attendre à un endroit spécifique que le poisson morde à l'hameçon. Les pêcheurs se déplacent alors beaucoup plus, ce qui modifie leur répartition sur le lac, l'aire de demande en SE et leur vitesse de déplacement. A noter : avec le sondeur, certains pêcheurs utilisent davantage les rames pour se déplacer (Amateur Annecy 2).

Le sondeur permet **d'accéder à de nouvelles connaissances** sur la profondeur, permet aux pêcheurs de se repérer par rapport à la forme des fonds du lac et de localiser les aires de fourniture du SE en fonction de ces paramètres (Amateur Annecy 4). Dans les années 1990, grâce au sondeur, les pêcheurs de loisir ont une **accessibilité accrue au SE et acquièrent de nouvelles informations**. En réponse, beaucoup observent un changement des aires de répartition de certaines espèces au lac d'Annecy : les corégones et brochets qui se pêchaient principalement dans les zones littorales se pêchent dorénavant plus facilement en milieu pélagique (profondeur 10 à 20m, voire > 40m) qu'en milieu littoral (<10m) (Amateur Annecy 3 ; Amateur Annecy 4 ; Amateur Annecy 6). Les pêcheurs professionnels mentionnent également que le sondeur permet de **réduire les conflits** avec les pêcheurs de loisir qui les accusaient autrefois d'épuiser les stocks, alors que le sondeur permet de se rendre compte que le poisson est présent mais ne mord pas forcément (Professionnel Annecy 1). A noter également que la réduction des relations entre pêcheurs sur les lacs s'étend également à terre, puisque les regroupements de pêcheurs sont moins fréquents et **l'ambiance et les coutumes dans les ports ont évolué**. Le sondeur n'est cependant qu'en partie responsable de cette évolution.

Cet exemple montre comment une modification de pratique sur un SE peut avoir des répercussions sur de nombreuses composantes du SSE.

⁸ Le sondeur est un appareil électronique de détection subaquatique, capable d'émettre des ondes dans l'eau qui se réfléchissent sur tout objet et ainsi de pouvoir « lire » les fonds, mesurer la profondeur, détecter la présence d'obstacles ou de poissons à la verticale du bateau.

❖ Les forçages exogènes de changement d'état du SE

Les **facteurs exogènes** au SSE peuvent influencer à la fois sur la fourniture du SE quand ils sont de nature biophysique (réchauffement climatique, espèces invasives, pollutions) ou bien sur la demande en SE s'ils sont associés à des flux d'informations de nature socio-économique, culturelle ou juridique.

Les facteurs exogènes biophysiques

Le **dérèglement climatique** est une perturbation biophysique globale qui inquiète beaucoup les pêcheurs car ils le perçoivent essentiellement comme une menace. Les bénéficiaires sont conscients que les modifications provoquées par les changements de température des eaux peuvent avoir des conséquences fortes sur l'état des stocks de poissons, le système écologique lacustre et leurs pratiques. Ils mentionnent trois impacts majeurs du réchauffement sur la fourniture en SE : (1) le réchauffement perturbe les **périodes de reproduction** du poisson et l'état des stocks (professionnel Léman 3), (2) une fourniture se trouve réduite à certaines périodes et sur certains secteurs du lac ou profondeurs, du fait de perturbations sur **le retournement des masses d'eaux et l'apport de nourriture** aux poissons (amateur Léman 1), (3) le réchauffement favorise **l'implantation d'espèces indésirables** dans le lac (professionnel Léman 3). Ces trois effets du réchauffement sur le lac et les stocks de poissons sont validés par la bibliographie, notamment pour l'omble-chevalier (Jungwirth and Winkler 1984, Gillet 1991).

Les **espèces invasives** génèrent des représentations contrastées selon les bénéficiaires car certaines espèces sont valorisées et apparaissent comme un moyen de diversifier les pratiques de pêche, mais d'autres sont vues comme des menaces au développement des espèces cibles, ou génèrent des nuisances sur les pratiques (ex : dégâts sur les engins de pêche par le développement de moules invasives au Léman). Les écrevisses (écrevisse américaine – *Orconectes limosus* et écrevisse signal – *Pacifastacus leniusculus*) sont des espèces associées à ces deux types de représentations (professionnel Annecy 1 ; amateur Léman 1)

A noter au Léman, l'introduction récente du silure soulève de nombreuses questions sur l'impact de cette espèce sur l'écosystème lacustre et les ressources halieutiques, tant de la part des scientifiques et gestionnaires du lac que des pêcheurs.

Les facteurs exogènes socio-culturels

Parmi les flux d'informations entrants, on peut souligner le rôle important vis-à-vis de la demande en services des **normes socio-culturelles générales**. Voici ce qui s'observe à propos de la pêche dans le Léman : dans les années 1940, les consommations du poisson évoluent en « *friture* », avec l'émergence de la mode pour les filets de perche (*Perca fluviatilis*) et perches juvéniles, en réponse à **l'évolution des modes de vie**. Cette spécialité culinaire locale contribue à une spécialisation de la filière pêche dans la capture et la valorisation de la perche, générant une hausse de la pression de pêche sur cette espèce.

Depuis, cet « *effet de mode* » s'est étendu à d'autres espèces. En réponse, la plupart des pêcheurs professionnels investissent depuis le début des années 2000 dans des machines permettant de couper facilement et rapidement les filets de poisson.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Les changements de normes socio-culturelles peuvent avoir des incidences plus globales sur les composantes du SSE et influencer les coutumes, les relations sociales et même sur le dynamisme, l'animation et le développement des ports de pêche (Professionnel Léman 1).

Les **tendances démographiques** et le **développement économique régional** sont d'autres facteurs exogènes importants qui pilotent la demande et provoquent notamment une hausse importante de la demande en poisson en période estivale.

Les facteurs exogènes économiques

La demande en filet de perche est aujourd'hui bien supérieure à la capacité de fourniture du lac sous l'effet de l'accroissement constant de la demande et de l'amélioration de l'état trophique du lac non favorable à la perche. Par ailleurs, la période la plus prolifique pour cette espèce vient de plus en plus tard dans l'année et ne coïncide pas toujours avec les afflux touristiques.

Le filet de perche est aujourd'hui reconnu comme une spécialité culinaire locale ; il est rare qu'elle ne soit pas proposée au menu des restaurateurs au bord du Léman. Pour faire face à la demande, les pêcheurs professionnels estiment que 80-90% des perches présentes dans les restaurants sont importées, essentiellement des pays du Nord de l'Europe (Suède, Estonie) (DL 22-8-02). Ces **importations** ont débuté à l'époque de l'eutrophisation dans les années 1970, elles représentaient à l'époque une véritable concurrence car les poissons du lac étaient de moins bonne qualité gustative sous le coup de l'eutrophisation (Amateur Léman 2) et le coût des importations était moindre. Aujourd'hui le poisson du lac est bien mieux valorisé et les pêcheurs ont moins de difficultés à écouler leurs productions (Professionnels Léman 2 et 3). Les importations de féra sont beaucoup plus rares.

Les relations entre les différents SSE adjacents

Le SE pêche est également influencé par l'état et le fonctionnement des SSE adjacents. En effet, les SSE des grands lacs alpins s'influencent les uns les autres : à titre d'exemple, **chaque lac possède ses propres spécialités de pratiques en pêche** de loisir et la capture de corégone est pendant longtemps restée une spécialité des lacs d'Annecy et du Bourget. La capture de cette espèce était peu développée au Léman, davantage tournée vers la pêche aux carnassiers, perches ou gros poissons. Plusieurs pêcheurs amateurs mentionnent que le développement de la pêche de féra à la canne a été initié par le **partage de pratiques de pêche** entre pêcheurs des grands lacs alpins. Ces échanges d'informations entre SSE sont favorisés par le développement de concours de pêche « *inter-lacs* », le rapprochement des différentes AAPPMA (voir chap 2.3 pour détails sur ces structures) et la volonté de favoriser le développement des pratiques de pêche spécifiques aux grands lacs alpins (Amateur Léman 3).

Par ailleurs, certains épisodes de pollutions subies sur les SSE à l'échelle de la région (ex : le Rhône) peuvent entraîner une augmentation de la demande du SE sur les grands lacs alpins (Gagnaire 1988).

Ces différents exemples mettent en avant que les forçages peuvent fortement influencer les champs écologiques et de la décision et se traduisent par des adaptations au niveau local et notamment des changements de pratiques sociales et techniques d'exploitation des SE. Les modes de consommation des poissons, qui pilotent en grande partie la demande, sont notamment largement influencés par les forçages socio-culturels souvent difficiles à prévoir

et à contrôler. A ce titre, il nous paraît important de ne pas les négliger et d'identifier les effets qu'ils peuvent provoquer sur la fourniture et la demande en SE.

Conclusion

Les différentes explorations fonctionnelles sur le SE pêche dans les grands lacs alpins présentées dans cette partie illustrent les interdépendances fortes entre les SE et le SSE.

Plusieurs éléments sont à retenir en premier lieu sur le fonctionnement de ce SE :

1. **L'aire d'influence d'un SE** peut s'exporter au-delà des limites du système et attirer des bénéficiaires éloignés, notamment quand le SE d'approvisionnement est en synergie avec les SE culturels,
2. Le SE pêche est un **SE sentinelle de l'état du SSE** car (1) la fourniture de ce service répond rapidement à tout changement de qualités des eaux et des milieux, (2) les pêcheurs jouent un rôle important d'éveilleur public autour des atteintes à l'écosystème lacustre et (3) ce SE peut avoir un impact fort sur l'image du lac et son attractivité.
3. Certains changements de pratique d'un seul SE peuvent engendrer des modifications sur plusieurs composantes du SSE et vice versa. **Les progrès techniques**, en modifiant l'accès au SE pêche, engendrent de la variabilité dans la fourniture (accès à de nouvelles aires de fourniture), mais également dans la demande (changement dans les aires de demande, relations entre pêcheurs), voire sur des composantes du SSE qui ne dépendent pas uniquement des pêches (ex : vie locale aux ports)

Cette application apporte par ailleurs des informations générales sur le fonctionnement du SSE des grands lacs, notamment sur la **capacité d'adaptation** de la société aux changements d'état bio-physique des grands lacs et des SE. Cette capacité d'adaptation est rendue possible grâce à la **diffusion des informations** dans le système et conduit à des modifications de pratiques par les bénéficiaires et la mise en place d'actions de gestion par les parties prenantes de la gestion des pêches. Tout ceci montre l'importance des **apprentissages par les acteurs et bénéficiaires** et que la **capacité d'autonomie et d'auto-organisation** de la gouvernance sont des conditions impératives au succès de la **gestion adaptative** des SSE des grands lacs. En ce sens, le SE pêche et sa gestion dans les grands lacs alpins fournissent un bon exemple de gestion adaptative des SE.

Par ailleurs, au travers de cette étude, nous démontrons que la récolte des **savoirs locaux** des pêcheurs est une méthode qui peut aider à caractériser les SE, et à comprendre le fonctionnement des SSE des grands lacs. Les informations qualitatives et empiriques récoltées par le biais d'enquêtes peuvent être croisées avec des données écologiques et apparaissent comme des outils de **co-évaluation des SE**. Par ailleurs, le modèle SOALP est un outil qui permet de caractériser les interactions entre les différents compartiments du SSE, les multiples interdépendances entre SE. Cela est rendu possible par la capacité du modèle à synthétiser les informations permettant de mieux comprendre, analyser le système et anticiper les évolutions.

6.3 Synthèse : Les modalités de changement d'état du SSE des grands lacs

Dans cette partie, nous allons synthétiser les applications de SOALP réalisées dans ce chapitre et présenter les principaux facteurs de changements d'état du SSE et les réactions du système à ces dynamiques. L'expérience acquise dans nos sites de référence constitue la base de cette réflexion. L'influence des facteurs invariants du système se rapportant à la géologie et à la géographie physique (roches, pentes, altitudes...) n'est pas prise en compte.

6.3.1 Les facteurs du changement d'état

❖ Les facteurs exogènes et endogènes

Les **facteurs exogènes ou forçages** représentent des flux d'énergie, de matière et/ou d'information, ils modifient les caractéristiques de certaines composantes liées du champ écologique et/ou du champ de la décision et provoquent des réponses, variabilités, voire des perturbations.

Parmi les flux d'informations entrantes, on peut souligner le rôle important vis-à-vis de la demande en services, des **normes socio-culturelles** (Encadré 6-1). L'évolution des modes de consommation des poissons pêchés dans les grands lacs alpins en est un exemple. Ces effets socio-culturels « *globaux* » influencent également les modes d'usages des sols du BV (pratiques, aménagements, bâti), voire la composition de la charge externe (ex : apparition de la machine à laver le linge pour le cas de l'eutrophisation).

D'autres forçages exogènes sont des **flux hydro-météorologiques** (thermique, pluie, apports atmosphériques), **de produits** (matériaux, produits alimentaires, industriels, chimiques importés), **d'économies**, de **normes juridiques** (cadre réglementaire national, Directive Cadre sur l'Eau) ou de **connaissances scientifiques**. Ces flux exercent (1) des **pressions** spécifiques sur l'écosystème lacustre et/ou sur son BV, mais aussi des pressions plus globales affectant à la fois des processus écologiques et sociétaux, ou à l'inverse (2) des **moyens d'actions** de la gestion des grands lacs (ex : réglementations nationales, DCE, informations scientifiques globales).

Encadré 6-1 : Les normes socio-culturelles

Elles peuvent être définies comme un ensemble de règles et de *prescriptions sociales*, plus ou moins formalisées, engagées dans les pratiques des bénéficiaires des SE et l'ensemble des acteurs du SSE des grands lacs, servant à *discriminer* des objets ou des attitudes (d'après Lévy & Lussault, 2013). Les normes socio-culturelles orientent les comportements et les représentations des acteurs qui interagissent avec les grands lacs alpins. Les normes socio-culturelles peuvent influencer sur les choix d'occupation et d'usage des sols des habitants du BV, les pratiques sociales individuelles, les effets de mode, comportements et choix techniques dans l'exploitation des SE par les bénéficiaires, ou encore influent sur l'image globale du lac. Les normes affectent donc également l'attractivité des territoires lacustres, la perception des qualités de l'eau et des milieux par les usagers et les choix de gestion des acteurs de la décision. Ces normes varient dans le temps, dans l'espace et en fonction des individus.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

Une part de ces forçages peut être exportée du système sous forme de « **sorties** ». Ces forçages relient différents systèmes avec les SSE des grands lacs alpins par des relations d'échange, de partage ou de dépendance. Avec les changements climatiques attendus, l'accentuation de l'attractivité des lacs est prévisible et des antagonismes entre SE devraient s'amplifier fortement du fait de demandes potentielles de lâchers d'eau pour contrer la sécheresse à l'aval de la zone alpine (Pousse et al. 2015). Aux forçages agissant sur la qualité de l'eau des lacs s'ajouterait probablement donc à terme un **forçage quantitatif** ayant des impacts en cascade sur le niveau des lacs (marnage) et les SE.

Les autres facteurs sont qualifiés de **facteurs endogènes**. Ce sont tout d'abord des variables qui contrôlent des flux entre compartiments du SSE et déterminent l'état des fonctions clé. Il s'agit aussi bien de facteurs régulant les fonctions écologiques du système écologique lacustre (la biodiversité fonctionnelle, les milieux écologiques et paysages lacustre), le BV (conditions d'écoulement de l'eau) ou des co-évolutions lac - société (déterminants et stocks de polluants). Parmi ceux-ci, **les changements de MUS du BV** sont cruciaux car ils affectent les apports de polluants et sédiments des affluents vers les lacs. Les MUS sont à la fois définis selon des conditions environnementales et par des facteurs économiques, institutionnels, d'urbanisation (Encadré 6-2) et d'aménagement du territoire, et par des processus sociaux d'attachement au territoire lacustre (Brunet et al. 1992, Van der Sluis et al. 2015).

Encadré 6-2 : L'urbanisation

Dans la région qui nous sert de référence, l'urbanisation est le principal facteur de changement du MUS depuis 50 ans. Elle résulte d'une pression démographique régionale, voire nationale et transfrontalière (forçages) et s'accompagne d'une intensification des activités humaines, d'un accroissement des intrants en relation avec le changement des modes de production et de consommation, la mise en place d'un système de traitement des eaux usées relativement efficace, du développement d'une pollution diffuse difficile à maîtriser, enfin d'une modification des ruissellements et des fonctions de filtration des sols avec l'artificialisation. La plupart des grands lacs des pays développés, proches de zones fortement urbanisées, sont soumis à ces évolutions.

❖ Les facteurs endogènes du champ de l'action et de la décision

Certains facteurs pilotent **les pratiques et comportements des bénéficiaires des SE** (caractéristiques techniques et innovation, préférences individuelles de pratiques par les bénéficiaires) et influent sur la **gestion intégrée et adaptative** des grands lacs alpins.

Ces différents objectifs peuvent être en conflit ; le rôle du champ de décision sera de réaliser des choix éclairés face aux situations d'action du SSE en fonction des critères de gestion. Ces critères sont déterminés par les facteurs endogènes des trois compartiments qui composent le champ. Pour **le système d'acteurs**, il s'agit de prendre en compte la demande en SE pour chaque type de bénéficiaires, les besoins de chacune des parties prenantes de la gestion et groupes d'intérêts locaux et groupes de pression. Ces variables dépendent des **informations et représentations** sur le SSE (savoirs locaux/profanes, connaissances scientifiques, juridiques, valeurs économiques et socio-culturelles des SE). Il faut également prendre en compte l'ensemble des **enjeux** d'exploitation des SE, de leur préservation pour le futur et de

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

conservation des écosystèmes ; certains enjeux pouvant être imposés par des forçages (ex : normes), et enfin les **modalités de gestion** (cadrage financier, réglementaire, technique) qui dictent les possibilités d'action. Les cas du lac Saint-Pierre et du Léman nous ont montré l'intérêt de disposer de **structures de coordination** de la gestion (la CIPEL pour le Léman, la TCRLSP pour le LSP) et **d'outils de travail** (plans d'action, rapports de suivis, tableaux de bord...) permettant de construire une vision de synthèse du fonctionnement du SSE et de mobiliser les facteurs de ce champ pour fédérer les parties prenantes, soutenir et appuyer les prises de décision. Ce faisant, il devient possible de prendre des décisions pour satisfaire le bien-être des générations présentes et futures.

6.3.2 Modes d'action des facteurs de changement et rôles des fonctions clés

L'un des objectifs premiers des cadres conceptuels des SSE est l'analyse des interfaces entre les différents compartiments qui les composent. Dans notre modèle, ces interfaces s'organisent autour des **fonctions clés** du système. Les figures suivantes (Figure 6-16 ; Figure 6-17) représentent les relations entre fonctions clés et compartiments à l'intérieur de chaque champ. L'étude de ces interactions permet de dégager les spécificités du SSE grand lac (applicable aux grands lacs alpins et le LSP), d'en dégager les forces et menaces et d'aider à dresser un diagnostic d'état du SSE.

- ❖ La fonction clé qui pilote les interactions BV - grand lac : les dynamiques de transfert

Les dynamiques de transfert entre le BV et les grands lacs (Figure 6-16) sont associées aux caractéristiques hydrologiques et aux MUS du BV au travers de quatre grandes interactions. Le transfert est déterminé en premier lieu par le **degré de connectivité entre le BV et le lac**. Le degré de connectivité est inversement proportionnel à la capacité tampon du BV face aux perturbations. Plus la connectivité est importante, comme au LSP, plus le lac subit rapidement les pressions du BV, et plus ces dernières génèrent des impacts forts dans l'écosystème. Ce degré de connectivité est déterminé à la fois par les caractéristiques hydrologiques du BV et les MUS. A titre d'exemple, nous avons vu au LSP que l'endiguement des cours d'eau réduit l'espace de mobilité de ces objets, la capacité tampon de leurs berges et le travail du sol déterminent les conditions d'écoulement de l'eau. Sur le Léman, l'imperméabilisation des sols augmente le ruissellement.

Les MUS déterminent les stocks de polluants générés dans le BV et influent fortement sur les dynamiques de transfert entre le BV et le lac sous forme d'**apports**. Ces apports sont véhiculés jusqu'au lac par des **flux d'eau** qui transitent dans le champ écologique via les affluents et le ruissellement et constituent l'essentiel de la **charge externe** (les retombées atmosphériques complètent cette charge externe). La charge externe est le principal facteur de changement des fonctions écosystémiques qui interviennent dans la production des SE.

- ❖ Les fonctions écosystémiques assurent la fourniture en SE des grands lacs

Les fonctions écosystémiques sont les mêmes sur les grands lacs, mais elles sont déterminées par des composantes différentes du système écologique lacustre. Quatre composantes du système écologique lacustre déterminent la fourniture en SE : **la biodiversité fonctionnelle, les milieux écologiques, les masses d'eau et les paysages lacustres** (Figure 6-16). Les masses d'eau agissent sur les paramètres physico-chimiques des habitats, ont une importance forte dans les fonctions de régulation (contrôle physico-chimique des perturbations). La

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

biodiversité fonctionnelle et les milieux écologiques définissent le type d'espèces et milieux participants à la fourniture des SE. Les paysages enfin ont une importance dans la production des fonctions d'information et les SE culturels. Caractériser ces composantes permet de mettre en avant les spécificités fonctionnelles des grands lacs, de définir leurs caractéristiques biophysiques et d'envisager des comparaisons inter-lacs.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

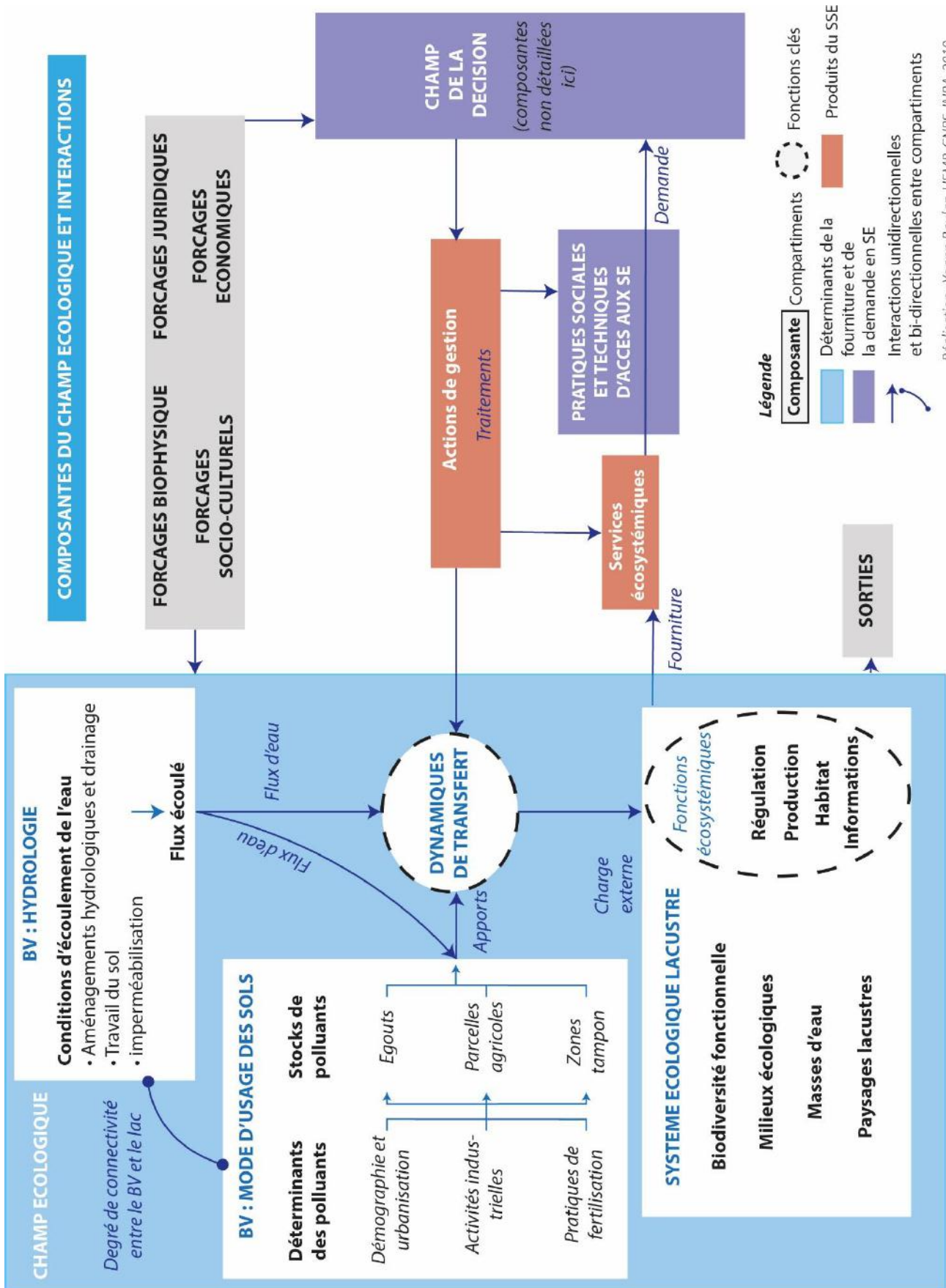


Figure 6-16 : Dynamiques des changements du champ écologique : facteurs et interactions contrôlant les dynamiques de transfert et les fonctions écosystémiques. (invariants : géologie et géomorphologie du BV et du lac)

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

- ❖ La diffusion d'informations relie la demande en SE à la construction d'objectifs de gestion

Tirer profit des SE des grands lacs requiert l'utilisation de **pratiques sociales et techniques d'accès** aux SE et la mobilisation **d'informations** qui déterminent les savoir-faire des pêcheurs par exemple. Les relations entre SE - pratiques - bénéficiaires sont les constituants évolutifs de la demande, la diffusion des informations dans le système permet leur exploitation et définissent les besoins sociétaux.

L'apprentissage est le processus d'appropriation des connaissances sur le SSE, sur les pratiques et techniques d'accès aux SE pour les bénéficiaires. L'apprentissage est réalisé selon les intérêts personnels des bénéficiaires et peut favoriser des choix éclairés de pratiques dans le but de satisfaire une demande durable et adaptative en SE.

Les décisions et actions de gestion reposent sur des informations valides sur les phénomènes (Encadré 6-3) (Pahl-Wostl et al. 2007). La **diffusion d'informations** (Figure 6-17) est alors déterminante dans les prises de décisions, elle procure aux parties prenantes de la gestion des grands lacs la possibilité de construire des objectifs de gestion adaptés aux problématiques du système. La forte capacité de diffusion des informations dans un système est alors une condition importante de la gestion intégrée et adaptative. Par ailleurs, les **informations et représentations** sur le système peuvent représenter des moyens d'action de la gestion : certains SE peuvent être promus (comme les SE culturels via la promotion tourisme) et certaines pratiques durables enseignées via l'éducation, la sensibilisation à l'environnement. Ces actions représentent des exemples de **traitements systémiques** visant à encourager certains comportements durables pour le SSE pour réduire des sources de perturbations. Les processus **d'apprentissage et les représentations** des lacs jouent un rôle essentiel dans la

Encadré 6-3 : Le savoir c'est le pouvoir ... d'action !

Dans un SSE, les connaissances revêtent un rôle très important, souvent négligé (Pahl-wostl 2018). L'objectif des modèles conceptuels de SSE n'est pas d'avoir une connaissance précise sur le fonctionnement de chacun des compartiments qui le composent, mais d'avoir une compréhension générale pouvant aider à déterminer sous quelles conditions les phénomènes sont susceptibles de se produire et les conséquences qui en résultent (relations causes/effets, effets de feed-back). Pour intégrer tous les types de savoirs, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes permettant de mêler connaissances analytiques et quantitatives du SSE (méthodes dites "dures") et les savoirs qualitatifs, des valeurs et représentations (méthodes dites "douces") (Pahl-Wostl 2007). Plusieurs auteurs (Redman et al. 2004, Liu et al. 2007, Ostrom 2009, Raymond et al. 2013) mettent en avant l'importance de l'acquisition de connaissances sur les processus sociaux et écologiques au sein des SSE, la communication de ces connaissances, leur valorisation et leur intégration dans les processus de décision comme des processus majeurs et essentiels au développement et la gestion durable des SSE. Aussi, il n'est pas possible de tout savoir, la gestion d'un SSE devra toujours faire face aux incertitudes, il est ainsi nécessaire de les prendre en compte pour ne pas retarder l'action. Cela met en avant l'importance d'anticiper les problématiques. Enfin, à noter que les connaissances ne sont pas indépendantes des représentations et de l'image d'un territoire. Ces dernières jouent souvent un rôle plus important que les caractéristiques objectives d'une situation dans les comportements adoptés par les individus ou groupes (Pahl-Wostl et al, 2007 in Vanssay, 2003)

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs : un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions

rapidité de réponse des grands lacs alpins aux problématiques de pollutions – les phases d'eutrophisation et de pollutions mercurielles fournissent de bons exemples.

- ❖ La construction d'objectifs de gestion rend opérationnelles les prises de décisions

Dans le champ de la décision, les informations sont mobilisées pour la **construction d'objectifs de gestion** du SSE (Pahl-Wostl 2007). Cette construction répond aux enjeux de la gestion et est matérialisée au sein de **processus de délibération** visant à prioriser les enjeux et les **possibilités d'actions**. Les **modalités de gestion** s'apparentent à "*la boîte à outils de la gestion*" qui regroupe le cadrage réglementaire (lois et règlements), technique (moyens techniques, humains), financier permettant de gérer et mettre en place concrètement les actions de gestion. Les modalités de gestion déterminent par ailleurs les **règles de la prise de décision** et le **degré d'autonomie** des acteurs de la gestion.

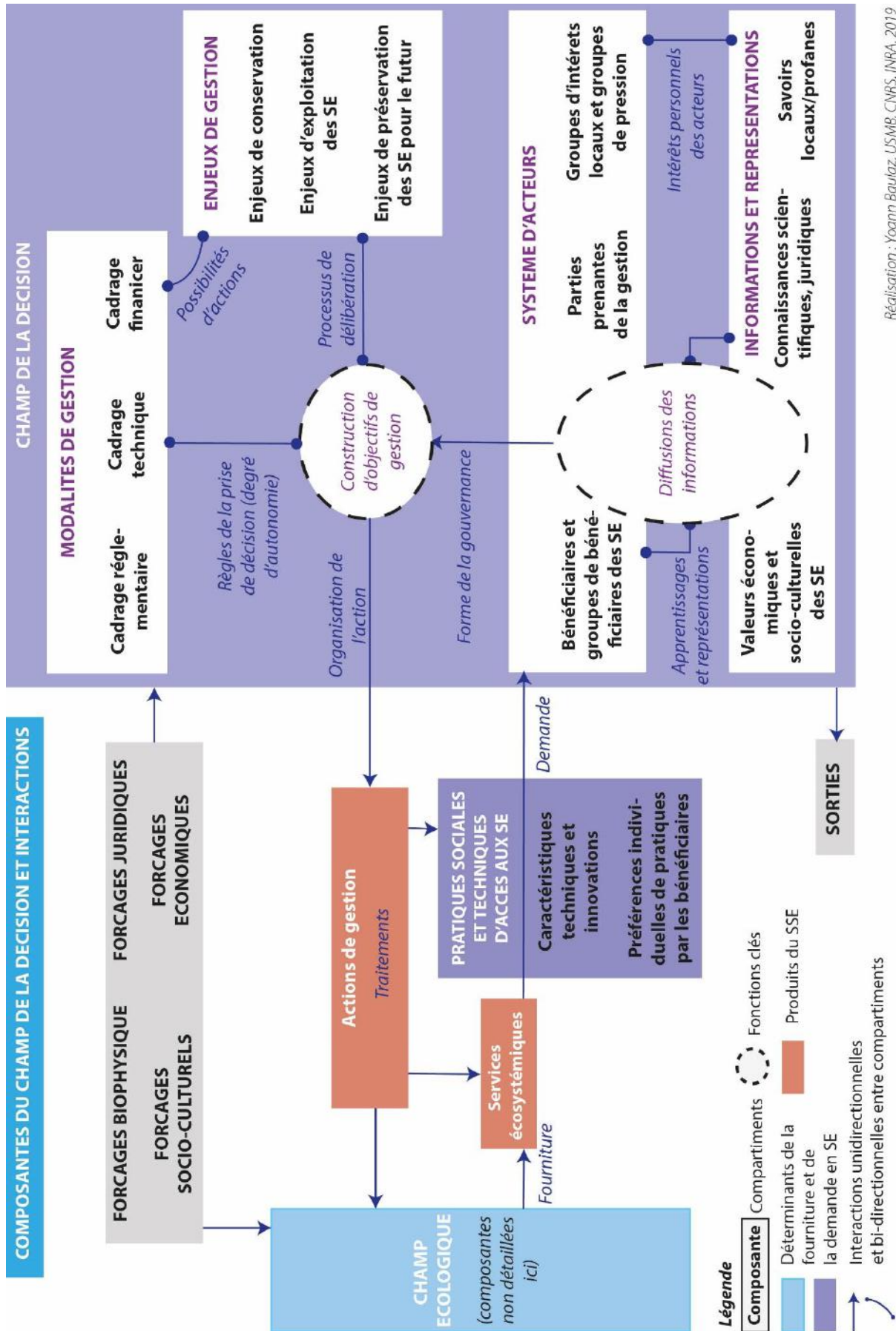
La **construction d'objectifs de gestion** (Figure 6-17) repose également sur la **forme de la gouvernance**, c'est à dire la forme de la gestion politique du SSE. Celle-ci formalise la manière dont est organisée le "*chantier de recherche*" (Lévy and Lussault 2013) des actions. La forme de la gouvernance est déterminante pour la capacité du système à s'auto-organiser, coordonner les différents diagnostics, diffuser les informations, délibérer entre acteurs et prendre des décisions. Pour les grands lacs étudiés, les acteurs publics jouent un rôle spécifique de producteur d'espace, mais également de coordinateur de la gestion pour certaines institutions spécifiques créées en réponse au problème d'eutrophisation (« *boundaries organisations* », chap 2.3).

Enfin, l'action nécessite d'être **organisée** pour que les traitements soient mis en place. Cela passe par une planification et mise à l'agenda politique des actions de gestion. Le recours à certains « *boundary works* » peut aider à faire cela (chap 2.3.4).

Nous avons vu dans cette partie que, selon notre conceptualisation, l'ensemble lac – BV - société est un SSE structuré par un tissu plus ou moins complexe d'interactions, dans lequel se propagent **des relations de cause(s) à effet(s)** générant des chaînes causales et des bouclages, tous plus ou moins directement et intensément régulés par un ou plusieurs **facteurs exogènes et endogènes** au système. Seul un petit nombre de configurations possibles entre compartiments permettent un fonctionnement durable du SSE. Tout changement socio-culturel, technique, écologique du SSE peut potentiellement entraîner une variation de la fourniture et/ou de la demande en SE. Ainsi, la trajectoire d'évolution des SSE aura davantage de probabilité d'être déstabilisée plutôt que de conserver son état. Ceci souligne la nécessité de rééquilibrages constants des dynamiques des SSE, qui sont précisément le rôle de la gestion des grands lacs, comme nous avons pu l'observer dans les applications du modèle SOALP.

CHAPITRE 6

Le socio-écosystème des grands lacs :
un système de gestion des SE à l'épreuve des pollutions



Réalisation : Yoann Baulaz, USMAB, CNRS, INRA, 2019

Figure 6-17 : Dynamiques des changements du champ de la décision : facteurs et interactions contrôlant la diffusion des informations et la construction d'objectifs de gestion

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été dédié à la présentation et l'application du modèle conceptuel SOALP développé pour l'étude des SSE des grands lacs soumis aux problèmes de pollution. Ce modèle formalise les interactions grand lac – BV - société en tant que SSE dynamique dans l'espace et le temps. Son application à l'étude des cycles de pollution – restauration des grands lacs a permis de tester et valider le fonctionnement du modèle, de montrer sa capacité à analyser les co-évolutions entre les écosystèmes et les sociétés qui les utilisent et les gèrent dans des approches rétrospectives, et de tirer des enseignements en vue de l'action. Cet outil peut ainsi fournir un **cadre opérationnel de prospective** pour la gestion adaptative, capable de caractériser les interactions Homme – grands lacs et **d'identifier les menaces** qui pèsent sur les SSE. Le modèle s'est avéré capable **d'organiser les multitudes d'informations** de différentes natures nécessaires à l'étude des SSE et d'en dégager des synthèses des principales interactions.

Tout ceci permet de valider la seconde hypothèse selon laquelle le SSE des grands lacs s'est construit et complexifié au cours du XXème siècle autour de la gouvernance des impacts des pollutions sur les SE. Ainsi, selon les cas, la perturbation initiale à l'origine d'un changement d'état préjudiciable est plus ou moins fortement et rapidement transmise dans le système et donne lieu de ce fait à une **réponse** écologique et sociale plus ou moins rapide et plus ou moins proportionnelle. Etudier la manière dont les relations cause - effet se propagent jusqu'à l'action permet **l'exploration fonctionnelle** du SSE.

Par ailleurs, l'application a conduit à identifier les interactions les plus importantes sur le fonctionnement et l'état du SSE, de faire émerger les **facteurs endogènes et exogènes** au SSE qui engendrent de la variabilité quand le système est en état de « *stress* » (face à une perturbation) et d'identifier des verrous et leviers d'actions pour la gestion. Les facteurs de changement identifiés et la caractérisation des interactions entre composantes du système apportent également des éléments utiles en vue de proposer un ensemble **d'indicateurs** à l'étude des SSE des grands lacs. Une proposition d'application du modèle à cette fin est développée en discussion.

Chapitre 7. Discussion générale et opérationnalisation



ASL
ASSOCIATION
POUR LA
SAUVETÉ DE LA
SAUMOSAGE
DE L'ÉMIN
8, rue Victor - 1200 GENEVE

POUR SAUVER LE LÉMAN

MOUI LEZ-VOUS!



Polluer l'eau que nous buvons est dangereux pour notre santé

 <p>Donc, évitons de jeter n'importe quoi dans l'évier, le lavabo et les toilettes</p>	 <p>L'eau est un bien précieux, économisons-la au lieu de la gaspiller</p>	 <p>Rendons attentifs petits et grands à la difficulté de rendre pure une eau sale</p>
 <p>Le problème du robinet qui fuit doit rester en classe de math</p>	 <p>TOUS DANS LE MÊME BAIN...</p> <p>Je... tu... il... nous polluons tous!</p>	 <p>... IL FAUDRAIT QUE JE POLLUASSE MOINS...</p> <p>LÉMAN</p> <p>Apprenons à conjuguer le verbe «Polluer moins»...</p>

Ensemble
PRENONS NOS RESPONSABILITÉS

respectons l'eau
que nous utilisons

Affiche de sensibilisation à la protection du Léman (ASL, 1988)

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

La présente recherche a pour but d'analyser l'évolution des SSE des grands lacs alpins et leurs SE à l'épreuve des pollutions. L'analyse rétrospective des SE fournis par les trois grands lacs alpins français montre que cette production varie dans le temps et l'espace et qu'elle est très dépendante d'une part des **qualités de l'eau et des milieux**, d'autre part des **innovations techniques** et de l'évolution des **pratiques, représentations** des lacs et **normes sociales** (chapitre 5). Depuis la première moitié du XX^{ème} siècle, la trajectoire d'état du lac est faite d'une série de vagues plus ou moins interférentes de dégradation-restauration des SE qui se succèdent et résultent de plusieurs épisodes consécutifs de pollutions - maîtrise des impacts et/ou des rejets (Lestel et al. 2017). Quels que soient les types de pollution ou d'atteinte à l'écosystème lacustre, la séquence est la même (1) dans un premier temps, **altération de certaines fonctions** écosystémiques des lacs jusqu'à leur saturation (par exemple du contrôle biogéochimique de la charge en P) ou leur effondrement (désoxygénation benthique), (2) au-delà se produit une dégradation de la fourniture, d'abord en **SE de régulation**, puis en **SE d'approvisionnement** (pêche, eau potable...) ce qui se traduit souvent par des adaptations des pratiques, des reports spatiaux ou des ressources complémentaires, (3) mise en péril des **SE culturels** au travers des pratiques socio-culturelles utilisant le lac comme support (risques sanitaires, nuisances), (4) enfin du SE culturel associé à **l'image du lac** provoquant une baisse d'attractivité pour la plupart des SE des grands lacs. Certaines pollutions, comme l'eutrophisation, affectent toutes les fonctions écosystémiques et les SE, se généralisent à **l'ensemble du plan d'eau** et compartiments de l'écosystème et **deviennent chroniques**. D'autres pollutions (micropolluants, ETM) ont eu une dynamique différente marquée par des **menaces sanitaires** sur des espèces ou des ensembles d'espèces, voire des habitats ou aires de fourniture spécifiques, capables de remettre en cause l'exploitation locale ou globale de certains SE d'approvisionnement et culturels (par les normes sanitaires, atteintes à l'image du lac), sans pour autant atteindre un niveau d'impact global sur le fonctionnement de l'écosystème et les SE de régulation.

A la lumière de ces observations, il apparaît que (1) les SE **ne sont pas des invariants** ni du système écologique, ni du système humain, (2) les impacts des qualités de l'eau et des milieux ne se répercutent pas de la même façon sur tous les SE, bien que des dénominateurs communs en termes de qualité d'eau existent, (3) la prise en compte de **l'accès aux SE** permet d'envisager les antagonismes spatiaux entre services du fait des adaptations de pratiques aux impacts des pollutions, (4) les **SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux** ont un rôle essentiel pour retarder les manifestations des pollutions et représentent un maillon important du petit cycle de l'eau par leur capacité « épuratoire » d'une partie des résidus d'eaux usées résiduelles, passées ou non par les STEP.

Les enseignements acquis par l'analyse rétrospective de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins **nous ont permis de valider notre première hypothèse et d'affirmer que les SE rendus par les grands lacs alpins ne sont pas invariants dans le temps et l'espace. Ils se sont construits, ont évolué en réponse à l'évolution des usages des lacs, des qualités de l'eau et des milieux et des actions de gestion des pollutions mises en place.**

L'évolution des relations grand lac - BV- société détermine l'état des SE rendus. Nous avons observé rétrospectivement que c'est sur l'espace du BV que de nombreuses actions de gestion ont été menées pour restaurer ou maintenir des SE qui n'ont bénéficié que très partiellement au BV. Ces actions ont été mises en place progressivement, initiées par (1) **une alerte** de la vulnérabilité de certains SE des grands lacs alpins, (2) suivie souvent d'un **diagnostic**

spécifique établissant la réalité des nuisances, rapidement relayé en général par un besoin de **diagnostic plus global** de l'état de l'écosystème lacustre et de la recherche des sources, conséquences et remèdes aux perturbations, (3) la **compréhension** globale du phénomène et sa **prise en compte** par les décideurs et la société, (4) **l'organisation** de la réponse et recherche de moyens, (5) la **mise en place de traitements**, en premier lieu agissant sur les nuisances, puis les principales causes (souvent les sources de pollutions dans le BV), puis/ou bien (6) la **suppression ou réduction d'une ou des sources** identifiées (traitements, incitations, réglementation). Nous avons montré que la complexité des phénomènes à différentes échelles et la multitude d'acteurs impliqués dans cette chaîne de réponse sociétale a nécessité la **construction d'une gouvernance globale et spécifique** du système lac - BV visant à coordonner les suivis écologiques des lacs et les actions de gestion entre les différentes parties prenantes. Cette gouvernance s'est structurée autour du problème de l'eutrophisation.

Rétrospectivement, il s'avère qu'une bonne part des perturbations des lacs résulte de conséquences d'évolutions sociétales devenues complexes, car à la fois endogènes au système lac - BV – société (mise en place du tout-à-l'égout, sur-fréquentation du littoral, saturation des berges, privatisation du littoral, conflits d'usages...), et plus globales (accroissement démographique, mise sur le marché de nouveaux produits, détergents, micropolluants plastiques, substances médicamenteuses et plus récemment réchauffement climatique). Les causes, impacts et conséquences de toutes ces évolutions prennent part à différentes échelles et leurs interactions sont mal connues au point de susciter des réponses contradictoires parfois. L'un des enjeux majeurs de la gestion durable des territoires lacustres est l'identification préventive de la combinaison des facteurs de changements du SSE à risque. Un tel objectif suppose que le diagnostic d'état des grands lacs évolue pour prendre en compte **les composantes écologiques et sociétales du SSE et les facteurs qui déterminent l'état et le fonctionnement** des grands lacs alpins. Il s'agit de doter les gestionnaires **d'outils conceptuels intégrés** permettant de considérer le lac et son BV comme un système global associant des sociétés à des écosystèmes et en considérant l'ensemble des composantes de la fourniture et de la demande en SE.

Le concept de SE n'étant pas suffisant pour analyser la gouvernance des grands lacs, nous avons développé un cadre conceptuel plus large, considérant les grands lacs comme un SSE : le modèle SOALP (chapitre 6). Cette proposition ambitieuse de modéliser le territoire lacustre, en considérant l'ensemble grand lac – BV – société comme **un SSE dynamique**. Développé à partir des cas assez proches des trois grands lacs alpins, ce modèle a vocation à être mis à l'épreuve d'autres contextes lacustres ; c'est pourquoi sa portée générale a été testée dans une application au cas radicalement différent du lac Saint-Pierre au Canada.

Ces applications de SOALP ont permis de (1) comprendre et modéliser la **construction et l'organisation de la gouvernance** des grands lacs pour lutter contre les pollutions, (2) analyser la **propagation des chaînes causales, associant impacts et réponses** écologiques et sociales impliquées dans les problèmes de pollutions, (3) définir et organiser **les facteurs endogènes et exogènes au SSE** qui modifient l'état du système et génèrent sa variabilité, (4) identifier **les menaces** dans chacun des compartiments qui composent le système et proposer des sorties opérationnelles à la gestion.

D'un point de vue rétrospectif, l'ensemble des applications de ce modèle aux chroniques des pollutions et leurs impacts sur le SSE des grands lacs alpins et les différentes explorations

fonctionnelles réalisées à partir des cas des pollutions, de la pêche et de l'étude du LSP ont rendu possible la validation de notre seconde hypothèse.

Ce modèle a aussi une portée opératoire en matière de gestion adaptative : en identifiant les composantes et interdépendances dynamiques, il permet (1) de **faciliter le tri et la synthèse des multiples informations** nécessaires à un diagnostic et un suivi global et intégré du SSE et contribuant à anticiper les perturbations et (2) d'analyser les interactions entre les multiples composantes biophysiques, socio-économiques, techniques et de gouvernance qui le composent et pilotent son état. Ces deux points vont aider à orienter les actions de gestion et leur cohérence vis-à-vis des problématiques et spécificités du SSE.

Nous avons ainsi démontré que le SSE des grands lacs s'est construit et complexifié autour de la gouvernance des impacts des pollutions sur les SE et que son exploration fonctionnelle et sa modélisation au sein d'un nouveau cadre conceptuel permettent de disposer d'un outil opérationnel à la gestion adaptative et intégrée du système.

Les points de discussion développés dans ce chapitre sont tout d'abord une analyse critique de la démarche utilisée pour tester ces hypothèses et des résultats obtenus. Il s'agit de présenter les limites et la portée générale de notre travail. En deuxième partie, nous aborderons, en nous appuyant sur nos acquis et notre rétrospective, les relations entre qualité des eaux et des milieux et SE. Enfin, l'expérience acquise sur nos terrains permettra de dépasser le cadre théorique du modèle conceptuel et de proposer des pistes d'évolution du « système d'observation » des grands lacs alpins pour qu'il soit adapté aux enjeux émergents des territoires lacustres.

7.1 Critiques et limites de la démarche pluridisciplinaire intégrée

Cette partie analyse et critique la démarche pluridisciplinaire et transdisciplinaire, discute des apports des concepts de SE et de SSE à la géographie, de l'utilisation de ces concepts à l'étude des territoires lacustres et avance les limites d'application du modèle conceptuel SOALP développé dans le cadre de cette étude.

7.1.1 Analyse critique de l'approche pluridisciplinaire

L'approche pluridisciplinaire a consisté ici en l'intégration d'outils méthodologiques et de concepts de diverses disciplines (Létourneau 2019) à l'étude du territoire lacustre, pour construire des savoirs plus ou moins intégrés en réalisant une co-évaluation des SE. Nous avons mobilisé **la limnologie et l'écologie** pour comprendre le fonctionnement des grands lacs, pour appréhender l'importance des relations trophiques dans la gestion des micropolluants, ou de la désoxygénation benthique et du relargage du phosphore piégé dans les sédiments d'un lac par exemple ; **les sciences humaines et sociales** ont permis l'étude des usages des lacs, mis en avant l'importance des pratiques et techniques, des représentations ou encore de la diffusion des informations. Le rapprochement entre ces différents types de savoirs a notamment incité à l'étude des capacités d'adaptation des bénéficiaires des lacs aux impacts des pollutions, mis en évidence que l'apparition de certaines techniques pouvaient générer des modifications de comportements des usagers et modifier leurs impacts sur

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

l'écosystème lacustre (ex : apparition du sondeur pour la pêche – chapitre 6.2.5). En tout état de cause, la finalité de ces rapprochements disciplinaires est inscrite dans le cadre d'une recherche en **géographie complète et intégrée**, réconciliée entre la géographie physique (par la limnologie, la géographie des lacs telle que définie par Forel (1904) et la géographie humaine (l'étude des usages des lacs, des acteurs, représentations). Tout ceci justifie l'ancrage de cette étude dans la **pluridisciplinarité**, définie comme « *l'étude d'un objet d'une seule et même discipline par plusieurs disciplines à la fois* » (Nicolescu 1996 p. 26), ou de manière plus précise : « *l'interaction entre deux ou plusieurs disciplines différentes [pouvant] aller de la simple communication d'idées, à l'intégration mutuelle de concepts, méthodologies, procédures, épistémologies, terminologies, données [...] menant à une organisation de la recherche et de l'éducation dans un domaine assez vaste* » (Chettiparamb 2007 p. 19).

L'ensemble de ces intégrations disciplinaires ayant pour but l'analyse rétrospective du système grands lacs – BV – société soumis aux pollutions. Pour certains, l'étude des systèmes complexes est nécessairement transdisciplinaire dans le sens où cette approche mobilise différentes disciplines et adopte une vision multi-référentielle et multi-dimensionnelle (De Freitas et al. 1994, Létourneau 2019). Le préfixe « *trans* » de transdisciplinarité indique ce qui est à la fois entre, à travers et au-delà de toute discipline (Nicolescu 1996) ; cette approche invite à faire interagir des disciplines, à les appréhender à différents niveaux pour fournir des savoirs nouveaux, pouvant dépasser le cadre des disciplines mobilisées (Chettiparamb 2007). **L'intégration des savoirs, des disciplines et des acteurs** sont ainsi des principes clés de la transdisciplinarité (Klein 2008) ; elle permet de dépasser l'opposition entre expertises théoriques et expertises d'usages et entre approches disciplinaires et très spécialisées sur les problèmes environnementaux, pour développer une approche systémique. D'un point de vue méthodologique, les divers types de savoirs mobilisés (expertises scientifiques, techniques, savoirs profanes, expertises d'usages) au travers d'enquêtes, la participation d'experts de différentes disciplines dans des ateliers participatifs, l'application de concepts interdisciplinaires (SE, SSE) et la combinaison de l'ensemble de ces apports démontrent **la portée transdisciplinaire** de cette étude.

Par l'approche transdisciplinaire, nous avons voulu donner une fonction d'ouverture de notre recherche pour qu'elle réponde au mieux aux enjeux de gouvernance des territoires lacustres, ceux-ci nécessitant l'intégration d'une pluralité de disciplines, y compris la prise en compte des techniques et de l'ingénierie (ex : systèmes d'assainissement). Ces réflexions placent donc cette étude dans le champ de la « **pluridisciplinarité incluant une composante transdisciplinaire** », pour reprendre l'expression de Létourneau (2019). A ce titre, les processus et méthodes de productions et synthèses de données réalisés peuvent être considérés comme des résultats en eux-mêmes de la recherche.

❖ Limites de la pluridisciplinarité

L'approche pluridisciplinaire peut avoir quelques limites, notamment liées à la récolte et l'analyse d'un flux d'informations important qui nécessite parfois la « *gestion d'un surplus d'informations* ». Ainsi, les savoirs disciplinaires mobilisés dans l'étude des BV sont les suivants : « *sciences biologiques, écologie, géographie, hydrologie, sciences sociales, sciences de la gestion, sciences politiques, sciences juridiques, urbanisme, sciences agronomiques, économie, éthique environnementale, sciences de l'information et de la communication, de l'éducation,* » (Létourneau 2019 p. 9), auxquels nous ajoutons la limnologie et les savoirs

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

d'usages qui ont eu une place importante dans notre étude. Analyser les interactions grands lacs - BV- société mobilise des données relatives à chacun d'eux, à la fois : (1) **des données écologiques** pour caractériser la fourniture en SE et les impacts des pollutions sur les écosystèmes lacustres et leurs BV, (2) **des données socio-économiques et culturelles** pour caractériser la demande en SE, les déterminants anthropiques des pollutions et les jeux d'acteurs impliqués dans la gouvernance, (3) **des données juridiques** enfin car les lois et règlements constituent l'un des principaux moyens d'action de la gestion, notamment pour réguler l'accès aux SE. D'autres savoirs auraient également pu être mobilisés comme la physique, les mathématiques pour l'étude du fonctionnement des systèmes, l'anthropologie ou encore l'économie pour caractériser les valeurs socio-culturelles et économiques associées à la biodiversité ; ces connaissances et/ou compétences représentent des élargissements disciplinaires possibles à notre étude.

Agréger l'ensemble des données précitées nous a occasionné quelques contraintes : (1) tout d'abord pour **organiser, trier** les informations et faire face à la complexité et la multitude de questions à aborder à différentes échelles (relatives au réseau trophique, aux réseaux d'acteurs, aux relations entre écosystèmes et SSE adjacents...), (2) associer des données de **métriques diverses** pour comprendre les chaînes causales impliquées dans les problèmes de pollutions, (3) identifier les **processus et fonctions clés** pour analyser le fonctionnement et l'état des SSE, (4) **représenter les trajectoires d'évolution** des SSE qui sont par nature dynamiques dans le temps et l'espace. Les modèles utilisés et développés dans cette étude ont cherché à faire face à ces verrous.

Cette recherche a mobilisé un grand éventail de sources de données variées, qui ont permis de trouver matière à éprouver, soit dans la **bibliographie et les archives** (littérature scientifique, rapports, articles de presse, documents réglementaires ...), soit dans **les ateliers participatifs**, soit dans **les enquêtes** (experts de différentes disciplines, usagers et gestionnaires des lacs), les concepts de SE et de SSE pour les affiner et les appliquer aux cas des grands lacs alpins et veiller à les rendre lisibles et opérationnels pour les gestionnaires.

Les résultats de cette recherche sur les SE sont non seulement des synthèses d'informations riches et structurées sur le fonctionnement du système grand lac - BV - société, mais aussi sur l'histoire des grands lacs alpins et leurs usages. Ils constituent, à ce titre, **des mémoires** des pratiques et évolutions passées de ces territoires lacustres. Il s'agit là d'un autre aspect de notre étude pouvant susciter l'intérêt.

❖ Intérêts et limites de l'approche intégrée

L'approche pluridisciplinaire avec une composante transdisciplinaire est donc mobilisée dans le cadre d'une **étude intégrée** du territoire lacustre, dont les relations grand lac – BV – société sont modélisées par le biais des concepts de SE et de SSE. L'approche intégrée a consisté à identifier les composantes du territoire lacustre, à étudier leurs relations et **incorporations** entre elles, depuis les compartiments trophiques, les jeux d'acteurs jusqu'à l'échelle du SSE des grands lacs pour analyser le fonctionnement du système dans son ensemble.

Ce faisant, l'approche intégrée a permis une « *montée en généralité* » de la recherche. Pour la mettre en place, il a été nécessaire de « *simplifier pour comprendre* », dans une perspective de généralisation (Lévy and Lussault 2013). Dans cette étude, les formes de généralisation

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

sont essentiellement au nombre de cinq : (1) l'approche reprend le modèle de la généralisation en **démarche analytique** par le choix d'étude de trois ou quatre (LSP) grands lacs et considérant que ces terrains d'étude sont représentatifs de certains phénomènes que l'on retrouve dans d'autres systèmes grands lacs - BV - société à l'échelle mondiale, (2) la généralisation s'opère également lors de **l'utilisation du concept de SE** où l'un des intérêts (et l'une des principales critiques) est de réduire la complexité des écosystèmes à l'étude de quelques fonctions écosystémiques, (3) l'un des objectifs de **l'approche compréhensive du fonctionnement des SSE** est de réduire l'ensemble des éléments des systèmes qui relient la société aux lacs à un petit ensemble de compartiments et de relations analysables, (4) la montée en généralité prend également la forme de **modélisations** consistant à réunir des caractères communs de composantes ou de phénomènes socio-écologiques dans des concepts ou des catégories plus générales (d'après Brunet et al. 1992).

Ceci étant, le processus de généralisation est soumis à un **biais cognitif** : il vise à rechercher des caractéristiques les plus répandues dans les différents objets ou processus étudiés en minorant leur importance. En effet, ce n'est pas parce qu'un phénomène est courant qu'il est important pour le fonctionnement du système (Lévy and Lussault 2013). Afin de limiter ce biais, il est nécessaire d'explorer d'autres sources de connaissances. Dans notre cas, la **triangulation méthodologique** et le **croisement d'informations** ont eu pour but de limiter ce biais.

La triangulation méthodologique est une méthode largement utilisée en sciences humaines et sociales (Caillaud & Flick 2016). Dans notre approche, nous l'avons mobilisée à tous les stades de notre recherche, y compris lorsqu'il s'agissait d'étudier la fourniture en SE et donc de mobiliser essentiellement des données écologiques. Nous pensons que la triangulation méthodologique et le croisement d'informations sont des méthodes pouvant réduire le niveau d'incertitude inhérent au concept de service écosystémique (Barnaud et al. 2011). Nous invitons donc les études sur les SE à suivre cette approche, elle nous paraît notamment importante dans le cadre d'évaluations intégrées où différents savoirs et concepts de différentes disciplines sont mobilisés.

7.1.2 Une application du concept de SE en géographie

Les études sur les SE des écosystèmes aquatiques sont essentiellement portées par des approches économiques (Hackbart et al. 2017). Or, dans notre recherche, nous avons voulu nous détacher des critiques associées à ces approches pour développer une co-évaluation des SE. D'un point de vue théorique, il nous paraissait plus intéressant de développer une telle approche, du fait qu'elle est le moins fréquemment appliquée et que le concept de SE est presque « *délaissé* », avec les sciences humaines et sociales (Brunet 2016, Hackbart et al. 2017). La plus-value essentielle de l'application du concept de SE pour la géographie nous semble celle-ci : savoir relier les informations sur les écosystèmes à celle des sociétés qui les utilisent et les gèrent.

La géographie est en effet une **science à l'interface** de différentes disciplines, capable de mobiliser les concepts et théories propres à d'autres sciences (fonctions écosystémiques, système de transfert, valeurs, représentation, gouvernance, etc.) et nécessaires à l'étude des SE. La géographie fait également appel aux **outils de la modélisation** pour schématiser ces processus et les représenter sous forme de cartes, schémas, mobiliser diverses formes

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

d'enquêtes et d'analyses de données, et apporter de nombreux outils à l'étude du concept de SE. Les sciences humaines et sociales étudient les comportements individuels ou collectifs (pratiques, fréquentation, spatialisation, exploitation économique ...), les valeurs sociales et culturelles qui informent du bien-être que les sociétés retirent de la biodiversité et les milieux naturels (Amigues and Chevassus-au-louis 2011).

Le concept de SE n'est pas pour autant complètement rejeté par les sciences humaines et sociales, mais lourdement critiqué (Brunet 2016) : pour des **raisons morales** (Maris 2018), de par son opérationnalité (Aubertin et al. 2001), **les controverses** autour de la notion (Barnaud et al. 2011), les phénomènes de **popularisation et de politisation** dont il est l'objet (Roche et al. 2016), ou l'intérêt de la **spatialisation** (Potschin and Haines-Young 2011). Parfois, le concept questionne aussi sur sa **plus-value par rapport à d'autres concepts** qui associent les sociétés à la nature. C'est notamment le cas avec le concept de **ressource**, la ressource étant considérée comme une richesse potentielle, ou dans certains cas ce qui sert à produire des richesses (Brunet et al. 1992). La ressource est une réalité entrant dans un processus de production sociale, qui ne se révèle que par un processus de mise en valeur - un travail (Brunet et al. 1992, Lévy and Lussault 2013). Une ressource peut être matérielle ou non, naturelle ou anthropique, renouvelable ou en stock limité, elle est aussi créée, territorialisée (Gumuchian and Pecqueur 2007). Une ressource naturelle attribue donc des valeurs à des éléments naturels utilisés par la société, ce qui la rapproche du concept de SE.

Ceci étant, de notre point de vue, **les plus-values du concept de SE par rapport à une ressource** sont : (1) d'une part de s'intéresser aux fonctions écosystémiques et processus naturels qui fournissent des SE, (2) de valoriser le fonctionnement des écosystèmes, leur capacité de résistance aux perturbations par la prise en compte des SE de régulation, (3) de considérer l'ensemble des relations entre SE, qu'elles soient neutres, positives ou négatives ; ce qui relève d'une approche systémique et ouvre la possibilité d'application à la gestion, notamment en prenant en compte les pratiques qui donnent accès aux SE, (4) l'intérêt pédagogique et la vision positive du concept qui considèrent les écosystèmes comme participant au bien-être des humains, (5) c'est un concept « hybride » qui permet d'associer diverses disciplines qui s'intéressent à l'environnement : les concepts de fonction écosystémique, de fourniture et demande nous ont été notamment très utiles pour synthétiser des informations relatives aux principaux processus pour caractériser les SE.

Le constat d'une absence de méthode et de modèle pour **caractériser la fourniture et la demande en SE des grands lacs et leur évolution au fil du temps** est relayé par Keeler et al. (2012) à propos de l'étude des SE des milieux aquatiques. Ce manque nous a conduit à l'adaptation de méthodologies des sciences humaines et sociales à l'étude des SE. Différents types de **frises chrono-systémiques** ont ainsi été produites, certaines visant à étudier spécifiquement l'évolution de la fourniture et de la demande en SE, d'autres plus globales qui ont intégré les multiples composantes des SSE. Ces frises sont à la fois des outils méthodologiques, quand elles permettent de synthétiser des entretiens, des résultats d'ateliers de travail, et des outils d'analyse et représentation des résultats, des outils hybrides capables de faire interagir des données écologiques et socio-économiques et culturelles. Dans le cadre spécifique de l'étude sur le SE pêche, la méthode d'analyse des récits de vie : **les trajectoires de vie**, a été adaptée au concept de SE, permettant ainsi de mettre en lien les informations qualitatives sur les pratiques et techniques d'exploitation des SE, avec celles sur la fourniture en SE, la gouvernance et la vie des pêcheurs interrogés. Cette méthode, bien que

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

chronophage, est très utile pour récolter des informations manquantes sur un sujet, permet de lier les informations sur la fourniture et la demande en SE et pourrait être réutilisée pour d'autres études sur les SE.

❖ Appliquer le concept de SE, mais en se détachant des évaluations monétaires

La plupart des critiques du concept de SE se basent sur des incompréhensions et des confusions qui montrent la diversité des points de vue et des représentations autour des problèmes de la conservation. La principale polémique est associée à l'idée de **monétariser la Nature** : une crainte bien présente est que le concept soit détourné et utilisé pour justifier de la rentabilité et de l'enrichissement égoïste de quelques-uns, au détriment de certains écosystèmes en raison de leur piètre valeur économique marchande. D'autres mettent en avant que les éléments de biodiversité n'auront jamais autant d'importance dans l'économie mondiale que les transports, les industries et les multinationales (Maris 2018). Mais c'est souvent la logique même de l'argument économique qui questionne : la Nature a une valeur intrinsèque infinie et les SE ne capturent que les **valeurs anthropo-centrées**. Ce point de vue peut provoquer une réduction de valeur et venir modifier les représentations de la Nature, ne considérant que les valeurs tangibles et monétaires et négligeant les valeurs morales, sociales et culturelles (Maris 2018). Cela questionne la possibilité de **quantifier des valeurs intangibles**, par nature non quantifiables, ce qui soulève des problèmes méthodologiques : en l'état actuel des connaissances, il est très difficile de "*donner un prix*" à un élément de biodiversité, et il est encore plus difficile de le faire pour un écosystème entier. Le même constat se pose pour donner un prix monétaire à la vie humaine, qui pourtant semble nécessaire dans le droit et certains domaines d'activité comme les assurances (cette valeur oscille selon les pays entre 4.5\$ au Bangladesh et 22 100 000\$ à Taïwan - OCDE 2011). Les résultats de ces évaluations monétaires sont souvent insatisfaisants, avec des sommes soit trop faibles pour les évaluations basées uniquement sur les coûts de marchés, ou à l'inverse, associées à trop d'incertitudes, avec des valeurs très importantes et des écarts de valeurs trop importants (Roche et al. 2016 ; voir Encadré 7-1). Il est notamment très difficile d'évaluer la valeur économique des SE des lacs car de nombreux SE sont non marchands et les caractéristiques biophysiques de ces écosystèmes sont très variables (Reynaud and Lanzasova 2017). Quand cela est possible, les SE non marchands sont souvent caractérisés en économie par des méthodes qui révèlent les « *consentements à payer* » (« *combien seriez-vous prêt à payer pour protéger tel SE ? tel écosystème ?* ») ou les « *consentements à recevoir* » (« *combien seriez-vous prêt à perdre pour laisser votre environnement se dégrader ?* ») à partir des **préférences déclarées** des bénéficiaires ou des populations. Il existe un biais important à ces méthodes qui accordent une importance plus forte aux individus les plus riches, et qui auront plus de poids dans l'évaluation monétaire du service (Encadré 7-1 ; Farley 2012).

Encadré 7-1 : Estimation économique de la valeur des SE des grands lacs alpins et critique

Il est possible de faire une évaluation économique des SE des grands lacs alpins par la méthode des transferts de bénéfices (la valeur des SE est obtenue à partir d'autres analyses situées dans un contexte comparable), à partir de l'article de Reynaud et al. (2017) qui a réalisé une moyenne des évaluations économiques contingentes pour les SE des lacs dans le monde. Les évaluations contingentes permettent d'estimer les valeurs de non-usage de la nature à partir de consentements à payer (Levrel and Missemmer 2018). Selon Reynaud et al. (2017), la valeur moyenne estimée des SE rendus par les lacs dans le monde se situe entre 106 et 140 \$US/hab/an. Pour appliquer cette évaluation aux grands lacs alpins, nous pouvons utiliser une seconde étude de Allan et al, 2017 qui mentionne que les principaux bénéficiaires des SE rendus par les lacs sont situés dans une zone inférieure à 10 Km.

A partir de ces informations, il est possible d'extraire le nombre de personnes vivant à moins de 10 Km des grands lacs alpins, soit 230 000 habitants pour le lac d'Annecy, 208 000 habitants pour le lac du Bourget et 547 200 pour le Léman. Ceci nous donne une valeur estimée des bénéfices rendus par les grands lacs alpins comprise entre **21 et 28,7 millions € / an pour le lac d'Annecy, 19,6 et 25,9 millions €/an pour le lac du Bourget et entre 51 et 68 millions € pour le Léman.**

Ces données sont critiquables pour plusieurs raisons : en l'état ces résultats chiffrés sont très difficiles à appréhender car ils sont très élevés et ne reposent que sur les informations sur la population, ne prennent pas en compte le nombre de SE rendus par le lac ou la qualité de ses eaux. Par ailleurs, l'approche par le consentement à payer est très critiquée car elle repose sur les perceptions et les jugements des bénéficiaires, ce qui suppose une estimation qui évolue en fonction de la catégorie socio-professionnelle des interrogés (Farley, 2012). Aussi, ce type d'estimation a tendance à « *surévaluer* » la valeur des SE. Ainsi, si l'on compare cette estimation à celle de Costanza et al. (2018), (estimation avec une méthodologie différente que les lacs dans le monde rapportent environ 1.7 milliards par an), cela voudrait dire que 22 lacs au territoire limitrophe peuplé à échelle équivalente de celle du Léman suffiraient pour atteindre la valeur de Costanza. Outre les nombreuses incertitudes autour de ces évaluations, elles peuvent être intéressantes en comparaison avec les investissements réalisés pour la gestion des lacs chaque année (les investissements de la restauration du lac du Bourget sont estimés à 185 916 333 € - coût d'installation de la conduite de détournement des eaux usées et des deux contrats de BV depuis le début des années 2000) et pourraient être un argument intéressant pour la conservation de ces écosystèmes.

Ceci étant, les estimations économiques et monétaires peuvent être utiles en comparaison avec le coût de la restauration des écosystèmes ; ce qui permet de leur donner un sens opérationnel, rappelant que **la pollution a aussi un coût**. C'est d'ailleurs l'un des intérêts principaux du concept qu'ont mis en avant les gestionnaires des grands lacs interrogés dans le cadre de cette étude. De notre point de vue, tout ce qui touche à l'économie ne va pas à l'encontre de la conservation et les évaluations économiques de SE peuvent être complémentaires à notre approche d'étude. Rappelons que l'économie est une des grandes sciences connexes de la géographie, qui étudie la production des richesses, leur évolution et

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

répartition entre les acteurs d'un territoire. L'économie étant définie par Brunet et collaborateurs (1992, p 178) comme "*la science de la production, de la distribution et de la consommation des richesses*" et ne cherche pas uniquement à « *donner un prix* » aux biens et ressources. Aussi, certaines pratiques sociales sont responsables de perturbations environnementales sans relation avec des valeurs monétaires ; nous l'avons montré à plusieurs reprises dans cette étude (destruction d'habitats, dérangement de la faune, saturation du plan d'eau), et parler de SE n'est pas implicitement lié à une monétarisation de la nature.

Attribuer une valeur aux SE n'inclut donc pas systématiquement une **marchandisation**. Pour les grands lacs alpins cela pourrait renforcer l'idée que ces lacs sont des **biens communs**, déjà considérés d'un point de vue réglementaire comme des lacs « *domaniaux* ». De notre point de vue, l'ensemble des arguments en faveur de la conservation, qu'ils soient économiques et anthropocentriques, ou éthiques et naturalistes, ne s'opposent pas, mais se complètent au contraire.

7.1.3 Critique de l'application des concepts de SE et de SSE à l'étude des territoires lacustres

❖ L'adaptation de la cascade des SE au cas des grands lacs

Un des points forts de l'étude est d'avoir appliqué et adapté l'un des modèles conceptuels parmi les plus utilisés pour caractériser les SE de multiples écosystèmes : **le modèle en cascade** de Haines-Young and Potschin (2010). Entre autres exemples, ce modèle a été utilisé pour caractériser les SE d'une région flamande (Staes et al. 2017), ou comme modèle d'analyse spatiale des SE marins à l'échelle européenne (Tempera et al. 2016). L'adaptation du modèle mis en place dans cette thèse prend en compte les impacts des pollutions sur les bouquets de services. Son utilisation permet de caractériser la fourniture et la demande en SE en fonction des atteintes aux fonctions écosystémiques et SE de régulation liés, mais également d'analyser les pratiques et techniques d'exploitation des SE utilisées pour tirer profit de ces SE. Ce modèle est également un outil méthodologique pour l'application d'une co-évaluation des SE (chap 3.3.1), approche rarement développée, et que nous avons choisi d'appliquer (Castro et al. 2014).

Notre application de la cascade des SE permet de caractériser des états de la fourniture et de la demande. Ses points forts sont : (1) de **définir le rôle et les limites des SE de régulation de la qualité de l'eau et des milieux** dans la fourniture de presque tous les SE des lacs, (2) de démontrer que **l'évolution des pratiques et techniques** conditionnent l'accès aux SE et doivent être prises en compte dans les suivis des lacs pour une application à la gestion. Le concept de SE offre donc des outils méthodologiques et des typologies de fonctions, SE, processus, etc. qui structurent la recherche d'informations et l'analyse, très utiles notamment dans le cadre d'études historiques tant la quantité d'informations est foisonnante et difficile à recouper.

Nous avons pu mettre en évidence que ce concept peut offrir une nouvelle grille de lecture des phénomènes passés rendant possible une **analyse rétrospective**. Les adaptations et

propositions conceptuelles développées dans cette thèse viennent combler un manque important de méthodes d'analyses rétrospectives des SE identifiés par la littérature à propos de divers types d'écosystèmes (TEEB 2010, Lavorel et al. 2017). Parmi les propositions faites, notre recherche d'informations a été structurée par des typologies d'impacts des pollutions sur les fonctions écosystémiques, par une adaptation des trajectoires de représentation-action, nous avons dégagé une typologie des pratiques socio-culturelles ou encore appliqué le concept à une approche d'enquête par les récits de vie.

L'analyse des dynamiques sociales et écosystémiques passées aide à comprendre le fonctionnement actuel des systèmes, notamment de la gouvernance, des modes de suivis des lacs et à cadrer certaines des menaces (micropollutions, changement climatique, fréquentation) pour le futur. La démarche d'enquêtes pluridisciplinaires est essentielle à appliquer dans ce cadre, car les déterminants de la variation temporelle des SE relèvent de processus à la fois biophysiques et sociétaux. De nombreux auteurs (Brunet 2016, Roche et al. 2016, Hackbart et al. 2017) partagent ce point de vue.

L'application de la cascade des SE aux grands lacs dans une approche rétrospective a permis d'identifier quelques **recommandations** qui nous paraissent importantes à prendre en compte pour de futures études sur les SE des grands et « petits » lacs. En premier lieu, la **prise en compte du BV** comme participant à la fourniture des SE, notamment les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux ; ce point est avancé par la littérature (Moss 2008, Keeler et al. 2012).

En second lieu, l'analyse rétrospective des SE pourrait être appliquée à d'autres objets que les lacs et pour des échelles de temps plus larges, par exemple pour **retracer l'histoire des relations Homme - Nature** sur un territoire. Nous avons légèrement exploré cette piste dans le chapitre 5.3.1 (les SE du passé), l'identification des SE apparus au cours du temps nous paraît une démarche intéressante pour étudier l'évolution des besoins sociétaux. La difficulté d'accès aux données écologiques passées peut cependant limiter cette approche. Un autre verrou majeur résiderait dans le choix d'une classification des SE permettant de comparer l'évolution des valeurs associées à la biodiversité et aux écosystèmes. Récemment, l'IPBES a proposé des évolutions importantes du concept de SE et privilégié désormais le terme de *"contributions de la nature pour l'Homme"*. Le groupe d'experts international propose une typologie permettant d'appréhender plus facilement les différentes valeurs de la biodiversité et reconnaît **le rôle central de la culture, des valeurs intrinsèques de la biodiversité, et considère l'ensemble des interactions, tant positives que négatives avec la Nature** (Díaz et al. 2018). Ces évolutions permettent notamment d'appliquer le concept à l'étude de populations qui utilisent la Nature comme moyen de subsistance et sont plus sensibles aux aléas naturels. Avant l'industrialisation, les SE répondaient majoritairement à des **besoins de subsistance**, cela nous incite à penser que les apports conceptuels de l'IPBES pourraient faciliter les approches historiques d'étude des SE. L'IPBES met également en valeur le rôle des **savoirs locaux** dans la compréhension des liens entre les écosystèmes et les sociétés (Díaz et al. 2018).

La science des SE est encore jeune (Holzer 2018). Il n'existe pas de cadre conceptuel d'application du concept pour tous les types d'écosystèmes et de problématiques et il n'existe pas non plus de cadre conceptuel généralisable à l'ensemble des cas traités en tant que SSE. C'est pour l'instant le verrou le plus important de ce concept, et qui a nécessité le

développement d'un cadre conceptuel spécifique pour cette étude. Nous suggérons donc que chaque projet de recherche sur les SE commence par une recherche du cadre conceptuel optimal correspondant aux caractéristiques du milieu étudié et des objectifs de l'étude. Le modèle en cascade est un modèle à portée pédagogique qui aide à organiser les informations multiples. Cependant, sa linéarité peu réaliste doit inviter chaque porteur d'étude sur les SE à questionner sa pertinence et envisager des adaptations de ce modèle.

❖ La proposition d'un cadre conceptuel pour l'étude des SSE des grands lacs et ses limites

Les deux limites les plus importantes au concept de SE pour cette étude ont été la **difficulté de prise en compte des méta-écosystèmes** tels que les lacs et leur BV, et **l'intégration insuffisante des processus de gouvernance** dans la plupart des cadres conceptuels. Les spécificités des objets d'étude (relation lac – BV, relation lac – société) et l'analyse de leur gouvernance ont ainsi nécessité une modélisation conceptuelle du système grand lac - BV - société via le concept de SSE. Cette conceptualisation met en évidence les **fonctions écologiques et sociales clés** du système étudié, constitue une avancée théorique et pratique. Elle ouvre des perspectives de **renouvellement des modèles actuels de gestion**, intégrant mieux de nouvelles dimensions relatives aux forçages exogènes, à la gouvernance et aux usages et - *en proposition à la fin de ce chapitre* - construit sur cette base une **nouvelle génération d'indicateurs**.

Le modèle sert pour **analyser les décisions de gestion dans une optique rétrospective, établit les liens entre état du lac et grandes dynamiques sociétales**. C'est ainsi qu'émerge la trajectoire de construction et de complexification du SSE des grands lacs alpins. La structuration du champ de la décision est, dans ce contexte, primordiale. Elle engendre des bouclages qui conduisent à des actions dans le champ écologique, dans l'exploitation des SE et à un contrôle de l'état des SE. La diffusion des connaissances et informations dans le système est également primordiale, car elle éclaire la manière de structurer le champ de la décision, le choix des actions de gestion et les représentations sur le SSE. C'est pourquoi la modélisation des trajectoires sociales représentations-action a fourni un cadre idéal pour analyser la construction du SSE. Cette modélisation constitue aussi un cadre pour **analyser rapidement l'état d'un territoire lacustre**, à partir de ses caractéristiques clés de fonctionnement (étude du LSP).

L'application du modèle conceptuel SOALP s'établit autour de l'analyse des quatre fonctions clés (dynamiques de transfert, fonctions écosystémiques, diffusion des informations, construction d'objectifs de gestion) et de leurs relations avec les productions du système (services écosystémiques et actions de gestion). L'analyse des modalités d'évolution du SSE provoquées par les forçages endogènes et exogènes est également nécessaire et permet de se concentrer sur les informations les plus critiques, à la manière dont les forçages influent sur le système et nous montre l'importance des données scientifiques et des auto-apprentissages (étude du SE pêche – 6.2.5). Les acteurs peuvent "*se retrouver*" dans la représentation du SSE et identifier les compartiments et menaces sur lesquels ils peuvent agir. D'où la possibilité d'utiliser le modèle comme base pour organiser des observatoires intégrés des grands lacs.

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

Appliqué sur un espace géographique lacustre spécifique, SOALP nous permet de mettre en évidence l'ensemble des facteurs sociaux, écologiques, endogènes et exogènes au système qui modifient la dynamique des bouquets de SE. Il a ainsi été possible d'organiser des diagnostics globaux sur des problématiques interactives, multi-usages, multi-polluants, multi-acteurs, telles que les questions relatives à la dynamique des SE associés aux activités de pêche et l'application du cadre conceptuel aux cas du Léman et LS, deux SSE de grands lacs très différents. **Ce type d'analyse est à développer en complément, voire en cadrage à la place des études d'impacts classiques (Liu et al. 2007).**

❖ Evaluation du modèle SOALP

Nahlik et collaborateurs (2012) proposent une méthodologie pour évaluer les modèles conceptuels d'application du concept de SE. Ces auteurs définissent des critères d'évaluation intéressants qui nous paraissent reproductibles pour critiquer le modèle de SSE SOALP, développé dans notre recherche.

Ces auteurs étudient six critères. Pour chacun de ces critères, sont associées cinq modalités (Annexe 7-1). Nous proposons dans le Tableau 7-1 les résultats d'une analyse critique de notre propre modèle conceptuel. Selon cette évaluation, SOALP semble aborder de manière satisfaisante (note : 21/24) les six critères que doit posséder un cadre conceptuel pour être opérationnel. Il serait intéressant d'avoir un retour sur son application par d'autres chercheurs ou acteurs opérationnels et sur d'autres thématiques ou grands lacs afin de compléter cette évaluation.

Tableau 7-1 : Evaluation du modèle SOALP d'après les critères d'évaluation de Nahlik et al. 2012

Critère	Evaluation de SOALP
<i>Existence d'une définition claire des SE et d'un système de classification pour identifier et catégoriser les SE</i>	Une définition claire et précise et un système de classification des SE sont proposés. La classification des SE du MEA en trois catégories (chap 3.2.1) a été testée dans le cadre de la co-évaluation des SE, avec des ateliers participatifs de chercheurs et gestionnaires et dans le cadre d'approches rétrospectives. L'inconvénient de cette typologie est lié à la difficulté d'étude des SE culturels car ils recoupent une quantité importante de pratiques avec des demandes variées en termes de processus biophysiques.
<i>le modèle est-il compatible avec une démarche transdisciplinaire, c'est-à-dire implique-t-il des chercheurs de différentes disciplines et le langage utilisé peut-il être le même par les différentes disciplines ?</i>	Différentes disciplines sont incluses et explicitement encouragées à collaborer par un langage et des notions pouvant être interprétés par les diverses disciplines. SOALP est construit et validé par des experts de différentes disciplines (écologues, limnologues, géographes, économistes, politologues). « L'équipe projet » autour de la thèse comprend : un écologue, un géographe, une économiste et ponctuellement le travail de deux stagiaires anthropologue et ingénieur hydraulique. Notre recherche peut être définie comme étant pluridisciplinaire, avec une composante méthodologique transdisciplinaire dont les concepts de SE et de SSE fournissent un cadre d'analyse.
<i>L'application du cadre conceptuel implique-t-elle</i>	Plusieurs types de bénéficiaires des SE, scientifiques, gestionnaires ont été interrogés au travers divers types d'entretiens et ateliers de travail

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

<i>des parties prenantes (individus, groupes, firmes) qui ont un intérêt pour l'écosystème</i>	pour caractériser les SE et tester le modèle SOALP. Plusieurs types d'expertises scientifiques, techniques et d'ingénierie sont mobilisés. Enfin, le modèle a été présenté à de nombreuses reprises lors de séminaires à différents publics.
<i>Prise en compte de la résilience et la dynamique des processus impliqués dans l'évolution du système</i>	Le modèle est opérationnel sur le moyen terme car il est adaptable aux conditions changeantes du SSE. Nous avons testé son application pour des approches rétrospectives. Il reste à tester ce modèle sur des approches prospectives.
<i>Le modèle est-il cohérent vis-à-vis d'un objectif et des hypothèses ? Le modèle doit-il être organisé de manière logique et réaliste ?</i>	Son utilisation a été testée avec les utilisateurs potentiels de ce type d'outils : les gestionnaires des grands lacs alpins ont précisé que le modèle " <i>représentait bien la réalité</i> ". SOALP a été appliqué à trois cas spécifiques et un dernier situé dans un contexte très différent. Il serait intéressant de le tester dans des lacs situés dans d'autres contextes de développement, avec d'autres modèles de gouvernance.
<i>Est-il pertinent pour les processus de décision et est-ce que les informations obtenues en appliquant le cadre peuvent aider à améliorer la gestion et la prise de décision ?</i>	La prise de décision est une composante majeure du modèle conceptuel. Dans SOALP, le champ de l'action possède un poids aussi important que le champ écologique. Une application du modèle est possible dans l'analyse des menaces qui pèsent sur les compartiments clés, ce qui permet de synthétiser les besoins de la gestion.

7.1.4 Perspectives d'application du modèle SOALP

L'application **opérationnelle** de SOALP pourrait faciliter le développement d'une gestion plus intégratrice : la prise en compte du système lacustre à gérer, comme un SSE produisant des SE, oblige à une analyse systémique des relations Homme – lac, avant la détermination d'objectifs de gestion d'un écosystème. Il pousse à une gouvernance systémique et coopérative des écosystèmes lacustres, intégrant les acteurs producteurs et consommateurs de l'espace (chap 2.3). Ceci devrait aussi pousser les gestionnaires à s'intéresser aux processus sociaux et écologiques extérieurs à leurs domaines de compétences (Biggs et al. 2010). Point qui se révèle particulièrement important pour analyser les impacts locaux des **changements globaux** (réchauffement climatique, eutrophisation ...), des transformations sociétales, des usages ou encore de l'ensemble des déterminants des SE (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).

Des réflexions plus **théoriques** pourraient être aussi envisagées. Elles reposent en grande partie sur des **approches rétrospectives**. L'histoire éclaire la compréhension des facteurs, processus, trajectoires d'évolution, informe sur les seuils et les conditions de ruptures. Ainsi seraient révélées quelques propriétés clés, à savoir la capacité d'adaptation, de résilience, capacité de réponse, d'autonomie et d'auto-dépendance (Gallopain 1994). Sur ces bases, on peut imaginer **les futurs possibles** d'un SSE lacustre en scénarisant les modalités d'évolution des variables et des compartiments, travail qui peut être réalisé avec les acteurs décisionnels. Les **études comparatives** des trajectoires de différents SSE lacustres peuvent venir enrichir ces approches.

En fournissant une vue d'ensemble formalisée des relations entre un lac, son BV et la société, le modèle SOALP constitue un outil de **recherche de compromis** entre développement humain et protection de la biodiversité et des milieux et du **dialogue entre science et société**.

❖ Domaine d'application du modèle

Le cadre conceptuel SOALP est adapté avant tout au contexte des **grand lacs anthropisés**, associés à des territoires situés en zone développée, définissant ainsi une gamme de MUS pour le BV (pôles urbains importants, associés à des activités industrielles, agricoles), de bouquets de SE (variétés de pratiques liées aux SE d'approvisionnement et culturels) et d'un nombre important d'acteurs et enjeux. L'état et le fonctionnement actuel du système modélisé présente 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. Comme tous les lacs européens (Jenny et al. 2020) ces écosystèmes ont connu des perturbations depuis le début du XXème siècle qui ont conduit à des actions de restauration, **basées sur la problématique de l'eutrophisation** et des actions menées à **l'échelle du BV**.

Hors de ce contexte strict, l'extension du modèle à d'autres lacs nécessiterait presque toujours **des 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, à la pollution... à la fois dans le même hydrobelt (Meybeck et al. 2013) 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 à la taille ou la forme du lac (cas type : lacs à l'échelle continentale et/ou lac très fragmenté), aux conditions biophysiques (gel hivernal du lac, réservoir – lac de Serre-Ponçon), socio-économiques (notamment, pays en voie de développement) et culturelles (autres usages, valeurs culturelles et rapports à la nature, poids des traditions, lacs utilisés par des populations autochtones). Ce type de difficultés ne remet pas en cause la représentation globale en champs et interfaces proposée par SOALP mais 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 pour construire le modèle présentant une forme relativement régulière ovoïde, d'où une faible variabilité spatiale de la qualité de l'eau, des SE et la pertinence d'actions indifférenciées sur l'ensemble du lac ou du BV. Dans le cadre d'écosystèmes équivalents mais compartimentés et formés de « *sous-lacs différenciés* » par leur qualité d'eau, usages, acteurs... l'application du cadre conceptuel supposerait de décrire des **sous-modèles géographiques** et le couplage global entre eux (cas du lac Champlain - Figure 7-1). La difficulté majeure résulterait probablement d'une multiplication des domaines de l'action : les

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

systèmes d'acteurs devenant plus complexes, la divergence des intérêts pourrait tendre à être la règle, donnant lieu à des blocages et d'autres modalités de diagnostic et de prise de décision. **La taille du lac** serait un autre paramètre géomorphologique de la cuvette lacustre, d'importance pour les SE du lac, les petits lacs possédant moins de SE, voire peuvent être mono-usages pour les plus petits d'entre eux (lacs de montagne). Dans le cas d'un lac avec peu d'acteurs, enjeux, SE, l'utilisation de SOALP perd de son intérêt.



Figure 7-1 : Le lac Champlain, à la frontière des USA et du Canada et son BV. Ce lac possède une grande variété de sous-lacs, avec une grande variabilité spatiale des qualités des eaux et des milieux (source : Commission mixte internationale de coordination de la gestion du lac - www.ijc.org)

L'application de SOALP à **d'autres types de systèmes aquatiques** (fluviaux ou maritimes) est plus difficile à envisager. Malgré de grands fonctionnements communs à tous ces systèmes, notamment la « *solidarité* » écologique entre l'amont, les zones littorales et pélagiques, et l'aval, il existe trop de différences en termes de pas de temps et d'espace, entre les lacs (cuvettes relativement fermées), les réservoirs (le territoire lacustre « s'exporte » à l'amont ou l'aval pour la production hydroélectrique ; ces lacs possèdent un marnage important, supposant des SE différenciés au cours de l'année) et les fleuves régis par une dynamique rapide amont en aval ou les systèmes marins très ouverts sur le large, à l'échelle planétaire et pour des temps très longs, en partie à l'échelle géologique (Touchart 2006). A ces facteurs s'ajoutent des différences majeures de statut administratif, de normes et d'accès aux SE. En outre les relations entre BV et aires d'influence socio-économique des fleuves et des mers, parfois associées à des questions géopolitiques (Bréhaut and Pflieger 2017) nécessiteraient une autre approche, une autre structuration.

7.2 Variabilité spatio-temporelle du SSE des grands lacs

La particularité des SSE des grands lacs est de **spatialiser** les processus en distinguant trois ensembles géographiques associés au plan d'eau : (1) **les milieux écologiques** benthiques, littoraux, pélagiques et de surface où sont fournis les SE des lacs, (2) **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, (3) **l'aire d'influence du lac** associée à celui-ci par des flux socio-économiques et culturels liés aux usages et aux divers SE et qui de ce fait représente l'espace où se font les bénéfices et se construit la gouvernance du SSE, et (4) **l'espace englobant ces trois ensembles** qui est celui de l'échelle du SSE. Cette intégration est représentative de la complexité du système et des difficultés de son monitoring et de sa gestion.

❖ Les aires d'influence des grands lacs, à travers les SE

L'eau est une ressource associée à l'ensemble des catégories de SE décrites par le MEA (Pinto 2014). Les lacs "*attirent*" les Hommes et la biodiversité et à mesure que l'on s'en éloigne, l'influence du plan d'eau diminue. Aussi, plus l'écosystème lacustre est étendu, riche en biodiversité et en bon état écologique, et plus les SE seront importants et satisferont un grand nombre de bénéficiaires (Carpenter et al. 2007, IPBES 2018). C'est pourquoi le SSE des grands lacs génère une aire d'influence étendue qui dépasse largement les limites du littoral lacustre. Cette aire d'influence est composée à la fois des aires de fourniture et de demande en SE.

Cette géographie des SE est différente pour chacun des services des grands lacs. **L'aire de fourniture** est dynamique et se distribue au sein de l'aire de fourniture « *in situ* » des milieux écologiques lacustres et est dépendante de l'aire d'influence biophysique du BV (chap 5.1.3). Les processus biophysiques qui caractérisent l'aire de fourniture in situ suivent généralement une **dynamique verticale** selon les différentes masses d'eau des lacs stratifiés. Il existe également une **spatialisation horizontale des masses d'eau**, qui peut être cruciale pour certains plans d'eau (différenciation horizontale des masses d'eau du LSP). Ces arrangements de l'aire de fourniture des SE sont importants à prendre en compte dans l'évaluation ; par exemple les SE d'approvisionnement en eau et en bio-ressources du Léman sont fortement dépendants de la profondeur du lac qui conditionne la température, la répartition des espèces de poisson et de plancton et la présence d'algues. La fourniture de ces SE est alors fortement liée au climat. A l'inverse, sur le LSP, les restrictions d'usage et les qualités de l'eau et des milieux des différentes masses d'eau contraignent la pêche à certains secteurs et le potentiel de navigation varie fortement selon la profondeur et l'hydrologie au différents espaces lacustres.

Dans l'aire d'influence biophysique, la charge externe, déterminée par les MUS, et l'hydrologie du BV, sont des déterminants de la fourniture des SE de régulation (chap 5.1.3). Aussi, la fourniture des SE culturels peut être « *déportée* » sur les reliefs autour du lac au sein d'une « **aire de vue sur le lac** » qui ne suit pas forcément les limites du BV et est incluse dans l'aire d'influence biophysique. Cet espace est alors délimité par les limites (proches) de l'aire de vue sur le lac et les limites du BV.

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

Les grands lacs alpins sont inscrits dans des espaces au pied de montagnes et moyennes montagnes et entretiennent des rapports étroits avec celles-ci, ce qui leur confère notamment une aire de vue étendue sur le lac. A l'inverse, le LSP étant un lac de plaine, son aire de vue sur le lac est restreinte à son littoral. Une hypothèse peut être formulée que l'appartenance des populations locales au territoire lacustre (ce que nous pouvons nommer « *l'identité lacustre* ») est en partie liée à l'existence d'une vue sur les lacs. Ceci pourrait expliquer en partie l'attachement sociétal plus important au Léman vis-à-vis du LSP.

Les SE se spatialisent également en fonction de l'aire de demande qui peut être très étendue (chap 5.1.3). L'étendue de « **l'aire de la demande en SE** » est liée à la diversité et le niveau de SE fournis, les qualités de l'eau et des milieux et les spécificités du lac par rapport aux territoires adjacents : par exemple, le Léman commence à être réputé pour la pêche aux gros poissons, et notamment le brochet, et attire des bénéficiaires éloignés de toute la région Rhône-Alpes et de Suisse. Ces différentes caractéristiques déterminent l'attractivité pour les SE des grands lacs.

Il convient de considérer une dernière échelle, qui est celle du **SSE qui englobe les aires de fourniture et de demande**. L'aire de demande éloignée n'est pas considérée dans ce périmètre, les processus et acteurs qui y sont liés sont considérés comme des facteurs/acteurs exogènes qui peuvent influencer sur la fourniture/demande en SE. A l'intérieur du SSE les aires de fourniture et de demande se superposent et sont imbriquées. Parfois, il arrive que l'aire de fourniture limitrophe soit plus étendue que l'aire de demande limitrophe (au-delà de la limite de 10 Km de l'aire de demande limitrophe).

A partir des travaux de Fisher et collaborateurs (2009) et Costanza (2008), il est possible de proposer une classification des SE des grands lacs qui prenne en compte les relations spatiales entre aires de fourniture et demande en SE (voir figure au chap 3 : figure 3-4). Cette classification est intéressante pour **la géographie** car elle se prête tout particulièrement aux approches de cartographie et met en évidence les compromis spatiaux entre aires de fourniture et de demande entre SE. Cette approche possède une portée opérationnelle forte qui permettrait de se prémunir de la traditionnelle échelle de gestion des grands lacs centrée sur l'échelle du BV. Cette classification est selon nous plus intéressante pour la géographie et l'étude scientifique des lacs que la typologie traditionnelle des SE en trois catégories.

L'une des difficultés de l'étude des **SE culturels** est de définir exactement ce qui dépend du tourisme lacustre car celui-ci résulte de la combinaison de l'attractivité du lac, de son littoral, de tous les éléments paysagers autour du lac et de la culture locale (Hall and Harkonen 2006, Mathieu 2019). La typologie des aires de fourniture et de demande d'un grand lac que nous venons de dresser pourrait aider à la caractérisation de ces SE, car à chacune de ces zones sont associées des pratiques sociales et techniques d'exploitation du SE particulières et des types de bénéficiaires spécifiques.

❖ Limite du SSE des grands lacs et partage des aires de fourniture et de demande

Par ailleurs, ces informations permettent de définir les limites des SSE : elles correspondent aux limites des **aires de fourniture et de demande en SE limitrophes**. Au niveau du système

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

d'acteurs, certaines parties prenantes de la gestion d'un lac ont un domaine de compétence qui ne se limite pas au lac ou son BV (région, état...). Le lac n'étant pas le principal objet de gestion de ces organismes, ces acteurs peuvent donc être considérés comme des acteurs faisant partie de "*l'aire d'influence lacustre éloignée*". Dans le cas du LSP, il convient de réfléchir en termes de masses d'eau, les limites de l'aire de fourniture limitrophe ne prenant pas en compte l'aire de fourniture associée à celle du fleuve et des grands lacs américains, car déjà soumise à une gouvernance spécifique. Ceci dit, des interactions entre parties prenantes de la gestion sont à prévoir pour coordonner les actions.

Par conséquent, il serait possible de proposer des aménagements de mise en valeur des SE lacustres à des dimensions qui dépassent l'échelle du lac et de son BV pour avoir une vision globale de la spatialisation des SE des grands lacs et envisager leurs relations. Les bénéficiaires se partagent les différents SE en fonction de l'aire de fourniture, ces deux aires pouvant correspondre aux mêmes patrons spatiaux. C'est notamment le cas de l'aire de demande in situ, partagée par les pêcheurs, les plaisanciers, les baigneurs... Ce partage se réalise de manière "*implicite*" entre bénéficiaires afin que les pratiques des uns et des autres ne soient pas en conflit, mais dans certaines situations le partage devient difficile et des antagonismes entre SE surviennent. La gestion d'un lac impose d'accompagner, parfois imposer, ce **partage des aires de fourniture en SE** par des restrictions d'accès aux SE. Cependant, dans le cas de **sur-fréquentation** d'un lac ou de pollution, l'aire de fourniture en SE se réduisant, les bénéficiaires présentant des demandes antagonistes peuvent se retrouver concentrés dans certains secteurs des lacs et engendrer ou accentuer des antagonismes entre SE. A l'inverse, **l'amélioration des qualités de l'eau et des milieux** va accroître l'aire de fourniture des SE, ce qui aura pour effet d'attirer un plus grand nombre de bénéficiaires, permettre le développement de nouveaux SE ou pratiques et favoriser les problèmes de sur-fréquentation. Par ces effets, l'amélioration de l'état de fourniture en SE peut augmenter l'attractivité du lac et donc l'étendue des aires de demande.

Les processus de dégradation et d'amélioration des qualités de l'eau et des milieux peuvent engendrer deux situations complexes où, **d'une part les problèmes de pollution engendrent une perte de SE, et d'autre part l'amélioration de l'état du lac provoque un gain de SE**. La gestion des SE doit prendre en compte ces possibles évolutions pour anticiper les possibles conflits et antagonismes spatiaux entre SE. A titre d'exemple, depuis l'amélioration des qualités de l'eau et des milieux, la sur-fréquentation du lac et de son littoral est devenue un problème majeur pour le lac d'Annecy : **les SE du lac sont victimes de leur attractivité**.

Il serait ainsi plus facile de gérer les bouquets et l'accessibilité aux SE en réfléchissant à une gestion à l'échelle de leurs aires de fourniture et de demande, ce qui permettrait d'identifier plus facilement ces problématiques.

Tout ceci démontre que, si nous ne sommes pas en mesure de lutter à la source contre la « *massification des activités* » et la diversification des demandes en SE, nous devons être « *prévoyants* » pour mesurer ces évolutions et les prédire le plus tôt possible. D'où l'utilité des modèles holistiques qui relient les lacs aux hommes, à leurs actions, au développement territorial du BV et la nécessité de **nouveaux indicateurs socio-économiques et culturels** pour renseigner de l'état et du fonctionnement des SSE lacustres. Le changement ne pourra être qu'effectif que si la gestion des lacs évolue vers une "*gestion socio-écosystémique*", et non plus centrée uniquement sur les flux de matières entre le BV et le lac et leurs conséquences

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

sur la biologie et physico-chimie lacustre. La partie 7.4 de ce chapitre apporte des pistes de réflexion visant à répondre à cet objectif.

Nous avons mis en avant que les dynamiques temporelles des SE sont influencées à la fois par des évolutions biophysiques (liées à l'état des écosystèmes), que par des processus socio-économiques et politiques ; ce qui signifie que les analyses rétrospectives des SE devraient toujours suivre une approche d'étude de l'évolution de la fourniture et de la demande en SE.

La plupart des problématiques de pollution supposent une interaction plus ou moins directe entre les composantes du BV et des bénéficiaires des SE des lacs. **Les décalages dans la distribution spatiale contraintes - bénéfiques** génèrent des contradictions entre ces acteurs et une difficulté à prendre en compte les enjeux de chacun. Disposer d'un cadre d'analyse comme SOALP prenant formellement en compte ce « *mismatch* » devrait faciliter les arbitrages, grâce à l'analyse des composantes humaines et écologiques et des logiques en jeu dans ce type fréquent de situation. Au total, la modélisation conceptuelle permet donc de mieux raisonner ou analyser les conditions de réalisation des SE, notamment leur gouvernance et leur variabilité selon l'état du SSE (Amigues and Chevassus-au-louis 2011).

❖ Transmission des chaînes causales dans le SSE et temporalité

Le modèle conceptuel SOALP cherche à rendre compte des caractéristiques clés du fonctionnement et de la temporalité des processus socio-écosystémiques. Le SSE des grands lacs fonctionne ainsi en associant, sous forme de chaînes causales, des flux et des états biophysiques, des SE, des logiques d'acteurs aboutissant à gérer sous la forme d'actions de gestion des flux matériels, voire à l'amont des stocks. Ainsi s'organisent des boucles de rétroaction qui constituent la gestion des lacs et qui, (selon Collins et al. (2011), sont fondamentales à identifier pour comprendre et mettre en œuvre une gestion durable des territoires et des ressources.

Ces boucles ne sont pas toutes de même **amplitude et temporalité**. Le cas des grands lacs alpins nous a montré que, selon le type de l'atteinte et le type de SE considérés, la boucle de rétroaction activée pour restaurer le SE (ou bouquet de SE) au niveau souhaité varie et avec elle, **le temps de réponse du SSE**. A l'extrême, la boucle est limitée à un très petit nombre de composantes centrées sur le lac et les pratiques d'exploitation des SE (exemple : alevinages en réponse à des variations négatives du stock de poissons impliqué dans la fourniture en SE du lac) ; il s'agit alors d'un traitement symptomatique qui vise une simple adaptation aux nuisances de la perturbation (soutien aux populations de poissons pour la pêche par ex). A l'inverse, la rétroaction peut supposer de développer un traitement systémique agissant à la source du problème, c'est-à-dire un traitement portant aussi bien sur le BV et ses composantes « *régulables* », que sur la gouvernance du SSE, voire sur des entrées (forçages biophysiques, économiques, juridiques, socio-culturels). C'est le cas souvent de la restauration des SE de régulation impactés par la pollution. L'emprise temporelle des actions est dans ce cas bien plus grande.

Les dynamiques évolutives du SSE se caractérisent par des **effets retardateurs**, par le cumul des divers types d'inerties (écologique, administrative, prise de conscience...), ou **des accélérations** (exemple : le temps paraît s'accélérer en période de crise, phénomène lié à des aspects sociologiques, innovations techniques dans le diagnostic des pollutions, effet des

« *personnalités* » pour convaincre les acteurs d'agir). La trajectoire du système est alors affectée par des ruptures (*turning point*) et bifurcations, résultant souvent à la fois de changements progressifs dans le champ du système écologique et des prises de conscience parfois brutales dans le champ du système social.

❖ Comparaison des trajectoires des SSE du Léman et du LSP en réponse aux pollutions

Le Léman et le LSP sont deux grands lacs difficilement comparables du point de vue limnologique et paysager, mais des similitudes s'observent du point de vue sociétal et des trajectoires de réponse sociétale aux pollutions.

Les deux grands lacs fournissent un grand nombre de SE affectés par des problématiques de pollution et des antagonismes entre SE qui réduisent leur accessibilité. Bien que les pratiques de pêche soient très différentes dans ces deux lacs, les pêcheurs ont joué un **rôle majeur d'alerte** des problèmes de pollution, sans laquelle la prise en compte des problématiques des lacs aurait été retardée. Les pêcheurs sont également des moteurs à l'action : ils forment des groupes de pression à l'échelle locale qui agissent envers les décideurs. A certains moments, ces bénéficiaires peuvent aussi être **en conflit**, soit entre pêcheurs professionnels et pêcheurs de loisir du fait qu'ils partagent le même SE, soit avec d'autres bénéficiaires dont les demandes en SE s'affrontent. Ces conflits nécessitent une action rapide des décideurs et paradoxalement peuvent avoir pour effet **d'accélérer ou de motiver l'action**.

La complexité des réseaux d'acteurs est un verrou important de ces deux SSE. Pour y faire face, la forme de la gouvernance doit permettre la consultation et l'information du plus grand nombre d'acteurs possibles. **Un organisme de coordination des suivis des lacs et des actions de gestion** a progressivement été développé pour chacun de ces lacs. Il s'agit de la CIPEL pour le Léman et de la TCRLSP pour le LSP. Cependant, la diversité des domaines de compétences et d'échelles d'action des décideurs en jeu limite le degré d'autonomie de l'organisme de coordination. Celui-ci ne peut qu'émettre des **recommandations de gestion**, s'en suivent alors des processus parfois longs pour convaincre les acteurs du bien fondé et de la nécessité des actions, puis s'ajoute la difficulté pour récolter les moyens opérationnels de les réaliser. Le temps de la restauration d'un lac et de ses SE dépend alors autant de **l'inertie des processus écologiques, que des processus de gouvernance** et de construction des objectifs de gestion.

Au final, **les trajectoires sociales de représentation - action** pour ces deux lacs sont similaires dans le cadre des problématiques de métaux lourds. Cette similarité est intéressante, elle montre qu'un forçage (alerte mondiale des contaminations au mercure en 1968 (OCDE 1974) peut entraîner les mêmes effets et réponses sur deux SSE non liés. Les autres trajectoires sociales sont par contre très différentes (Figure 7-2) car la compréhension des problématiques de pollution du LSP et leur prise en compte par les décideurs ont été très lentes, elles ont conduit à la formulation de **plusieurs alertes successives** liées à un même phénomène de destruction des habitats par les pollutions diffuses. Le diagnostic d'état et des réponses à engager n'est pas terminé, alors que les effets visibles des pollutions se sont manifestés à la fin des années 1990. Il en résulte que nous sommes en présence de deux systèmes dont l'un est en train de perdre des SE ou des pratiques associées (la baignade au LSP par ex), et l'autre qui a gagné des SE et pratiques depuis sa restauration.

Les analyses historiques acquises sur les trois grands lacs alpins, sur le LSP et sur l'étude de quelques SE nous permettent d'identifier une même chaîne causale d'impacts des processus de pollutions qui affectent le SSE de ces grands lacs :

1. Des **forçages externes** entraînent une variabilité dans les composantes "BV" du champ écologique (l'hydrographie ou les MUS). Dans certains cas cette variabilité est impulsée par des facteurs internes au système.
2. Les **dynamiques de transfert** au lac sont modifiées par l'apport de nouveaux polluants ou une intensification de ceux existants, ce qui modifie la composition de la charge externe qui entre au lac.
3. Des réactions écosystémiques à cette charge affectent les **fonctions écosystémiques** du lac jusqu'à saturation.
4. Les **SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux** sont dégradés en premier, avec des impacts qui se répercutent sur l'accès aux SE d'approvisionnement et culturels.
5. Les **informations de la dégradation du lac sont diffusées** dans le système par trois actions possibles liées : les bénéficiaires des SE impactés lancent une alerte de la dégradation des SE, un diagnostic de la pollution est lancé et une prise de conscience que le lac est pollué s'opère.
6. Des processus de **prise de décision** s'organisent en lien avec les parties prenantes de la gestion, les enjeux et modalités de la gestion du lac pour construire des objectifs de gestion des impacts sur les SE.
7. Les **actions de gestion** sont élaborées et mises en place.
8. En réaction, **une évolution des dynamiques de transfert, des fonctions écosystémiques et/ou des usages se produit**, l'accessibilité au SE satisfait peu à peu de nouveau les bénéficiaires.

Ce bouclage en huit étapes est une formalisation dans le SSE des grands lacs de la description de cette même chaîne d'impacts des polluants proposée par Meybeck (2002) (chap 1.3.2).

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

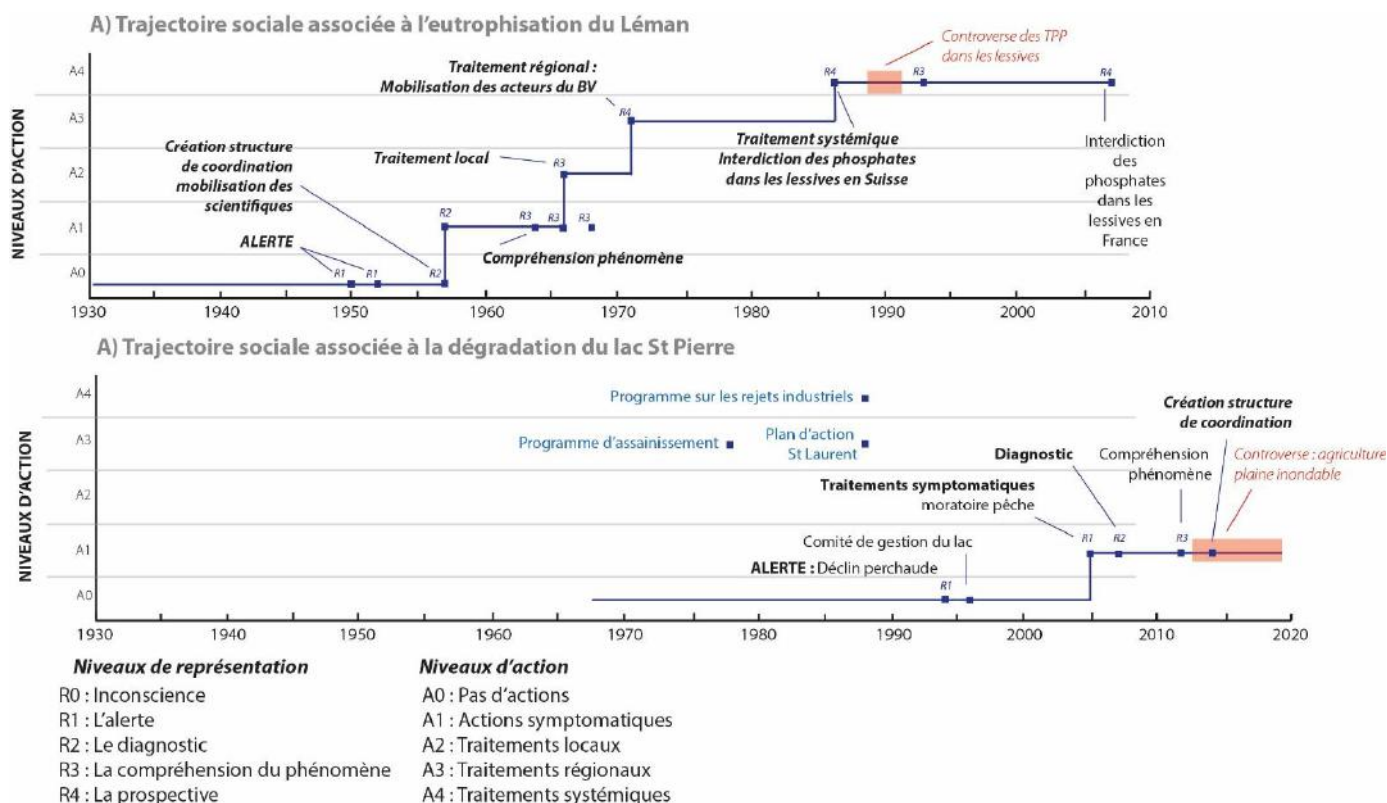


Figure 7-2 : Comparaison des trajectoires de représentation - action du Léman et du LSP

7.3 Relations multiples entre qualités de l'eau et des milieux et SE

Les qualités de l'eau et des milieux sont déterminantes pour la fourniture en SE. De nombreux **bouquets de SE** se composent autour de ces relations dont l'analyse a été rendue possible par l'adaptation du modèle en cascade des SE au cas des grands lacs alpins (chapitre 5). Les chroniques nous ont montré que les pollutions possèdent une grande variabilité dans le temps et dans l'espace en fonction des types des polluants. La relation qualités de l'eau et des milieux et SE possède donc une grande variabilité spatio-temporelle : les impacts qui en résultent sur les SE ont ainsi de multiples dimensions.

Face aux divers épisodes de pollution, les sociétés locales, et également la politique de l'eau à l'échelle nationale se sont organisées et ont mis en place des actions de gestion pour restaurer/maintenir/compenser les SE en agissant pour la protection de tout ou partie des écosystèmes lacustres. Les grands lacs alpins fournissent l'exemple que le traitement des eaux usées, la fourniture en services de régulation des qualités de l'eau se sont améliorés, sans jamais toutefois revenir à l'état initial avant perturbations et a conduit à une augmentation globale des niveaux de SE. Les problèmes de pollutions ont agi comme révélateurs de l'importance des SE de régulation dans les SSE des grands lacs alpins. Par ailleurs, ce sont les atteintes en particulier sur les SE d'approvisionnement qui ont été les révélateurs des pollutions et au-delà, ont permis la prise en compte de la dégradation globale des grands lacs.

7.3.1 Les pollutions révèlent les SE et les SE révèlent les pollutions

Une particularité de l'évaluation des SE aquatiques est la relation entre les milieux aquatiques et le mode d'occupation des sols de leurs BV. Selon Hackbart et al. (2017), l'évaluation des relations « MUS du BV – SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux – SE d'approvisionnement et culturel – société » pourrait aider les décideurs à définir et planifier les mesures de gestion des lacs dans l'ensemble du BV. De fait, certains SE sont fortement dépendants des niveaux des SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux, c'est le cas des SE « pêche », « activités récréatives », « eau potable ».

Ces différents SE fonctionnent en synergie et sont très sensibles aux conséquences des changements dans les écosystèmes. Keeler et collaborateurs (2012) mettent en avant les nombreuses interactions entre fonctions, services et bénéficiaires associés à la qualité de l'eau et des milieux, cette problématique est soumise à de nombreux enjeux de gestion. Il émerge qu'un seul changement des qualités de l'eau et des milieux va affecter plusieurs fonctions écosystémiques (ex : production primaire, maintien des habitats, transparence) ce se répercuter sur la fourniture de plusieurs SE (ex : approvisionnement en eau potable, SE culturels), impactant potentiellement les activités de nombreux bénéficiaires. A ces effets délétères s'ajoutent les conséquences des boucles de rétroactions entre services. Ces rétroactions peuvent être positives ou négatives, elles dépendent du fait que la fourniture d'un service peut dépendre de la fourniture d'un autre service. Ceci étant, aucun modèle unique n'a été développé pour mesurer l'impact d'un changement de la qualité de l'eau sur la fourniture en SE des milieux aquatiques (Keeler et al. 2012).

A contrario, d'autres SE des grands lacs alpins comme les SE d'approvisionnement en eau à des fins matérielles (pour la navigation, l'hydroélectricité), ou l'utilisation des ressources minérales ou propriétés des écosystèmes à des fins matérielles possèdent des déterminants abiotiques et des relations bien moins fortes avec les problèmes de pollution. Les principaux risques consistant en des gênes occasionnées par des nuisances olfactives et visuelles (ex : macro-déchets). C'est par ailleurs une des raisons pour lesquels ces SE dits « abiotiques » (CICES 2018) ne sont pas toujours considérés dans les études sur les SE (Méral and Pesche 2016).

❖ Les SE révèlent les pollutions

Nos grands lacs, comme tous les grands lacs de régions développées, ont connu une succession de pollutions dans l'anthropocène qui ont généré une variabilité d'impacts sur les SE rendus (Jenny et al. 2020). En fonction du type de pollution et de l'importance des contaminations, des caractéristiques du SSE lacustre et de la liste des SE, ces impacts se sont manifestés de différentes manières. En premier lieu, ce **sont les bénéficiaires qui ont alerté des pollutions** en faisant part de leurs inquiétudes vis-à-vis de changements visibles sur le fonctionnement du lac ou sur l'accès aux SE. Ces changements visibles provoquent une difficulté d'utilisation de certaines pratiques, altèrent les demandes en SE ou modifient les représentations et normes socio-culturelles associées au lac. Plus tard ont émergé des pollutions invisibles (les micropolluants) non détectables directement par les bénéficiaires, risquant pourtant de compromettre l'exploitation des SE et le bien-être humain. Pour ces pollutions, **l'alerte a été lancée scientifiquement** à l'issue des mesures de suivis écologiques permettant de "*rendre visible*" l'invisible par transgression de normes préétablies renseignant

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

sur les risques de pollution sur certains SE (pêche, activités récréatives, eau potable). Si de telles normes n'existent pas, il a souvent été constaté que ce sont les **catastrophes écologiques et sociétales**, tels que les blooms algaux ou les problèmes sanitaires, qui jouent ce rôle d'alerte, créent des crises et poussent à la mise en place urgente des actions. L'influence des "*catastrophes*" s'exporte au-delà des limites d'un SSE donné et peut inciter certains territoires à engager des mesures pour tester la présence des contaminations "*invisibles*", comme ce fut le cas au Léman et au LSP à la suite de l'alerte mondiale au mercure donnée par l'OCDE (voir encadré 1-8).

Bien souvent, les alertes sont données à partir du moment où les SE d'approvisionnement sont affectés. Or, la manifestation d'effets des pollutions sur ces SE suggère des dégradations déjà importantes sur les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux et les fonctions écosystémiques. Le coût de la restauration est alors bien plus important car il revient à restaurer non pas un seul SE, mais l'ensemble d'un bouquet de SE avec la mise en place de traitements à la fois locaux, régionaux et systémiques. Souvent, des traitements symptomatiques sont indispensables pour limiter l'aggravation des impacts socio-économiques et permettre une exploitation continue minimum des SE, ce qui vient s'ajouter au coût de la restauration.

L'histoire révèle ainsi que les sociétés humaines sont difficilement capables d'anticiper les problèmes, ou quand bien même elles le sont, des retards de prise de conscience, financiers, techniques ou réglementaires viennent retarder l'action. Une réelle **anticipation** viendrait à donner l'alerte dès l'identification des premiers impacts sur les fonctions écosystémiques, avant leurs répercussions sur les SE, voire avant cela dès l'identification d'un changement sociétal potentiellement néfaste aux SE. Des traitements préventifs pourraient alors être mis en place en amont des impacts, ce qui permettrait le maintien d'un écosystème capable de répondre aux demandes de l'ensemble des bénéficiaires. Il pourrait également être envisagé de suivre l'évolution des modes de vie, des rapports des sociétés aux lacs, l'apparition de nouveaux produits sur le marché ayant un impact sur les milieux aquatiques.

Les SE sont **des révélateurs des pollutions**. Il existe des "*SE sentinelles*" dont les bénéficiaires jouent un rôle important dans les alertes des pollutions. C'est le cas du SE pêche, où les poissons et écrevisses sont des bio-indicateurs de l'état des écosystèmes lacustres et les bénéficiaires en contact avec l'eau (pêcheurs professionnels et de loisir, plongeurs, nageurs ...), entretiennent un contact constant et régulier avec les grands lacs tout au long de l'année. Les pêcheurs en particulier possèdent des savoirs profanes sur le fonctionnement d'un lac et sont en mesure de détecter des modifications visibles de son état. Par ailleurs, les produits de la pêche étant consommés localement, une atteinte aux poissons peut aider à une prise de conscience globale des pollutions des lacs. Les pêcheurs ont ainsi été des **lanceurs d'alerte** de l'eutrophisation des trois grands lacs alpins et de la destruction des habitats du LSP. Leur rôle a, par ailleurs, également été observé pour d'autres écosystèmes aquatiques : en mer (Johannes and Neis 2007, Le Fur et al. 2011) et dans les fleuves (Beslagic 2013). Frioux and Malange (2013) mentionnent que les pêcheurs sont parmi les premiers groupes d'acteurs à s'inquiéter de la pollution des rivières au XX^e siècle. De plus, ces bénéficiaires des SE sont capables de s'organiser pour faire pression auprès des décideurs pour accélérer la prise de décision. En tant qu'acteurs, ils peuvent également participer au diagnostic de l'état d'un SSE, en renseignant sur l'état de la biodiversité, le lac, mais également des usages, des relations entre acteurs et sur le fonctionnement de la gouvernance. Les pêcheurs amateurs sont à ce

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

titre mobilisés dans le cadre des suivis halieutiques du Léman et d'Annecy. Tout cela indique l'importance de valoriser le **savoir local des pêcheurs**, et plus globalement des bénéficiaires des SE pour la conservation de la biodiversité (Nazarea 2006).

Bien entendu, **certains types de pollutions sont invisibles** et restent insoupçonnées par les bénéficiaires des SE. C'est le cas des micropolluants, dont les impacts sur la santé ou la biodiversité peuvent être importants mais révélés uniquement par des études scientifiques. Un travail de médiatisation de l'alerte ou de contrôle des produits doit être mis en place pour éviter la mise en danger des divers types de bénéficiaires.

❖ Les pollutions révèlent les SE de régulation

Les pollutions révèlent différemment les SE des grands lacs alpins, tout comme d'autres milieux aquatiques (Keeler et al. 2012). Les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux s'avèrent d'une importance capitale car ils assurent une dilution et « *épuration naturelle* » des flux de polluants que la société est incapable de réduire au-dessous d'un certain seuil. A ce titre, ils jouent un rôle primordial dans la résistance aux pollutions. Ils sont en partie dépendants de l'état de la biodiversité, de la redondance fonctionnelle et de la complémentarité fonctionnelle (Lavorel et al. 2013).

❖ Une gestion multi-services, multi-polluants

La gestion d'un grand lac consiste à coordonner les acteurs d'un territoire lacustre pour qu'un suivi global de l'écosystème soit réalisé et que des actions soient mises en place permettant aux différents usages lacustres de perdurer. Or, les lacs sont soumis à de multiples pressions anthropiques d'origines diverses à différentes échelles, et dont les impacts sont incertains, avec de possibles effets cocktails. La gestion des grands lacs repose aujourd'hui sur une gestion des SE d'approvisionnement et culturels dont l'objectif vise à satisfaire les usages et les bénéficiaires. Les moyens d'action de la gestion sont alors soit directement d'ajuster la demande à la capacité de fourniture en SE (ex : diminution du nombre de bénéficiaires, diminution de l'accès : traitements locaux-régionaux), ou bien en régulant artificiellement la fourniture à la demande (augmentation de la fourniture par des traitements symptomatiques), ou de manière indirecte (supprimer les sources et réduire les dynamiques de transfert de polluant au lac, conserver les habitats et de la biodiversité lacustre : traitements systémiques).

Sur les grands lacs, les bouquets de SE associés aux régulations des qualités de l'eau et des milieux sont souvent pris en compte dans la gestion de manière implicite de par les actions sur le BV visant à restaurer ces SE via la qualité des eaux. **Seule une approche globale, mêlant les trois types de traitements, couplée avec un suivi des fonctions écosystémiques, un suivi des pratiques et des demandes sociétales**, sera à même d'assurer une gestion durable et adaptative des écosystèmes lacustres.

7.3.2 Qualités de l'eau et des milieux et SE des grands lacs

❖ Impacts des pollutions sur les fonctions écosystémiques et les SE

Comme le relèvent Keeler et al. (2012 - article de référence autour des relations "*qualités de l'eau et des milieux et SE*"), la « *qualité de l'eau et des milieux* » est une variable importante pour décrire l'état d'un système lacustre. Cependant, les SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux sont relativement peu étudiés par rapport aux autres types de SE (notre inventaire des SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux est d'ailleurs identique à celle proposée par ces auteurs). L'importance de ces SE est pourtant primordiale dans la fourniture de la plupart des SE et donc pour le bien-être humain.

Ces SE de régulation, les fonctions écosystémiques qui les sous-tendent et les autres SE en synergie sont reliés à quatre dimensions des qualités de l'eau et des milieux : **la qualité physico-chimique, biologique, sanitaire et perçue**. Selon ce point de vue, il est normal de considérer cette variable comme multidimensionnelle et en partie construite socialement (Lestel et al. 2017). Elle se base à la fois sur une évaluation objective d'intensité (indicateur d'état physico-chimique, biologique ...), sur des seuils tels que des normes sanitaires en partie arbitraires et sur des évaluations totalement subjectives (les représentations/perceptions) qui peuvent varier fortement d'un SE à un autre. Il en résulte que chaque SE possède une sensibilité particulière aux pollutions du fait que les différents compartiments biophysiques fournissant les services n'ont pas la même sensibilité aux changements de qualité des eaux et des milieux. Chaque SE possède également une demande sociale spécifique en termes de qualités des eaux et des milieux.

Nos analyses rétrospectives mettent bien en évidence ces différences et l'importance de celles-ci sur la "**propagation**" dans le **SSE des impacts des pollutions**. Elles se matérialisent par une évolution des atteintes aux fonctions et SE, en commençant par les plus sensibles (Figure 7-3, les flèches rouges indiquent le sens de la propagation des atteintes aux services et fonctions dans le cadre d'une diminution de la qualité des eaux ; les flèches orange, dans le cadre d'une perte d'habitats) :

1. Toute atteinte à la qualité des eaux et des milieux lacustres commence par une **atteinte aux fonctions de régulation**, qui, au-delà d'un seuil, se répercute sur les fonctions de production et/ou d'habitats.
2. Une atteinte trop importante à la fois des **fonctions de régulation et de production** entraîne un impact délétère sur les fonctions d'habitats.
3. Par effet de rétroaction négative, une atteinte aux **fonctions d'habitat** peut amplifier les impacts négatifs sur les fonctions de production et de régulation si une ou plusieurs espèces impliquées dans les processus de dégradation des contaminants ou dans la production primaire sont affectées (ex : les invertébrés benthiques qui participent aux cycles bio-géo-chimiques). Des impacts négatifs sur les fonctions d'information peuvent également survenir si l'habitat d'une espèce emblématique des lacs se dégrade (ex : frayères pour les poissons).
4. Les fonctions d'information ont un comportement par « *effet de seuil* » car elles sont déterminées en partie par les représentations des lacs par les bénéficiaires : ces fonctions sont sensibles aux dépassements d'une norme sanitaire ou l'apparition

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

d'une nuisance visuelle, olfactive. En l'absence de ces signes, les impacts sur les fonctions d'information sont inexistantes. Ces signes sont liés à la dégradation des autres types de fonctions (régulation : développement de risques sanitaires ; Production : baisse de la transparence, variations de la couleur de l'eau ; Habitat : perte d'habitat, perte d'une espèce emblématique ou apparition d'une espèce invasive).

5. Si à la fois les fonctions de production, de régulation et d'habitat sont impactées au-delà d'un certain seuil, alors des nuisances apparaissent (ex : blooms algaux ; anoxie du milieu ; mortalité des poissons ; nuisances olfactives) qui affectent **les fonctions d'information** et les représentations des écosystèmes lacustres.
6. Si **l'ensemble des fonctions sont dégradées**, alors nous sommes en présence d'une pression généralisée sur l'écosystème qui engendre des réductions fortes de la fourniture des bouquets de SE associés à la régulation des qualités de l'eau et des milieux.

Les dégradations de toutes les fonctions écosystémiques surviennent par paliers avec des seuils associés à l'inertie des systèmes écologiques et de leurs composantes hydrologiques (temps de séjour des eaux), biologiques (réseau trophique) et humaines (représentations). Cette inertie est fortement liée au temps de séjour des eaux dans les grands lacs et nous pouvons émettre l'hypothèse que plus celle-ci est importante, plus les changements ne sont visibles qu'à long terme et peuvent se cumuler et s'amplifier mutuellement. Cette propriété des systèmes lacustres agit autant dans les trajectoires de dégradation des SE que dans les trajectoires de restauration (Barroin 1990).

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

LES QUALITES DE L'EAU ET DES MILIEUX LACUSTRES : UNE VARIABLE AVEC DES DIMENSIONS MULTIPLES

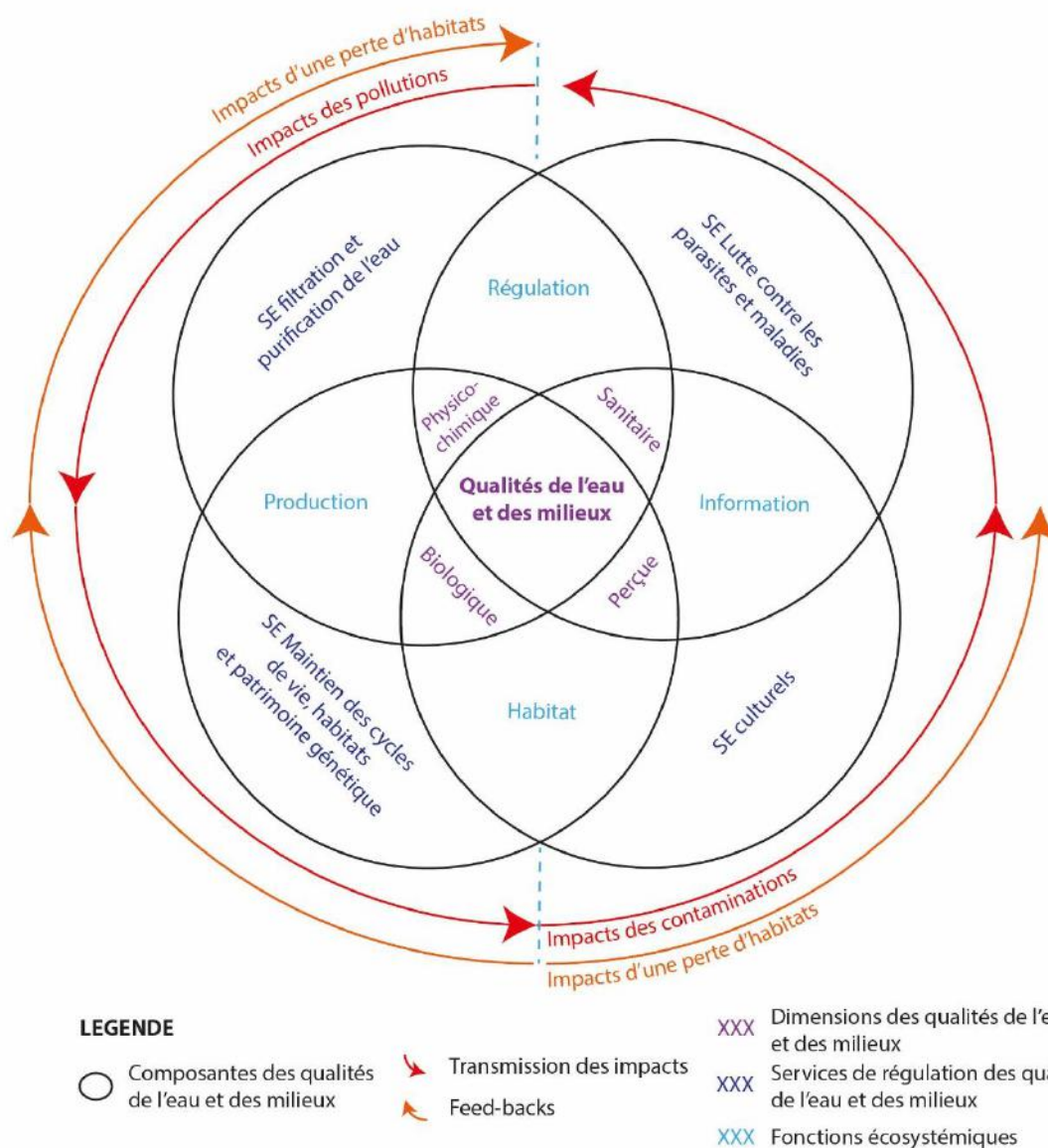


Figure 7-3 : Définition des qualités de l'eau et des milieux par le prisme des SE. Chaque SE possède des relations plus fortes avec certaines fonctions écosystémiques, rattachées à différentes dimensions des qualités de l'eau.

❖ Effets de la dégradation des qualités de l'eau et des milieux sur la fourniture des SE

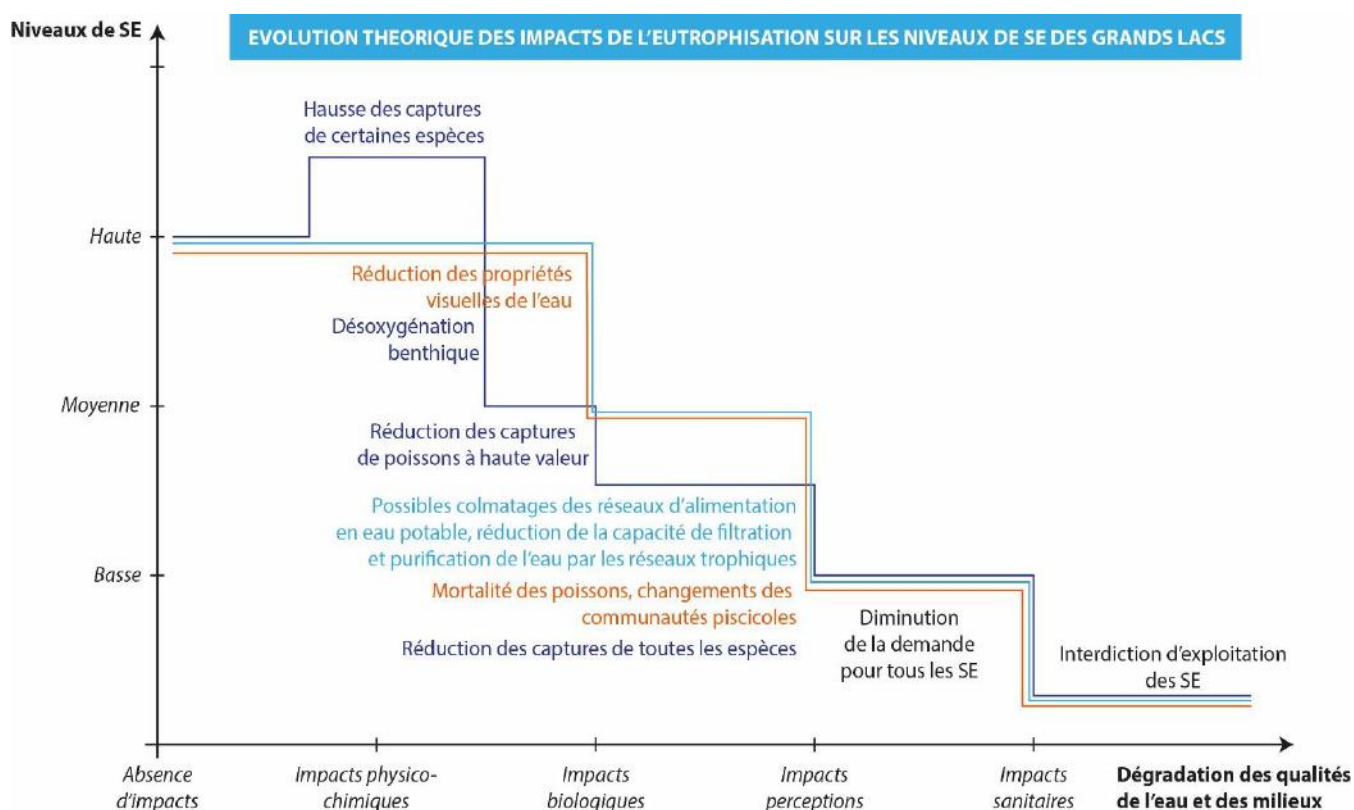
Sur les grands lacs alpins, les niveaux de fourniture des SE d'approvisionnement et culturels diminuent progressivement avec l'accroissement des impacts des pollutions, mais les évolutions ne sont pas synchrones (Figure 7-4).

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

Les impacts sur la **qualité sanitaire de l'eau et des bio-ressources exploitées** impliquent un risque pour la santé qui conduit à l'interdiction ou la limitation de l'exploitation de certains SE. Cela a été le cas au Léman avec la pollution mercurielle et au lac du Bourget du fait des PCB, où des limitations de la taille maximale des poissons pêchés ont été mises en place (chapitre 5.3.3). La fourniture du SE baisse jusqu'à être presque nulle (subsiste la valeur d'option). Si les impacts persistent, la fourniture des SE peut diminuer à un point tel que cela peut entraîner la perte totale du SE.

La dégradation de la qualité des eaux et des milieux enclenche des processus écologiques qui peuvent engendrer des **dis-services**. Nous avons identifié trois phénomènes agissant ainsi : (1) la libération de la charge interne en polluants stockés dans les sédiments, (2) la bio-amplification et (3) la bio-accumulation qui de manière naturelle sont deux processus permettant de conserver, transférer et amplifier les oligo-éléments, vitamines et acides gras nécessaires aux différents niveaux trophiques et de fournir des SE de qualité, mais qui en présence de contaminants persistants entraînent une accumulation et un transfert de la charge polluante dans les réseaux trophiques. Des risques sanitaires associés à l'exploitation des SE d'approvisionnement surviennent alors. Sans ces processus, certains contaminants ne génèreraient pas d'impacts sanitaires pour l'homme.



Services écosystémiques considérés

Approvisionnement en bio-ressources

Approvisionnement en eau potable

SE culturels

Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2019

Figure 7-4 : Relation entre les niveaux de SE et l'évolution des impacts sur les qualités de l'eau et des milieux par l'eutrophisation, d'après l'expérience acquise dans les trois grands lacs alpins.

❖ Effets de la dégradation des qualités de l'eau et des milieux sur la demande en SE

Les impacts des pollutions affectent également la **demande en SE**, c'est-à-dire les fonctions sociales, les bénéfiques et leur bien-être. Ces impacts se matérialisent de quatre manières :

1. Une perte de certains **bénéfiques**,
2. Une **accessibilité réduite** au SE (souvent le cas pour les SE associés aux pêches, chap 5.3 et 6.3).
3. Un **désintérêt des bénéficiaires pour les SE** des lacs, se traduisant par une diminution du nombre de bénéficiaires, ou alors par une perte totale d'un type de bénéficiaires directs.
4. Une **atteinte à l'image globale** du lac qui va affecter la demande en plusieurs services,

En réponse aux atteintes sur les SE, les systèmes sociaux sont résilients et capables d'adapter leurs pratiques. Cela se matérialise par l'utilisation de pratiques non soumises aux impacts des perturbations (ex : changement d'engins de pêche), le report sur d'autres espèces et des reports spatiaux. Ces adaptations peuvent être très rapides, risquant d'accentuer certaines problématiques, générer de nouveaux impacts et antagonismes entre SE. **Les SE évoluent donc en fonction des pollutions et des progrès techniques** qui donnent l'opportunité aux bénéficiaires d'adapter la demande en SE à la variabilité de la fourniture.

Ceci souligne l'importance d'un monitoring des lacs permettant à la fois de suivre l'évolution de l'état de chacune des fonctions écosystémiques, et également des composantes sociétales des SSE. L'évolution des pratiques, des modes de vie, l'apparition de nouveaux produits potentiellement néfastes aux écosystèmes lacustres et des représentations des lacs sont des variables tout aussi intéressantes à monitorer que les variables écosystémiques.

7.4 Opérationnalisation du modèle et prospective

7.4.1 Approche par la prospective stratégique

Les **approches prospectives** sont une autre application des modèles conceptuels de SSE qui consistent à anticiper les changements possibles et souhaitables (Godet 2006). Cependant, comme le font remarquer Godet et al. (2004), *"l'action sans but n'a pas de sens et l'anticipation suscite l'action"* ; ce qui signifie que la prospective seule n'est pas digne d'intérêt si elle n'est pas couplée avec une étape de préparation de l'action. Cela consiste en l'élaboration et l'évaluation des **choix stratégiques** pour se préparer aux changements attendus et provoquer les changements souhaitables. Les modèles conceptuels sont très bien adaptés à ce type d'approches, car ils permettent de répondre aux cinq questions fondamentales que suscite la prospective stratégique (voir Encadré 7-2 ; Giget 1998)¹.

¹ L'auteur propose ces questions dans le cadre d'une application à la gestion des entreprises, mais elles peuvent s'appliquer à d'autres contextes

Encadré 7-2 : Les questionnements de la prospective stratégique

1. *"Qui suis-je?"* : les modèles conceptuels d'étude permettent d'étudier les composantes et interactions dans un SSE
2. *"Que peut-il advenir ?"* : ils facilitent l'identification des variables de changement
3. *"Que puis-je faire ?"* : ils peuvent aider à identifier les menaces qui pèsent sur un système, mettre en avant celles qui sont endogènes ou exogènes au système
4. *"Que vais-je faire ?"* : ils permettent d'identifier les modalités et possibilités d'actions pour guider la prise de décisions
5. *"Comment le faire"* : de manière pratique, ces modèles aident à l'identification des parties prenantes de l'action, et à planifier une stratégie pour mettre en œuvre les actions de gestion

Appliquer notre modèle conceptuel SOALP dans une approche prospective est une autre manière de rendre le modèle opérationnel. Ce type d'approche nécessiterait d'être réalisé de manière collective avec des chercheurs et des acteurs du territoire étudié. Ici nous ne proposons que des pistes de réflexions vis-à-vis des futurs possibles des SSE des grands lacs.

Une première section traite des enjeux et menaces des grands lacs pour le futur, qui nous amènera à comparer brièvement le fonctionnement des SSE du Léman et du LSP. En deuxième section, nous proposons des pistes d'évolution du système d'observatoire lémanique et la sélection d'indicateurs "*socio-écosystémiques*".

❖ Les menaces du Léman dans le futur

Aujourd'hui, le développement socio-économique sans précédent autour des lacs génère de nouvelles perturbations qui s'accroissent rapidement, s'accumulent, s'intriquent et se diversifient, rendant leur résolution de plus en plus complexe. Quatre grands types de menaces sont à prévoir dans le futur pour les grands lacs alpins (Figure 7-55) :

1. Des impacts accrus de certaines pollutions sur l'écosystème et les SE, à **savoir les micropolluants plastiques et médicamenteux**. L'émergence et le développement sans précédent de nouvelles molécules résistantes avec des capacités de bio-accumulation et de bio-amplification dans les réseaux trophiques sont souvent inquiétants (chap 5.3.4). Ces propriétés placent l'humain en composante la plus sensible aux effets de ces polluants, mais les perturbateurs endocriniens sont généralement nocifs également pour l'écosystème. Rien n'exclut que des impacts sanitaires pourraient survenir avant même de pouvoir identifier des impacts sur la biodiversité, limitant notre capacité d'alerte des problèmes.
2. Une accentuation des impacts locaux du **réchauffement climatique**, avec des conséquences fortes sur la biodiversité emblématique, les espèces cibles des pêcheries

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

et le fonctionnement global de l'écosystème et de son BV (ex : développement du corégone, chap 5.3.3). A l'avenir, les grands lacs vont devenir de plus en plus oligomictiques, avec moins de brassages du fait d'hivers plus doux. Les risques attendus sont un relargage de la charge interne de certains polluants dont PO₄, ce qui engendrerait des épisodes d'émissions massives de certaines pollutions héritées du passé, contre lesquelles il sera compliqué d'agir et dont les impacts sont difficiles à évaluer ou prévoir à long terme en l'état actuel des connaissances. Les développements accrus d'espèces indésirables, notamment planctoniques (qui engendrent des limitations ou interdictions d'usages) sont également attendus (ONEMA 2014). Parallèlement, une hausse de l'attractivité des lacs pour les SE culturels est très probable du fait d'une eau de plus en plus avenante pour les activités récréatives (hausse de la température de l'eau, couleur de l'eau de plus en plus turquoise), et d'une demande de plus en plus forte envers les SE de régulation du microclimat local du fait des canicules attendues.

3. Des enjeux de plus en plus importants autour de la **préservation des ressources en eau**, vont s'ajouter aux problématiques de qualité, des préoccupations sur la manière d'éviter le marnage estival et ses potentiels impacts sur les littoraux lacustres ou encore des questions de réduction des quantités d'eau disponibles dans les BV. Ces problématiques n'affecteront pas que les lacs mais se feront ressentir à l'échelle régionale, ce qui pourrait soulever des questions de "*solidarité*" avec l'aval (irrigation, AEP, hydroélectricité ...) (Lehmann 2019). Des contraintes de plus en plus fortes (quantité d'eau, débits mais également la température) posées par la présence des centrales hydroélectriques à l'aval des lacs sont également attendues. Ces enjeux pourraient prendre l'ascendance sur les problématiques des SE des grands lacs dans le futur (dires d'expert, géographe).
4. De manière globale, un **accroissement de la demande pour l'ensemble des SE**, des besoins d'extension des aires de fourniture des SE et des pressions de plus en plus fortes sur l'accessibilité aux SE. Tout ceci sera exacerbé par les trois menaces listées ci-avant. Les antagonismes entre SE vont devenir l'une des problématiques les plus importantes des grands lacs à l'avenir.

Des actions pour y faire face sont en cours (limiter l'utilisation de certains micropolluants dans le BV, sensibiliser les communes à l'interdiction de l'utilisation des produits phytosanitaires pour l'entretien des espaces verts) ou sont devenus des enjeux identifiés pour le prochain plan d'action de la CIPEL (CIPEL 2019), où la gestion des activités de loisir est reconnue comme un enjeu majeur, tout comme les problèmes de micropolluants et le réchauffement climatique. Les « *dangers* » de l'attractivité du Léman non maîtrisée et de la promotion du lac pour le tourisme sont également mis en avant. Enfin, il s'agit de tenir compte des nouveaux SE (ex : utilisation de l'eau du lac pour la régulation thermique, nouvelles pratiques récréatives ...) dans le droit et la gestion et les anticiper au maximum.

Ces actions seront-elles en mesure de faire face à un SSE de plus en plus ouvert, influencé par des forçages extérieurs difficiles à maîtriser ? De nouvelles chaînes causales dans le SSE peuvent apparaître et complexifier le système actuel et sa gestion. Certains phénomènes pourraient être vertueux pour le système, améliorer la fourniture en SE : de nouvelles pratiques plus vertueuses de l'environnement peuvent apparaître par exemple. Mais à l'inverse, certains phénomènes pourraient avoir des effets désastreux pour le SSE et venir amplifier les problématiques actuelles. Quelle marge de manœuvre restera-t-il au niveau local

pour agir sur ces forçages ? La question reste ouverte, mais de nouvelles formes de collaboration entre le SSE des grands lacs et les territoires adjacents et les échelons administratifs sont sans doute à envisager. Le modèle SOALP, en permettant d'organiser les informations, peut aider à identifier ces chaînes causales, les effets de rétroaction négatifs qui pourraient survenir et les causes et conséquences internes et/ou externes au SSE.

A l'avenir, ce type de modèle pourrait devenir un outil stratégique essentiel à la gouvernance des grands lacs, permettant aux gestionnaires de prendre du recul face aux problématiques et actions mises en place pour lutter contre. Ce modèle peut aider à la mise en place d'une « gestion multi-scalaire » des écosystèmes lacustres, envisageant les processus et leurs conséquences à différentes échelles spatiales, mais également temporelles.

❖ Les particularités socio-écosystémiques mises en avant par la comparaison du SSE du LSP et du Léman

Les SSE des lacs Saint-Pierre et le Léman ont un fonctionnement différent dans tous les compartiments qui composent le modèle SOALP. Les enjeux entre ces deux systèmes sont également différents, avec un cas de SSE menacé par une **perte de SE** du fait des pollutions et destructions d'habitats (LSP), et un cas de **gains de SE** (lac Léman), en réponse à sa dépollution et l'augmentation de l'attractivité du lac. Ces deux situations sont néanmoins lourdes de menaces pour l'avenir des SSE. Les figures 6-14 (chapitre 6.2.4) et figure 7-5 nous permettent de comparer les menaces sur ces deux lacs. La comparaison entre ces deux systèmes permet d'identifier des problématiques et questionnements qui n'auraient pas été identifiés autrement.

La taille très étendue du BV du LSP, la faible pente et le réseau hydrographique dense avec une forte capacité de transport entraînent une connectivité élevée entre les sources de pollutions et les masses d'eau du lac. Les immenses parcelles agricoles du LSP sont chacune reliées directement aux cours d'eau par des systèmes de drainage et un réseau important de fossés. Les cours d'eau sont aménagés pour faciliter l'écoulement, si bien qu'il existe un lien presque direct entre les parcelles agricoles, sources des pollutions, et le lac récepteur. Au Léman en revanche, les parcelles agricoles sont plus petites, présentent des bandes riveraines et ne sont pas directement reliées aux cours d'eau, ce qui permet aux zones tampon d'avoir une action sur les polluants avant leur entrée dans les cours d'eau. Les cours d'eau sont par ailleurs moins anthropisés, ce qui leur permet d'assurer une épuration partielle des eaux avant leur entrée dans le lac. La première différence majeure entre ces lacs qui entraîne une forte sensibilité aux pollutions se situe donc au niveau du **degré de connectivité entre le BV et le lac**. Ceci nous informe que les « *modalités d'injection de la charge externe dans le lac* » est une composante essentielle de la sensibilité du champ écologique des grands lacs aux pollutions.

Le deuxième facteur qui génère une sensibilité du lac aux perturbations issues du BV est lié au **degré d'isolation entre les masses d'eau**. La séparation des masses d'eau du LSP limite le potentiel des SE de régulation de la qualité de l'eau et des milieux et la capacité de dilution des polluants. Une image qui pourrait traduire la situation du lac consisterait à envisager le LSP comme deux lacs séparés par un fleuve au centre : la séparation des masses d'eau limite les échanges, et de ce fait, concentre les pollutions et impacts au sein de chacune d'elles. Par comparaison, le temps de résidence des eaux au Léman est d'environ une dizaine d'années, alors qu'il est inférieur à un an au LSP, ce qui signifie un temps de réaction de l'écosystème

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

lacustre aux pressions beaucoup plus court pour le deuxième lac. Ceci étant, cela implique également que les alertes des pollutions et le temps d'anticipation au Léman soient retardés.

La différenciation des masses d'eau du LSP complexifie également la gestion et les prises de décisions car les actions entreprises dans les tributaires n'auront une **action partielle que sur une seule masse d'eau**. La gestion du LSP relève donc de deux échelles différentes : celle des tributaires qui influencent la masse d'eau du nord, du sud, coordonnée au niveau du comité ZIP du LSP et celle liée au fleuve Saint-Laurent, qui dépend de la régulation des qualités de l'eau et des milieux des grands lacs américains, gérée à l'échelle des gouvernements des USA et du Canada. Une dernière échelle d'action de la gestion prend part au niveau de la plaine littorale du lac qui le ceinture et possède des enjeux de conservation relativement homogènes au niveau de la partie nord et sud du lac. Cela nous informe également qu'au-delà d'un certain seuil, **la surface du BV est trop étendue pour être l'échelle pertinente de la gestion**.

Egalement, cela sous-entend le rôle majeur des "*boundary organisation*" et des "*boundary works*" dans **l'organisation de la gestion**, pour reprendre les termes de Guston (2001). La forme de la gouvernance est similaire pour les deux lacs avec une structure coordinatrice, dont le rôle est de mettre en relation les acteurs du lac, fournir une plateforme d'échanges entre parties prenantes pour orienter les prises de décisions et piloter les suivis des lacs. La CIPEL et le Comité ZIP du LSP sont l'interface entre la science, les politiques et les citoyens et émettent des recommandations de gestion aux acteurs concernés par les problématiques des lacs. Étant donné la complexité des réseaux d'acteurs impliqués dans la gestion des grands lacs, ces acteurs sont indispensables à la prise de décision.

Les « *boundary works* » sont des outils permettant de synthétiser les informations et d'appuyer l'action. Sur les deux lacs, un **plan d'action** fournit les axes stratégiques de la gestion et priorise les actions à mettre en place sur le lac. Le LSP possède également une bibliothèque numérique (http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bibliotheque/lac_st_pierre/) qui regroupe l'ensemble des articles scientifiques et rapports techniques associés au lac et accessibles en ligne publiquement. C'est un outil intéressant d'interface entre science et politique. Sur le Léman, il existe également un **tableau de bord** qui permet de synthétiser les données suivies ; chaque année un **rapport scientifique** du lac est réalisé qui concentre l'ensemble des analyses du monitoring et enfin une **lettre d'information** de l'état du Léman et des actions entreprises est adressée à chaque acteur et aux communes du BV du lac. C'est un outil de sensibilisation important car la conscience des problématiques du lac est fragmentée du fait de l'étendue du territoire à gérer. Depuis 2017, les résultats des synthèses de suivi du Léman sont également rendus publiques sur le site de la CIPEL. Au LSP, un **forum citoyen** est organisé, autre moyen plus moderne de sensibilisation des acteurs et de la population. Tous ces "*boundary works*" sont des outils indispensables à la gestion adaptative des grands lacs (Guston 1999). On remarque que le **numérique** joue un rôle d'appui à la diffusion de ces outils auprès des citoyens et de l'ensemble des acteurs des lacs. Un autre type de *boundary works* est en cours de développement, il s'agit des **sciences participatives**, qui consistent à mobiliser les populations locales (ex : associations ASL, ALP – chap 2.3.3), les usagers (pêcheurs de loisir volontaires pour recueillir des données sur les pêches et la biologie), voire les touristes pour participer à des travaux de recherche. Ces actions permettent à la fois d'obtenir des ensembles importants de données quand les moyens humains de recherche sont insuffisants et de sensibiliser les participants à la protection des lacs et de l'environnement en général.

Par ailleurs, étant donné l'importance des plans d'eau et de la superficie de leurs BV, les actions de gestion relatives à ces territoires lacustres sont en mesure de **remettre en cause des réglementations qui prennent part à des échelles régionales, voire étatiques**. Ce fut notamment le cas lors de l'épisode des controverses des TPP dans les lessives pour le Léman où la réponse réglementaire nécessitait l'intervention des gouvernements français et suisse (Barroin 1990)- chap 6). Les acteurs gouvernementaux du LSP interrogés mettent en avant qu'il existe des enjeux importants réglementaires autour du lac dont les répercussions ne se limiteraient pas à l'échelle du lac. Ainsi, certaines problématiques des grands lacs ont une **influence nationale** et peuvent motiver l'action. En contrepartie, des **lobbies nationaux** puissants peuvent participer aux prises de décisions des grands lacs, que ce soit de manière directe (influence de l'UPA sur l'agriculture littorale du LSP), ou indirecte (influence des industriels lessiviers dans la controverse sur les lessives du Léman).

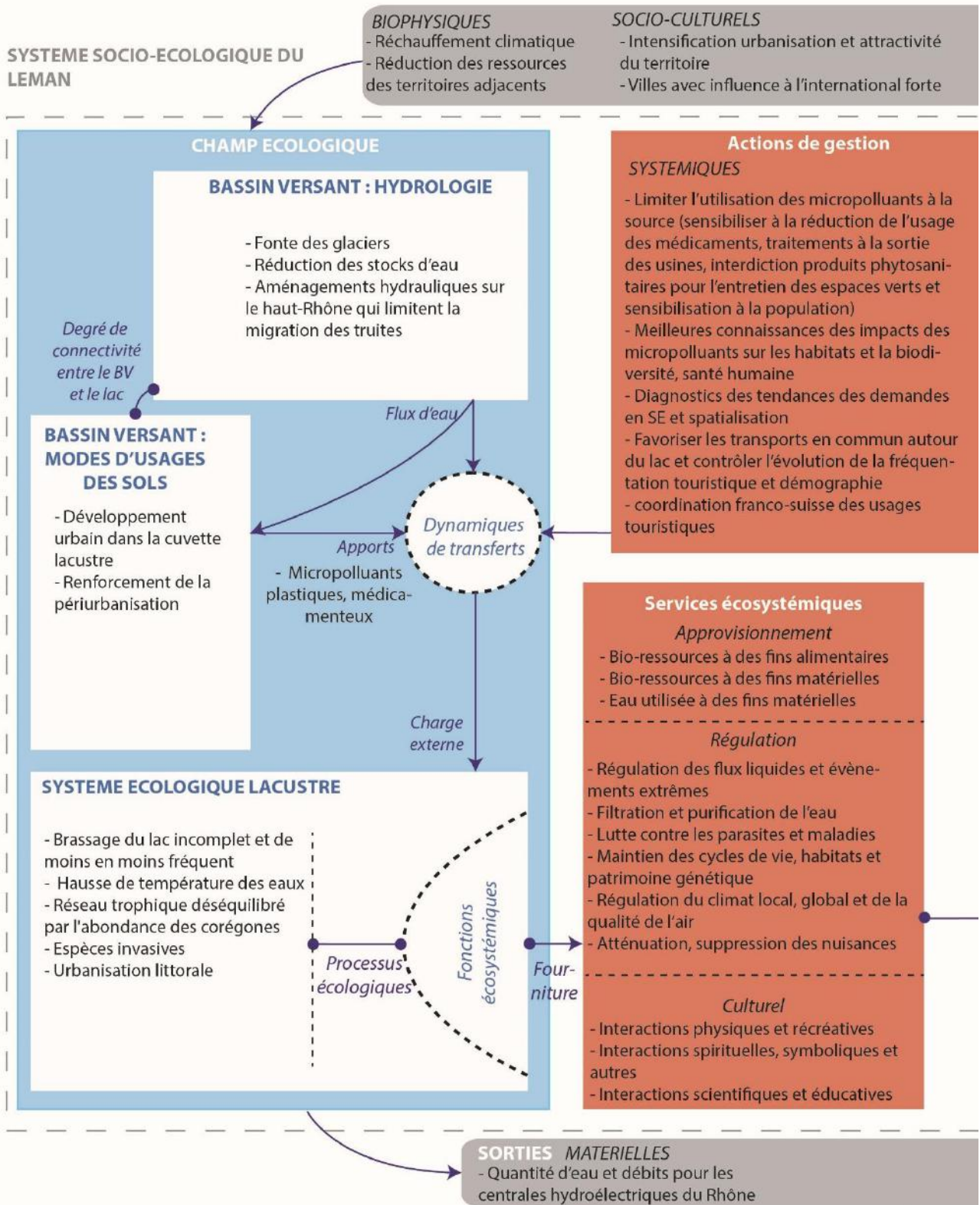
Aussi, il existe une différence de **représentation** des deux lacs auprès de la population du territoire lacustre, avec notamment un détachement de plus en plus fort concernant le LSP (Godmaire and Sauvé 2005). Une étude approfondie de la perception, de l'attachement au lac mériterait d'être menée pour qualifier l'importance de ce lac dans la culture locale. Néanmoins, nous émettons l'hypothèse que la zone de vue sur le lac permet une diffusion de l'attachement au lac et que la présence de reliefs contribue à l'attachement des populations au lac. Le LSP étant un lac de plaine, sa zone d'influence visuelle est très réduite par rapport à celle du Léman, et l'accessibilité physique au lac y est faible.

Enfin, l'un des points communs les plus importants entre ces deux grands lacs se situe au niveau des **perturbations** qu'ils subissent. Notamment les deux systèmes sont impactés par les effets du réchauffement climatique et de contaminations aux micropolluants plastiques et médicamenteux. Cela concorde avec l'article de Jenny et al. (2020) qui mentionne ces trois perturbations comme des pressions subies par tous les grands lacs de la planète. Au-delà de la diversité de ces pressions globales, les effets cumulés et effets cocktails de ces différentes perturbations sont souvent méconnus et viennent complexifier la gestion des lacs et limiter son pouvoir d'action. La nécessité d'anticipation des problématiques et leurs conséquences sur les SSE est alors essentielle.

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

Application du modèle SOALP au menaces du socio-écosystème du Léman (hypothèses)



Légende

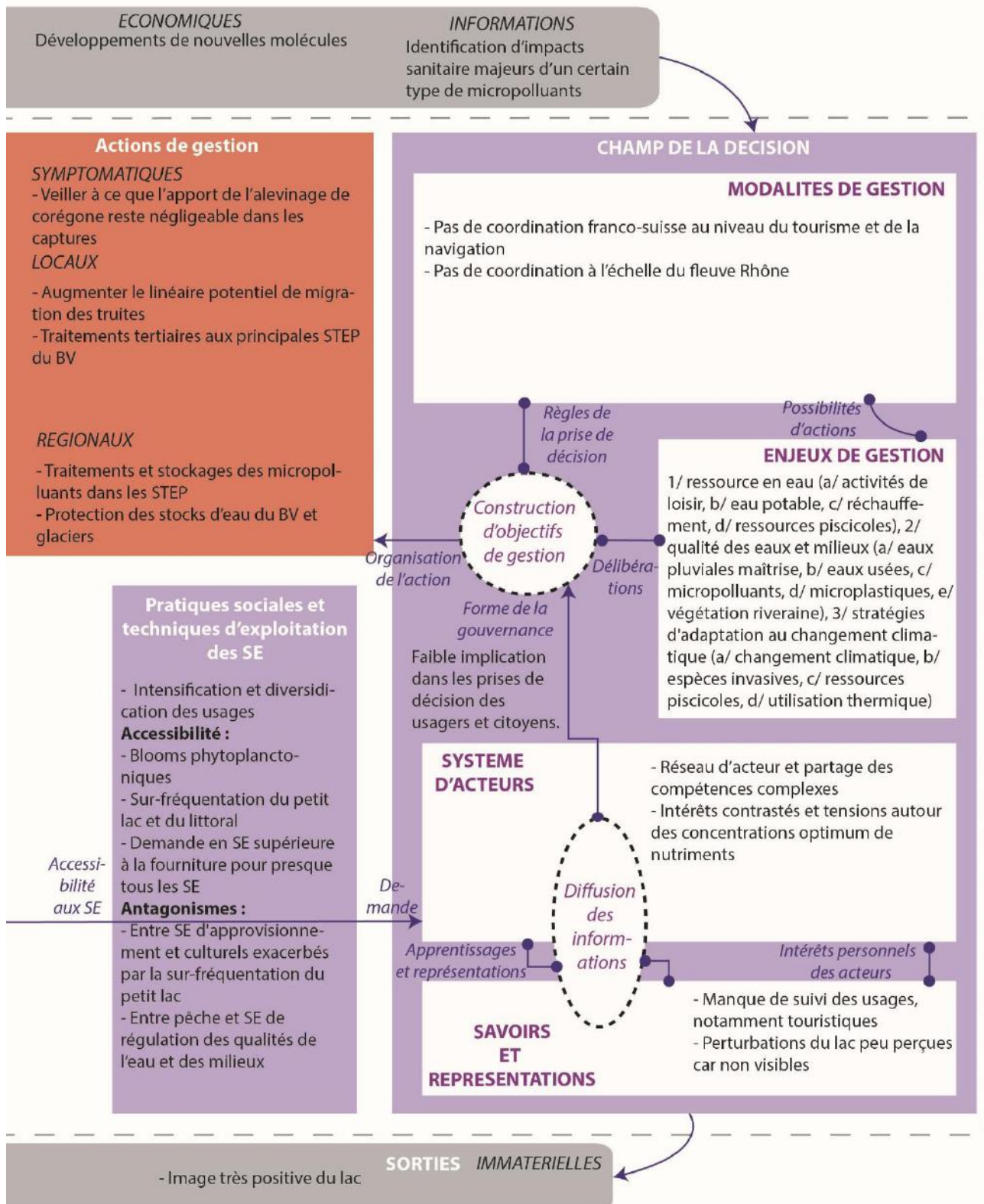
- Composante Composants
- Fonctions clés Fonctions clés
- \rightarrow Interactions entre compartiments
- Déterminants de la fourniture en SE
- Déterminants de la demande en SE
- Forçages exogènes
- Produits du SSE

Figure 7-5 : Application du modèle SOALP pour identifier les menaces du SSE du Léman

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

Application du modèle SOALP au menaces du socio-écosystème du Léman (hypothèses)



Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2018

7.4.2 Quelques pistes pour un « *observatoire socio-écosystémique* »

Pour faire face aux menaces qui pèsent sur les SSE des grands lacs, la gestion doit se doter d'un **système d'indicateurs** de l'état du SSE qui puisse éclairer les prises de décisions. Un indicateur est un outil de suivi et d'aide à la décision permettant de mesurer un état ou une tendance par rapport à une norme, de façon la plus objective possible, à un instant donné, en un lieu donné (Observatoire National de la Biodiversité 2011). Un indicateur cherche à condenser des informations de natures variées pour permettre à des acteurs différents (ex : scientifiques, gestionnaires, politiques et citoyens) de dialoguer. L'utilité d'un indicateur dépend de sa capacité à traduire la réalité, de l'existence de causalités directes ou indirectes mais aussi de sa simplicité d'acquisition et de compréhension. Pour prévenir l'interprétation simpliste d'un indicateur pris isolément, il faut privilégier l'interprétation d'un « *système d'indicateurs* » pour chaque question posée. Un système d'indicateurs a pour vocation par exemple d'éclairer les questions posées sur les écosystèmes lacustres et leurs liens avec la société. Ces questions découlent des objectifs que se fixent les parties prenantes de la gestion autour de menaces identifiées. Certaines questions relatives aux relations entre les grands lacs et la société nécessitent l'utilisation d'indicateurs qualitatifs (données d'enquêtes par exemple) pour y répondre. C'est pourquoi nous ne parlerons pas de « *système d'indicateurs* » dans cette partie et privilégierons le terme « **d'observatoire** » qui inclut des types d'informations et des méthodes plus larges (Fabre-Le Hec 2001).

D'après Van Oudenhoven et al. (2018), un observatoire doit répondre à quatre caractéristiques pour être opérationnel : il doit être (1) **crédible**, c'est-à-dire valable scientifiquement et en adéquation avec les questions scientifiques posées, (2) **légitime**, c'est-à-dire qu'il donne des informations légitimes, impartiales et équitables pour les décideurs, (3) **saillant**, ceci fait référence à la capacité de l'observatoire à transmettre des informations jugées utiles et pertinentes pour les acteurs et décideurs et (4) **faisable**, car il réfère à la facilité d'obtention des données, vis-à-vis du temps et du cadrage réglementaire, technique et financier de la gouvernance. Ces auteurs proposent une « check-list » pour juger de la qualité d'un observatoire mobilisant le concept de SE (Encadré 7-3).

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

Encadré 7-3 : Les neuf critères auxquels doit répondre un observatoire des SSE (Van Oudenhoven et al. 2018)

- 1/ La validité scientifique de l'observation et l'opérationnalisation ont été prouvées.
- 2/ Les informations renseignées par les indicateurs sont compatibles avec les actions de gestion mises en place.
- 3/ Les indicateurs ont été sélectionnés et normés dans un cadre de concertation transparent entre scientifiques, gestionnaires et experts techniques.
- 4/ Les besoins et enjeux des parties prenantes de la décision sont incorporés dans les types d'informations fournies par l'observatoire.
- 5/ L'observatoire permet de suivre les effets (succès ou non) des actions de gestion.
- 6/ Les indicateurs sélectionnés et les informations qu'ils fournissent sont simples à comprendre pour faciliter les communications entre parties prenantes et la prise de conscience des problématiques du SSE.
- 7/ Les données requises sont disponibles ou faciles à obtenir et issues de sources reconnues.
- 8/ L'acquisition des informations est faisable par les institutions impliquées dans la gestion. Un suivi fréquent des indicateurs est intégré.
- 9/ Un plan de mise en œuvre, incluant les ressources disponibles pour la récolte des données, est proposé.

❖ Le suivi scientifique du Léman par le prisme du modèle SOALP

Le suivi scientifique actuel du Léman actuel est impressionnant par le nombre de phénomènes suivis au travers de plus de 80 indicateurs (fig 7.6) : 13 indicateurs physico-chimiques (ex : Température, oxygène dissout, nutriments) et une dizaine d'indicateurs biologiques (ex : diversité du phytoplancton, biomasse algale, abondance des macrophytes) qui permettent de suivre l'état de l'écosystème et 16 indicateurs qui permettent d'évaluer les quantités et types de flux qui composent la charge externe (ex : flux de nutriments, micropolluants). Cet observatoire prend également en compte des forçages biophysiques liés au climat, les sorties matérielles du lac à l'exutoire (ex : débits à l'exutoire, flux de nutriments) et un nombre important d'indicateurs de suivis des actions de gestion (ex : pourcentage de cours d'eau évalués, nombre de STEP suivies pour les micropolluants, rendement d'épuration). Les indicateurs associés au système écologique lacustre, aux dynamiques de transfert et aux forçages font l'objet d'un suivi régulier dont les résultats sont synthétisés au sein d'un rapport scientifique (CIPEL 2018). Certaines composantes mixtes (biophysiques et sociétales) du BV, relatives aux MUS, à l'hydrologie du BV et au suivi des actions sont synthétisées dans le tableau de bord et le plan d'action de la CIPEL.

Cet observatoire est alors bien adapté à un suivi de la **fourniture en SE de régulation** car il permet de renseigner l'état de l'ensemble des fonctions écosystémiques du lac, ainsi que la composition de la charge externe. Il a été instauré et construit autour du problème de l'eutrophisation et des évolutions techniques dans les méthodes de suivi (ex : suivi de la production primaire à partir dans les années 1970, des picocyanobactéries dans les années 1990), puis s'est adapté à l'entrée des micropolluants dans le lac, avec un nombre de

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

contaminants suivis de plus en plus important depuis le début des années 2000 (plus d'une centaine de micropolluants suivis).

En conséquence, un très grand nombre de ces indicateurs permettent de renseigner l'état des compartiments du champ écologique et des actions de gestion en cours. Certains indicateurs prennent également en compte la fourniture des SE d'approvisionnement et culturels (ex : suivi des fraies du corégone et de la perche, qualité sanitaire de l'eau potable, qualité bactériologique des plages). Cependant, la prise en compte et le suivi de la **demande en SE** se limite à trois indicateurs : la quantité d'eau potable prélevée, les captures annuelles de pêche et le nombre de places de bateaux aux embouchures, indicateur utilisé principalement pour le suivi de l'état de conservation des rives et milieux naturels littoraux. Cependant, **les autres composantes sociétales du SSE sont totalement absentes de cet observatoire** : *qu'en est-il de la demande en activités touristiques et de loisir, enjeu majeur pour l'avenir du lac ? Qu'en est-il des valeurs socio-culturelles, des représentations de la société et des demandes en SE culturels ? Quels sont les éléments paysagers qui participent à l'attractivité et l'image du lac ? Quelles sont les principales fonctions sociétales du lac ? Quelles sont les pratiques en développement ?* Ces questions nous amènent à nous demander **comment, dans ce contexte, anticiper les évolutions sociétales** comme l'introduction de nouvelles pratiques, l'évolution des modes de vie ou même l'apparition de nouvelles molécules ?

De fait, le monitoring en place est adapté pour répondre ou donner des alertes et analyser les symptômes des pollutions, mais est bien trop faible pour anticiper les évolutions qui menacent le SSE. Celles-ci ne se limitent pas à une évolution du MOS du BV, mais englobent des composantes bien plus diversifiées qu'il convient de caractériser. En l'état, le monitoring n'est pas en capacité d'agréger des indicateurs biophysiques et socio-économiques et de prendre en compte les forçages socio-culturels pour répondre aux nouveaux enjeux sociétaux, notamment ceux imposés par l'évolution du tourisme et de l'urbanisation.

En définitive, cela nous permet de dire que l'observatoire du Léman peut être qualifié d'« *observatoire éco-toxicologique des SE de régulation* » dont l'échelle d'investigation est focalisée sur la relation BV – lac, suivant une **vision linéaire** des causes des perturbations dans le BV et leurs effets sur le lac. Le diagnostic final repose sur une évaluation par des experts, sans formalisation ni transparence des modalités de synthèse. Une procédure d'agrégation d'indicateurs serait à envisager autour des fonctions clés du système : l'observatoire devrait par ailleurs évoluer pour prendre en compte les « *feedbacks* » sociétaux générés par l'évolution des demandes en SE, s'intéresser à la fonction clé de diffusion des informations, aux forçages socio-économiques et culturels et devenir plus systémique. L'observatoire pourrait ainsi évoluer et devenir un **observatoire « socio-écossystémique »** des grands lacs.

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

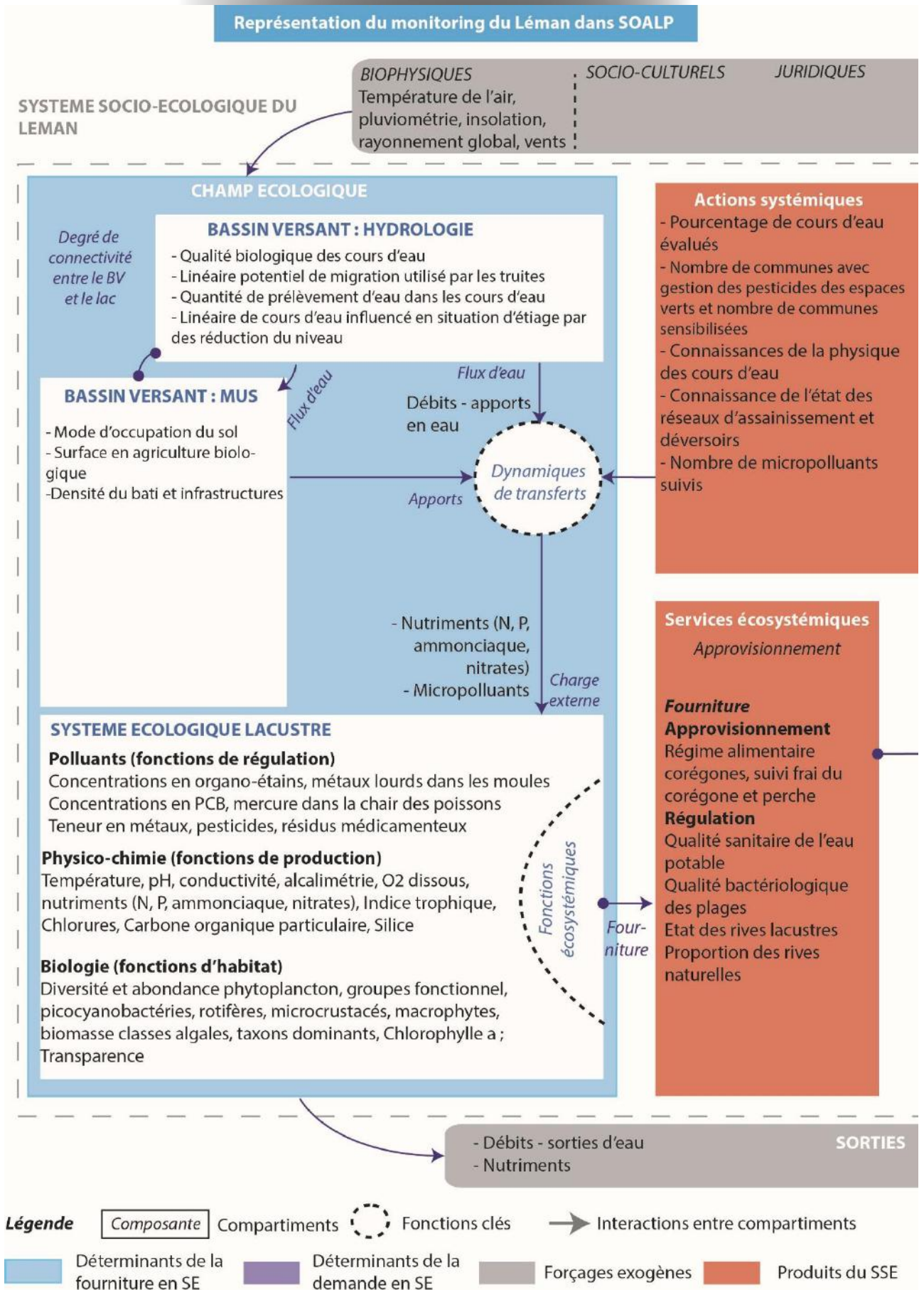
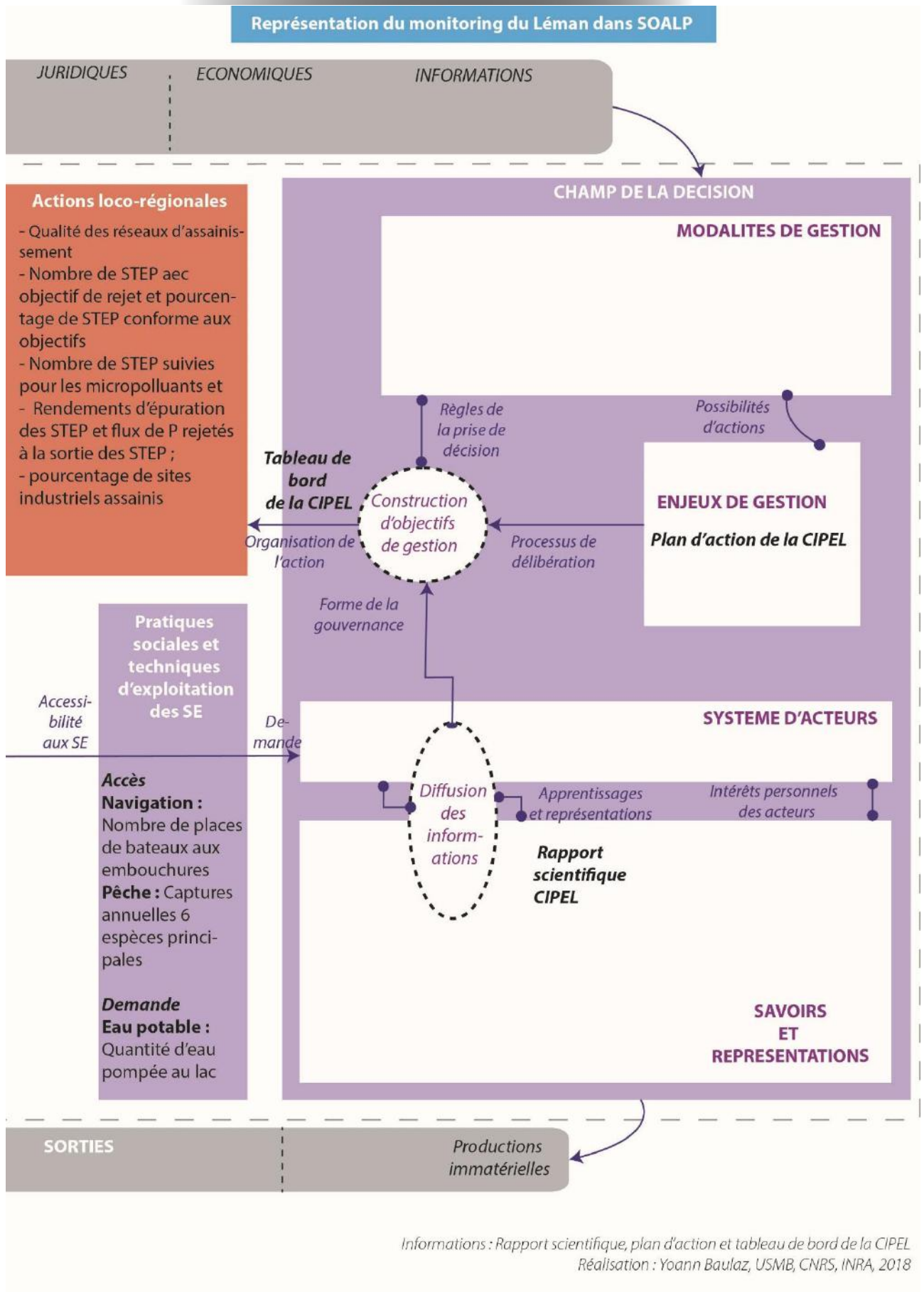


Figure 7-6 : L'observatoire actuel du Léman, représenté au sein de SOALP

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation



CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

❖ Propositions pour agréger des variables et élaborer des indicateurs

La plus-value de l'intégration d'indicateurs socio-écosystémiques dans le SSE vient de la capacité de ces indicateurs à croiser des données écosystémiques et sociétales pour mesurer une variable du SSE spécifique liée à une menace. Ils font donc appel à de multiples sources (ex : MOS, enquêtes spécifiques, suivi scientifique du lac) relevant de différentes disciplines. La création d'indicateurs de ce type est une démarche longue, qui **doit être réalisée en concertation avec scientifiques, gestionnaires et techniciens en charge de réaliser les mesures et les usagers.**

Cette étape n'a pas pu être réalisée dans le cadre de cette étude ; il s'agit d'un travail qui devrait être engagé par la CIPEL en partenariat avec les nombreux laboratoires de recherche suisses et français s'intéressant au Léman, ainsi qu'acteurs publics et techniciens en charge des suivis et des bénéficiaires des SE. Ce nouvel observatoire permettrait de faire évoluer le monitoring du Léman vers une gestion plus anticipative et adaptative qui réponde mieux aux problématiques actuelles et futures. La gestion sur le lac d'Annecy est en train d'évoluer dans ce sens avec la création en 2019 d'un « *observatoire socio-économique du lac d'Annecy* » (SILA 2019). Nous proposons quelques pistes ici pour développer un tel observatoire sur le Léman à partir des apprentissages fournis par les analyses du modèle SOALP.

Notre cadre conceptuel a permis d'identifier les principaux facteurs et composantes des compartiments du SSE, interactions entre facteurs clés, qui pilotent les changements d'état (chap 6.3). Ces informations peuvent être mobilisées pour l'élaboration d'indicateurs du SSE. Le modèle SOALP représente une simplification des processus complexes socio-écosystémiques et propose un certain nombre de variables dans chacun des compartiments qui compose le SSE. A partir de ces informations, il est possible de réaliser une agrégation de différentes variables pour produire une variable plus synthétique, représentative de certaines relations entre deux compartiments du SSE et qui pourrait être mesurée par le biais d'un indicateur.

Les indicateurs produits seraient alors intégratifs, capables d'intégrer des informations à la fois biophysiques et sociétales portant sur différentes composantes et interactions du SSE. La Figure 7-7 propose un exemple de démarche d'élaboration d'un indicateur de SE à partir du modèle SOALP. Cette méthode se base sur deux étapes, la première visant à identifier et à **sélectionner des variables** mesurables au sein du SSE, la seconde à **proposer des indicateurs** visant à mesurer l'état de ces variables.

La démarche consiste à remonter les chaînes associant les différents compartiments de SOALP. Dans notre exemple, le modèle nous permet d'identifier les composantes et fonctions clés liées au « SE loisir » : il s'agit de la fourniture, l'accès et la demande en SE. Ces composantes et fonctions clés sont elle-mêmes liées à différentes variables dans le SSE : les fonctions écosystémiques pour la fourniture, les techniques et choix individuels pour l'accès aux SE et les types de bénéficiaires et valeurs pour la demande.

La seconde étape de création des indicateurs est plus difficile à réaliser et mériterait d'être réfléchi en ateliers participatifs avec des gestionnaires, scientifiques, techniciens et usagers ; les propositions faites dans la figure ne se basent qu'à partir de notre expérience acquise sur les grands lacs alpins et le LSP. Trois indicateurs à monitorer sont ainsi proposés pour

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

renseigner de l'état du SE loisirs (figure 7-7). L'étape finale consiste à agréger ces indicateurs pour proposer un indice simple pouvant synthétiser les processus complexes liés à la fourniture, l'accès et la demande du SE loisir. L'indice produit nécessiterait d'être normalisé en atelier afin d'identifier des valeurs de références et des seuils qui correspondent aux besoins de chaque partie prenante de la gestion. C'est une suite possible de la présente étude.

Par cet exemple, nous avons souhaité montrer une application importante du modèle SOALP en tant qu'outil d'aide à la décision. La réflexion sur l'application de SOALP pour la création de nouveaux indicateurs reste à approfondir, mais il apparaît que la capacité du modèle à organiser les informations pourrait largement contribuer à la sélection de variables mesurables dans le SSE, étape nécessaire à l'élaboration d'indicateurs. SOALP pourrait alors servir à l'identification des informations et à la définition d'indicateurs nécessaires au nouvel observatoire socio-écosystémique des grands lacs.

CHAPITRE 7

Discussion générale et opérationnalisation

Exemple d'arbre d'élaboration d'un indicateur du SSE

Objectif :

Obtenir un indicateur du SE d'interactions physiques et récréatives avec les grands lacs

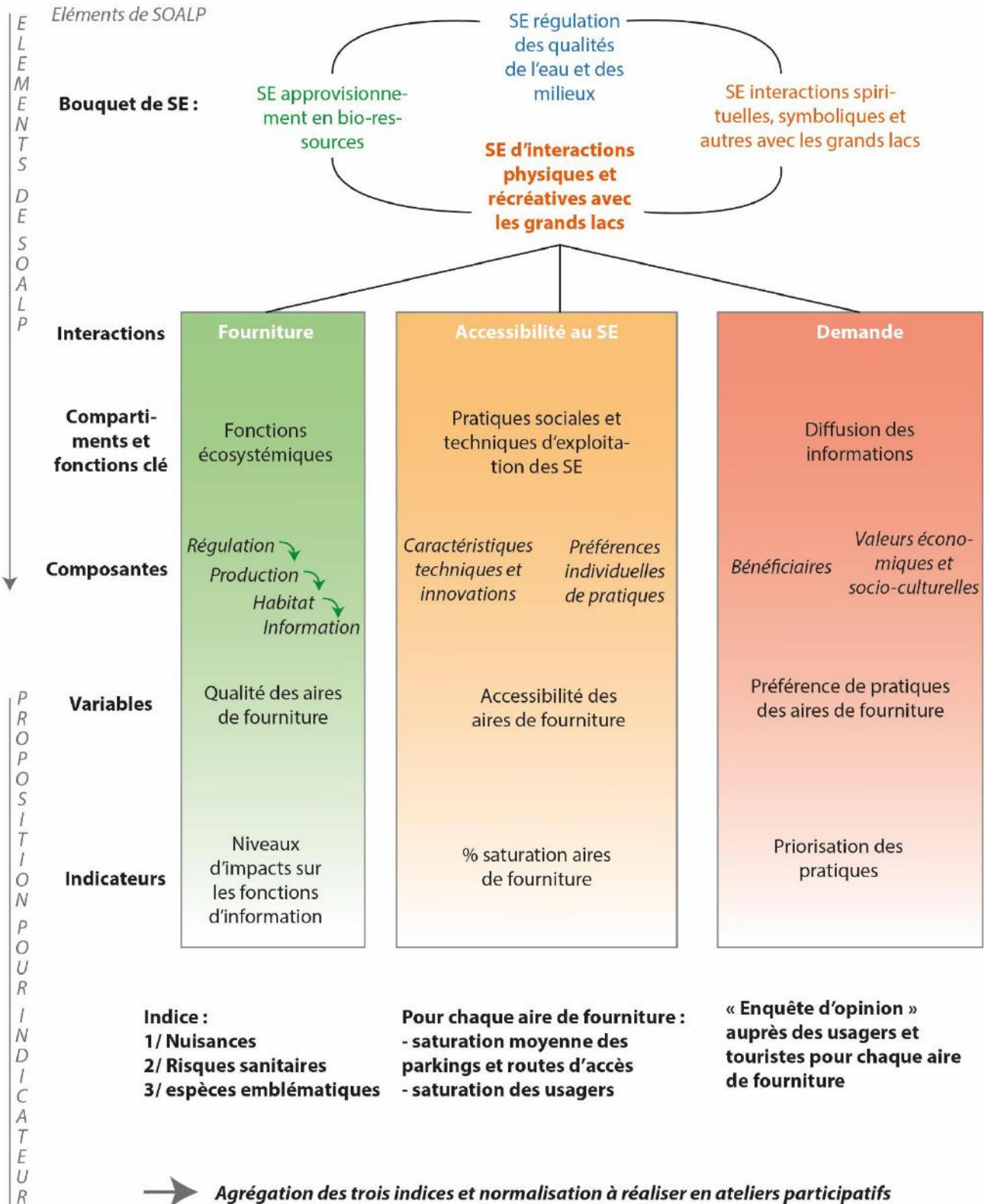


Figure 7-7 : Exemple de processus d'élaboration d'indicateurs permettant de mesurer l'état du SE loisir. Ce processus se déroule en deux étapes : (1) le modèle SOALP, en détaillant les processus et fonctions associés à chaque compartiment du SSE, permet d'identifier des variables liées au compartiment à monitorer, (2) la proposition d'indicateurs est une démarche concertée de réflexion entre les différentes parties prenantes de la gestion des lacs visant à sélectionner des indicateurs de suivi des variables identifiées dans la première étape. A l'issue de cela, différents indices peuvent être produits, voire agrégés.

Conclusion

Comprendre comment les grands lacs "*rendent des services*" aux sociétés est une tâche qui va bien au-delà d'un inventaire des usages. Étudier les services écosystémiques (SE) des grands lacs demande la prise en compte et l'analyse d'une multitude de facteurs déterminants pour le fonctionnement du système grand lac – bassin versant (BV) – société : propriétés physiques, hydrologiques, biologiques des plans d'eau, de l'ensemble des usages et pratiques, et également des représentations et valeurs socio-culturelles associées à ces objets. Ces composantes sont évolutives dans le temps et l'espace mais chacune avec leur variabilité spécifique. La trajectoire et la spatialisation globale du système qui en résultent reposent alors sur les interdépendances entre les différents territoires de l'eau à l'amont (BV et modes d'usages des sols) et à l'aval (fleuve, exutoire ...) des grands lacs. La prise en compte des liens et rétroactions entre ces ensembles permet d'envisager de nouvelles façons de comprendre, monitorer et gérer le système grand lac - BV - société. Notre recherche s'inscrit dans cet objectif.

Le fil conducteur de cette thèse s'est tissé autour de l'analyse de l'évolution des systèmes socio-écologiques (SSE) des grands lacs et leurs SE à l'épreuve des pollutions. Les deux concepts sont mobilisés dans une méthodologie transdisciplinaire consistant d'une part à **co-évaluer les déterminants bio-physiques et sociétaux des SE** des grands lacs et **leur évolution en réponse aux problématiques de pollutions**, et d'autre part à **construire un modèle conceptuel du système grand lac – BV – société applicable rétrospectivement**, répondant ainsi à un manque bien identifié par la littérature. Les investigations menées, principalement à partir des cas concrets des grands lacs alpins et secondairement du SSE du lac Saint-Pierre au Québec, renseignent sur le fonctionnement des interactions société – grands lacs.

Les objectifs concrets et théoriques assignés à notre recherche sont de (1) **rendre applicable les concepts** de SE et de SSE à des approches rétrospectives et aux spécificités des grands lacs, (2) identifier les **trajectoires d'impacts et de réponses écologiques et sociétales** aux pollutions, puis les modéliser au sein de frises chrono-systémiques de synthèse, (3) questionner la **spatialisation des territoires lacustres** et les influences réciproques entre les grands lacs et les espaces à l'amont ; développer une approche géographique pour borner cet ensemble, (4) proposer des pistes **d'intégration des composantes sociétales et des usages** à la gestion des écosystèmes lacustres, (5) identifier les forçages des SSE des grands lacs pour une application à la **gestion durable et adaptative** et pour mieux anticiper les évolutions.

La thèse met en évidence que les SE rendus par les grands lacs alpins **se construisent et évoluent en réponse aux changements d'usages des lacs, aux problèmes de qualité de l'eau et des milieux et aux actions de gestion des pollutions**. Différents types d'actions de gestion sont identifiées, n'agissant pas aux mêmes échelles : certaines visant à traiter localement les nuisances des pollutions et d'autres à supprimer certaines sources dans les BV. Avec l'évolution des SE et l'apparition de nouvelles parties prenantes de la gestion, une gouvernance globale de l'écosystème lacustre s'est peu à peu organisée et complexifiée autour des impacts des pollutions sur certains SE, notamment de l'eutrophisation.

L'exploration fonctionnelle du SSE et sa modélisation à partir d'un nouveau cadre conceptuel nous amènent à proposer un outil opérationnel à la gestion adaptative et intégrée du système.

La gestion des grands lacs, basée actuellement sur le couple "*lac - BV*", doit évoluer pour prendre en compte l'ensemble des composantes des territoires lacustres, la participation des citoyens et les influences extérieures (mondialisation, réchauffement, échelons administratifs, évolution des modes de vie) à ce système de plus en plus ouvert. En conséquence, "***l'observatoire écotoxicologique***" actuel des grands lacs doit évoluer vers un "***observatoire socio-écosystémique***" : les concepts de SE et de SSE permettent d'en définir les composantes biophysiques et socio-économiques à étudier, les limites et les interactions entre ces ensembles à monitorer. La thèse propose un ensemble de pistes pour mener à bien ce changement de paradigme de la gestion et notamment une approche spatiale distinguant **les aires de fourniture et de demande des SE** des grands lacs. Cette approche peut notamment fournir des informations opérationnelles pour gérer les antagonismes entre SE et identifier les espaces à enjeux prioritaires, poussant à intégrer les différentes aires influencées par les plans d'eau dans la gouvernance des grands lacs.

Les concepts de SE et de SSE apparaissent donc comme des clés de lecture intéressantes à l'étude géographique des territoires lacustres. Ils représentent des outils pertinents **d'application de la transdisciplinarité** pour combiner les savoirs multiples (scientifiques, techniques et d'ingénierie, profanes, d'usages, de gestion) et des outils **de dialogue** avec des scientifiques de diverses disciplines et gestionnaires. La mobilisation de ces concepts à d'autres grands lacs et d'autres écosystèmes dont la gestion des problématiques environnementales implique de reformuler les liens société/Nature et le développement de nouvelles approches en sciences humaines et sociales sont à encourager.

Dans un monde incertain où les problèmes environnementaux se succèdent et s'accumulent, il devient évident que des actions "*proactives*" sont à mettre en place à toutes les échelles et qu'une **anticipation** minimum des problèmes est indispensable. Cela soulève le besoin de nouveaux systèmes d'indicateurs de suivi des grands lacs permettant de mesurer les interactions entre phénomènes biophysiques et sociétaux.

L'histoire des grands lacs alpins montre que la protection des habitats lacustres et les efforts de conservation ciblés dans le BV des lacs, ont permis un retour des fonctions écosystémiques à un état satisfaisant pour la plupart des usages de ces écosystèmes. Ce ne sont pas seulement les actions ponctuelles de lutte, ou de compensation, contre les nuisances des pollutions engagées dans les années 1960 qui ont permis ce retour à un état écosystémique acceptable. Il s'agit surtout **des actions systémiques et coordonnées entre l'ensemble des acteurs du territoire visant à maintenir les pressions et les flux de polluants affectant les lacs** pour ne pas compromettre la capacité naturelle de résistance du système grand lac (BV inclus). Davantage d'efforts de ce genre seront encore nécessaires pour consolider les progrès réalisés, pour empêcher toute régression et pour étendre les progrès aux épineux problèmes qui perdurent et émergent, comme les micropolluants et le réchauffement climatique.

Si la société jouit aujourd'hui d'un environnement plus sain, c'est grâce à la science, à sa démarche d'expertise ouverte et sa force de conviction, à l'adhésion de quelques politiques aux diagnostics scientifiques, à l'activisme des usagers et associatifs, à des pratiques judicieusement raisonnées et réglementées et à l'ingéniosité technique et sociales de tous ceux qui ont œuvré à la protection des milieux naturels. Une telle dynamique de gouvernance à base scientifique doit être maintenue et entretenue par davantage d'investissements dans la **connaissance globale des SSE** des grands lacs. Des modes de partage des connaissances

sont également à trouver entre les différents territoires de l'eau et territoires lacustres à l'échelle des alpes, voire mondiale, mais également entre le SSE et l'échelon national, voire international afin d'anticiper les effets délétères de nouveaux produits introduits dans l'environnement, des nouvelles menaces et sur l'évolution des modes de vie. Cette approche pourrait également conduire à un développement plus durable et « *solidaire* » des sociétés qui bénéficient des grands lacs à travers le monde.

Table des illustrations

Figure 1 : Représentation schématique de la démarche et objectifs.	18
Figure 2 : Schéma général des questionnements associés à chacun des chapitres de la thèse	21
Figure 3 : Pense-bête : plan de thèse et mots clés	22
Chapitre 1	
Figure 1-1 : François Alphonse Forel, inventeur de la limnologie.....	24
Figure 1-2 : Etagement des lacs profonds et propriétés physico-chimiques.....	34
Figure 1-3 : Fiches descriptives des fonctions écosystémiques des grands lacs alpins	41
Figure 1-4 : Changements des paramètres physico-chimiques et de l'abondance relative de la biomasse végétale en fonction du degré d'eutrophisation en milieu aquatique.....	58
Figure 1-5 : Impacts de l'eutrophisation sur les lacs et réservoirs (Smith et al. 1999).....	59
Figure 1-6 : Trajectoires de prise en compte des perturbations des grands lacs alpins, depuis leur émergence, l'alerte et mise en place d'actions, puis la restauration.....	64
Figure 1-7 : Représentation des trajectoires « perception/action » face à différents problèmes environnementaux. (Lestel et al. 2017)	67
Encadré 1-1 Une autre approche de la limnologie	25
Encadré 1-2 : les grands lacs alpins sont-ils des grands lacs ?	28
Encadré 1-3 : L'écologie et la limnologie : des origines communes	32
Encadré 1-4 : La gamme des teintes de l'eau des lacs	33
Encadré 1-5 : Les compartiments du réseau trophique des lacs	39
Encadré 1-6 : Les modes d'occupation et d'usages des sols	46
Encadré 1-7 : Les représentations de l'eau et des lacs	55
Encadré 1-8 : Une alerte mondiale : la pollution du village de Minamata (Japon)	61
Encadré 1-9 : Evolution des mesures réglementaires qui interviennent dans la gestion des lacs (www.vie-publique.fr).....	70
Encadré 1-10 : La gestion intégrée des ressources en eau et des milieux.....	73

Tableau 1-1 : Effets de la taille du plan d'eau sur l'écosystème et la société (adapté d'après Jenny et al. 2020) 29

Tableau 1-2 : Les grands types de perturbations des écosystèmes lacustres (d'après Dubois et al, 2018)..... 52

Tableau 1-3 : Caractéristiques lacustres permettant de définir le niveau trophique des milieux lacustres, fluviaux et océaniques (Smith et al. 1999) 57

Chapitre 2

Figure 2-1 Carte de situation des grands lacs alpins 77

Figure 2-2 : Carte des modes d'occupation des sols des trois grands lacs alpins 85

Figure 2-3 : Ressources et types d'usages des grands lacs alpins..... 90

Figure 2-4 : Exemple de la chaîne de traitement de l'eau potable issue du lac d'Annecy depuis 2009..... 93

Figure 2-5 : Liste des espèces de poissons des grands lacs alpins (Cachera et al. 2015)..... 96

Figure 2-6 : Mosaïque d'exemples de paysages des grands lacs alpins..... 101

Figure 2-7 : Typologie des pratiques socio-culturelles associées aux grands lacs alpins 103

Figure 2-8 : Réseau d'acteurs de la gestion des ressources des grands lacs alpins 105

Encadré 2-1 : Un acteur décisionnel essentiel : la DDT..... 106

Encadré 2-2 : Quelques exemples de représentants des acteurs "non-humains" sur le Léman 108

Tableau 2-1 : Répartition de la démographie dans le BV du Léman..... 85

Chapitre 3

Figure 3-1 : Evolution du nombre de publications sur les SE depuis 1999 (Hackbart et al. 2017) 118

Figure 3-2 : Les différentes « valeurs » mobilisées par les concepts de SE et de SSE 121

Figure 3-3 : Frise chronologique d'émergence et diffusion du concept de SE 129

Figure 3-4 : Classification des SE par relation spatiale entre la fourniture et la demande en SE (d'après Costanza 2008 et Fisher et al. 2008)..... 139

Figure 3-5 : Classification des SE selon le type de biens (d'après Fisher et al. 2008) 140

Figure 3-6 : Exemple de représentation des bouquets de SE et de leur réponse à différents modes d'usage des sols (Foley et al. 2005) 141

Figure 3-7 : Le modèle en cascade des SE représente les relations entre biodiversité - fonctions écosystémiques et bien-être humain (Haines-Young & Potschin 2010)	153
Figure 3-8 : Adaptation du modèle en cascade des SE par Van Oudenhoven et al. (2012) ..	153
Figure 3-9 : Représentation et traduction du modèle conceptuel du Management and Transition Framework (d'après Pahl-Wostl et al. 2010)	161
Encadré 3-1 : Différence entre préservation et conservation	137
Encadré 3-2 : Le Millenium Ecosystem Assessment (MEA)	127
Encadré 3-3 : Les SE dans le droit à l'international	128
Encadré 3-4 : « C'est complexe, c'est compliqué ... » quelles différences ?	144
Encadré 3-5 : L'importance de l'eau pour le bien-être humain	151
Tableau 3-1 : Définition des types de SE (MEA 2005).....	131
Tableau 3-2 : Définition des composantes du bien-être selon le MEA (2005) et bénéfices associés que l'on peut retrouver dans les grands lacs alpins	156
Tableau 3-3 : Avantages, inconvénients et spécificités de chacun des 10 cadres conceptuels de SSE parmi les plus utilisés, en vue de leur application à notre objet d'étude	158

Chapitre 4

Figure 4-1 : Démarche globale de la recherche doctorale	167
Figure 4-2 : Représentation des trajectoires méthodologique et des étapes de l'étude	177
Figure 4-3 : Types d'informations, données et méthodes mobilisées pour l'étude	179
Figure 4-4 : Trajectoire méthodologique de l'étude spécifique pour la pêche dans les grands lacs alpins	186
Figure 4-5 : Photos du premier atelier rétrospectif et modèle de frise Pression - Etat - Réponse à remplir	194
Figure 4-6 : Structure de la base de données socio-écosystémiques mise en place dans le cadre de l'étude.....	199
Encadré 4-1 : Apports du travail de deux stagiaires à l'étude globale.....	183
Encadré 4-2 : Déroulement et résultats bruts de l'atelier d'évaluation de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins	189
Encadré 4-3 : Déroulement de l'atelier 2 sur l'évaluation de la fourniture en SE des grands lacs alpins	191

Encadré 4-4 : La limite et difficulté de mobiliser une expertise pour l'étude du concept de SE	191
Encadré 4-5 : Déroulement de l'atelier décision et coordination de la gestion	192
Tableau 4-1 : Nombre de personnes enquêtées selon le type d'expertise recherché	178
Tableau 4-2 : Avantages et inconvénients de la méthode d'enquête par récits de vie.....	185
Tableau 4-3 : Types d'analyses des verbatims associées à la démarche d'enquête par récits de vie (Sanséau 2005)	187
Tableau 4-4 : Nombre de participants et organisateurs de chacun des ateliers participatifs menés dans le cadre de l'étude	188
Tableau 4-5 : résultats de l'évaluation de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins	179
Tableau 4-6 : Etat des lieux de la base de données OLA pour les grands lacs alpins	196

Chapitre 5

Figure 5-1 : Evaluation à dires d'experts de l'importance de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs alpins	211
Figure 5-2 : Carte de spatialisation de la fourniture en SE d'approvisionnement en bio-ressources à des fins alimentaires pour la pêche de loisir.....	214
Figure 5-3 : Carte du réseau de collecte des eaux usées municipales et de spatialisation de la fourniture et de la demande en SE d'approvisionnement en eau potable du lac d'Annecy .	216
Figure 5-4 : Schéma de l'aire de fourniture en SE des grands lacs alpins et ses déterminants	217
Figure 5-5 : Carte de la fourniture et de l'accès au SE d'interactions physiques et récréatives avec l'environnement naturel du lac du Bourget	218
Figure 5-6 : Spatialisation de la fourniture et de la demande en SE des grands lacs	220
Figure 5-7 : Photographie des piquets de protection autour des roselières du lac du Bourget (source : flickr.fr)	211
Figure 5-8 : Adaptation du modèle en cascade des SE de Haines-Young & Potschin 2010 au cas des grands lacs alpins	225
Figure 5-9 : Adaptation du modèle en cascade à la fourniture en SE des grands lacs alpins	227
Figure 5-10 : Relations entre services, pratiques et bénéficiaires.....	229

Figure 5-11 : Représentation des impacts des pollutions sur les fonctions écosystémiques et SE	231
Figure 5-12 : Reproduction d'habitations palafittiques dans un parc archéologique	233
Figure 5-13 : Promenades sur le Grand Port d'Aix-les-Bains (début XXè) et aménagement de la plage d'Aix-les-Bains (années 1930). Source : Belle 2015.....	235
Figure 5-14 : Evolution des SE des grands lacs depuis les premiers peuplements autour des lacs	236
Figure 5-15 : Evolution démographique dans les BV des grands lacs alpins depuis le début du XXème siècle.....	238
Figure 5-16 : Frise chronosystémique d'évolution de la fourniture et de la demande en SE à l'épreuve des pollutions dans le Léman	239
Figure 5-17 : Signes avant-coureurs	241
Figure 5-18 : Premiers symptômes	242
Figure 5-19 : Résultats des mesures d'échantillons de colliformes fécaux dans les stations de prélèvement du Léman entre 1957 et 1981 (CIPEL 1984)	243
Figure 5-20 : Aggravation des impacts – impacts étendus	244
Figure 5-21 : Evolution du taux de P dans le Léman	246
Figure 5-22 : Symptômes d'une grave eutrophisation (Source : ASL 1983)	247
Figure 5-23 : Impacts généralisés et persistants.....	248
Figure 5-24 : Evolution de la capacité des STEP du BV du Léman en équivalent habitants et de la déphosphatation (Rapin 1992).....	249
Figure 5-25 : Lente réduction des impacts.....	251
Figure 5-26 : Etat actuel	253
Figure 5-27 : Trajectoire de prise en compte des micropollutions dans les grands lacs alpins	254
Figure 5-28 : Impacts de la pollution mercurielle sur les fonctions écosystémiques du Léman	255
Figure 5-29 : Carte de distribution des contaminations aux PCB dans les sédiments du Léman et tableau de comparaison des teneurs en PCB et DDE des sédiments de plusieurs grands lacs (CIPEL 1985).....	256
Figure 5-30 : Estimation de l'évolution des fonctions écosystémiques du Léman en réponse aux contaminations aux PCB et micropolluants médicamenteux	257

Figure 5-31 : Evolution de la concentrations en micropolluants dans le Léman et en PCB pour les grands lacs alpins	258
Figure 5-32 : Trajectoire d'impact écologique sur la fourniture en SE de régulation des qualités de l'eau et des milieux du Léman	260
Tableau 5-1 : Liste des services écosystémiques d'approvisionnement des grands lacs alpins. Source : Dénomination retenue de la CICES 2018	204
Tableau 5-2 : Liste des services écosystémiques de régulation des grands lacs alpins. Source : Dénomination retenue de la CICES 2018	205
Tableau 5-3 : Liste des services écosystémiques de régulation des grands lacs alpins. Source : dénomination retenue de la CICES 2018	206

Chapitre 6

Figure 6-1 : Représentation du SSE des grands lacs alpins : le modèle SOALP (Social ecological systems, Alpine Lakes and Pollution)	267
Figure 6-2 : Modèle type de trajectoire sociale comparée à la trajectoire écologique obtenue pour le Léman.....	273
Figure 6-3 : Trajectoire sociale représentation - action à l'état initial.....	274
Figure 6-4 : Représentation du SSE à l'état initial et premiers processus de dégradation....	274
Figure 6-5 : Trajectoire sociale représentation – action pendant la phase d'alerte et trajectoire écologique	275
Figure 6-6 : Représentation du SSE à l'étape de l'alerte de l'eutrophisation	275
Figure 6-7 : Trajectoire sociale représentation - action au cours de la phase d'aggravation des impacts et trajectoire écologique	276
Figure 6-8 : Complexification du SSE du Léman à l'aggravation des impacts de l'eutrophisation	277
Figure 6-9 : La trajectoire sociale représentation - action associée à la période des impacts généralisés et trajectoire écologique	278
Figure 6-10 : Représentation du SSE lors des impacts généralisés.....	279
Figure 6-11 : La trajectoire sociale représentation - action au cours de la lente réduction des impacts et trajectoire écologique	280
Figure 6-12 : Représentation du SSE du Léman à la réduction des impacts de l'eutrophisation et la mise en place de traitements systémiques.....	281
Figure 6-13 : Trajectoires de représentation - action des grands lacs alpins face aux problèmes de pollution	284

Figure 6-14 : Application de SOALP au SSE du lac Saint-Pierre.....	298
Figure 6-15 : Evolution des captures par unités d'effort de corégone dans le lac d'Annecy.	307
Figure 6-16 : Dynamiques des changements du champ écologique : facteurs et interactions contrôlant les dynamiques de transfert et les fonctions écosystémiques.	316
Figure 6-17 : Dynamiques des changements du champ de la décision : facteurs et interactions contrôlant la diffusion des informations et la construction d'objectifs de gestion.....	319
Encadré 6-1 : Les normes socio-culturelles.....	312
Encadré 6-2 : L'urbanisation.....	313
Encadré 6-3 : Le savoir c'est le pouvoir ... d'action !.....	317
Tableau 6-1 : Adaptation de la typologie des trajectoires sociales de Lestel et al. 2017	272
Tableau 6-2 : Proposition d'actions de gestion à partir des dires d'experts rencontrés	300

Chapitre 7

Figure 7-1 : Le lac Champlain, à la frontière des USA et du Canada et son BV.....	337
Figure 7-2 : Comparaison des trajectoires de représentation - action du Léman et du LSP	344
Figure 7-3 : Définition des qualités de l'eau et des milieux par le prisme des SE.	350
Figure 7-4 : Relation entre les niveaux de SE et l'évolution des impacts sur les qualités de l'eau et des milieux par l'eutrophisation, d'après l'expérience acquise dans les trois grands lacs alpins.	351
Figure 7-5 : Application du modèle SOALP pour identifier les menaces du SSE du Léman...	358
Figure 7-6 : L'observatoire actuel du Léman, représenté au sein de SOALP	363
Figure 7-7 : Exemple de processus d'élaboration d'indicateurs permettant de mesurer l'état du SE loisir	367
Encadré 7-1 : Estimation économique de la valeur des SE des grands lacs alpins et critique	330
Encadré 7-2 : Les questionnements de la prospective stratégique	353
Encadré 7-3 : Les neuf critères auxquels doit répondre un observatoire des SSE (Van Oudenhoven et al. 2018).....	361
Tableau 7-1 : Evaluation du modèle SOALP d'après les critères d'évaluation de Nahlik et al. 2012.....	334

ANNEXES

Chapitre 1

Annexe 1-1 : Les neuf principales origines des lacs dans le monde. (d'après Pourriot & Meybeck 1995 ; Thomas et al. 1996) 381

Annexe 1-2: Classification des lacs selon leur fréquence de retournement des masses d'eau. 384

Annexe 1-3 : Les écosystèmes aquatiques dans l'anthropocène 385

Chapitre 2

Annexe 2-1 : Présentation des catégories d'acteurs "producteurs d'espace lacustre" et leur rôle dans la gouvernance 387

Annexe 2-2 : Les acteurs consommateurs de l'espace lacustre..... 389

Annexe 2-3 : La "cartothèque" du lac Saint-Pierre 391

Chapitre 3

Annexe 3-1 : Les 10 définitions du concept de SE les plus utilisées et la philosophie à laquelle elles sont rattachée 396

Annexe 3-2 : Différentes représentations des cadres conceptuels associés aux SE dans la littérature. 397

Chapitre 4

Annexe 4-1 : Les différentes versions du modèle conceptuel du SSE des grands lacs et son évolution..... 403

Annexe 4-2 : Liste des experts de validation des analyses et d'aide à la construction des modèles conceptuels..... 408

Annexe 4-3 : Exemple de trajectoire de vie d'un pêcheur interrogé dans le cadre de l'étude 410

Annexe 4-4 : Exemple de trajectoire globale pour le Léman.....	411
Annexe 4-5 : Liste des experts techniques rencontrés dans le cadre de l'étude sur le SE d'approvisionnement en eau potable et l'évolution de l'assainissement	412
Annexe 4-6 : Liste des acteurs du tourisme rencontrés dans le cadre de la caractérisation des SE culturels	413
Annexe 4-7 : Liste des experts participant aux ateliers sur l'évaluation de la fourniture et demande en SE.....	415
Annexe 4-8 : Résultats de l'atelier 2 sur la fourniture en SE des grands lacs alpins.....	416
Annexe 4-9 : Liste des experts participant à l'atelier d'évaluation des SE culturels.....	417
Annexe 4-10 : Liste des experts techniques impliqués dans la gestion des grands lacs alpins	418
Annexe 4-11 : Résultats de l'atelier décision et coordination de la gestion des grands lacs alpins	419
Annexe 4-12 : Liste des experts impliqués dans les études rétrospectives des impacts de pollutions et réponses sociétales.....	423
Annexe 4-13 : Frises résultat des ateliers rétrospectifs.....	425
Annexe 4-14 : Liste des sources d'archives mobilisées pour l'étude.....	429
Annexe 4-15 : liste des experts scientifiques et techniques consultés dans le cadre de l'étude sur le lac Saint-Pierre.....	438

Chapitre 5

Annexe 5-1 : Ensemble des pathologies favorisées par le contact ou la présence des grands lacs alpins	439
Annexe 5-2 : Carte de l'accessibilité aux rives du lac d'Annecy (source : Nikolli, 2018).....	441

Annexe 5-3 : Chronique des impacts de l'eutrophisation et de la réoligotrophisation du lac d'Annecy sur les SE..... 442

Annexe 5-4 : Chronique des impacts de l'eutrophisation et de la réoligotrophisation du lac du Bourget sur les SE..... 451

Chapitre 6

Annexe 6-1 : Verbatims issus des entretiens de pêcheurs cités dans le texte. 459

Annexe 6-2 : Principales évolutions du Règlement d'application relatif à la pêche dans le Léman entre 1980 et 2016..... 465

Chapitre 7

Annexe 7-1 : Critères d'évaluation des cadres conceptuels des SE (Nahlik et al. 2012) 466

Annexes chapitre 1

Annexe 1-1 : Les neuf principales origines des lacs dans le monde. En plus des catégories présentée dans ce tableau peuvent être ajouté deux types de lacs très rares formés par des agents extraterrestres (météores, comètes...) et l'accumulation d'organismes végétaux ou coralliens (lagons coralliens dans les océans Pacifique et Indien) (d'après Pourriot & Meybeck 1995 ; Thomas et al. 1996)

Type	Description	Caractéristiques	Exemples
<i>Lacs glaciaires</i>	Lacs issus de la fonte progressive des grands glaciers quaternaires et des effets 1/ de l'abrasion des roches par la glace et les eaux s'écoulant à la base du glacier, 2/ de la topographie originale résultant de l'accumulation des dépôts charriés par le glacier ou 3/ de la présence d'un glacier qui forme un barrage naturel	Type de formation de lacs la plus courante, ils sont présents dans les régions de montagnes et subarctiques. Lacs issus de la dernière glaciation du Würm (- 110 000 et 14 000 ans) et de la période post-glaciaire. La forme et le volume des lacs glaciaires vont varier en fonction des types de substrats érodés par les glaciers (socle cristallin : lacs très plats et d'une profondeur généralement < 50m, tout comme les lacs situés dans les plaines sédimentaires ; les terrains sédimentaires à fort reliefs et roches métamorphiques vont être associées à des lacs pouvant être très profonds, et étroits)	Majorité des lacs alpins ou des grands lacs nord-américains.
<i>Lacs tectoniques</i>	Lacs résultant d'une déformation de l'écorce terrestre (pli, faille, mouvements à grande échelle)	Ces lacs peuvent être exceptionnellement vieux	Lac Baïkal, lac Victoria, mer d'Aral, mer Caspienne.
<i>Lacs fluviaux</i>	Lacs créés par les méandres des fleuves et rivières dans les plaines inondables, les barrages fluviaux en raison du dépôt des sédiments par les affluents et creusements provoqués par des cascades.	Plusieurs grands lacs de part le monde ont cette origine, souvent couplée avec une origine glaciaire. Ces lacs peuvent être encore aujourd'hui traversés par une rivière ou un fleuve.	Lacs sur le fleuve Amazone, le St Laurent comme le lac St Pierre, Le Léman qui est traversé par le Rhône
<i>Lacs côtiers</i>	Plans d'eau séparé de la mer ou de l'océan par un cordon littoral	Généralement de faible profondeur, eau pouvant être saumâtre ou salée avec un gradient de salinité. Ils peuvent être reliés à la mer par un chenal ou en souterrain et posséder une diversité biologique remarquable de par leurs propriétés	"étangs" landais, étang de Thau en France. On en retrouve sur toutes les côtes du monde.

		de salinité et d'écosystème de transition (écotone). Lorsque les échanges avec les eaux salées sont très importants, la lagune peut être considérée comme faisant partie du milieu marin (Pourriot & Meybeck, 1995, p8)	
<i>Lacs gravitaires</i>	Lacs provoqués par des glissements de terrain et éboulements.	Ces lacs sont présents dans les régions montagneuses et peuvent être de courte durée.	Lac de Montriond, lac de Vallon dans les Alpes françaises (Haute-Savoie - 74).
<i>Lacs volcaniques</i>	Lacs résultant d'une activité volcanique : cratères de volcans, cratères d'explosion (maars), calderas (dépression volcanique d'un diamètre > 3 km), d'un barrage naturel formé par une coulée de lave	Lacs présent uniquement dans les régions volcaniques, et dans certains cas peuvent être associés à des sources chaudes, des phénomènes explosifs rares (Lac Pavin - Meybeck, 2019). Les lacs de cratère sont généralement de forme circulaire et creux et présente un bassin d'alimentation de faible superficie par rapport à la taille du lac.	Type de lac courant au Japon, dans les Philippines, l'Indonésie, Cameroun, Amérique Centrale, Europe occidentale – Auvergne
<i>Lacs phréatiques (issus d'eaux souterraines)</i>	Lacs qui apparaissent dans des cavités créées par percolation de l'eau et/ou dissolution de roches solubles telles que le calcaire, le gypse ou le sel ou résultant de la fonte du pergélisol de la toundra	Présent principalement en plaine dans les régions où sont présente des roches solubles. Ces lacs sont souvent de petite taille. Les lacs de dissolution issus d'eaux souterraines sont souvent creux avec une forme d'entonnoirs (surtout en milieux karstique)	Plaine roumaine, mares arctiques
<i>Retenues d'eau</i>	Lacs artificiels aménagés pour répondre à divers besoins (hydroélectricité, irrigation, pisciculture...), ils peuvent également être le résultat d'activités minières ou d'exploitation de granulats aujourd'hui inexploités.	Les premières retenues remontent à plus de 4 000 ans dans l'ancienne Egypte. Elles peuvent être de toutes tailles, rendre un ou plusieurs services aux Hommes. Les barrages peuvent provoquer des déséquilibres écologiques majeurs (destruction de zones humides, perte d'espèces migratrices, déséquilibre des transports sédimentaires ...) et conduire à des déplacements de populations dans certaines régions. La plupart des retenues appartiennent à des	Il existe plus de 45 000 grands barrages dans le monde (Rinke et al, 2015).

		entreprises ou revêtent d'un caractère privé. Les lacs de barrage naturels ou artificiels sont allongés de forme triangulaire ou ovale avec une profondeur maximale à proximité du barrage	
--	--	--	--

Annexe 1-2: Classification des lacs selon leur fréquence de retournement des masses d'eau.

La première classification des lacs selon leur fréquence de retournement a été établie par Forel qui distinguait trois types de lacs : les lacs tempérés, tropicaux et polaires ; cette typologie n'était pas satisfaisante car de nombreux lacs tropicaux étaient situés dans des régions tempérées et de nombreux lacs polaires, dans des régions non-polaires. Plusieurs autres classifications suivirent, jusqu'à la classification de Lewis de 1983 en 8 catégories qui distingue (Pourriot and Meybeck 1995, Kalff 2002) :

- **Les lacs amictiques** : couverts par une épaisse couche de glace toute l'année qui ne permet pas au lac de se retourner, ce qui crée facilement des conditions anoxiques. Des courants de densité restent néanmoins possibles du fait de la pénétration de la lumière dans la zone pélagique et qui provoque une stratification inverse. Ces lacs sont très rares, situés à de très hautes latitudes, ou d'altitude très élevée.
- **Les lacs monomictiques** : caractérisés par une seule période de retournement dans l'année, ils peuvent être "froids" et gelés la majeure partie de l'année (température toujours inférieure à 4°C - stratification inverse), c'est le cas de la plupart des lacs des régions polaires. Ils peuvent aussi être "chauds" (température supérieure à 4°C - stratification étendue durant la partie la plus chaude de l'année), largement répandus dans le sud de l'Europe et les régions tempérées avec une température moyenne environ supérieure à 10°C. Les grands lacs alpins sont des lacs monomictiques chauds.
- **Les lacs dimictiques** : couverts de glace en hiver et dont la température de l'eau dépasse les 4°C en été, ce qui provoque une stratification inverse en hiver et une stratification directe stable le reste de l'année, avec deux périodes de retournements aux cours de la transition entre ces deux états au printemps et à l'automne. Ces lacs sont abondants dans les régions tempérées aux latitudes moyennes ou en altitude (ex : Canada, Russie, massifs montagneux d'Europe)
- **Les lacs polymictiques** : ces lacs présentent plusieurs brassages au cours de l'année, ils sont soit très exposés aux vents ou relativement peu profonds ; ils présentent une couverture de glace une partie de l'année qui dégèle en été. Ils sont non stratifiés ou peu stratifiés les jours ensoleillés s'ils sont de faible profondeur (<20m - polymictiques continus) avec un retournement la nuit, tandis que les plus profonds se stratifient pendant des périodes de quelques jours à plusieurs semaines en été (polymictiques discontinus). Ces lacs peuvent être froids ou chauds.

Certains lacs ne se retournent pas et ne sont pas gelés en surface pour autant, on dit qu'ils sont « **méromictiques** », son antonyme est « **holomictique** ».

Nous vivons une époque de changements rapides et sans précédents pour la planète qui ont débuté lors de l'un des événements les plus marquants de l'histoire de l'humanité : l'industrialisation au début du XIX^{ème} siècle. L'amélioration de la première machine à vapeur par l'écossais James Watt dans les décennies 1770 - 1780 marque une révolution dans le domaine industriel en donnant accès à la première source d'énergie mécanique maîtrisée par l'Homme. Celle-ci va permettre la transition rapide d'un monde agraire, dont l'essentiel de l'énergie provenait de sources renouvelables, vers un monde industriel en constante recherche de profits (Steffen et al. 2007). S'en suit alors une ascension fulgurante du progrès technique, du consumérisme, du matérialisme, la diversification des activités économiques avec une course à la croissance, un besoin constant de profit, de plaisirs et le postulat de ressources naturelles illimitées qu'il faudrait « domestiquer » (Kareiva et al. 2007, Damesin 2013, Pinker 2018).

L'énorme expansion de l'utilisation des énergies fossiles comme le charbon, et plus tard le gaz et le pétrole vont rendre possible l'exploitation de ressources naturelles jusque-là inaccessibles et permettre à la démographie et l'économie mondiale d'exploser. Depuis 1800, la population mondiale a ainsi été multipliée par plus de **sept fois**, dépassant les 7.6 milliards d'individus aujourd'hui et l'économie mondiale par plus de **50 fois** (Steffen et al. 2007). Ces évolutions ont permis à l'Homme de répondre à plusieurs grands défis de l'humanité : les revenus des pays dits "en développement" **ont doublé** en une centaine d'année, tout comme l'espérance de vie (et la mortalité infantile a été divisé par sept), et les progrès dans les 20 dernières années sont encore plus importants dans le milieu de l'éducation (**hausse de 75%** de l'alphabétisation), la pauvreté (**déclin de 50%** de la pauvreté) et la sécurité alimentaire (**diminution de 33%** de la malnutrition) (sources : anthropocene.info, Steffen et al. 2007, WWF 2016). L'ensemble des progrès de l'anthropocène ont permis d'augmenter la sécurité avec une diminution par quatre des crimes et violences physiques, l'abolition de l'esclavage, des persécutions religieuses et des châtiments, le recul des guerres après la seconde guerre mondiale et les révolutions dans le domaine du droit : droits civils, droits des femmes, droits des homosexuels, droits des enfants ou encore des droits des animaux (Pinker 2018). On pourrait également résumer ces évolutions par le fait suivant : **le monde a fait des progrès spectaculaires dans chaque domaine mesurable du bien-être humain, sans exception** (MEA 2005, Raudsepp-Hearne et al. 2010).

Depuis 1950, l'ensemble de ces processus s'accroissent dans un phénomène appelé "la grande accélération" de l'entreprise humaine, marqué notamment par un doublement de la démographie en moins d'une 50aine d'année, un exode rural global qui voit la population urbaine augmenter entre 30 et 50%, une économie mondiale multipliée par plus de 15 fois, le tout s'accompagné d'une augmentation tout aussi importante de la demande en énergie, en terres, en eau et en ressources naturelles.

Le résultat de ces changements planétaires est aujourd'hui sans équivoque : le cycle de l'eau et des sédiments est totalement déséquilibré par les innombrables barrages construits de par le monde (45 000 grands barrages) et l'utilisation de plus de la moitié des eaux douces disponibles par l'agriculture (Vörösmarty et al. 2004). La disponibilité en terres fertiles ne cesse de diminuer (entre le tiers et la moitié des surfaces terrestres ont été transformées pour l'agriculture ou l'artificialisation), la composition de l'air est perturbée (la concentration en CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de presque 30 % depuis le début de la révolution

industrielle), les cycles biogéochimiques sont brisés (il y a plus d'azote atmosphérique fixé par l'humanité que par toutes les ressources naturelles combinées) et l'entreprise humaine a entraîné la biodiversité mondiale dans la sixième extinction de masse (IPBES 2018) entre autres indicateurs...

1. Les écosystèmes aquatiques dans l'anthropocène

En quelques décennies, l'aménagement accéléré des territoires et le développement de l'industrie et de l'agriculture intensive ont altéré les milieux aquatiques : artificialisation des berges, diffusion de contaminants dans les écosystèmes, pressions accrues sur la ressource en eau, etc. **La perte et la dégradation des habitats** menace ainsi 48% de la faune et la flore aquatique (ONEMA 2013). **La surexploitation directe**, que ce soit sous l'effet de la pêche non responsable ou de prélèvements menés à des fins commerciales ou de subsistance, arrive en deuxième position (24 %), devant les **espèces invasives et les maladies** (12 %) (favorisées par la mondialisation), **la pollution** (12 %), et enfin, **le changement climatique** (4 %) (Collen et al. 2014).

Les écosystèmes aquatiques présentent une forte vulnérabilité au changement climatique avec **une augmentation moyenne de la température de l'eau de 1,6°C au cours du XXème siècle** en France (contre environ 1°C de la température de l'air pour la même période) (ONEMA 2014), qui se traduit par des événements climatiques extrêmes, des étiages et crues plus sévères. Cette perturbation est amenée à devenir plus intense dans le futur avec une demande en eau qui augmente d'environ 1% par an depuis les années 1980 (WWAP 2019) et qui devrait augmenter de 30% d'ici à 2050 (Raworth 2012).

La dépendance de l'Homme à la ressource en eau le rend vulnérable face aux pressions causées sur les systèmes aquatiques et cela engendre des répercussions sanitaires importantes, des pertes économiques, des conflits géopolitiques (263 BV lacustres ou fluviaux sont transfrontaliers) parfois armés ; exacerbé par les pollutions qui contaminent les stocks d'eau disponibles, les changements climatiques, des inégalités socio-culturelles (liées au genre, l'appartenance ethnique, culturelle, au statut socio-économique), des inégalités sur le prix de l'eau (l'eau est moins chère dans les pays au niveau de vie élevé) (WWAP, 2019b). Aucune autre ressource sur la Terre ne révèle mieux les inégalités qui déchirent la planète.

La crise mondiale de l'eau s'accroît avec l'anthropocène et l'évolution démographique, la croissance exponentielle des besoins qui va de pair avec l'évolution de notre mode de vie et la croissance économique des pays. Cette crise est par ailleurs exacerbée par une répartition géographique inégale sur la surface du globe, les changements climatiques et la destruction des habitats et zones humides ainsi que par une mauvaise gestion de l'eau à l'échelle locale dans de nombreux territoires, notamment ceux des pays en voie de développement, ainsi qu'à l'échelle mondiale : surexploitation des ressources en eau, gaspillages et pollutions sont les conséquences de ce défaut de gouvernance.

Annexes Chapitre 2

Annexe 2-1 : Présentation des catégories d'acteurs "producteurs d'espace lacustre" et leur rôle dans la gouvernance

Catégorie d'acteurs	Acteurs concernés	Rôle dans la gouvernance des lacs
<i>Acteurs étatiques - Institutions gouvernementales et Etat fédéral suisse</i>	Europe, Etat français ; Ministère de la Transition écologique et solidaire ; Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales Etat fédéral Suisse ; Office fédéral de l'Environnement ; Département fédéral des affaires étrangères	L'Europe intervient dans la gestion des ressources lacustres par le soutien technique, financier, réglementaire qu'elle apporte dans la protection, la connaissance et la gestion des espaces naturels au travers notamment de l'application de la Directive Cadre sur l'Eau. Les grands lacs alpins appartiennent à l'Etat, ce qui signifie qu'ils font partie de son domaine public (ce sont des lacs dits "domaniaux") et présentent un intérêt stratégique pour le pays justifiant d'un statut spécifique de régime de propriété. Ce statut rend les biens domaniaux inaliénables. La limite du domaine public fluvial (les grands lacs sont régis par la réglementation fluviale, notamment en matière de navigation) sur les lacs du Bourget et d'Annecy est définie par la "côte des plus hautes eaux ordinaire" (fixée artificiellement). Sur le Léman, il s'agit de la limite des "hautes eaux moyennes" (s'étend également aux grèves exondées et zones colonisées par la végétation aquatique) et de la frontière suisse qui traverse le lac en longueur. Sur les lacs domaniaux en France, le droit de pêche appartient à l'Etat (les poissons à personne tant qu'ils ne sont pas capturés), de même que les ressources minérales ; les autres ressources et compartiments lacustres appartiennent au propriétaire.
<i>Services déconcentrés de l'Etat</i>	Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) ; Agence Régionale de Santé (ARS) ; Préfecture	Organismes chargés de la mise en œuvre dans les régions des politiques publiques de différents ministères. A l'échelle des grands lacs, la DREAL contribue à la stratégie régionale de création des classements des espaces protégés (arrêtés préfectoraux de protection de biotope -APPB, réserves naturelles, ...), la mise en place des SDAGE, SAGE et les contrats territoriaux, de rivière ou de bassin, le classement des cours d'eau des BV des lacs, la mise en place du plan de restauration de la continuité écologique des cours d'eau, la protection des eaux souterraines, de lutte contre la pollution par les nitrates, les produits phytosanitaires, veille à la gestion quantitative de la ressource en eau à l'échelle régionale. Cet organisme accompagne les territoires dans la mise en œuvre d'une gestion durable des ressources en eau. (http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/) L'Agence Régionale de Santé (ARS) est chargée du pilotage régional du système de santé. Cette instance assure une mission de veille et de sécurité sanitaire de tous les sites d'accès publics autorisés autour des lacs, elle intervient notamment dans le suivi de la qualité sanitaire des plages surveillées, et peut autoriser ou non la baignade sur les plages si cet usage peut représenter un risque pour la santé. La préfecture correspond à la fonction, la circonscription et les

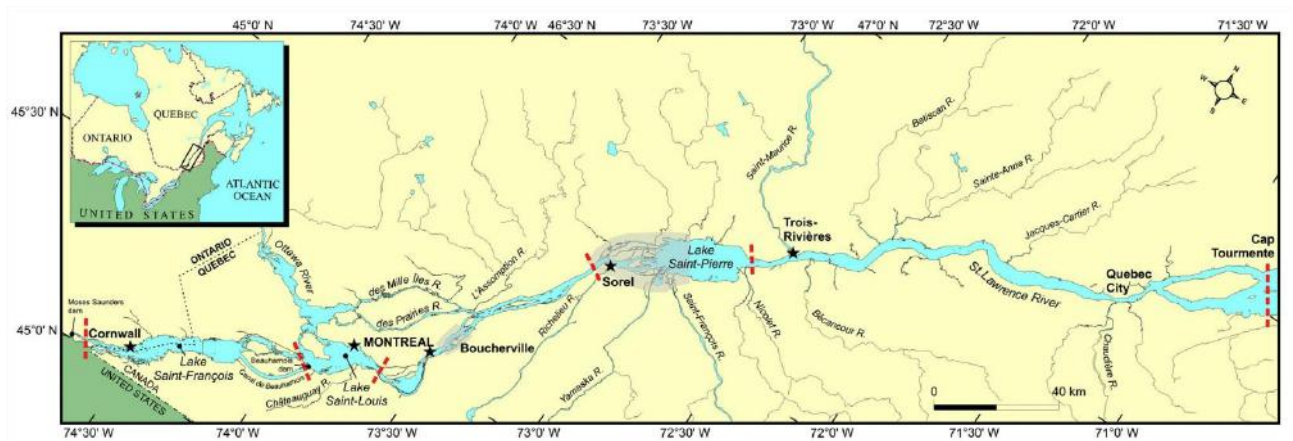
		bureaux confiés au préfet, représentant de l'Etat français (Brunet et al, 1992)
<i>Région et département</i>	Région ; Direction Départementale des Territoires - DDT ; Etats cantonaux Suisse (Genève, Vaud, Valais)	Les conseils régionaux et territoriaux sont responsables de la mise en œuvre locale de l'action, ils font le lien entre les politiques d'aménagement du territoire et politique de l'eau. Ils apportent un soutien technique et financier aux communes et EPCI. La DDT est le représentant de l'Etat en tant que propriétaire du lac. A l'échelle de la Suisse, les Etats cantonaux sont les représentants de l'Etat fédéral en tant que propriétaires.
<i>Communes et intercommunalités</i>	Communes et Intercommunalités dans le BV des lacs	Les communes sont responsables du service de l'eau potable et de l'assainissement depuis la distribution à la collecte et traitement des eaux usées. Cette compétence peut être déléguée aux communautés de communes et d'agglomérations. Les communes ont également sous leur responsabilité d'assurer la sécurité des usagers des territoires communaux, notamment des plages, en assurant leur surveillance, et par arrêtés municipaux de contraindre certains usages et l'accès à des portions du littoral. Elles sont également tenues d'appliquer sur le territoire des communes la servitude de marchepied
<i>Structures techniques et administratives d'appui à la gestion des services publics</i>	Stations d'épuration, Stations de pompage d'eau potable, Offices du Tourisme	Ces structures fournissent les services techniques et structures permettant d'assurer l'exploitation des ressources sous responsabilité des communes. Ces installations sont soumises à normes environnementales contrôlées par la DDT.
<i>Structures techniques d'appui à la gestion des espaces naturels</i>	Conservatoires des Espaces naturels régional et départemental (CEN 73 et ASTERS), Conservatoire du Littoral et des Rivages Lacustres (CLRL) ; Agence Française pour la Biodiversité (AFB) ; Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS)	Ces structures ont un rôle d'aide technique et de mise en place des actions de gestion relatives à la restauration des milieux lacustres (roselières, littoral ...) importants et de gestion des espaces naturels sensibles des deux départements, y compris ceux situés autour des grands lacs alpins. Le CLRL est un établissement public national à caractère administratif, qui mène une politique d'acquisition de terrains dans le but de protéger les espaces fragiles ou menacés. Le CEN 73 et ASTERS œuvrent pour la préservation de la biodiversité au cœur des départements. L'AFB vient en appui aux acteurs dans la mise en œuvre des politiques publiques dans le domaine de la connaissance, la préservation des lacs et la gestion. Elle exerce notamment un rôle de contrôle de l'exploitation des ressources lacustres et leur exploitation par les usagers par le biais de la Police de l'Environnement, la Police des Pêches. Les inspecteurs de l'Environnement disposent d'un pouvoir de police judiciaire pour rechercher et constater certaines infractions environnementales. Ils sont sous l'autorité du préfet de département. L'ONCFS est un établissement public en charge de la régulation et de la connaissance de la faune sauvage. Elle a un rôle de police de la chasse et de l'environnement et d'appui technique auprès des décideurs.

Annexe 2-2 : Les acteurs consommateurs de l'espace lacustre

Ressource	Catégorie d'acteur	Dénomination de l'acteur	Rôle
<i>Eau-support</i>	Bénéficiaires directs	Sociétés de navigation commerciale et Sociétés de transport lacustre	La Compagnie Générale de Navigation (CGN) est une société suisse de transport fluvial qui propose sur le Léman des croisières pour des usages touristiques ou pour rejoindre les rives des deux Etats français et suisse. Des sociétés de transport lacustre existent également à Annecy, il s'agit de la Compagnie des Bateaux du Lac d'Annecy et sur le lac du Bourget : Bateaux du Lac du Bourget et du Haut-Rhône
	Bénéficiaires indirects	Populations riveraines et touristes	Usager
<i>Eau-ressource</i>	Bénéficiaires directs	Collectivités territoriales	Usager
	Bénéficiaires indirects	Populations riveraines et touristes	Usager
	Groupes d'intérêts locaux et groupes de pression	Société des Eaux minérales d'Evian	Peut intervenir à l'échelle du BV français du Léman
<i>Eau-énergie</i>	Bénéficiaires directs	Compagnie Nationale du Rhône et Services Industriels de Genève	Ces entreprises semi-publiques sont les concessionnaires du fleuve Rhône pour la production d'hydroélectricité, et le transport fluvial et les usages agricoles de la vallée du Rhône pour la CNR. La CNR est responsable de la gestion du fleuve de la frontière suisse jusqu'à la Méditerranée, est chargée de la régulation du niveau du lac du Bourget. Les SIG régulent le niveau du Léman et gèrent le fleuve à l'amont jusqu'à la frontière Suisse (Maussin, 2004 ; www.cnr.tm.fr)
	Bénéficiaires directs	Communes et intercommunalités	Usager
	Bénéficiaires indirects	Populations riveraines et touristes	Usager
<i>Extraction de bio-ressources</i>	Bénéficiaires directs	Pêcheurs professionnels et de loisir, chasseurs, artisans, artistes	Usager
	Bénéficiaires indirects	Hôtellerie, restaurants, populations riveraines et touristes	Consommateurs des produits des pêches professionnelles
		Les clubs sportifs, représentants d'usagers	Clubs Nautiques, Clubs des nageurs, des plongeurs, Club de voile, plaisanciers ...

	Groupes d'intérêts locaux et groupes de pression	Représentants d'usagers de la pêche	L'Association pour la mise en valeur des Plan d'eau en Rhône-Alpes (APERA), présente à l'échelon régional, regroupe l'Association Agréée Interdépartementale des Pêcheurs Professionnels des Lacs Alpains (AAIPPLA) et les associations Agréées pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques de Savoie et de Haute-Savoie.
		ONCFS	Etablissement public à caractère administratif
<i>Extractions de ressources minérales</i>		Entreprise SAGRAVE	Usager
<i>Paysages lacustres</i>	Bénéficiaires directs	Populations riveraines et touristes	Usager
	Bénéficiaires directs	Hôteliers - restaurateurs	Bénéficiaires directs des paysages lacustres
	Bénéficiaire direct	Immobilier	Usager
	Groupes d'intérêts locaux et groupes de pression	Les promoteurs touristiques	Au niveau national, La Fédération Nationale des Offices de Tourisme et Syndicats d'Initiative représente et défend les intérêts des offices de tourisme auprès des institutions publiques et privées et elle fédère l'ensemble des structures des offices de tourisme au sein d'un réseau national. Auvergne Rhône-Alpes Tourisme est un observatoire du tourisme à l'échelle de la région dont les missions sont de promouvoir une offre touristique à l'échelle régionale, nationale et internationale, et d'accompagner les acteurs des territoires pour renforcer l'attractivité des sites touristiques. Les départements de la Savoie et de la Haute-Savoie ont décidé de promouvoir ensemble le tourisme des Alpes françaises avec la création de l'Association Savoie Mont-Blanc Tourisme. Il s'agit d'un observatoire à l'échelle des deux Savoie. Les grands lacs alpins français (lac d'Aiguebelette compris) sont promus en tant que destinations touristiques globales associées, dans le but de développer un tourisme à l'année associé aux plans d'eau et complémentaire du tourisme de montagne et des sports d'hiver.

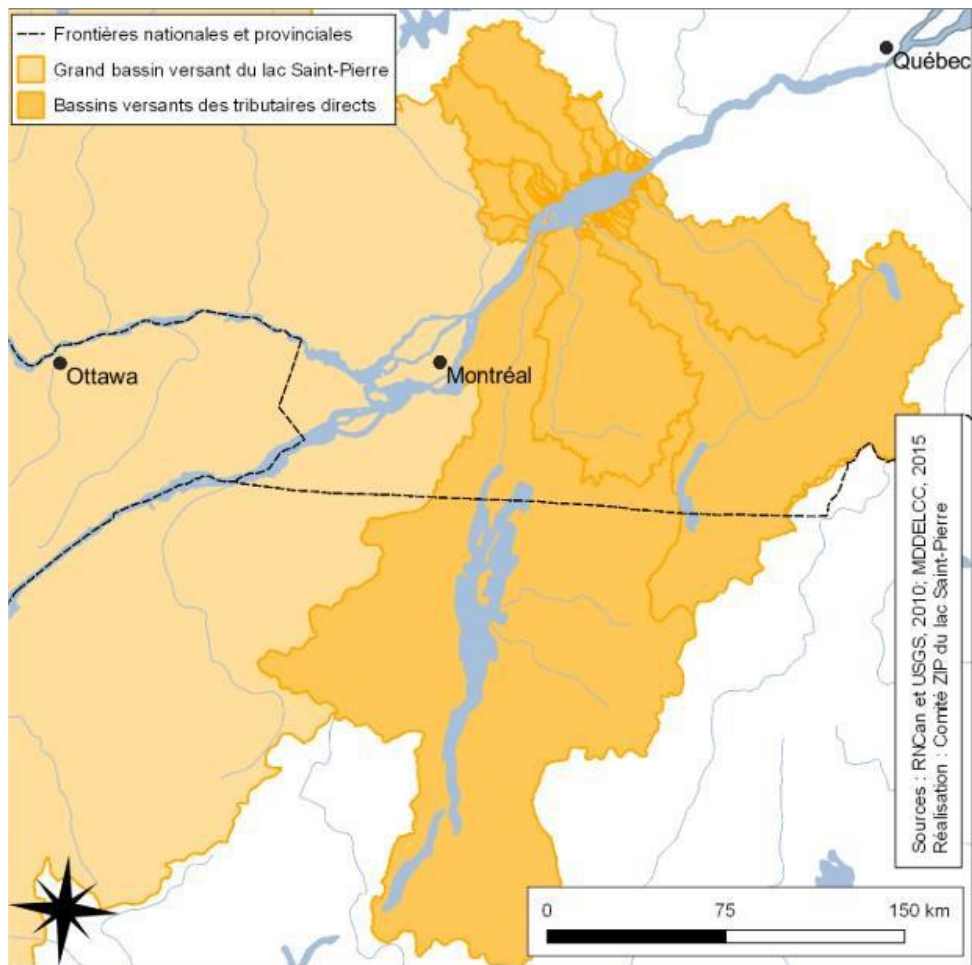
Annexe 2-3 : La "cartothèque" du lac Saint-Pierre



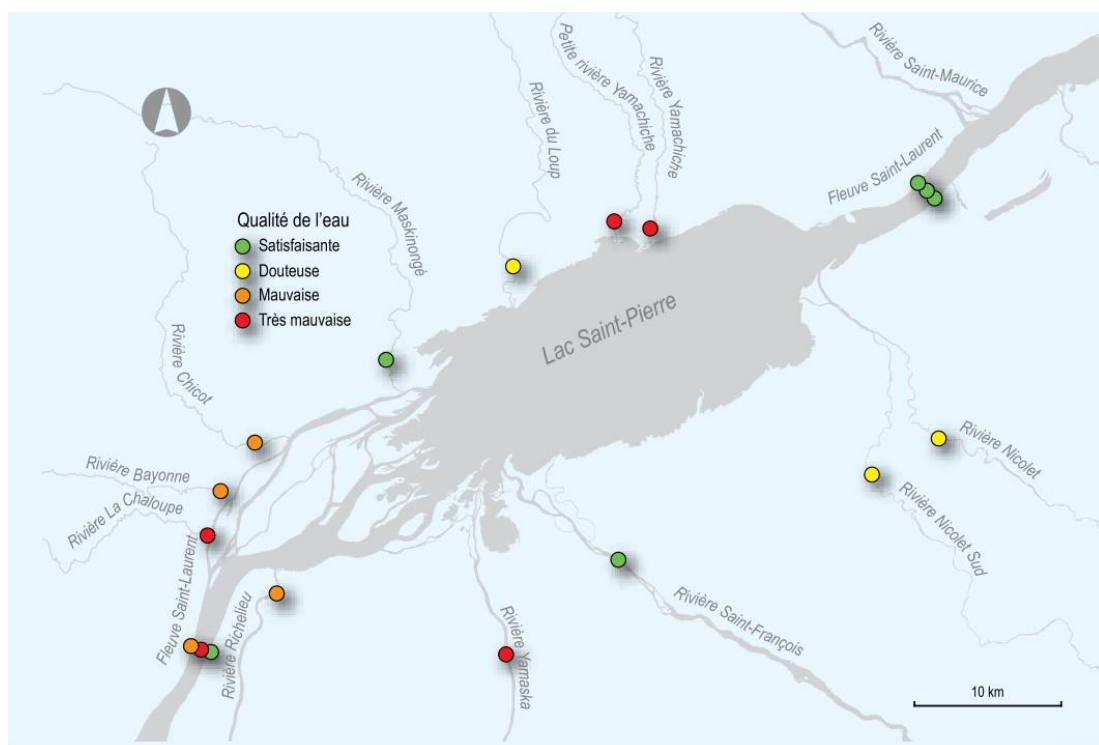
1/ Carte de situation du LSP (Hudon et al. 2018) : Le lac est situé sur le fleuve Saint-Laurent, au Canada, entre les villes de Sorel et de Trois-Rivières



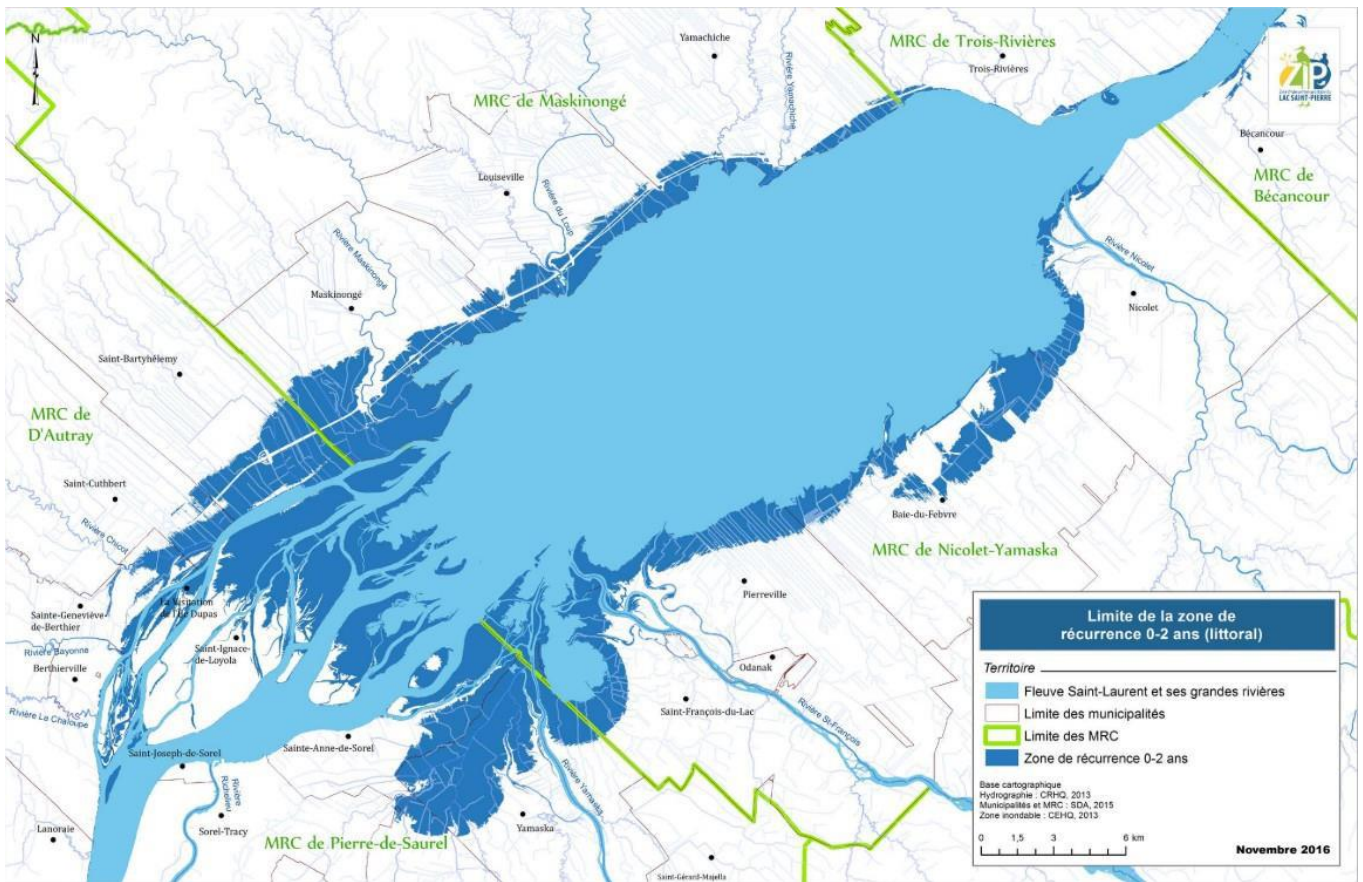
2/ Carte de l'étendue du BV du LSP ((MDDEFP 2013) : Le BV du LSP est très étendu, car il est intégré à celui du fleuve Saint-Laurent qui prend sa source dans les grands lacs américains



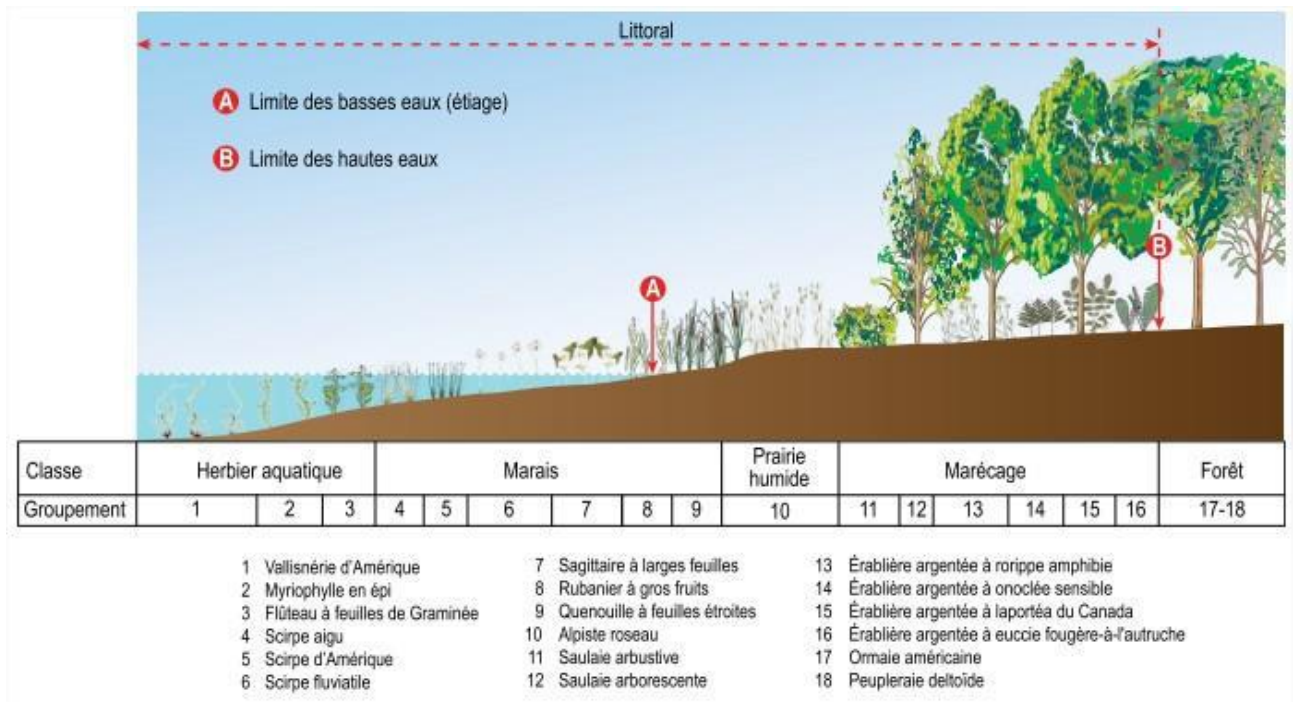
3/ Carte des sous-BV du lac (TCRLSP 2016) : la gestion du LSP est coordonnée à l'échelle des sous-BV du lac au Québec, à savoir les BV des 11 tributaires du lac.



4/ Carte des qualités de l'eau des 11 tributaires du lac (MDDEFP 2013) : pour la plupart des tributaires du LSP, la qualité de l'eau est non satisfaisante, voire très mauvaise.



5/ Carte de la limite de la zone littorale du LSP : la zone de récurrence 0-2 ans correspond au littoral du LSP, elle est étendue sur plus de 28 060 ha de milieux humides, zones boisées et arbustives et zones cultivées.



6/ Schéma de la composition floristique du littoral du LSP

7/ carte des changements d'occupation du sol dans le littoral du lac St Pierre entre 1950 et 1997 (Dauphin and Joibin 2016).

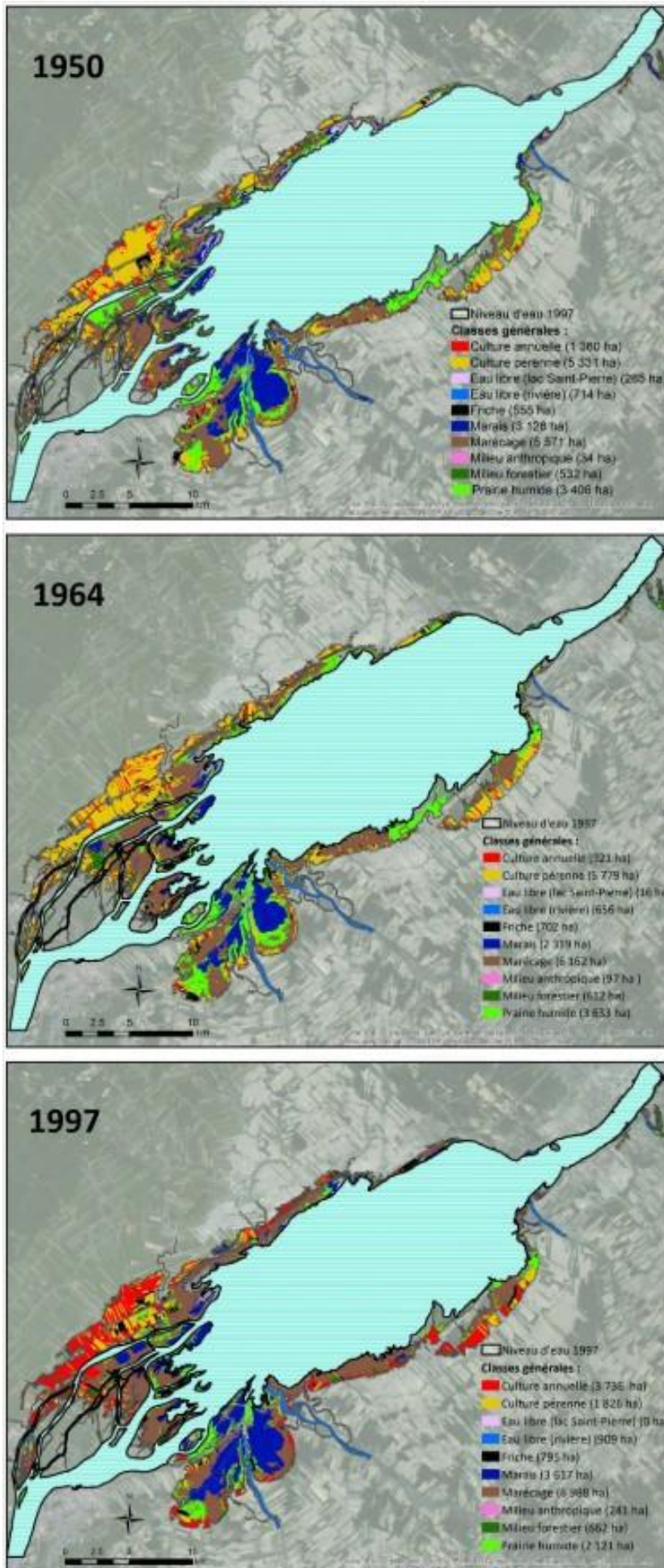


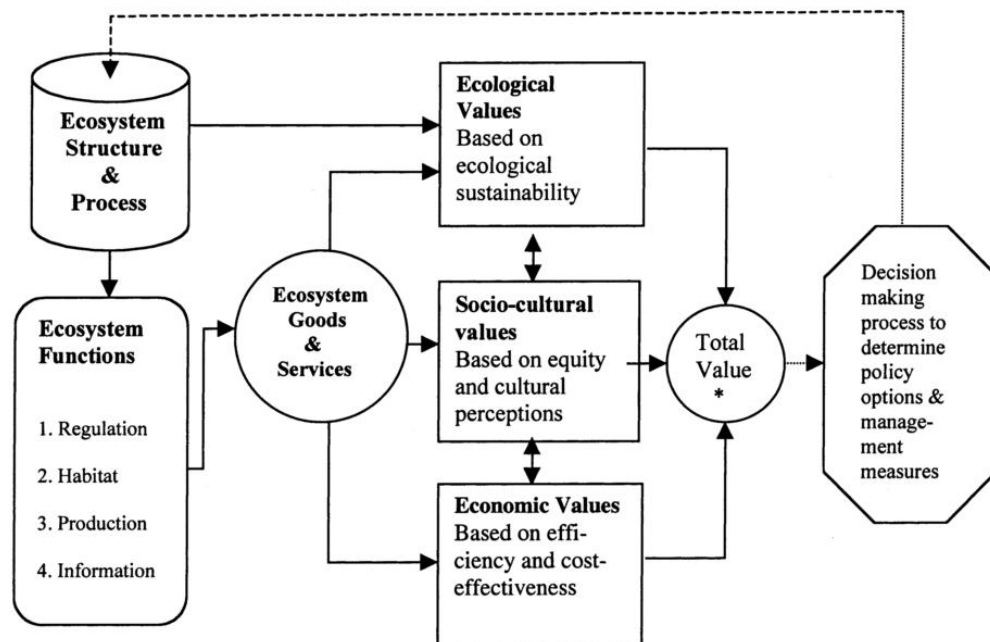
Figure 3. Occupation du sol dans la zone de récurrence de 0-2 ans de la plaine inondable du lac Saint-Pierre en 1950, 1964 et 1997 (ajustée au niveau d'eau de 1997).

Annexes Chapitre 3

Annexe 3-1 : Les 10 définitions du concept de SE les plus utilisées et la philosophie à laquelle elles sont rattachée (ES = avantage veut dire que les SE sont considérés comme les avantages, ES => Avantage signifie que les SE sont considéré comme les éléments des écosystèmes qui conduisent à ces avantages)

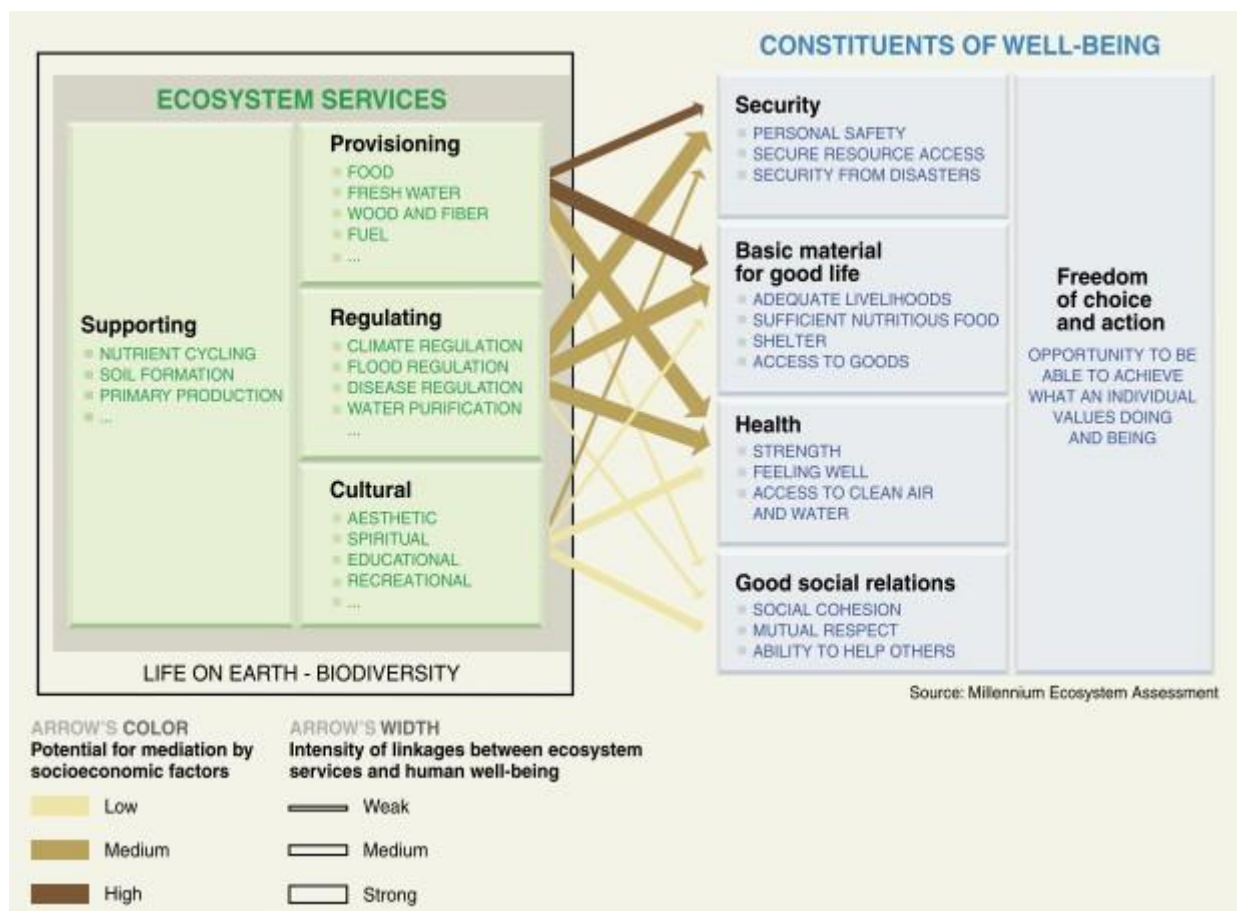
Définition des services écosystémiques	Citation	Philosophie
Les bénéfiques que les populations humaines dérivent, directement ou indirectement, des fonctions des écosystèmes	(Costanza et al. 1997)	ES = Avantages
Les conditions et processus à travers lesquels les écosystèmes naturels et les espèces qui les composent, soutiennent et comblent la vie humaine	(Daily 1997)	ES => Avantages
La capacité des composants et processus naturels à fournir des biens et services qui satisfont les besoins humains, directement ou indirectement	(De Groot et al. 2002)	ES => Avantages
L'ensemble des fonctions écosystémiques qui sont utiles aux hommes	(Kremen 2005)	ES => Avantages
Composantes de la nature, directement appréciées, consommées ou utilisées pour produire le bien-être humain	(Boyd & Banzhaf 2007)	ES => Avantages
Les aspects utilisés des écosystèmes (activement ou passivement) pour produire le bien-être humain	(Fisher et al. 2009)	ES => Avantages
Une gamme de biens et de services générés par des écosystèmes qui sont importants pour le bien-être humain	(Nelson et al., 2009)	ES => Avantages
Bénéfices que les humains reconnaissent comme obtenus à partir des écosystèmes qui soutiennent, directement ou indirectement, leur survie et leur qualité de vie	(Harrington et al, 2010)	ES = Avantages
Un terme collectif pour les biens et services produits par les écosystèmes qui profitent à l'humanité	(Jenkins et al, 2010)	ES => Avantages

Annexe 3-2 : Différentes représentations des cadres conceptuels associés aux SE dans la littérature.



*) The problem of aggregation and weighing of different values in the decision making process is an important issue, but is not the subject of this paper (see other papers in this issue for further discussion)

1/ Cadre conceptuel pour la co-évaluation des SE proposé par De Groot et al. 2002



2/ Cadre conceptuel du MEA, 2005, qui associe les SE au bien-être humain.

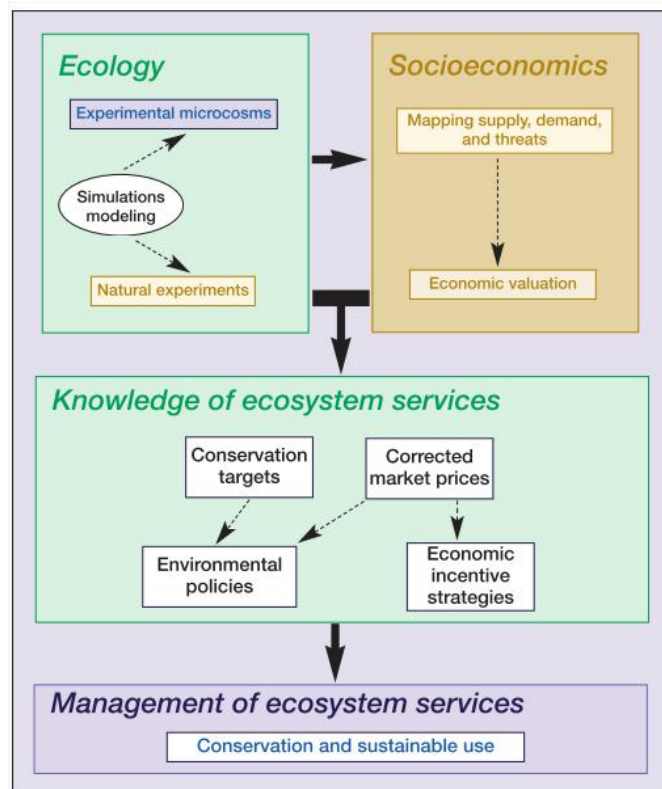


Figure 2. Conceptual framework illustrating how greater ecological knowledge, in combination with socioeconomic knowledge, is needed to manage ecosystem services for sustainable use (Limburg and Folke 1999). Blue boxes: areas of greater current knowledge; orange boxes: poorly known (arrows indicate desired or existing linkages); white boxes: desired outcomes.

3/ Cadre conceptuel de Kremen & Ostfeld (2005) qui vise à organiser les informations relatives aux SE

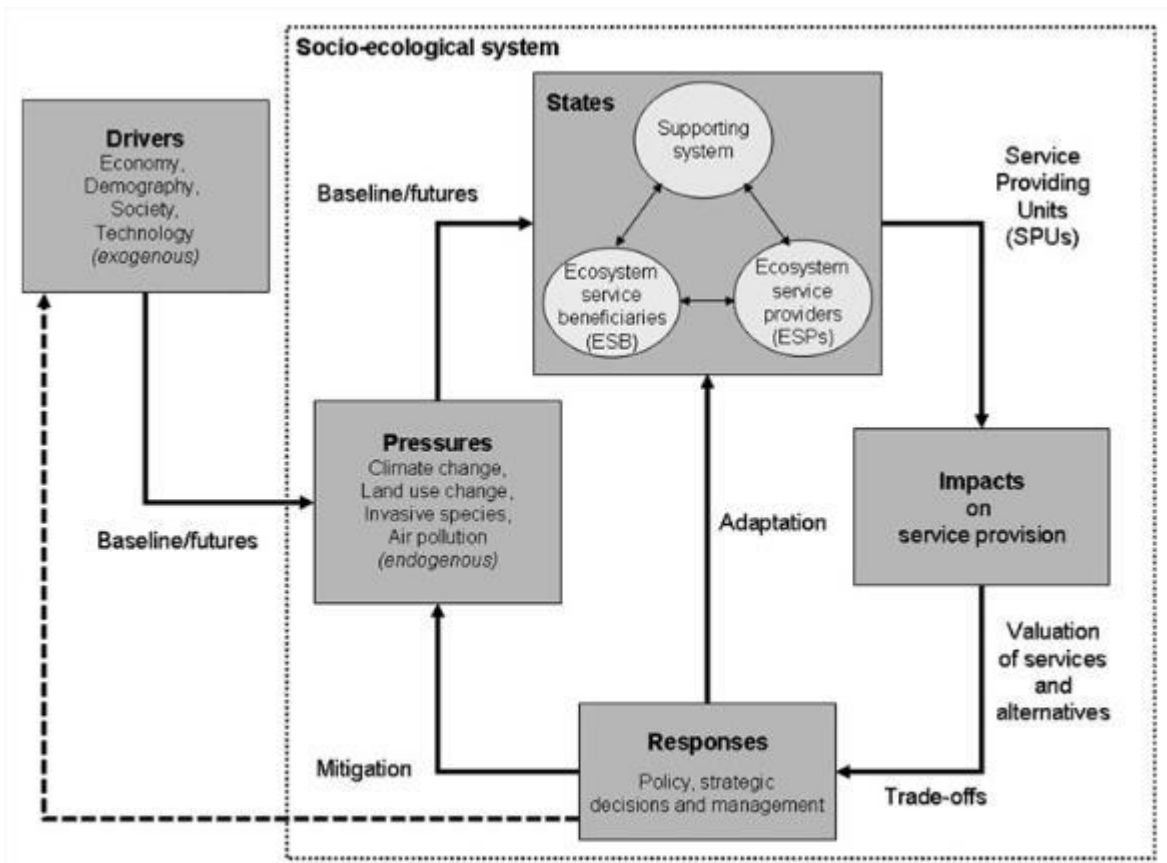


Fig. 1 A Framework for Ecosystem Service Provision (FESP) based on a modified Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) framework

4/ Cadre conceptuel de Rounsevell et *collaborateurs* (2010) qui applique le concept de SE au modèle « Pression – Etat – Réponse » développé initialement par l'Agence Environnementale Européenne en 1999

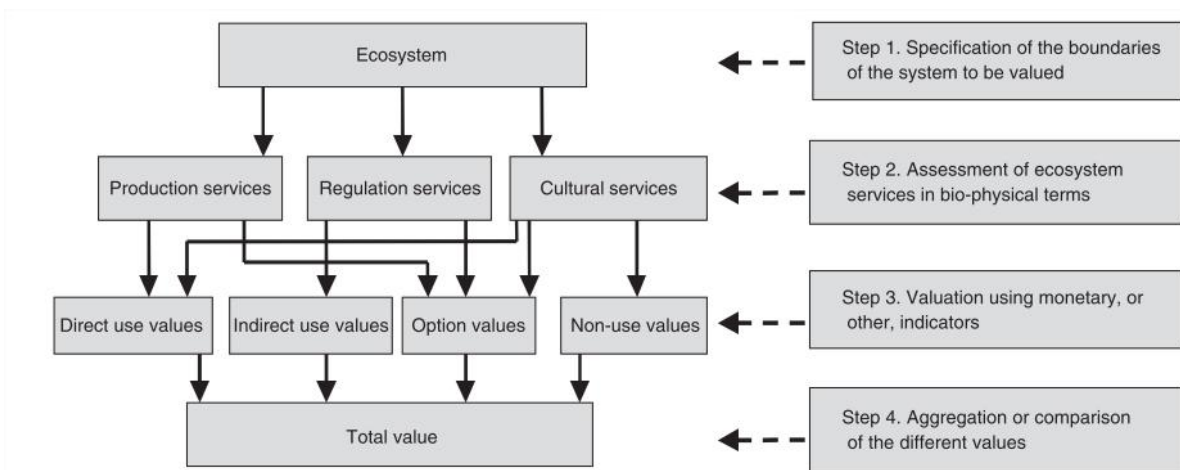


Fig. 1. The ecosystem valuation framework. The solid arrows represent the most important links between the elements of the framework. The dashed arrows indicate the four principal steps in the valuation of ecosystem services.

5/ Cadre conceptuel permettant d'évaluer la valeur globale des SE d'un écosystème, divisé en quatre étapes pour y arriver (Hein et al. 2006)

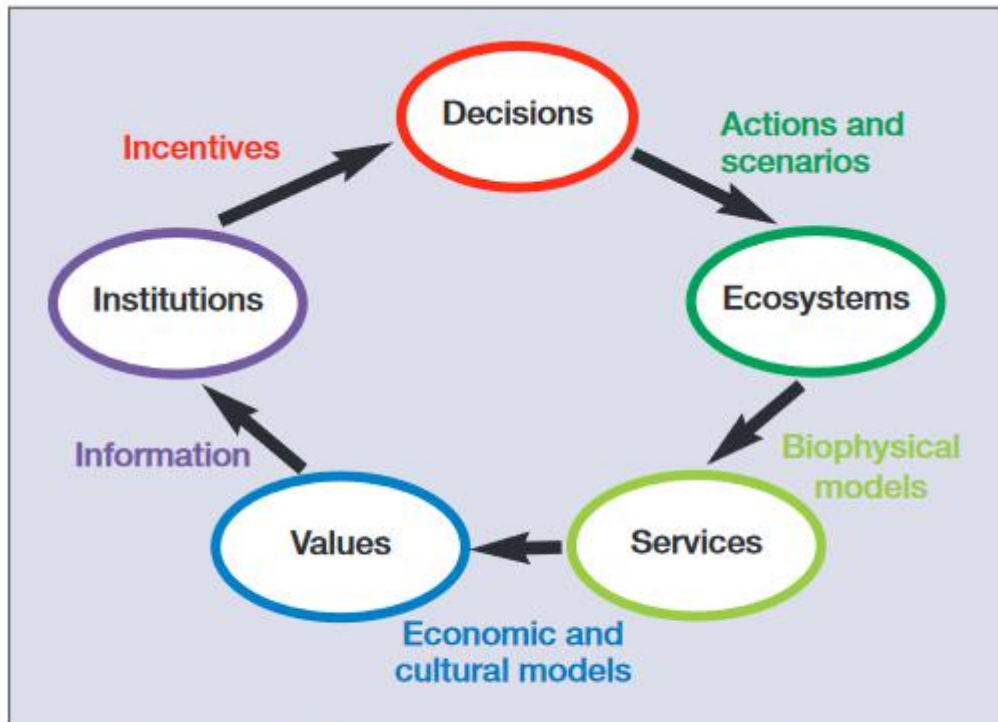
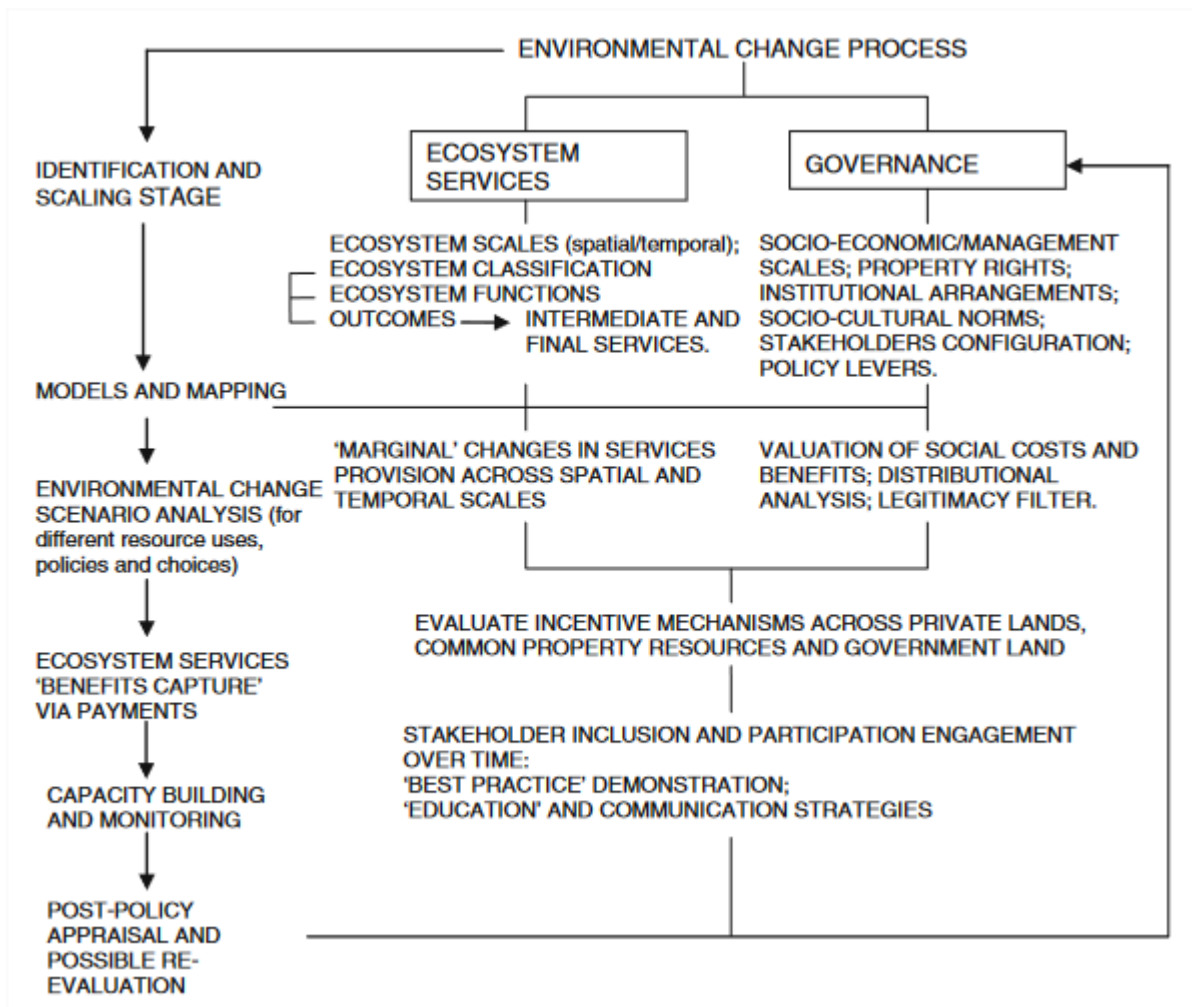


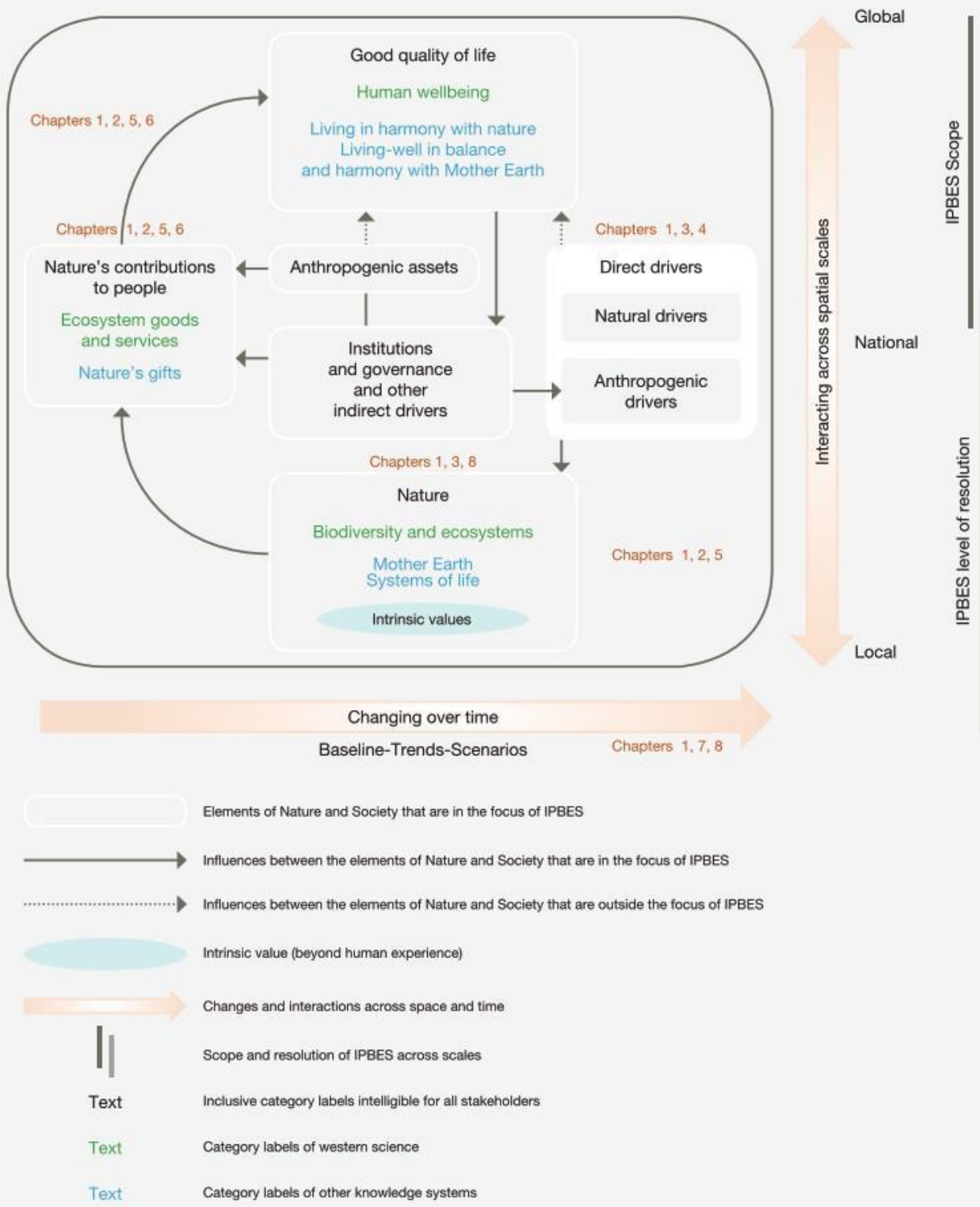
Figure 2. A framework showing how ecosystem services can be integrated into decision making. One could link any two ovals, in any direction; we present the simplest version here.

6/ Un modèle conceptuel qui met en avant les bouclages entre la fourniture en SE et les actions de gestion sur les écosystèmes (Daily et al. 2009)



7/ Le ESF (Ecosystem Services Framework), un cadre conceptuel appliqué à la cartographie et les approches prospectives mobilisant le concept de SE (Turner and Daily 2008)

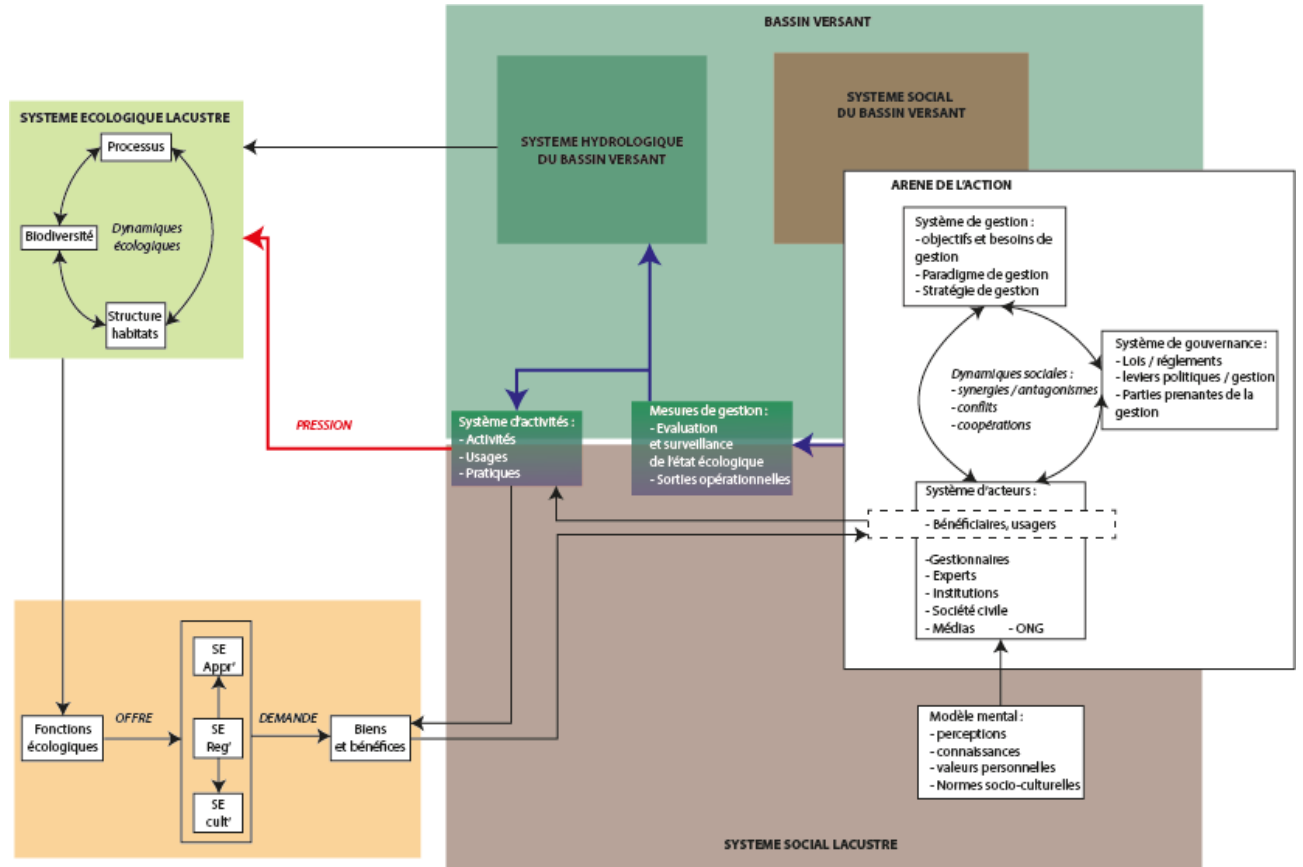
The boxes relate to elements of people and nature, and the thin arrows to the relationships between them. The broad arrows represent recognition that the system has spatial variation, multiple scales, and dynamics over time. The connections of the eight chapters of this thematic assessment to the Conceptual Framework are indicated in red. Source: Diaz *et al.* (2015).



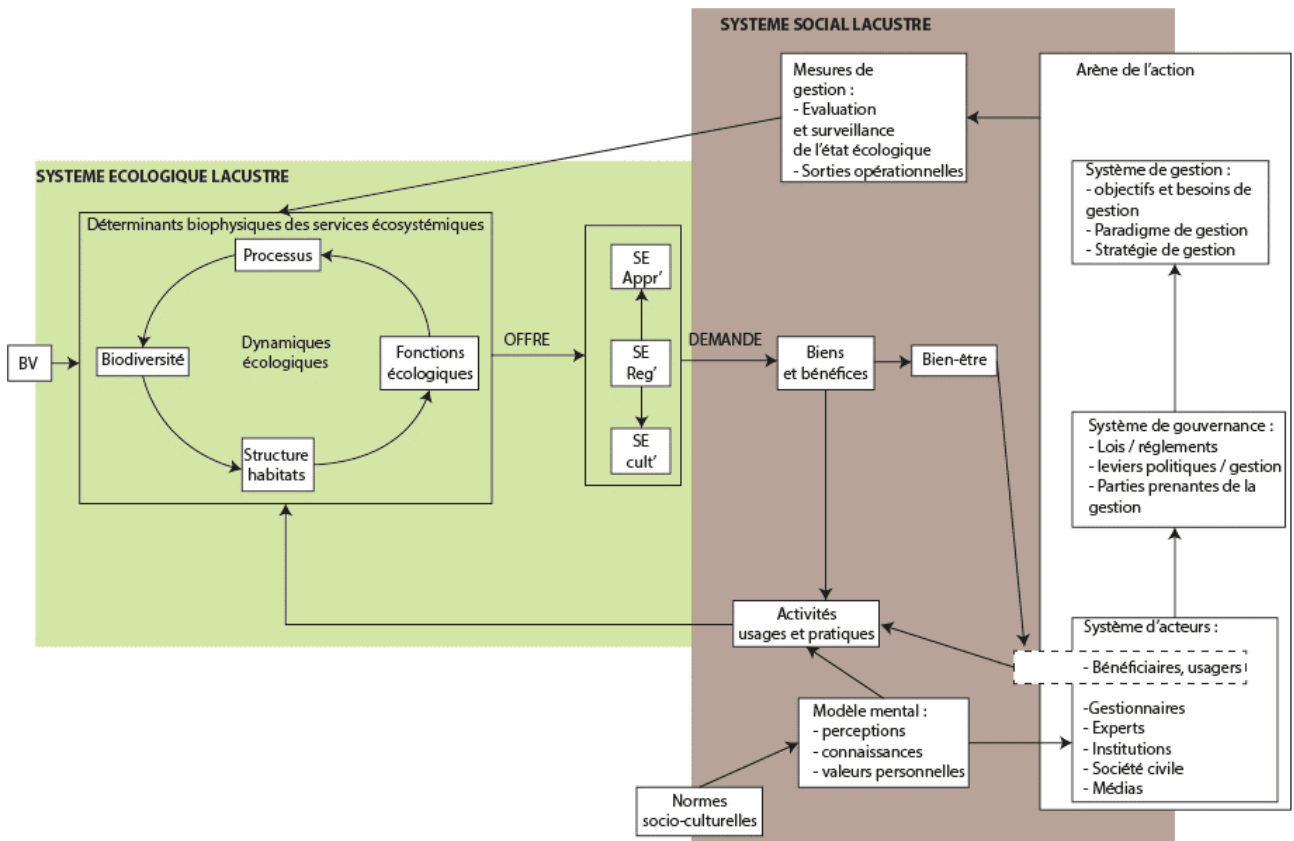
8/ Le cadre conceptuel proposé par l'IPBES pour caractériser les « contributions de la nature pour l'Homme » (IPBES 2018c)

Annexes chapitre 4

Annexe 4-1 : Les différentes versions du modèle conceptuel du SSE des grands lacs et son évolution

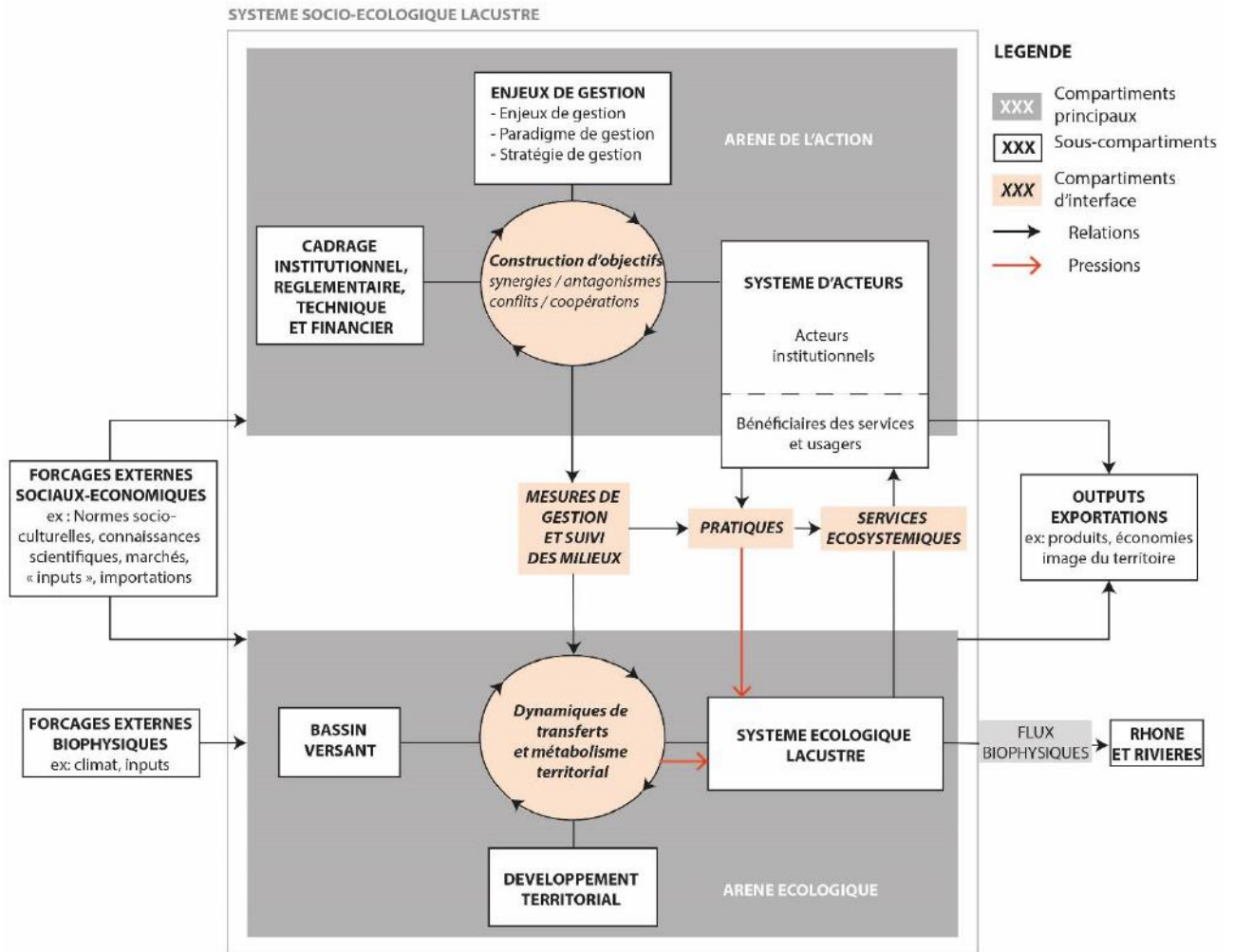


Version 1 janvier 2017 : Identification des composantes du modèle



Version 2 mars 2017 : Mise en évidence de dynamiques écologiques et sociales

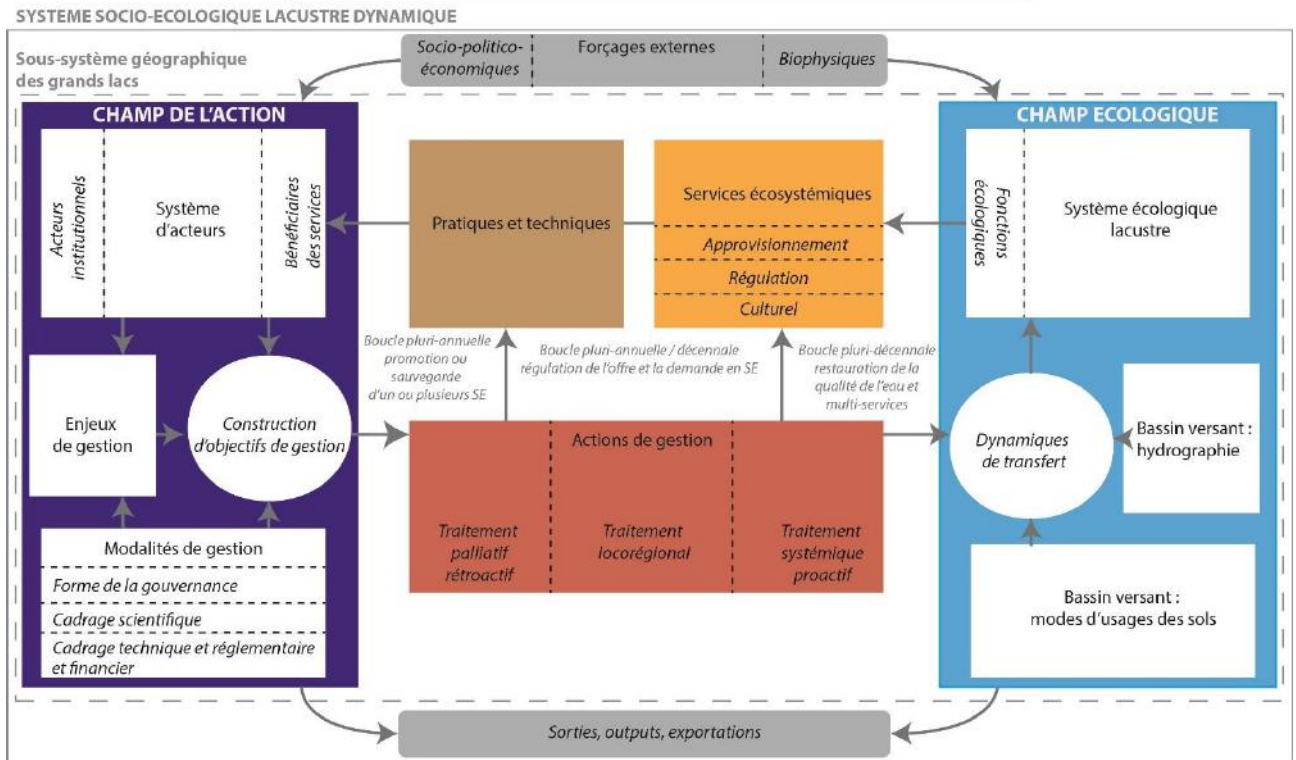
Représentation du système socio-écologique associé aux grands lacs alpins



Réalisation : Yoann Baulaz, 2017

Version 3 juin 2017 : Changement de l'organisation du modèle, identification de deux arènes écologiques et de l'action, de trois compartiments d'interface

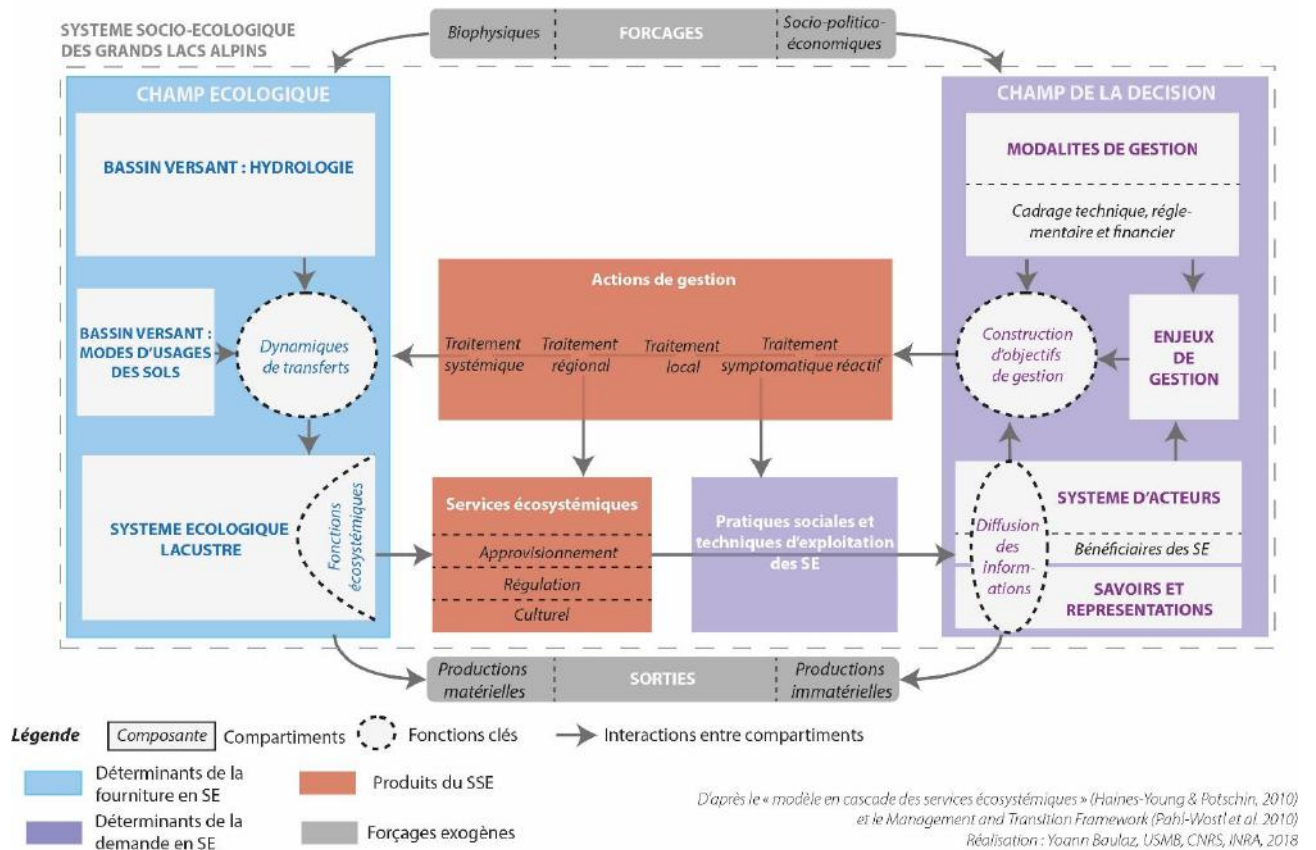
Représentation du système socio-écologique associé aux grands lacs alpins



Réalisation : Yoann Baulaz, USMB, CNRS, INRA, 2018

Version 4 septembre 2018 : Version après présentation aux gestionnaires des grands lacs alpins et scientifiques, changements dans la représentation, identification de composantes au sein des compartiments

Représentation du modèle SOALP (Social ecological systems, Alpine Lakes and Pollutions)

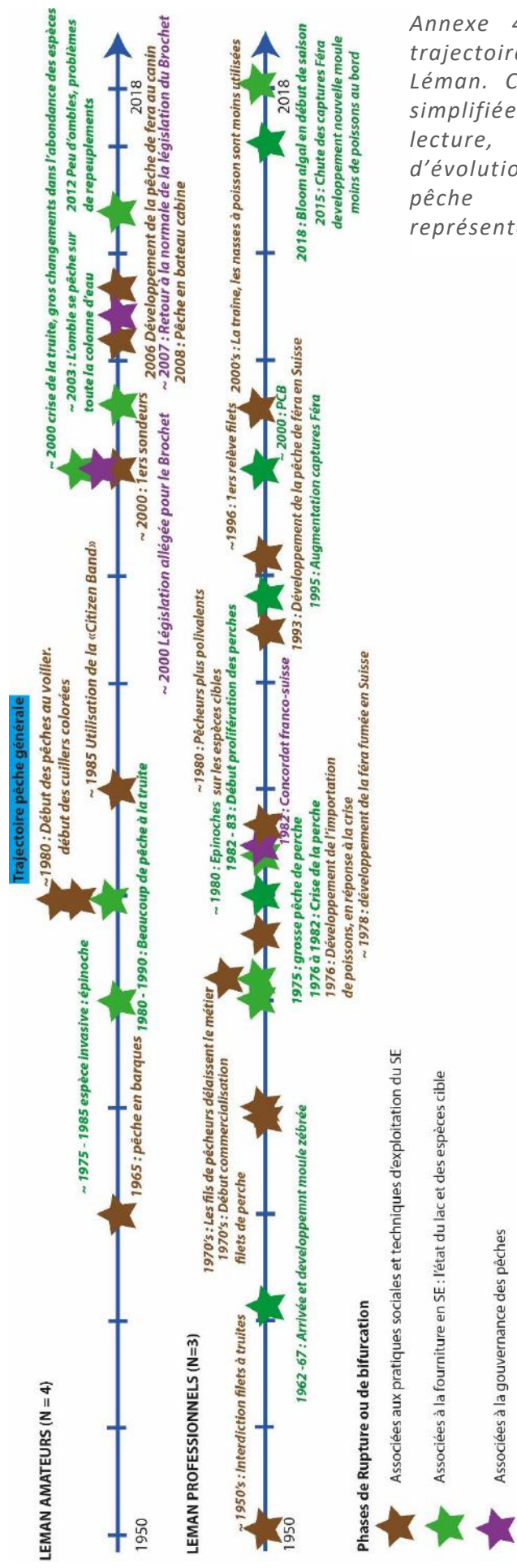


Version 5 finale décembre 2018 : Simplification et identification de quatre fonctions clés du modèle

Annexe 4-2 : Liste des experts de validation des analyses et d'aide à la construction des modèles conceptuels

Nom de l'expert	Structure	Domaine d'expertise	Informations recherchées pour la thèse
<i>Alain Gagnaire</i>	ASL	Ancien secrétaire de l'ASL (Association pour la Sauvegarde du Léman)	Importance de l'ASL dans la sauvegarde du Léman - chronique de la restauration
<i>Alain Prigent</i>	Médecin généraliste indépendant	Médecin qui a travaillé au bord du Léman	Exploration des relations SE – dis-services et santé
<i>Chloé Goulon</i>	SHL - INRA	Halieutique - suivis des pêches dans les grands lacs alpins	Validation des analyses sur le SE pêche
<i>Emmanuel Naffrechoux</i>	USMB	Chimie de l'environnement	Impacts des PCB sur les grands lacs et leurs SE
<i>Géraldine Pflieger</i>	Université de Genève - Chaire de l'eau UNESCO	Enseignante chercheur - droit	Droit et gestion du Léman
<i>Jérôme Poulenard</i>	USMB - CNRS	Enseignant chercheur - pédologie	Approche systémique des relations BV - lacs
<i>Laurent Touchart</i>	Université Orléans	Géographie environnementale - plans d'eau	Validation du modèle conceptuel SOALP

<i>Michel Meybeck</i>	Université de la Sorbonne - CNRS	Biogéochimie - écosystèmes aquatiques	Validation du modèle conceptuel SOALP - chroniques des relations Société - écosystèmes aquatiques
<i>Orlane Anneville</i>	SHL - INRA	Limnologie - suivi du Léman	Validation des chroniques de l'eutrophisation du Léman
<i>Sandra Lavorel</i>	Université Grenoble - CNRS	Directrice de recherche - écologie	Concept de service écosystémique
<i>Stephan Jacquet</i>	SHL - INRA	Ecologie microbienne aquatique et réseaux trophiques	Validation des chroniques des pollutions du lac du Bourget
<i>Véronica Mitroï</i>	CNRS	Post doc - géographie	Etudes en sciences humaines et sociales sur les systèmes lacustres
<i>Yves Perrodin</i>	Université de Lyon 1 - CNRS	Directeur de recherche - hydrobiologie	Relations hydrologiques entre BV - lacs ; SE d'assainissement et approvisionnement en eau potable



Annexe 4-4 : Exemple de trajectoire globale pour le Léman. Cette version a été simplifiée par souci de lecture, les données d'évolution des captures de pêche n'ont pas été représentées ici.

Annexe 4-5 : Liste des experts techniques rencontrés dans le cadre de l'étude sur le SE d'approvisionnement en eau potable et l'évolution de l'assainissement

Nom de l'expert	Structure	Domaine d'expertise	Informations recherchées pour la thèse
<i>Christian Lepinard</i>	Dir. Adjoint agglomération Annecy, Service des eaux, déchets et environnement	Gestion de l'eau potable et assainissement	Informations techniques sur les systèmes d'approvisionnement en eau potable
<i>Cyrille Girel</i>	CISALB	Chargé de mission qualité de l'eau et assainissement	Assainissement dans le BV du lac du Bourget
<i>Lucien Chessel</i>	Syndicat des Eaux Moises et Voirons	Gouvernance	Gestion de l'eau potable et distribution
<i>Michel Amoudry</i>	Conseiller municipal de la ville d'Annecy - Président association amis du vieil Annecy	Histoire de la restauration	Histoire de la gestion de l'eau potable et assainissement
<i>Stéphane Pralong</i>	CC pays d'Evian	Responsable de l'assainissement de la CC	Assainissement dans le BV du Léman, partie française
<i>Thierry Billet</i>	SILA - Maire adjoint Annecy	Gestion lac d'Annecy - commission lac et prospective	Organisation de la gouvernance du lac, relations entre acteurs

<i>Vincent Bourmaud</i>	Responsable de la STEP Thonon-les-Bains	Fonctionnement des STEP	Assainissement dans le BV du Léman, partie française
-------------------------	---	-------------------------	--

Annexe 4-6 : Liste des acteurs du tourisme rencontrés dans le cadre de la caractérisation des SE culturels

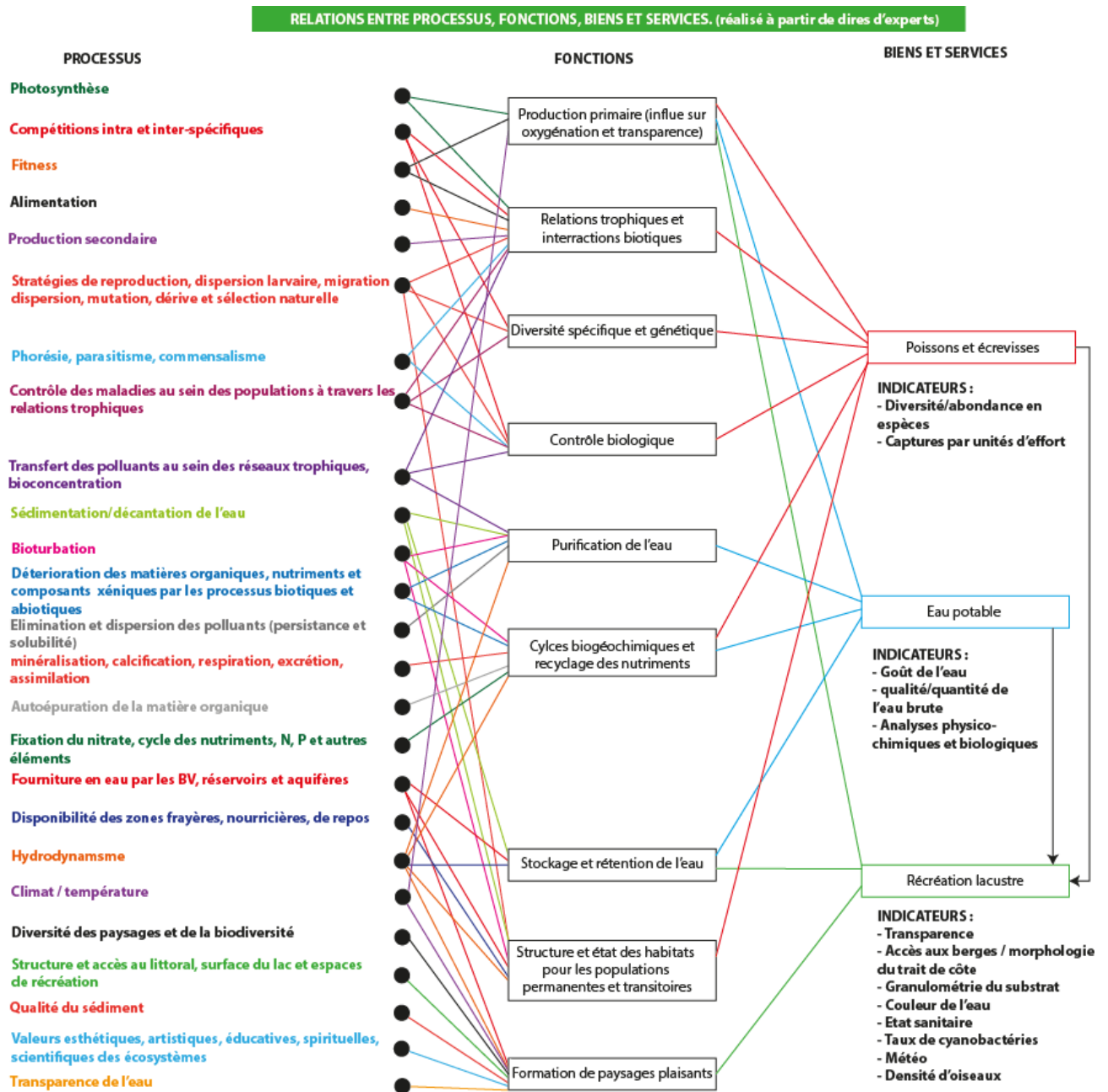
Nom de l'expert	Structure	Domaine d'expertise	Informations recherchées pour la thèse
<i>Carole Duverney</i>	Savoie Mont Blanc Tourisme	Gestion du tourisme	Entretien SE culturels
<i>Denis Clouet</i>	Association des amis de la Chautagne, du Canal, du lac, associés pour un meilleur environnement (ACCLAME)	Jeux d'acteurs gestion du tourisme	Entretien SE culturels
<i>Dominique Picard</i>	Club GSRL	Plongée Bourget	Entretien SE culturels
<i>Guillaume Simon</i>	Moniteur de plongée indépendant	Plongée au lac d'Annecy	Entretien SE culturels
<i>Guy Reant</i>	Club des plaisanciers du lac du Bourget	Nautisme Bourget	Entretien SE culturels
<i>Jacques Rey</i>	Maire de Sevrier	Gestion	Usages - gouvernance et jeux d'acteurs
<i>Jean-Pierre Crouzat</i>	Administrateur de la FRAPNA - Rhône Alpes	Conservation des espaces naturels	Entretien SE culturels

<i>Julien Michel</i>	Président du club Profil Plongée	Plongée au lac d'Annecy	Entretien SE culturels
<i>Karine Lambersens</i>	DDT 74	Gouvernance des grands lacs alpins	Champ de la décision - actions de gestion - jeux d'acteurs
<i>Monique Curtelin</i>	ACCLAME	Jeux d'acteurs gestion du tourisme	Entretien SE culturels
<i>Nicola Bodin</i>	Président de l'Internautique de Saint Jorioz	Nautisme Annecy	Entretien SE culturels
<i>Pierre Billoud</i>	Club des plaisanciers du lac du Bourget	Nautisme Bourget	Entretien SE culturels
<i>Sylvie Normand</i>	CA Grand Lac	Responsable service Ports et plages	Entretien SE culturels
<i>Thierry Pothet</i>	Président club des Dauphins annéciens	Plongée au lac d'Annecy	Entretien SE culturels
<i>Thomas Gagnieu</i>	Moniteur au cercle de voile de Sevrier	Voile Annecy	Entretien SE culturels
<i>Vincent Roux</i>	Ancien Président du club Eau libre	Plongée au lac d'Annecy	Entretien SE culturels
<i>Julie Legros</i>	Directrice OT Thonon-les-Bains	Gestion du tourisme	Champ de la décision - actions de gestion - jeux d'acteurs

Annexe 4-7 : Liste des experts participant aux ateliers sur l'évaluation de la fourniture et demande en SE

Nom de l'expert	Structure	Domaine d'expertise
<i>Chloé Goulon</i>	SHS - INRA	Halieutique
<i>Dominique Trevisan</i>	SHS - INRA	Relations BV - lacs
<i>Frédéric Rimet</i>	SHS - INRA	Phytoplancton et zooplancton
<i>Isabelle Domaizon</i>	SHS - INRA	Suivi du Léman - réseaux trophiques - paléolimnologie
<i>Jean Guillard</i>	SHS - INRA	Halieutique
<i>Jean-Marcel Dorioz</i>	SHS - INRA	Relations BV - lacs
<i>Orlane Anneville</i>	SHS - INRA	Suivi du Léman
<i>Stephan Jacquet</i>	SHS - INRA	Bactériologie - microbiologie

Annexe 4-8 : Résultats de l'atelier 2 sur la fourniture en SE des grands lacs alpins



Associations entre processus et fonctions qui déterminent les biens eau potable, poisson, récréation lacustre

Conception : dires d'experts issus de l'atelier Carrtel2 du 24/02/17 et Costanza et al, 1997; Fletcher et al, 2011 ; De Groot et al, 2010 ; Schoenn et al, 2013

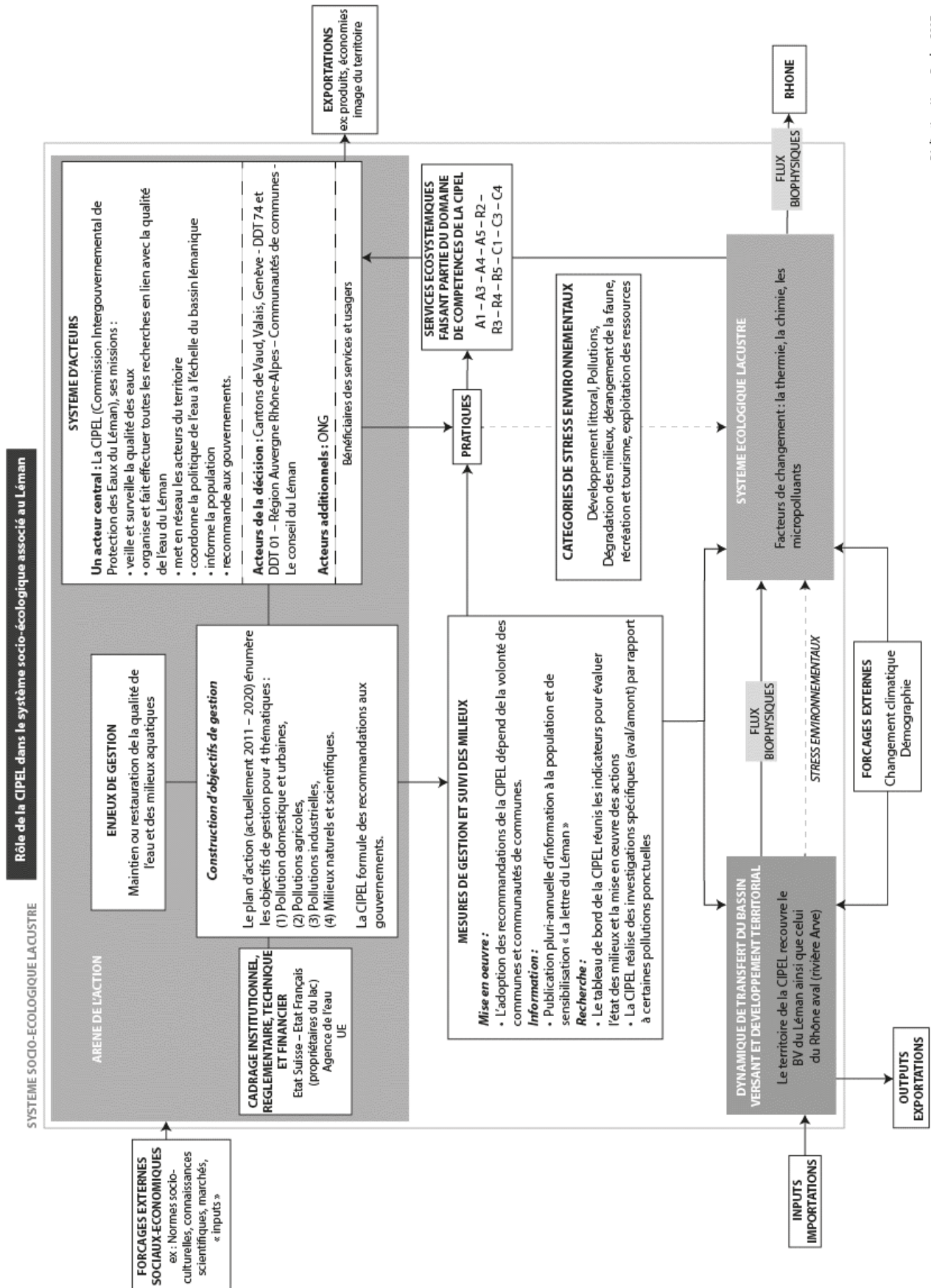
Réalisation : Yoann Baulaz, Carrtel, 2017

Annexe 4-9 : Liste des experts participant à l'atelier d'évaluation des SE culturels

Nom de l'expert	Structure	Domaine d'expertise
<i>Alice Nikolli</i>	EDYTEM - CNRS	Droit des lacs
<i>Christophe Gauchon</i>	EDYTEM - CNRS	Tourisme de montagne
<i>Fabien Hobléa</i>	EDYTEM - CNRS	Tourisme lacustre
<i>Laura Rudzewicz</i>	EDYTEM - CNRS	Tourisme lacustre
<i>Lionel Laslaz</i>	EDYTEM - CNRS	Tourisme de montagne
<i>Mélanie Duval</i>	EDYTEM - CNRS	Tourisme lacustre - histoire
<i>Véronique Peyrache-Gadeau</i>	EDYTEM - CNRS	Economie - innovation territoriale

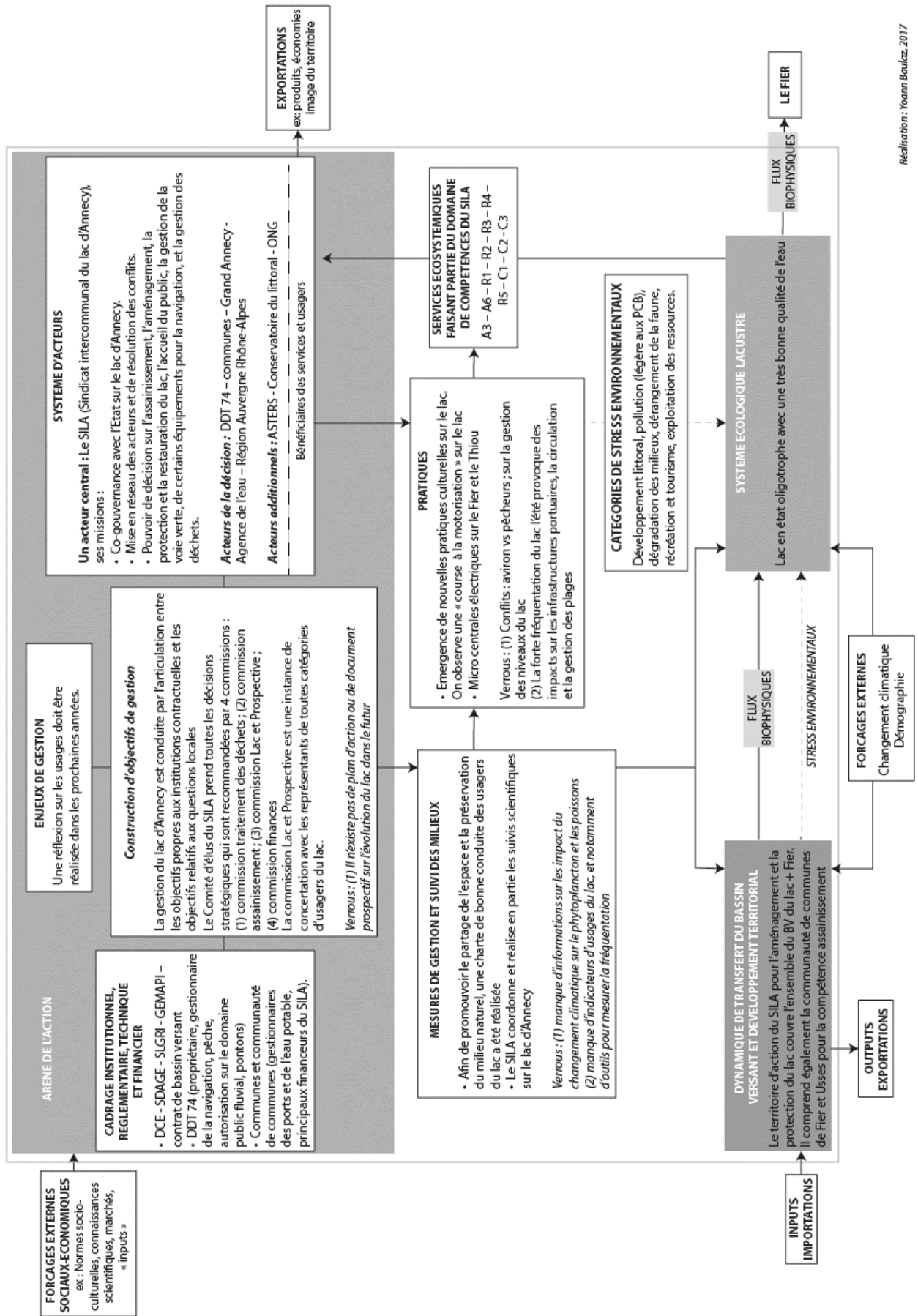
Annexe 4-10 : Liste des experts techniques impliqués dans la gestion des grands lacs alpins

Nom de l'expert	Structure	Domaine d'expertise	Informations recherchées pour la thèse
<i>Adrien Oriez</i>	CIPEL	Gouvernance Léman	Champ de la décision - actions de gestion - jeux d'acteurs
<i>Damien Zanella</i>	SILA	Gouvernance lac d'Annecy	Champ de la décision - actions de gestion - jeux d'acteurs
<i>Jacques Rey</i>	Maire de Sevrier	Gestion	Usages - gouvernance et jeux d'acteurs
<i>Karine Lambersens</i>	DDT 74	Gouvernance des grands lacs alpins	Champ de la décision - actions de gestion - jeux d'acteurs
<i>Ludovic Ayot</i>	CC lac d'Aiguebelette	Gouvernance lac d'Aiguebelette	Différences de gestion entre le lac d'Aiguebelette et les autres lacs
<i>Manuel Bouron</i>	CENS	Gouvernance lac d'Aiguebelette	Différences de gestion entre le lac d'Aiguebelette et les autres lacs
<i>Marc Pero</i>	Agence de l'eau	Gouvernance des grands lacs alpins	Champ de la décision - actions de gestion - jeux d'acteurs
<i>Sébastien Cahera</i>	CISALB	Gouvernance lac du Bourget	Champ de la décision - actions de gestion - jeux d'acteurs
<i>Véronique Beauvais</i>	Conservatoire des Espaces naturel 73 (CENS)	Gouvernance lac d'Aiguebelette	Différences de gestion entre le lac d'Aiguebelette et les autres lacs

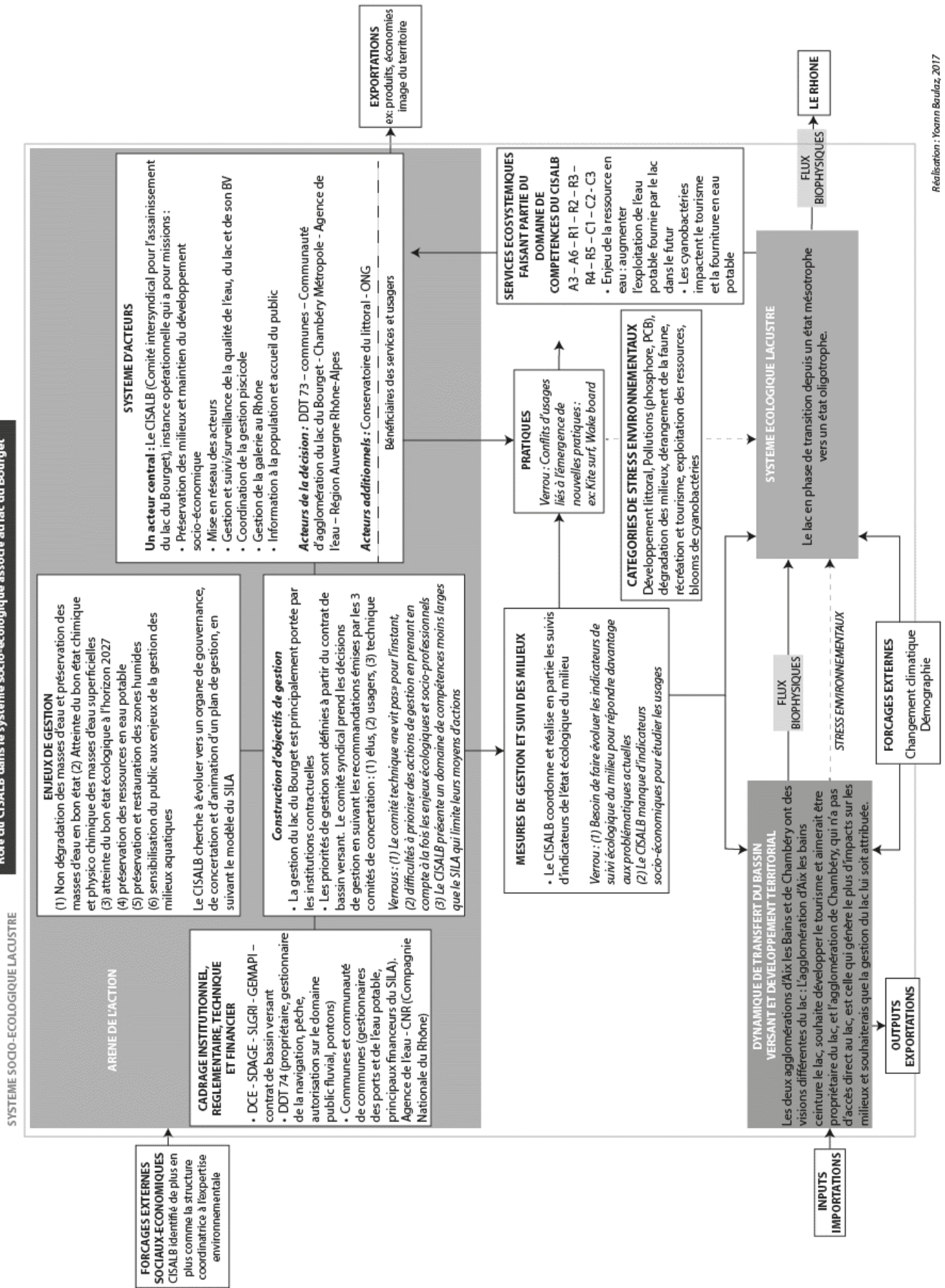


Rôle du SILA dans le système socio-écologique associé au lac d'Annecy

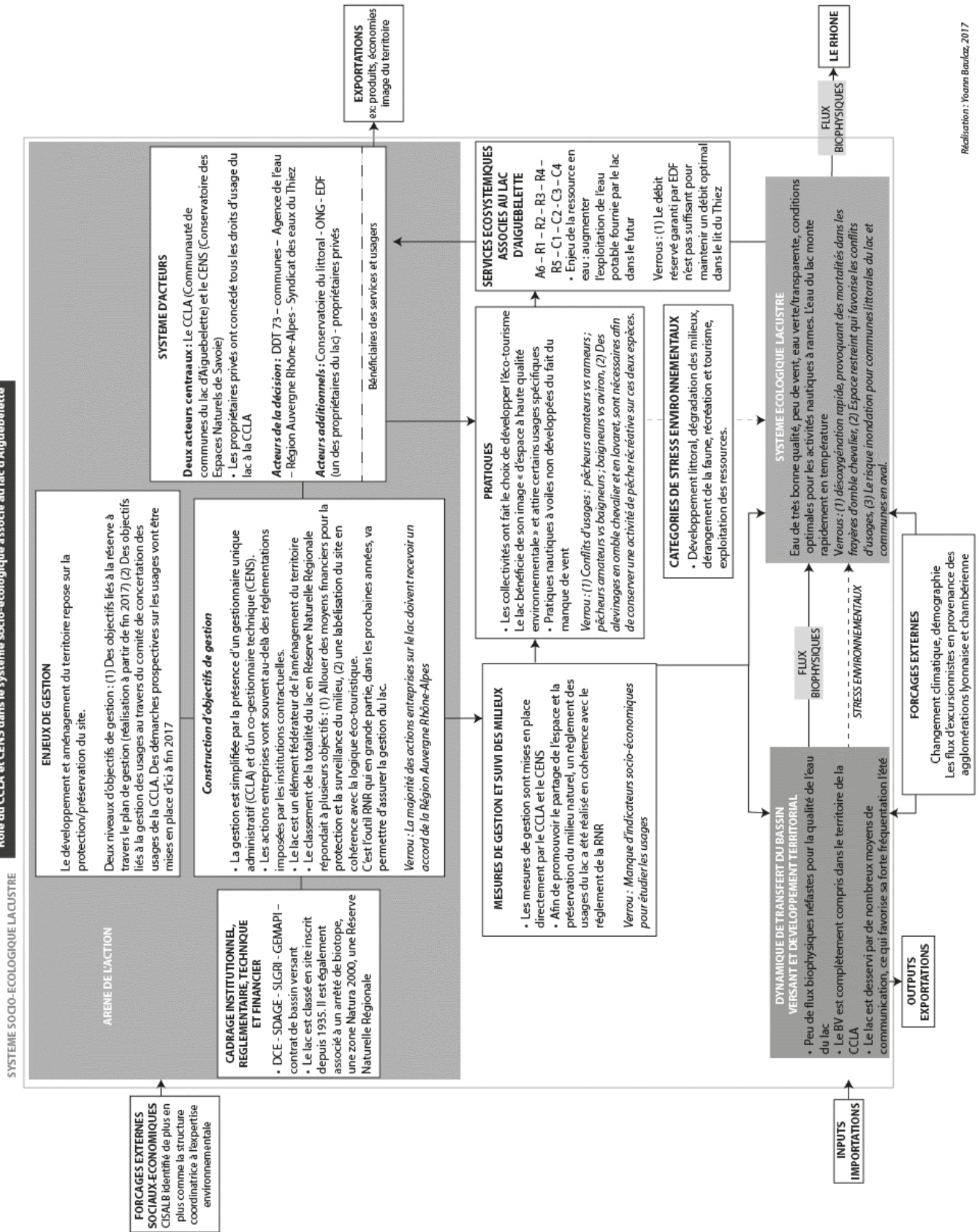
SYSTEME SOCIO-ÉCOLOGIQUE LACUSTRE



Rôle du CISALB dans le système socio-écologique associé au lac du Bourget



Rôle du CCLA et CENS dans le système socio-écologique associé au lac d'Aiguebelette

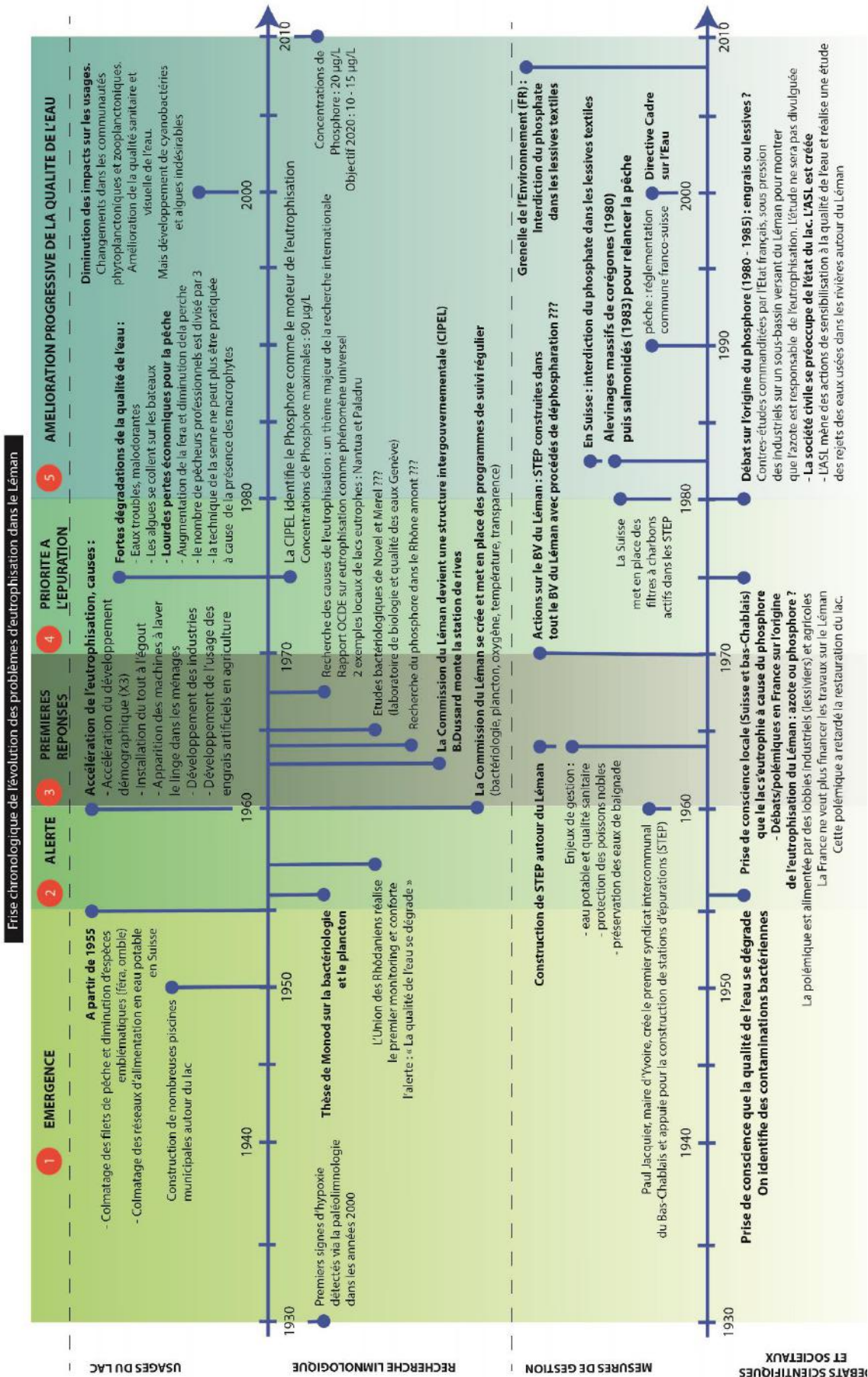


Annexe 4-12 : Liste des experts impliqués dans les études rétrospectives des impacts de pollutions et réponses sociétales

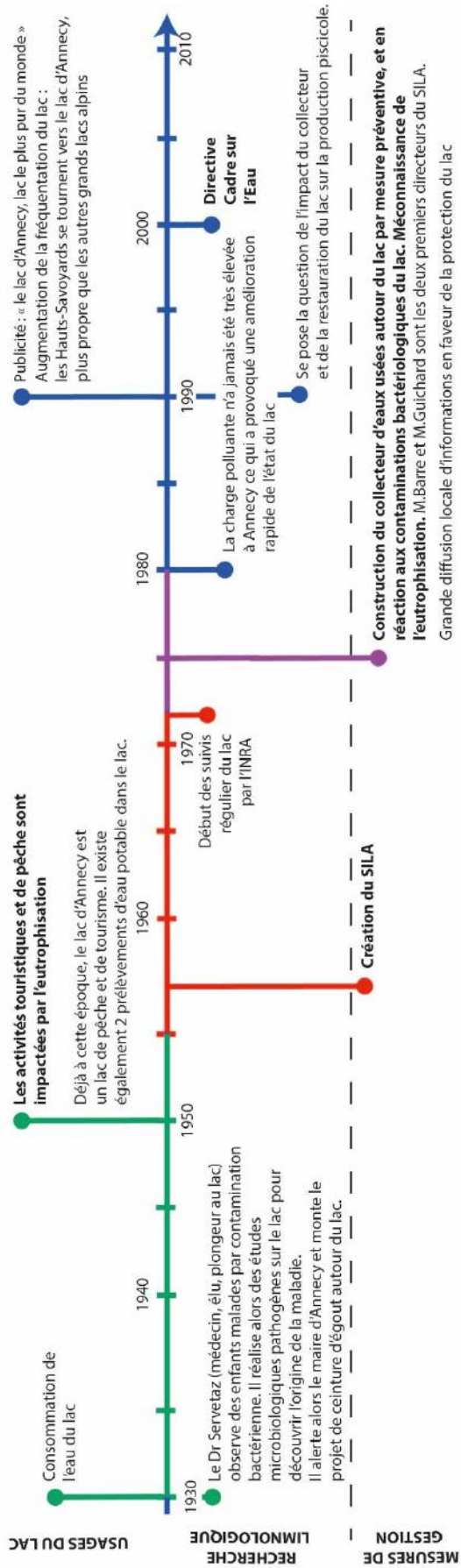
Nom de l'expert	Structure	Domaine d'expertise	Dates d'implication suivis lacs
<i>André Ferhi</i>	CRG	Biochimie zootopique ; hydrodynamique ; BV - traçages isotopiques	1983
<i>Brigitte Trevisan</i>	SHL - INRA	Science des sols ; hydrobiologie ; biologie moléculaire	1989
<i>Christian Gillet</i>	SHL - INRA	Relations poissons - pollutions	1983
<i>Gérard Paolini</i>	Comité d'agglomération Grand lac - CRG	Technicien suivi lac Bourget	1984
<i>Jacques Feuillade</i>	SHL - INRA	Eutrophisation du lac de Nantua ; Plancton/algues ; Cyanobactéries	1968
<i>Jean Pelletier</i>	SHL - INRA	Production primaire - eutrophisation	1964
<i>Jean-Marcel Dorioz</i>	SHL - INRA	Phosphore ; pollution ; BV ; mesure charge externe au lac	
<i>Jean-Paul Moille</i>	SHL - INRA	Technicien suivi des lacs ; Sondes, prélèvements, dosages chlorophylle	1973
<i>Mauricette Feuillade</i>	SHL - INRA	Physiologie des algues ; lac de Nantua ; recherche des impacts de la toxicité liée à Tchernobyl	1968
<i>Nadine Angelli</i>	SHL - INRA	Epuration/filtration par les macrophytes ; Relations proies/prédateurs	1985

<i>Paul Blanc</i>	SHL - INRA	Suivi chimique des lacs ; amélioration des méthodes d'analyse pour la CIPEL	1972
-------------------	------------	---	------

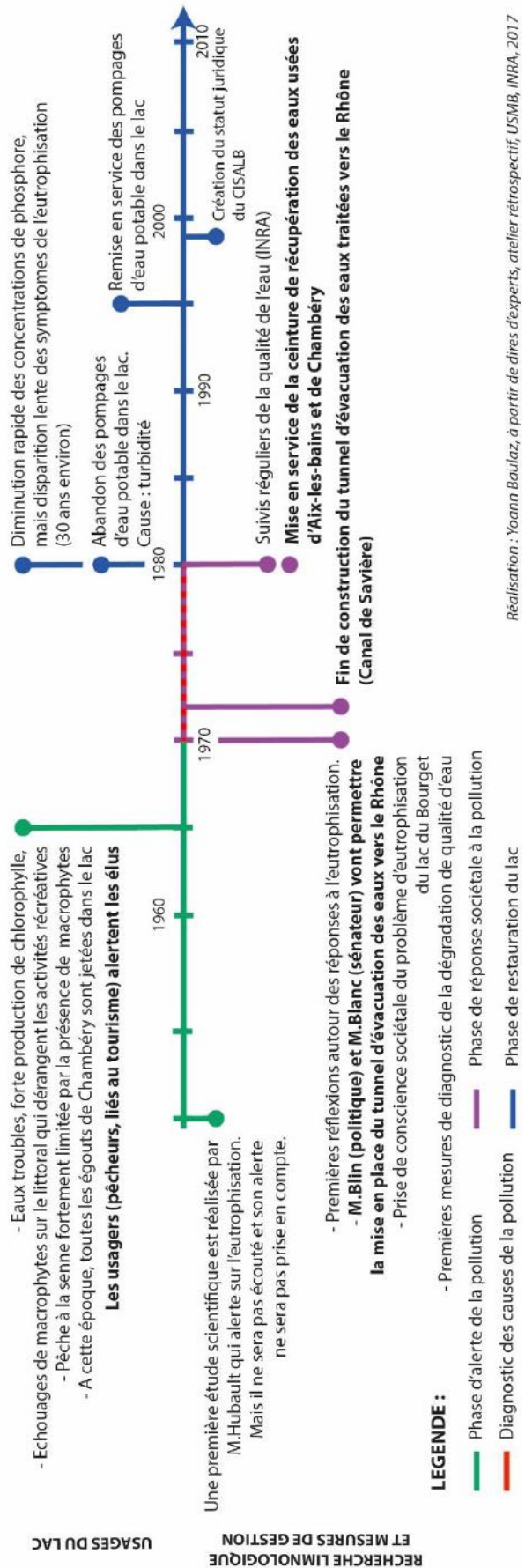
Annexe 4-33 : Frises résultat des ateliers rétrospectifs



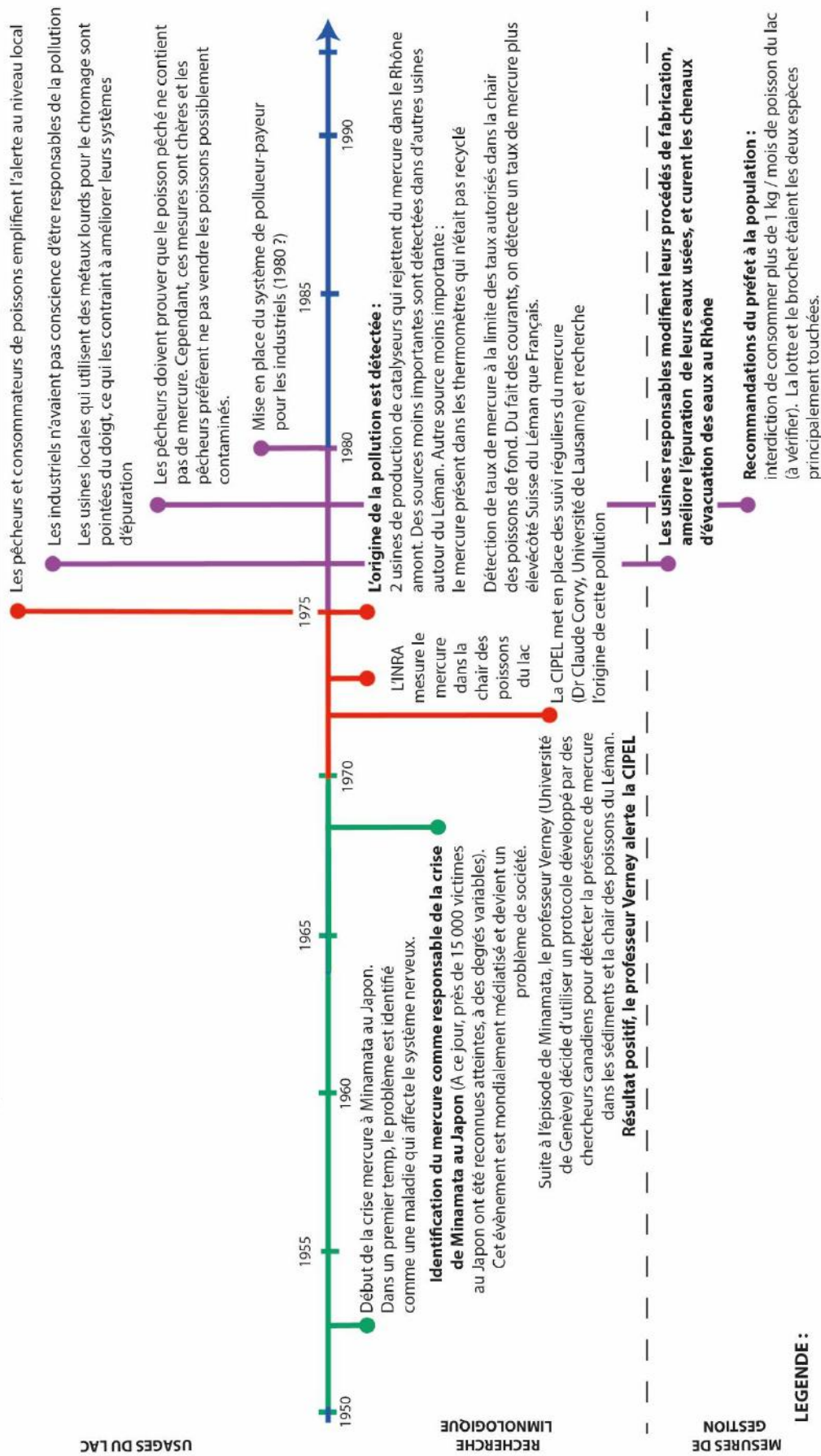
Frise chronologique de l'évolution des problèmes d'eutrophisation dans le Lac d'Annecy



Frise chronologique de l'évolution des problèmes d'eutrophisation dans le Lac du Bourget

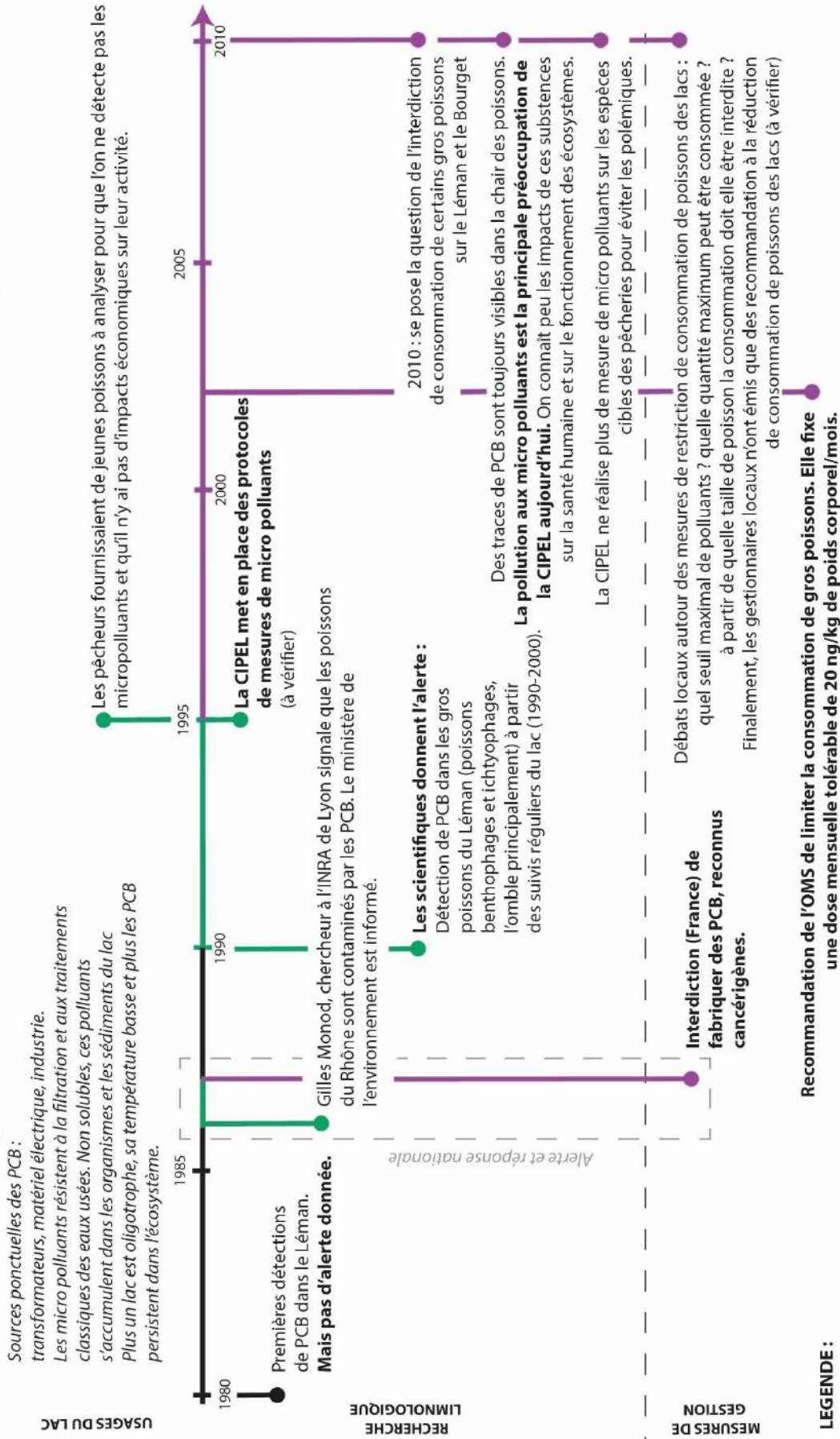


Frise chronologique de l'évolution des problèmes de pollution aux métaux lourds dans le Léman



Réalisation : Yoann Baulaz, à partir de dires d'experts, atelier rétrospectif, USMB, INRA, 2017

Frise chronologique de l'évolution des problèmes liés aux micropolluants dans les grands lacs alpins



Réalisation : Yoann Baulaz, à partir de dires d'experts, atelier rétrospectif, USMB, INRA, 2017

Annexe 4-14 : Liste des sources d'archives mobilisées pour l'étude

Type source	Titre	Année de publication	Auteur, source
<i>Livre</i>	L'eau, vie d'un lac alpin	1991	Servettaz
<i>Rapport</i>	Des pionniers de l'environnement : émergence et institutionnalisation de la politique de sauvetage du lac d'Annecy, de l'après-guerre aux années 1970 (Mémoire)	2004	Pietu
<i>Rapport</i>	Etude bactériologique des eaux du lac d'Annecy octobre 1966 - décembre 1967	1967	Institut pasteur
<i>Livre</i>	100 années de passion pour la pêche de loisir au lac d'Annecy	2006	ALP
<i>Article</i>	Sedimentological and geochemical records of past trophic state and hypolimnetic anoxia in large, hard-water Lake Bourget, French Alps	2010	Giguet-Covex et al.
<i>Article</i>	The proliferation of the toxic cyanobacterium <i>Planktothrix rubescens</i> following restoration of the largest natural French lake (Lac du Bourget)	2005	Stephan et al, 2005
<i>Article</i>	Evolution de paramètres clés indicateurs de la qualité des eaux et du fonctionnement écologique des grands lacs périalpins (Léman, Annecy, Bourget) : Etude comparative de trajectoires de restauration post-eutrophisation	2012	Jacquet et al, 2012
<i>Article</i>	Les couleurs du lac du Bourget : un régal pour le peintre, une alerte pour le biologiste	2014	Jacquet et al,
<i>Film</i>	La pollution des lacs	1972	INA
<i>Rapport</i>	Suivi lac Bourget 2017	2018	CISALB
<i>Article presse</i>	Il dépollue le lac de Lamartine	28/071973	Paris Match,
<i>Rapport</i>	Impact anthropique et environnement sur le site du lac du Bourget	1995	Jardot

<i>Article presse</i>	Sauver l'eau : la dépollution des lacs et des plans d'eau	05/05/1992	Le quotidien du maire
<i>Article Presse</i>	L'eau vive... Ce bien qui nous est si cher	1977	Le Messager
<i>Article Presse</i>	Une manne ministérielle de 150 millions de centimes	24/09/1982	DL
<i>Article Presse</i>	Les petits tuyaux font les grandes pollutions	1990	Le Messager
<i>Article Presse</i>	Léman : un constat de convalescence non justifié	01/02/1983	DL
<i>Article Presse</i>	Lessives sans phosphates à chavannes-des-bois : Une démonstration convaincante	13/01/1983	24 heures
<i>Article Presse</i>	Le Léman malade de ses affluents : à la recherche du remède miracle	1982	?
<i>Article Presse</i>	Le lac Léman mérite la plus grande attention	28/02/1982	DL
<i>Article Presse</i>	Inciter le consommateur à un meilleur dosage des lessives	12/06/1981	Le Messager
<i>Article Presse</i>	L'aide du ministère de l'environnement pour la protection du Léman	18/05/1982	DL
<i>Article Presse</i>	Lessives plus propres	?	?
<i>Article Presse</i>	Le lac Léman menacé par la lessive	16/10/1983	Mardi dimanche
<i>Article Presse</i>	Thonon : sauver le Léman, une affaire nationale	01/10/1982	Courrier savoyard
<i>Article Presse</i>	La lente eutrophisation de nos lacs	21/06/1981	Le messager
<i>Article Presse</i>	Un lac pour l'an 2000 : des sommités internationales dans le débat.	1990	Messenger
<i>Magazine</i>	Etat du Léman : plutôt sur la bonne voie, mais attention	1989	Lémaniques n°1

<i>Article Presse</i>	Nous n'avons qu'un Léman	1987	Savoie Liberté, n°56
<i>Article Presse</i>	Léman : on "phosphore" à la cité des sciences"	29/05/1987	Le Messager
<i>Article Presse</i>	Les phosphates des lessives en question	28/05/1987	DL
<i>Article Presse</i>	Des eaux plus bleues pour un lège aussi blanc	nov-89	Combat nature, n°87
<i>Rapport</i>	Recommandations	1986	CIPEL ; 1986
<i>Article Presse</i>	Pour des lessives "sans"	19/08/1986	Messenger
<i>Article Presse</i>	L'ASL à la rencontre de la montagne dans le val d'Abondance	16/11/1986	DL
<i>Lettre d'information</i>	A propos de l'état du Léman et des nouvelles lessives sans phosphates	1986	ASL comm. interne
<i>Article Presse</i>	Laver les soupçons	24/01/1987	Le Monde
<i>Article Presse</i>	Le Léman, c'est aussi l'affaire de la montagne	09/08/1987	DL
<i>AG ASL</i>	Quel bilan pouvons-nous dresser après ces 10 années d'activités	1990	ASL comm interne
<i>AG ASL</i>	Rapport d'activité 1992 - 1993	1993	ASL comm interne
<i>Article Presse</i>	Réduire la pollution du Léman	23/10/1991	DL
<i>Magazine</i>	La lente guérison du lac Léman	nov-91	Que choisir, 277
<i>Article Presse</i>	Un malade en sursis	01/08/1992	DL
<i>Article Presse</i>	Au pays de l'eau pure	mars-93	DL

<i>Article</i>	Evolution de paramètres clés indicateurs de la qualité des eaux et du fonctionnement écologique des grands lacs périalpins (Léman, Annecy, Bourget) : Etude comparative de trajectoires de restauration post-eutrophisation	2012	Jacquet et al,
<i>Article Presse</i>	Médicaments dans le lac : une pollution invisible	15/06/2017	Le Messager
<i>Article presse</i>	Ceux qui polluent le Rhône	entre 96 et 2001	?
<i>Article Presse</i>	Des médicaments et du plastique dans le Léman	14/09/2017	DL
<i>Littérature grise</i>	Table de concertation régionale du lac Saint Pierre. (2016). La qualité de l'eau au lac Saint-Pierre, actes du forum TCRLSP.	2016	TCRLSP
<i>Article scientifique</i>	L'eau qui coule dans nos terres	2017	Aubert Michaud, IRDA
<i>Littérature grise</i>	Table de concertation régionale du lac Saint Pierre. (2017). <i>Cohabitation agriculture-faune en zone littorale au lac Saint-Pierre.</i>	2017	TCRLSP
<i>Littérature grise</i>	<i>Qualité de l'eau des tributaires du lac Saint-Pierre : évolution temporelle 1979-2014 et portrait récent 2012-2014.</i>	2014	Marc Simoneau
<i>Littérature grise</i>	<i>Le lac Saint-Pierre, un joyau à restaurer.</i>	2013	MDDEFP
<i>Article scientifique</i>	Cumulative impacts of hydrology and human activities on water quality in the St. Lawrence River (Lake Saint-Pierre, Quebec, Canada). <i>Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences</i> , 65(6), 1165–1180.	(2008).	Hudon, C., & Carignan, R.
<i>Mémoire maîtrise</i>	Les enjeux de gestion agriculture-faune au lac saint pierre : application de la méthode Q à l'analyse des opinions des acteurs	2018	Lévesque, Ann
<i>Article scientifique</i>	Modifications anthropiques sur 150 ans au lac Saint-Pierre : une fenêtre sur les	2003	Côté, J.-P., & Morin, J.

	transformations de l'écosystème du Saint-Laurent. VertigO, 4 (Volume 4 Numéro 3)		
<i>Article scientifique</i>	Changements de l'occupation du sol dans la plaine inondable du lac Saint-Pierre entre les années 1950 et 1997. Le Naturaliste Canadien - La Société Provancher d'Histoire Naturelle Du Canada, 140(1), 42.	2016	Dauphin, D., & Jobin, B.
<i>Littérature grise</i>	Charges de phosphore, d'azote et de matières en suspension à l'embouchure des rivières du Québec – 2009 à 2012 (Ministère). Québec.	2017	Patoine, M. M.
<i>Article scientifique</i>	Les cent-îles du lac Saint-Pierre. Retour aux sources et nouveaux enjeux	2000	Rodolphe De Koninck
<i>Article scientifique</i>	Une problématique d'éducation à la santé environnementale au Lac Saint-Pierre – Exploration de la dimension socioculturelle. Education Relative à l'environnement, 5, 15–32.	(2005).	Godmaire, H., & Sauvé, L.
<i>Cours</i>	Module 8 : Survol de la législation reliée à l'agroalimentaire québécois. In Mémento de l'agronome du Québec (p. 27).	2009	Ordre des agronomes du Québec.
<i>Article presse</i>	"C'est l'agriculture qu'il faut restaurer" - Richard Carignan	17/02/2014	Sciences Québec (SQ) - Joël Leblanc
<i>Article presse</i>	Le lac Saint-Pierre aura disparu dans 100 ans	09/04/2004	Le Devoir (LD) - Louis-Gilles Francoeur
<i>Rapport</i>	Réconcilier le soutien à l'agriculture et la protection de l'environnement : tendances et perspectives	2004	Denis Boutin
<i>Présentation</i>	Historique de l'aménagement des cours d'eau agricoles	2008	Richard Beaulieu
<i>Rapport</i>	Portrait hydro-géomorphologique d'un bassin versant agricole et processus de reméandrisation des cours d'eau Le cas de la Baie de Lavallière au Québec	2012	Clément Roux

<i>Article scientifique</i>	Relation entre les concentrations en phosphore particulaire et dissous dans les eaux de ruissellement et les teneurs en P total et assimilable des sols pour différentes cultures	2008	Giroux et al
<i>Colloque</i>	Les défis de l'agriculture de demain	2005	Préfontaine & Racicot
<i>Article scientifique</i>	Restauration des habitats du lac Saint-Pierre : un prérequis au rétablissement de la perchaude	2014	de la Chenelière, Véronik Brodeur, Philippe Mingelbier, Marc
<i>Article scientifique</i>	Temporal (1970 - 2016) changes in human pressures and wetland response in the St. Lawrence River (Québec, Canada)	2018	Hudon et al.
<i>Rapport</i>	Suivi scientifique du Léman dans le cadre des activités de l'APERA	1998	D.Gerdeaux
<i>Rapport</i>	Suivi scientifique du Léman dans le cadre des activités de l'APERA	1999	D.Gerdeaux
<i>Rapport</i>	Suivi scientifique du Léman dans le cadre des activités de l'APERA	2000	D.Gerdeaux
<i>Rapport</i>	Suivi scientifique du Léman dans le cadre des activités de l'APERA	2001	D.Gerdeaux
<i>Rapport</i>	Suivi scientifique du Léman dans le cadre des activités de l'APERA	2003	D.Gerdeaux
<i>Rapport</i>	Suivi scientifique du Léman dans le cadre des activités de l'APERA	2004	D.Gerdeaux
<i>Rapport</i>	Suivi scientifique du Léman dans le cadre des activités de l'APERA	2006	D.Gerdeaux, C.Crepeau
<i>Rapport</i>	Détermination du point de non-retour des larves de corégones du lac Léman	1988	N.Le Rouilly
<i>Presse</i>	Cormorans : chronique d'une régulation reportée	1997	La voix des torrens, 1997
<i>Presse</i>	Commission consultative 2014	2015	Les voix du Léman, 2015

<i>Presse</i>	Historique de l'apparition de la pêche	2015	Les voix du Léman, 2016
<i>Presse</i>	Règlement d'application	2015	Les voix du Léman, 2016
<i>Presse</i>	Impact économique de la pêche au Léman	2015	Les voix du Léman, 2016
<i>Presse</i>	Présentation de l'omble chevalier du Léman	2016	Les voix du Léman, 2017
<i>Article scient</i>	Exploitation et gestion des populations piscicoles lacustres	1996	D.Gerdeaux
<i>Presse</i>	Grand cormoran sur le Léman : peut-on encore croire ce que nous disent les ornithologues?	2018	Les voix du Léman, 2018 (Daniel Chollet)
<i>Presse</i>	Les peuples lacustres du néolithique, les premiers pêcheurs du Léman	2018	Les voix du Léman, 2018
<i>Presse</i>	Les labels pêche : la structuration d'un tourisme pêche de qualité	2018	Les voix du Léman, 2018
<i>Presse</i>	Pacage lacustre et action de l'APERA pour la restauration des salmonidés	2018	Les voix du Léman, 2018
<i>Presse</i>	Conséquences des changements de la qualité de l'eau du Léman et du réchauffement climatique sur les principales espèces du peuplement piscicole	2018	Les voix du Léman, 2018
<i>Article scient</i>	Parental effects on embryonic viability and growth in Arctic Charr (<i>Salvelinus alpinus</i>) at two incubation temperatures	2010	Janhunnen, Piironen, Peuhkuri
<i>Article scient</i>	The temperature dependence of embryonic development of grayling, Danube salmon, arctic char, and brown trout	1984	Jungwirth, Winkler
<i>Article scient</i>	Egg production in an Arctic charr (<i>Salvenilus alpinus</i> L.) brood stock : effects of temperature on the timing of spawning and the quality of eggs	1991	Gillet

<i>Presse</i>	Les pêcheurs inquiets du manque de féras dans leurs filets	27/04/2017	Le messager
<i>Presse</i>	Drôle de zèbre ce mollusque	19/02/1991	Dauphiné Libéré
<i>Presse</i>	Elevage d'ombles chevaliers: une première mondiale à Thonon	18/05/1979	Le messager
<i>Presse</i>	Le Rhône compte un nouveau poisson	23/02/1989	Le Messager
<i>Presse</i>	A Ripaille, la vie de château pour les corégones	12/10/1984	Messenger
<i>Presse</i>	Pour ré-empoissonner le Léman, l'élevage des corégones se fera en bassin.	07/10/1984	DL
<i>Presse</i>	Le Léman : le plus grand lac d'Europe occidentale à l'agonie	août-80	Progrès
<i>Article scient</i>	Une nouvelle Ecrevisse dans les eaux françaises	1924	L.Léger, Bulletin de la société centrale d'aquiculture et de pêche. Tome 31, n°10-12, oct-dec 1924.
<i>Presse</i>	Beaucoup de perches et de féras	2009	DL
<i>Presse</i>	La pollution, problème majeur pour la fédération départementale	02/03/1976	DL
<i>Presse</i>	Pollution, braconnage, repeuplement, préoccupation des "Pêcheurs amateurs du Léman français"	23/01/1979	DL
<i>Presse</i>	Pas de perches, mais des algues	19/07/2007	DL
<i>Presse</i>	Phénomène suivi de près à l'INRA	19/07/2007 b	DL
<i>Presse</i>	Vers une réconciliation entre pêcheurs professionnels et pêcheurs amateurs du Léman français	1973?	Messenger
<i>Presse</i>	L'élevage des écrevisses au centre des débats du 4è symposium international d'astacologie à Thonon-les-Bains	29/08/1978	DL

<i>Presse</i>	Petite histoire de l'évolution de la population piscicole du lac	12/03/1979	DL
<i>Presse</i>	Petite histoire de l'évolution de la population piscicole du lac	12/03/1979	DL
<i>Presse</i>	Les pêcheurs amateurs du Léman entre le nuage de la pollution et le soleil d'un "concordat"	21/01/1980	dl
<i>Presse</i>	Ces filets de perche si convoités	22/08/2002	DL
<i>Presse</i>	684 052 kg de poissons pêchés dans le Léman français en 1972	16/02/1973	Message
<i>Presse</i>	Le mercure au centre des débats des pêcheurs amateurs du lac Léman	27/01/1976	Message ?
<i>Presse</i>	Dépeuplement du lac : eutrophisation ou surexploitation?	30/03/1980	Message ?
<i>Presse</i>	Retirer tous les ombles de la carte des restaurants	04/04/2008	DL
<i>Article scient</i>	La pollution des fleuves	1990	La recherche, n°221
<i>Article scient</i>	Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services	2012	
<i>Presse</i>	Les pêcheurs amateurs réunis à Messery demandent à être écoutés	08/01/1986	DL

Annexe 4-15 : Liste des experts scientifiques et techniques consultés dans le cadre de l'étude sur le lac Saint-Pierre

Nom de l'expert	Structure	Domaine d'expertise
<i>Aubert Michaud</i>	IRDA	accompagnement secteur agricole vers meilleurs pratiques; processus de contamination diffuse de l'eau ; gestion pollutions diffuses
<i>Christiane Hudon</i>	Centre St Laurent	Ecologie fluviale ; bio-indicateurs ; cyanobactéries ; impacts cumulatifs ; qualité de l'eau ; St Laurent ; changement climatique.
<i>Stéphane Campeau</i>	UQTR	Bio-indicateurs; écologie et biogéographie des Diatomées; eutrophisation; gestion intégrée de l'eau par bassin versant; restauration des rivières; pratiques de gestion bénéfique en milieu agricole
<i>Julie Ruiz</i>	UQTR	Transformation paysages ; relations pop aux paysages agricoles ; gestion paysages
<i>Andrea Bertolo</i>	UQTR	Limnologue ; habitats vs zooplancton ; réseaux trophiques
<i>Philippe Brodeur</i>	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC)	Gouvernance, enjeux, jeux d'acteurs autour du Lac Saint-Pierre
<i>André Barabé</i>	UQTR	responsable bibliothèque électronique du lac Saint-Pierre et un administrateur de la réserve de biosphère. Vision systémique
<i>Louise Corriveau</i>	Direction comité ZIP Lac Saint-Pierre	Gouvernance, enjeux, jeux d'acteurs autour du LSP
<i>Marc Simoneau</i>	MDDELCC	Qualité de l'eau des tributaires du lac Saint-Pierre

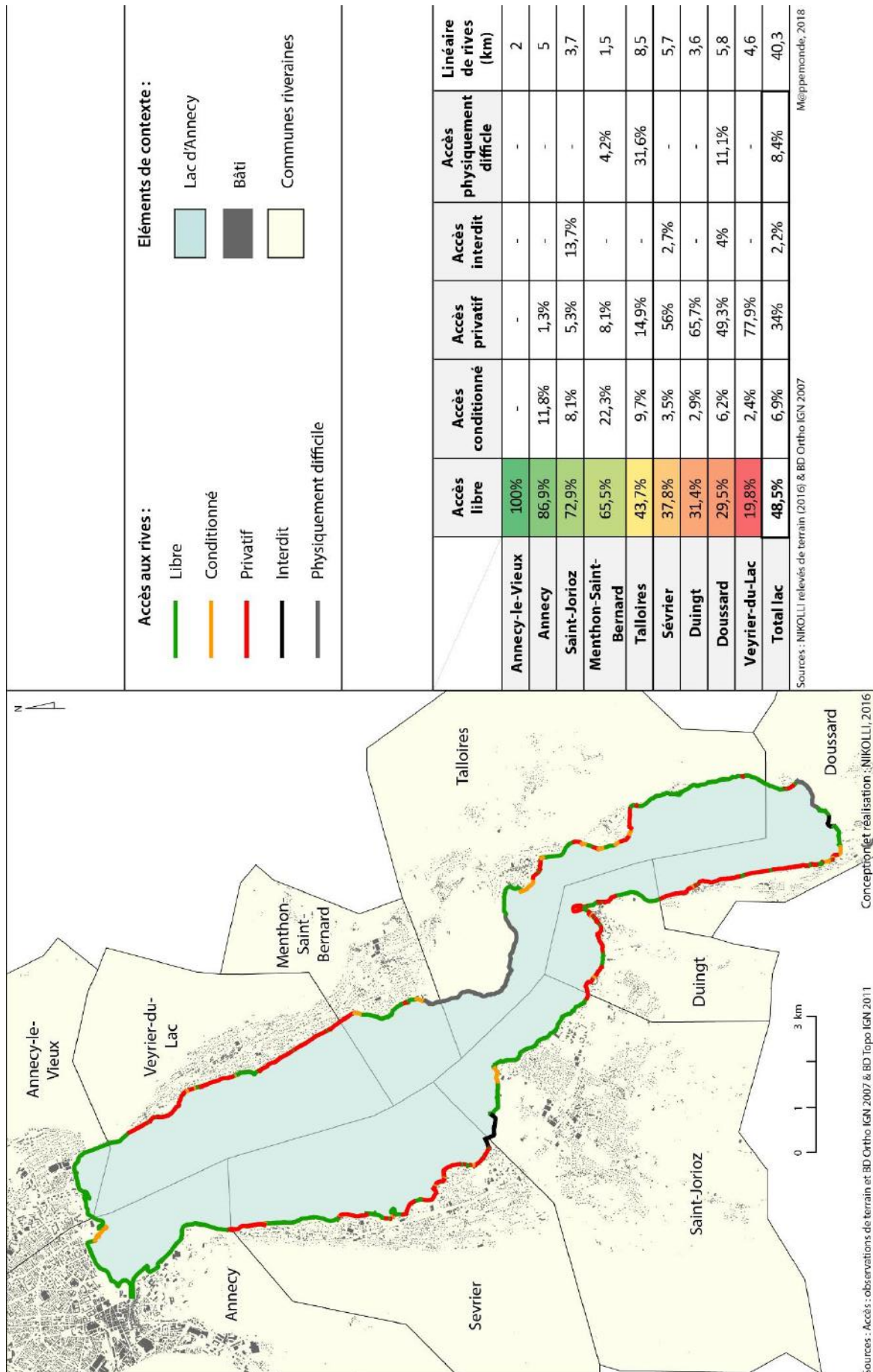
Annexes Chapitre 5

Annexe 5-4 : Ensemble des pathologies favorisées par le contact ou la présence des grands lacs alpins (sources : dires d'expert - médecin généraliste qui a pratiqué pendant plus de 30 ans au bord du Léman)

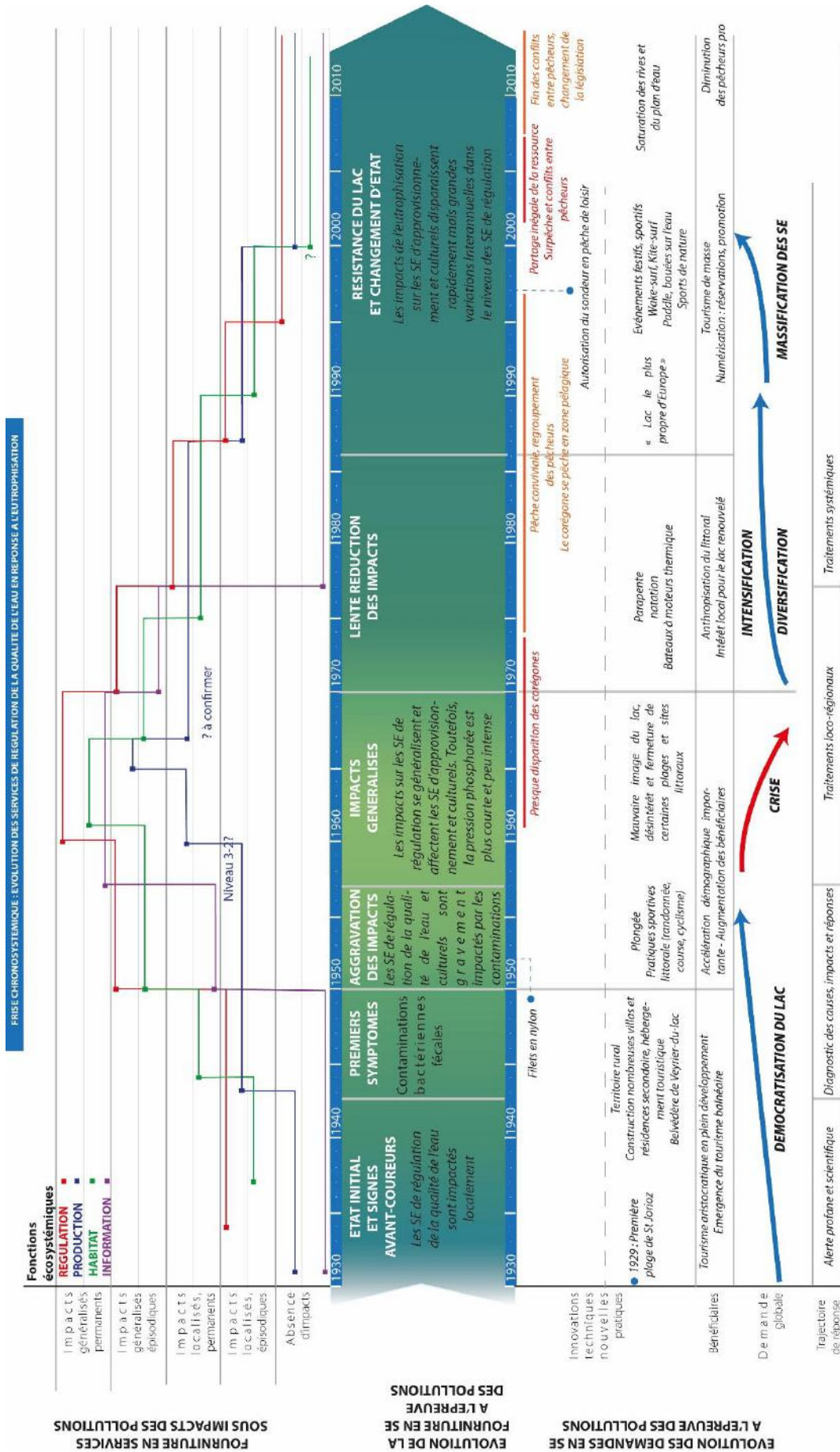
Problème de santé favorisé par les grands lacs alpins	Commentaires
<i>Infections microbiennes rhino-bronchiques</i>	Recrudescence des infections saisonnières d'origine virale favorisée par les conditions climatiques, et notamment l'humidité et le déplacement des masses d'air. La présence d'un grand lac entraîne une augmentation de l'humidité à proximité de celui-ci et génère des vents spécifiques
<i>Pathologies oto-rhino-laryngologique (ORL)</i>	Pour les personnes en contact de longue exposition avec l'eau froide (pêcheurs, plongeurs, nageurs, etc.), il y a un risque de développement d'ostéochondrose du conduit auditif externe entraînant un rétrécissement par hypertrophie des parois osseuses, à l'origine d'otites récidivantes et de surdité, nécessitant une exérèse chirurgicale.
<i>Traumatologie</i>	Blessures survenues lors de l'exploitation des SE (blessures, fractures, entorses, coupures sur des objets coupants, tranchants, piquants, sur des rochers ou débris de coquilles)
<i>Accidents barotraumatiques</i>	En relation avec la pression au cours d'une plongée en lac
<i>Pathologie infectieuses et parasitaires</i>	<p>- Puce du canard (Dermatite circadienne – infection bénigne) qui provoque des rougeurs et démangeaison au point de piqûre par le parasite. Touche principalement les personnes peu habituées aux piqûres par les puces du canard : touristes, enfants, baigneurs occasionnels. La puce du canard n'est pas en relation avec la qualité de l'eau.</p> <p>- Ténia du poisson (bothriocéphale – infection facile à détecter) : parasite que l'on retrouve essentiellement dans le corégone, qui peut être attrapé chez l'homme lors de la consommation de chair crue ou mal cuite et qui peut provoquer des lésions digestives, anémie. Le carpaccio de féra était un plat fréquent au menu des restaurants autour du Léman au début des années 2000, jusqu'à ce que le phénomène soit médiatisé</p>
<i>Contaminations bactériennes</i>	- La Poliomyélite : infection présente jusque dans les années 1950-60, avant l'arrivée d'un vaccin en France. Plusieurs cas déclarés autour des grands lacs alpins ont donné

<p><i>d'origine fécale (observées essentiellement lors des déversements d'eaux usées non traitées)</i></p>	<p>une mauvaise réputation aux lacs dans les premiers temps de l'eutrophisation et participé à l'alerte.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La leptospirose et l'Hépatite A sont des bactéries d'origine bovine présentes dans les eaux usées non traitées - Escherichia Coli : les sources de cette bactérie peuvent être nombreuses, la contamination s'effectue par ingestion d'eau infectée, les égoutiers sont les plus touchés par ce problème. - Gastro-entérite virale, quelques cas rares observés par la consommation d'eau potable contaminées.
<p><i>Affections dermatologiques</i></p>	<p>Coups de soleil, brûlures, lucite (allergie au soleil) par réverbération des rayons solaires sur l'eau</p>
<p><i>Noyade</i></p>	<p>Asphyxie par inondation des voies respiratoires. Certaines conditions météorologiques et hydrologiques (courants, température de l'eau) favorisent le risque de noyade.</p>
<p><i>Suicides</i></p>	<p>Les grands lacs sont des milieux à haute charge émotionnelle</p>

Annexe 5-5 : Carte de l'accessibilité aux rives du lac d'Annecy. Les plages d'accès payant sont comprises dans la catégorie d'accès conditionné aux rives. Nikolli, 2018



Annexe 5-6 : Chronique des impacts de l'eutrophisation et de la réoligotrophisation du lac d'Annecy sur les SE



La prise de conscience de la dégradation des qualités de l'eau et des milieux et les premiers signes visibles des pollutions se sont déclenchées 20 ans plus tôt sur le lac d'Annecy que sur le lac du Bourget et le Léman. Aussi, les niveaux de phosphore n'ont jamais atteint les concentrations fortes des deux autres lacs, et s'élèvent au maximum d'environ 13µg/L de phosphore durant le pic d'eutrophisation du lac entre 1960 et 1965 (Jenny et al. 2013). Par contre, ce lac a été très touché par les contaminations bactériennes d'origine fécales issues des eaux usées domestiques et par d'importantes modifications d'habitats benthiques et littoraux (Servettaz 1977). Ces impacts avec de forts risques sanitaires ont permis une prise de conscience rapide de la pollution du lac et une mobilisation forte des acteurs locaux envers la restauration du lac avant que tous les impacts ne soient irréversibles. Il est possible que la situation géographique du principal pôle urbain à l'aval du lac, la taille réduite du plan d'eau et de son BV, l'hydrologie et le nombre réduit d'acteurs expliquent en partie la différence de trajectoires écologique et de réponse sociétale de ce lac par rapport à ceux du lac du Bourget et du Léman.

Etat initial et signes avant-coureurs (1930 – 1943)

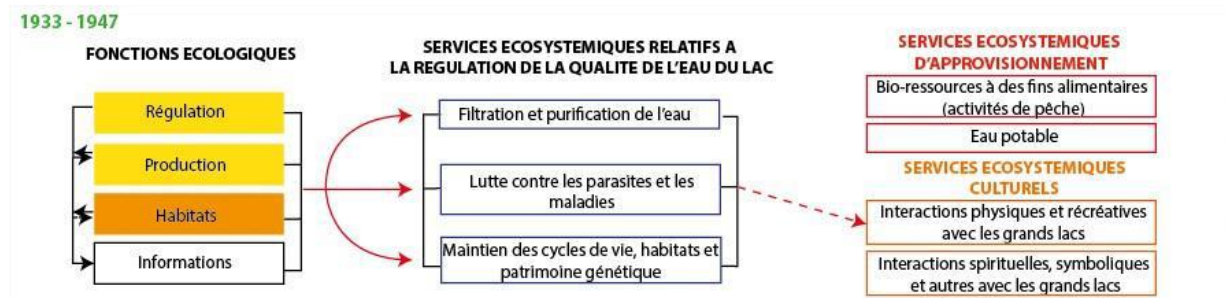
Au moment de l'émergence de l'eutrophisation, les pourtours du lac sont encore des territoires ruraux et les communes ne sont que des petits hameaux, hormis la ville d'Annecy qui regroupe 23 000 habitants avant la seconde guerre mondiale. Les réseaux d'égouts sont très peu développés (seules les villes de Cran et d'Annecy possèdent un réseau de collecte des eaux usées).

Deux types d'alertes d'une dégradation des qualités de l'eau et des milieux du lac se succèdent entre les années 1930 et 1950. Une première alerte profane dès 1933 associée à des problèmes d'insalubrité du hameau d'Albigny au nord-est du lac¹ et deux alertes scientifiques du limnologue Hubault en 1943 et 1947. Le scientifique détecte également des teneurs très faibles en oxygène dans le fond du lac, avec la présence d'organismes benthiques et pélagiques (*Oscillatoria rubescens*) bio-indicatrices d'eutrophie, il identifie aussi le début d'une désoxygénation benthique à partir de 1944, accompagnée d'un engorgement du petit lac. Il accuse les innombrables villas, résidences secondaires, hôtels, palaces et campings qui s'étalent sur les rives du lac de rejeter leurs eaux usées directement dans le lac sans traitements, ce qui entraîne une dégradation de la qualité globale des eaux (Hubault 1947). Ces différentes alertes ne seront pas écoutées (les ouvrages de Hubault ne sont pas accessibles pour tout le monde et publiés à l'époque de la seconde guerre mondiale), bien qu'en 1947 le préfet de la Haute-Savoie incite la commune d'Annecy-le-vieux à se doter d'un système d'égouts pour résoudre le problème du hameau d'Albigny. L'idée est alors de se raccorder au réseau déjà existant de la ville voisine d'Annecy, mais les communes n'arriveront jamais à se mettre d'accord sur la répartition des finances de la construction d'un tel projet (Pietu 2004).

Ces signaux indiquent une atteinte locale aux qualités de l'eau et des milieux : le SE de lutte contre les parasites et maladies est affecté par les contaminations bactériennes d'origine fécale et les fonctions d'habitat vont rapidement être atteintes avec la diminution des teneurs

¹ A partir de 1934 la préfecture de la Haute-Savoie reçoit les premières plaintes de contaminations bactériennes fécales autour du hameau d'Albigny, ce sera la première d'une longue série jusqu'aux années 1950 (Pietu, 2004).

en oxygène benthique mesuré par Hubault à partir de 1937 et quelques années plus tard l'apparition de faciès anoxiques, ce qui provoque un engorgement du fond du petit lac.



Impacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 1 : 1934) impacts aux contaminations bactériennes fécales au nord - est du lac au niveau du hameau d'Albigny

Production : (niveau 1 : 1943) en 1937 Hubault atteste que les concentrations en phosphore sont faibles mais qu'à partir de 1943 le lac ne peut plus être considéré comme un lac oligotrophe.

*Habitat : (niveau 1 : 1937) diminution de l'oxygène dans le fond du lac, présence détectée d'organismes benthiques et pélagiques (*Oscillatoria rubescens*) inféodés aux milieux riches en nutriments*

(niveau 2 : 1944) engorgement du petit lac et désoxygénation benthique

Diagnostic du phénomène (1947 - 1955)

A la fin des années 1940, les impacts sur les fonctions écosystémiques s'aggravent rapidement, notamment au niveau des fonctions de régulation, qui ne sont plus en mesure de maintenir les contaminations bactériennes. Les concentrations en bactéries augmentent de manière très forte, tout en restant localisées sur les zones littorales du grand lac (ports et plages). Des risques sanitaires localisés pour la baignade et le camping sont alors signalés et certaines plages interdites à la baignade dès 1950. De plus en plus d'habitats du lac sont touchés par l'eutrophisation et ses symptômes et l'ensemble du réseau pélagique est affecté ; des poissons morts sont retrouvés échoués sur les plages. Cette mortalité entraîne des baisses de captures des poissons nobles et de leur qualité gustative (omble, truite, corégone) en lien avec la désoxygénation grandissante du fond du lac qui persiste une grande partie de l'année. Les berges du grand lac autour de la ville d'Annecy, en pleine extension touristique, deviennent vaseuses à leur tour et inquiètent les baigneurs de la baie des Marquisat autour de la ville d'Annecy à partir de 1950 (Pietu 2004). L'ensemble de ces impacts témoignent d'une atteinte aux fonctions d'information : fermeture de plages, perte de qualité gustative du poisson, eaux moins avenantes, risques sanitaires et articles de presses qui portent à connaissance du public l'ensemble de ces problèmes : l'image générale du lac est affectée.

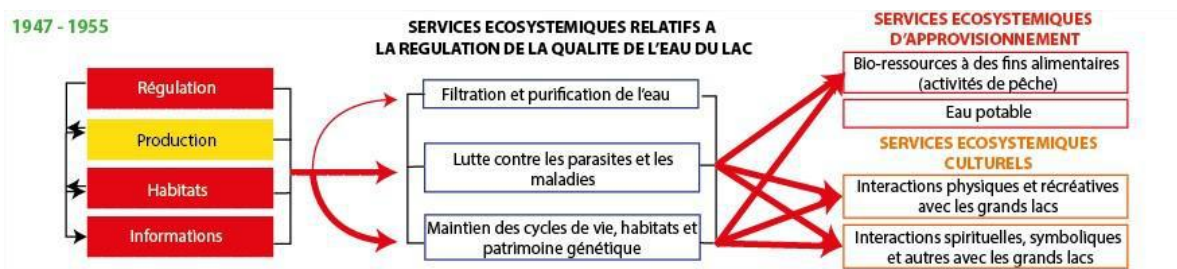
Comme ces différents symptômes reviennent tous les ans en période estivale, le maire commande une étude sur la possibilité de nettoyage du fond du lac. Mais l'on ne croit pas à une véritable pollution, le bureau d'hygiène de la ville d'Annecy détecte une pollution forte aux coliformes fécaux sur certaines plages, mais l'associe plutôt au nombre de baigneurs et à l'insuffisance des courants lacustres à diluer ces organismes. Il est vrai qu'à cette époque, les habitants et élus des communes autour du lac n'ont pas conscience des pollutions, ni de

l'importance du lac pour le développement territorial : le lac est utilisé comme décharge et il était habituel, légal, normal et pratique de déverser les déchets dans l'eau, nettoyer ou faire la vidange de sa voiture au bord du lac, ou encore à l'issue de la seconde guerre mondiale de cacher des armes et bombes désamorçées (Servettaz 1977). Jamais personne n'aurait soupçonné une dégradation du "lac d'argent" comme on le surnommait à l'époque, mais un homme, le docteur Paul-Louis Servettaz diagnostique dans les années 1940 des enfants malades, contaminés par une eau du lac de mauvaise qualité et entame alors des recherches pour en connaître l'origine. Dès lors il consulte les rapports de Hubault et commence une lutte pour la préservation du lac dont il va incarner la figure de la sauvegarde et restauration du lac d'Annecy.

Servettaz devient conseiller municipal en 1948, puis maire adjoint de la ville d'Annecy aux côtés du maire Charles Bosson. Ensemble, ils vont œuvrer pour la restauration du lac. En 1948, Servettaz va lancer plusieurs campagnes de sensibilisation des riverains et élu à la protection des eaux du lac, il engage également des diagnostics de l'état bactériologique des eaux². Il trouve rapidement une oreille attentive auprès des pêcheurs qui le soutiennent et ils lancent ensemble un grand cri d'alarme en 1955, mettant en avant la forte mortalité des poissons nobles et les contaminations bactériologiques. Paul Vivier, directeur de la Station d'Hydrobiologie Lacustre, en charge d'une partie des études sur le lac met alors en garde le maire : *"le lac est très malade, vous avez M. Le maire, un maximum de 15 années pour sauver le lac ; si rien n'est fait d'ici là, il deviendra lac mort"*. L'alerte de la pollution devient officielle et plusieurs élus municipaux l'aident dans sa mission. La même année, le diagnostic des différentes études sur le lac est donné au Conseil Supérieur de l'Hygiène publique de France qui atteste d'une pollution du lac modérée, mais de contaminations bactériennes estivale alarmante sur les rivages. Cette institution préconise l'évacuation des effluents vers l'exutoire au moyen de collecteurs généraux de contournement (Pietu 2004 d'après Avis du CSHF du 15 avril 1955 - Archives départementales de Haute-Savoie : SC 26995).

² Le suivi annuel physico-chimique et biologique réalisé par la Station Hydrobiologie Lacustre de Thonon (INRA) débute en 1965

Ce rapport marque pour Servettaz le début de la prise de conscience générale de la pollution du lac.



: Impacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 3 : 1951) contaminations bactériennes très fortes et étendues avec des risques sanitaires localisés pour la baignade, le camping

Production : niveau 1

Habitats : (niveau 3 : 1950) des poissons malades sont échoués sur les rives, les berges sont vaseuses

Information : (niveau 3 : 1950) certaines plages sont inaccessibles, les baignades sont vaseuses et les eaux moins avenantes. Des plaintes sont émises à différents endroits du lac pour cause de risques sanitaires

Actions systémiques (1955 - 1977)

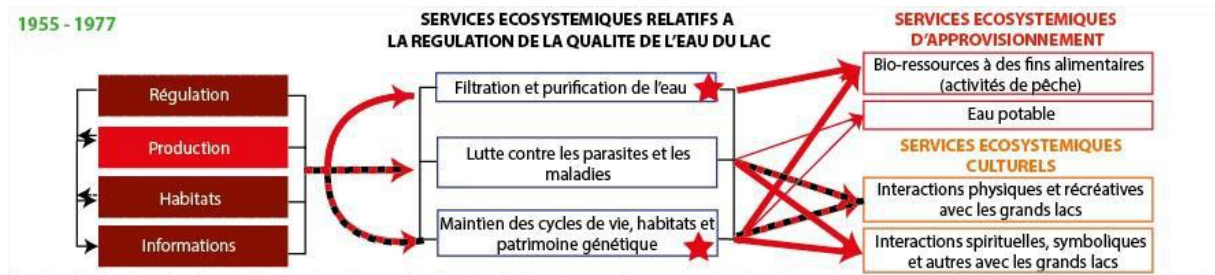
A l'issue du rapport du Conseil supérieur de l'hygiène publique de France, les acteurs locaux se mobilisent pour sauver le lac et engager l'assainissement pour toutes les communes du tour du lac. Les Ingénieurs des Ponts et Chaussées préconisent dès 1952 la construction d'un réseau d'assainissement intercommunal de toute l'agglomération d'Annecy. C'est alors que l'idée émerge de créer un syndicat intercommunal du lac d'Annecy (SIRCLA puis qui deviendra l'actuel SILA) en charge de l'assainissement des communes pour fédérer celles-ci autour de ce projet. Servettaz met en avant que la protection du lac doit se faire « *tous ensemble ou rien* » pour appuyer la création du syndicat. Dès le départ, ce syndicat souhaite associer la STEP intercommunale à un centre de traitement des déchets ménagers car il paraît évident qu'il n'est pas possible de protéger le lac en traitant les eaux usées sans agir sur les déchets des ménages. Deux propositions sont émises en 1956 pour mettre à bien ce projet. La solution la plus complète, efficace et la moins coûteuses (coûts d'entretien) semble être de collecter l'ensemble des eaux usées de toutes les communes autour du lac et de les traiter en un seul point. L'autre solution était de créer un ensemble de mini-stations à plusieurs endroits autour du lac.

La première solution est votée par les élus, mais est technique et très innovante pour l'époque, les pouvoirs publics ont également peur d'un déficit de résultats de la STEP. Se pose aussi un dilemme technique car il faut rapidement restaurer le lac, mais les coûts du projet obligent à fractionner les travaux : alors vaut-il mieux construire rapidement la STEP et retarder la mise en place du collecteur pour épurer mieux mais un nombre plus faible

d'habitants, ou bien entamer la construction de la STEP et du collecteur en même temps et épurer partiellement dans un premier temps dans l'attente de la fin de la construction. La deuxième solution sera choisie.

Le projet de restauration du lac d'Annecy comporte donc trois volets : la collecte de l'ensemble des eaux usées urbaines des communes sur les pourtours du lac, leur traitement en un seul et même point et leur rejet en aval du lac, et le traitement des déchets ménagers. La STEP et la station de traitement des ordures ménagères commenceront d'être construites en 1961 et seront rapidement mises en service en 1963, mais alors que la fin des travaux est prévue initialement pour 1966, la construction du collecteur va connaître un ensemble de problèmes qui entraîneront sa mise en service plus de 10 ans plus tard. Les retards en cause sont les suivants : 1/ un retard d'ordre technique au sujet du tracé du collecteur autour du lac et 2/ plusieurs conflits d'ordre financier entre différents acteurs participant au financement du collecteur : entre certaines communes et l'agence de bassin et entre les communes elles-mêmes quand il s'agit de fixer un coût de raccordement des égouts respectifs des différentes communes (Pietu 2004).

Les années 1960 représentent la décennie de saturation des fonctions du lac, avec des impacts généralisés. En 1960, les contaminations bactériennes sont retrouvées dans presque l'ensemble des plages du lac en saison estivale et sur l'ensemble de la colonne d'eau et d'autres types de pollutions (détergents, hydrocarbures des bateaux) sont décelés à de faibles quantités. Hubault (1947) mentionne également des changements dans la composition en espèces du phytoplancton et du zooplancton avec une augmentation des espèces de milieux eutrophes, puis à partir de 1965-67 une réduction forte de la diversité du zooplancton, à la fois indicateur de fonctions de production et d'habitats. Ces dernières ont déjà atteint leur niveau d'impact maximum dès 1961, notable par une désoxygénation totale du fond du lac la moitié de l'année et la présence à 79% des cyanophycées dans les espèces planctoniques. L'ensemble de ces changements entraînent la nécessité de fermeture de nombreuses plages dès 1962 du fait des contaminations fécales, la présence d'odeurs nauséabondes caractéristiques des milieux anoxiques ou des algues en décomposition. Une peur du lac et des maladies qu'il pourrait provoquer (typhoïde, poliomyélite notamment) se développe parmi les riverains qui ne souhaitent plus se baigner dans certains secteurs (Pietu 2004). Cette peur est favorisée par les médias et inquiète les élus locaux qui craignent en retour une diminution de l'attractivité touristique du lac. Seules les fonctions de production n'atteignent pas leur niveau de saturation durant toute cette période, certainement du fait que la société se concentre à l'aval du plan d'eau.



Impacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 4 - 1960) Contaminations bactériennes fécales généralisées à toutes les stations et toute la colonne d'eau en période estivale ; changements importants de la production primaire ; détection de pollution aux hydrocarbures et détergents

Production : (Niveau 3 - 1965) réduction forte de la composition en espèce et abondance du zooplancton

Habitats : (niveau 4 - 1961) désoxygénation benthique totale la moitié de l'année ; 79% des algues sont des cyanophycées (bio-indicatrices de milieux riches en nutriments et pouvant développer des blooms colorés et/ou toxiques). Risque pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Menthon-Saint-Bernard à partir de 1957

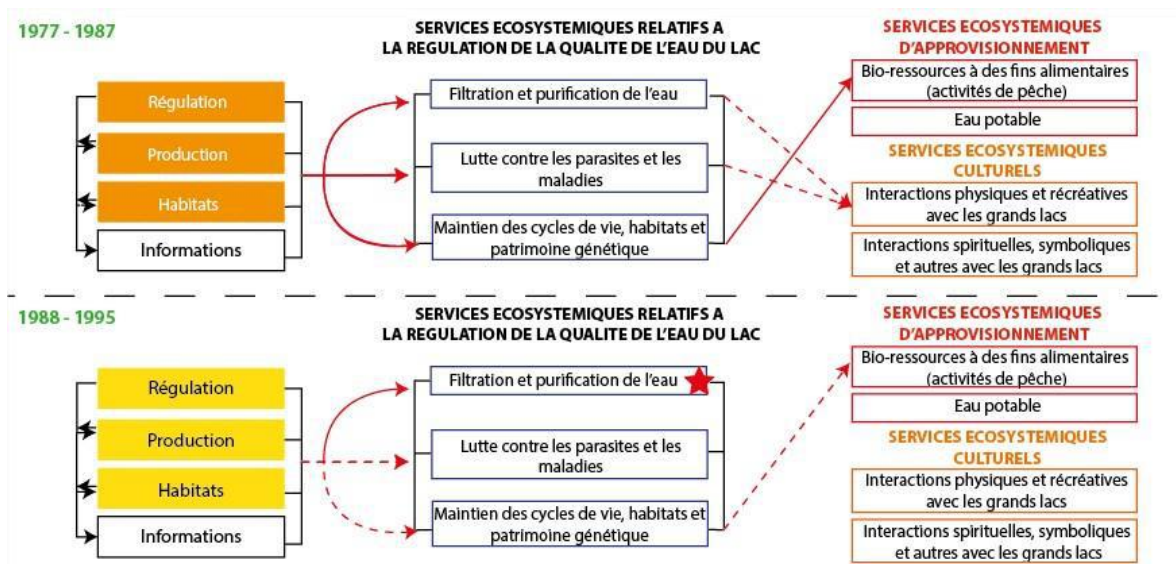
Information : (Niveau 4 - 1958) plaintes pour odeurs nauséabondes ; articles polémiques sur les risques sanitaires ; peur d'un danger mortel à se baigner dans certains secteurs (risques de typhoïdes, poliomyélite) ; crainte d'une mauvaise image touristique

Changement d'état écologique du lac

Si l'on regarde l'évolution des impacts sur les fonctions écosystémiques, on se rend compte que celles-ci commencent à se rétablir dès 1967, avec une amélioration de la transparence et une diminution des cyanobactéries, qui redeviennent minoritaires dans les communautés planctoniques. Ces évolutions des fonctions d'habitat et de production signifient que la construction de la STEP et de l'usine de traitement des déchets ménagers, seulement trois années plus tôt ont eu un effet positif rapide sur l'état global du lac. En 1970, on observe une amélioration de la qualité bactériologique (Barraqué 1986) après des contaminations atteignant plus de 30 000 germes de E.coli par ml en 1964 à la plage des enfants entre le hameau d'Albigny et le Palace l'Impérial. Dès 1967, les contaminations bactériennes fécales sont absentes de presque toutes les stations de mesures ou à des concentrations plus de 100 fois inférieures aux années précédentes. Les fonctions écosystémiques se stabilisent malgré tout à un niveau d'impact élevé et étendus dans le lac avec de fortes variations interannuelles jusqu'en 1987, soit 10 ans après la construction du collecteur des eaux usées, avant de revenir à un état de lac pauvre en nutriment à partir de 1995. Les fonctions de production mettent quelques années supplémentaires avant de revenir à un état stable de lac oligotrophe : c'est à partir de 2000 que la production secondaire se rétablit (Jenny et al. 2013). Malgré les faibles contaminations en phosphore du lac d'Annecy, la contamination benthique du fond du lac reste visible à certains moments de l'année. Le lac ne s'est donc jamais remis totalement de cet épisode de pollution (Jenny et al. 2013).

A l'issue de ces opérations, le lac d'Annecy deviendra un modèle français d'assainissement des eaux usées et fera l'objet d'une rencontre entre les élus locaux, les acteurs de la restauration et le ministre R.Poujade en 1977.

Servettaz et Bosson actèrent auprès du ministre M.Ortoli, puis auprès de ses deux successeurs entre 65 et 70, sans que rien ne se fasse. Réponse de l'Etat en 70 par le ministre A.Bettencourt qui mentionne clairement l'opposition à la loi « d'interdiction des détergents non biodégradables à 80% » par un « groupe industriel français ». Le décret finira par être appliqué le 25/09/70, mais sans que des moyens soient alloués à la surveillance. En 77, toujours pas de surveillance.



: Impacts sur les fonctions :

Régulation : (Niveau 3 - 1970) Amélioration de la qualité bactériologique

(Niveau 2 - 1977) Les contaminations bactériennes fécales ne sont plus visibles pour presque l'ensemble des stations et en dessous des seuils de risques sanitaires

(Niveau 1 - 1987) Les concentration en Phosphore total diminuent en dessous de 8 µg/L

(Niveau 0 - 1995) L'état trophique du lac se stabilise à un niveau oligotrophe

Production : (Niveau 2 - 1967) Augmentation de la transparence

(Niveau 1 - 1987) : les concentrations de phosphore total diminuent en dessous de 8 µg/L mais subsistent quelques poussées ponctuelles de production primaire au milieu des années 1990

Habitats : (Niveau 3 - 1967) Les cyanobactéries redeviennent minoritaires dans les communautés planctoniques, mais la désoxygénation benthique reste étendue

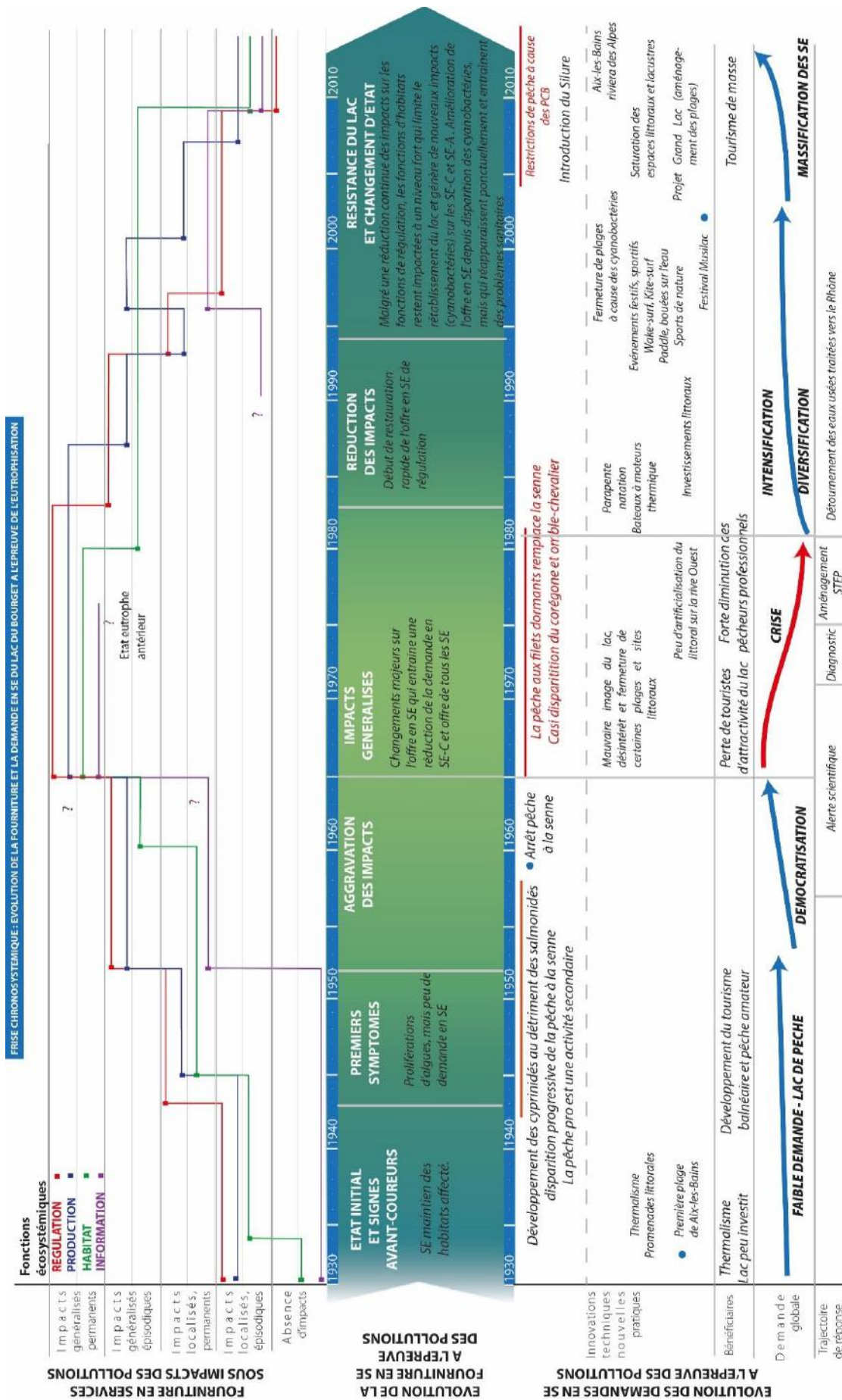
(Niveau 2 - 1975) Diminution légère de la surface de désoxygénation benthique et stabilisation des compositions en espèces de phytoplancton de milieux oligotrophes

(Niveau 1 - 1990) Les durées de désoxygénation sont raccourcies de 80 à 90% par rapport aux années précédentes et la zone benthique impactée diminue fortement

Informations : (Niveau 3 - 1970) Légère amélioration de la qualité bactériologique de certaines stations de mesures

(Niveau 0 - 1970) Fin des contaminations bactériennes fécales

Annexe 5-7 : Chronique des impacts de l'eutrophisation et de la réoligotrophisation du lac du Bourget sur les SE



Parmi les trois grands lacs alpins, le lac du Bourget est celui qui a connu la période d'eutrophisation la plus longue, marquée par des concentrations en phosphore totale très importantes dans les années 1970 et représentatives d'un état d'hyper-trophie. C'est le seul grand lac alpin naturel à avoir atteint ce seuil.

L'implantation de l'urbanisation autour du lac, le niveau de demande restreint pour la plupart des SE au tout début du XXème siècle sont des facteurs qui ont conduit à une prise en compte tardive de la pollution du lac, malgré des effets visibles importants dans les années 1950. Aussi, le limnologue Hubault qui avait alerté de la dégradation du lac d'Annecy mène la même étude sur le Bourget mais ne détecte pas l'eutrophisation naissante du lac qu'il décrit comme « riche en oxygène » et oligotrophe (Hubault 1947). Ce diagnostic scientifique erroné ne participe donc pas à l'alerte de la pollution du lac. Ce manque de considération sociétale est une des raisons pour laquelle nous manquons de données sur le lac du Bourget aujourd'hui pour analyser finement l'ensemble de la chronique de la dégradation de l'état trophique du lac. Les données bactériologiques sont par exemple inexistantes.

Emergence et alerte (1920 - 1965)

La relation entre le fleuve Rhône et le lac est une spécificité de ce lac, déterminante pour l'état des fonctions écosystémiques de production et d'habitat. La paléolimnologie nous permet aujourd'hui de détecter dès 1922 des signes d'élévation de la production primaire benthique (sans toutefois que cela soit problématique) certainement liée à des apports par le fleuve, mais en 1943, une crue importante du Rhône provoque des afflux critiques de nutriments qui entraînent le déclenchement de l'eutrophisation du lac (Giguet-Covex et al. 2010, Jenny et al. 2013). Deux années plus tard, la production secondaire suit l'élévation des nutriments du lac (Jenny et al. 2013) et dans le fond du lac est observé une diminution interannuelle de l'oxygène. Les arrivées d'eaux usées non traitées (ou seulement filtrées) des communes autour du lac et des agglomérations d'Aix-les-Bains et de Chambéry et les pollutions diffuses du BV ne constituent donc pas les seuls apports de nutriments, le Rhône est également une source de matières fertilisantes. A l'inverse, le fleuve peut être une source de réoxygénation pour le lac et favoriser le retournement des masses d'eau en hiver.

Sur le lac du Bourget, les impacts évoluent de manière spectaculaire entre 1943 et 1960. Les premiers impacts visibles de l'eutrophisation apparaissent une dizaine d'année après le début de l'eutrophisation (1952-53) avec des proliférations d'algues détectées à plusieurs endroits et une diminution de la transparence globale. Ces impacts témoignent d'une atteinte aux fonctions de production et d'information. A cette époque le tourisme est en plein développement (évaluation à 150 000 touristes estivaux à Aix-les-Bains à la fin des années 1960 - About 1972) mais davantage orienté vers un tourisme thermal, les gênes occasionnées par les blooms algaux restent donc limités sur les SE culturels. La pêche connaît néanmoins des diminutions dans les captures de poisson et semble être le SE le plus affecté à cette époque. La Station d'Hydrobiologie Lacustre de Thonon effectue en 1957 des mesures d'oxygène dans le lac et repère une diminution importante des concentrations dans la zone benthique. Ils alertent alors les collectivités locales, mais ne seront pas écoutés du fait que l'idée que les crues du Rhône peuvent renouveler les eaux du lac et lui rendre sa « pureté » est largement répandue.

C'est véritablement à partir des années 1960 que les impacts sur les fonctions du lac s'élèvent fortement avec une désoxygénation benthique généralisée à l'ensemble du lac et persistante. L'état trophique se stabilise à un niveau d'eutrophie certainement déjà important (manque de données sur les concentrations précises en phosphore de l'époque). Mais à partir de 1965, la transparence de l'eau continue de baisser en réaction à un fort développement de la production primaire et des échouages de macrophytes sont détectées sur de grandes portions du littoral. Les impacts sur les services s'accroissent et occasionnent une gêne pour les activités récréatives (perte d'attractivité du littoral et des plages), la pêche à la senne est également fortement limitée par la présence d'algues qui colmatent les filets et les rendent visibles pour les poissons, comme cela pouvait être observé à la même époque pour le Léman. L'ensemble des usagers impactés (pêcheurs, riverains, acteurs du tourisme) alertent les élus d'une possible pollution du lac.



Impacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 1 - 1920) Début d'augmentation de la production primaire du lac, dans des proportions très faibles

Production : (niveau 1 - 1920) début d'augmentation des espèces de phytoplancton

Habitats : (niveau 1 - 1933) Apparition de faciès anoxiques

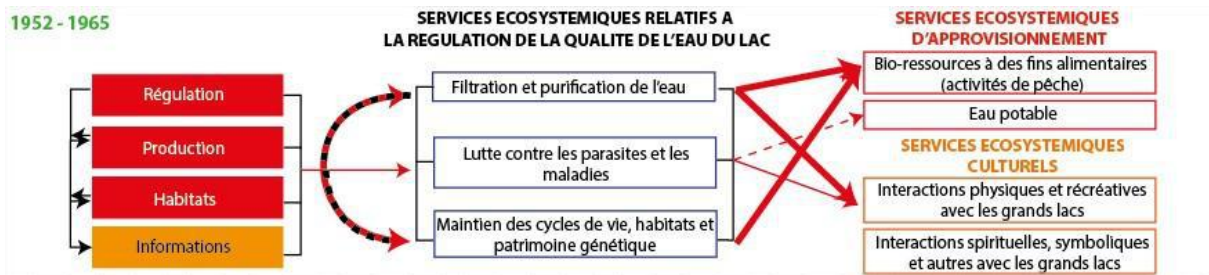


Impacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 2 - 1943) apports critiques de nutriments par le Rhône qui déclenche le processus d'eutrophisation

Production : (niveau 2 - 1945) Augmentation de la production secondaire

Habitats : (niveau 2 - 1945) Diminution interannuelle d'oxygène et hausse de la production secondaire benthique



Impacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 3 - 1952) Prolifération d'algues, diminution de la transparence et stabilisation de l'état trophique à partir de la décennie 1960

Production : (niveau 3 - 1952) Proliférations d'algues sur les plages et dans la zone pélagique du lac, puis stabilisation de l'état trophique à partir de la décennie 1960

Habitats : (niveau 3 - 1960) La désoxygénation benthique est étendue à l'ensemble du lac et persistante,

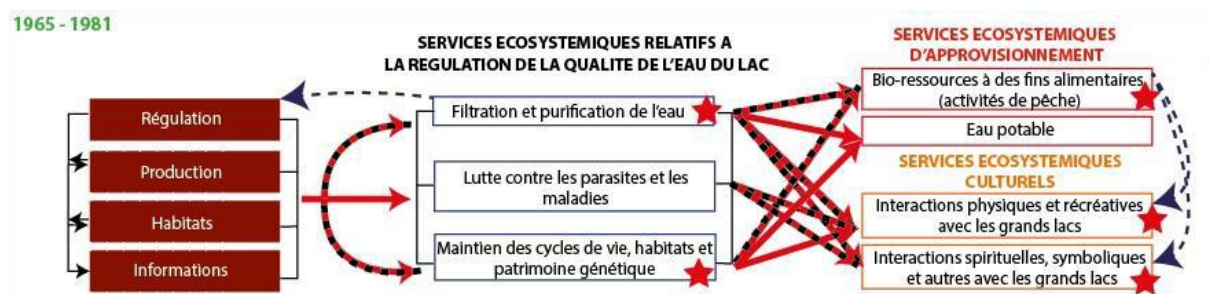
Information : (niveau 2 - 1952) prolifération d'algues

Diagnostic (1965 - 1975)

Au début des années 1970, les impacts sur les fonctions du lac sont graves, témoignant d'un état trophique eutrophe du lac, voire hyper-eutrophe, et d'une désoxygénation benthique généralisée. L'ensemble de ces impacts entraînent une diminution majeure de la transparence (inférieure à 1m d'après un test avec une ampoule de 100 W - About 1972) et des proliférations importantes de macroalgues sur l'ensemble du lac, formant des paquets en décomposition à la surface et de véritables cloaques sur certaines plages, associés à de possibles risques sanitaires (on peut émettre l'hypothèse de développements importants de cyanobactéries toxiques à cette époque comme ce fut le cas pour les autres grands lacs alpins), on note également la présence d'amas de déchets ménagers accumulés sur les bords des lacs : "les lacs deviennent les poubelles de tous" (About 1972). La perception du lac par les riverains change et il y a une véritable peur du développement de maladies liées à l'eau : poliomyélite, hépatite virale, voire des cancers. Par ailleurs, l'ensemble des habitats du lac sont impactés, en atteste la désoxygénation benthique généralisée, de boues agglomérées en surface et des changements de zones d'habitats des poissons du lac (About 1972). Ces impacts se répercutent sur les SE d'approvisionnement en bio-ressources et plusieurs techniques de pêche ne peuvent plus être pratiquées dans le lac : la pêche à la cuiller en pêche amateur, la pêche à la traîne pour capturer le brochet, ou la pêche à la senne pour les professionnels.

Malgré l'alerte donnée par la SHL en 1957 et les nombreux impacts qui démontrent d'une pollution majeure du lac, les pouvoirs publics mettront plus de 10 ans avant d'intervenir. Deux personnalités politiques de l'époque vont permettre la mise en place des actions de restauration du lac : M. Blin, président d'un syndicat intercommunal et le sénateur M. Blanc. Ensemble, ils vont mener des actions de sensibilisation importantes au sujet de la nécessité de préserver le lac et vont paraître à plusieurs reprises lors de journaux télévisés nationaux en 1971. Le deuxième souhait de ces deux « protecteurs du lac » est de récolter des financements pour le projet impressionnant qu'il souhaite mettre en place : la collecte des eaux usées, et

leur détournement vers le fleuve Rhône ou dans l'Isère après traitement. L'impact de l'eutrophisation et de sa médiatisation sera tel qu'il entraînera une chute de 44% de la fréquentation touristique de la ville d'Aix-les-Bains cette année-là et de nombreuses lettres de plaintes de téléspectateurs seront envoyées aux collectivités locales et au gouvernement pour qu'une solution soit prise (Sapin 1973 - presse). Les problèmes du lac prennent alors une ampleur nationale et le conseiller technique du ministère de l'Environnement se rend sur place en 1971.



Impacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 4 - 1965 - estimation) apports très importants de phosphore au lac (environ 300t de phosphore par an)

Production : (niveau 4 - 1965) production primaire fortement atteinte, niveau de transparence critique

Habitats : (niveau 4 - 1965) désoxygénation benthique généralisée, les captures de poissons diminuent et des algues prolifèrent sur les plages

Information : (niveau 4 - 1965) Cloaques sur les plages, diminution critique de la transparence

Actions systémiques (1975 - 1981)

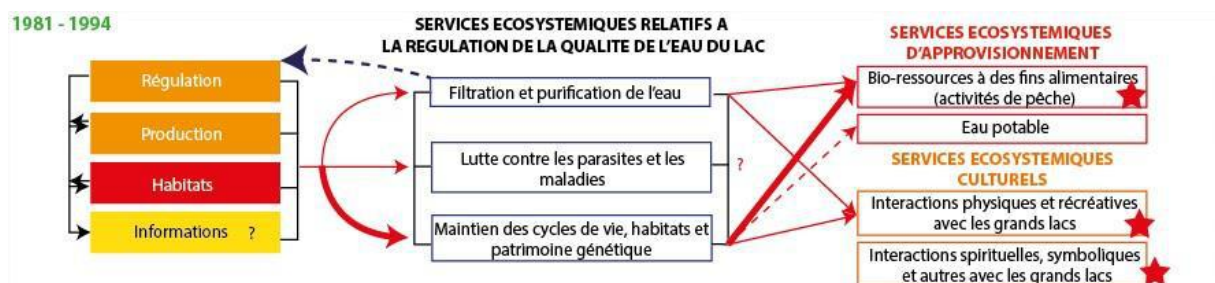
Au cours de cette période, les impacts sur les fonctions restent à un niveau critique équivalent aux deux périodes précédentes, avec quelques améliorations ponctuelles dues à des variations interannuelles liées aux conditions climatiques. Les fonctions d'habitat commencent à se rétablir dès 1980 avec une réduction légère de l'emprise de la désoxygénation benthique (Jenny et al. 2013)

Alors que la détection de l'eutrophisation et la prise de conscience des impacts des pollutions ont été longs à se réaliser, la mise en place des actions sera relativement rapide et efficace. Deux actions importantes sont à noter au cours de cette période : tout d'abord l'agrandissement des STEP de Chambéry et de Aix-les-Bains en 1976 et 1977 respectivement qui étaient de capacités insuffisantes pour traiter l'ensemble des eaux usées des agglomérations, permettant ainsi de réduire les impacts des deux principales sources de pollutions ponctuelles du lac. La deuxième action est un traitement systémique permettant de réduire drastiquement les entrées de nutriments dans le lac. Elle consiste à la construction d'un collecteur d'eau usées traitées issues des deux STEP principales, et leur acheminement au Rhône au travers d'une conduite construite au travers de la montagne de l'Épine. Ce projet,

dont les frais sont évalués à plus de 50 millions de Fr, sera financé à 80% par l'Etat et dureront 6 ans (contre 2 ans et demi prévu initialement)

Une restauration du lac amorcée (1981 - 1994)

L'amélioration des fonctions de régulation vont être observées assez rapidement avec une diminution dès 1983 des concentrations de phosphore total dans le lac. Par ailleurs, cette baisse va être très importante de l'ordre de presque 2 fois en 5 ans. Le détournement des eaux usées a donc un impact très important et rapide sur l'état du lac. Les autres fonctions du lac vont rapidement suivre la même tendance, avec une amélioration de la production primaire dès 1987 et une stabilisation, puis de la production secondaire en 1993, qui entraînera deux ans plus tard la réduction des captures de poissons de milieux riches en nutriments et une augmentation des salmonidés. Les habitats restent malgré tout à un niveau d'impact relativement élevé malgré ces évolutions dans le réseau trophique du fait de fortes variations interannuelles des impacts dans la phase de rétablissement du lac.



mpacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 3 - 1987) Réduction de la concentration en Phosphore total

(niveau 2 : 1993) Réduction de tous les indicateurs de l'eutrophisation

Production : (Niveau 3 - 1987) début de diminution de la prod primaire et stabilisation.

(niveau 2 - 1993) réduction de la production secondaire - retour des diatomées cyclotella et baisse des cladocère (Jenny et al, 2013)

Habitats : stabilisation au niveau 3 (désoxygénation interannuelle, pas d'amélioration sur le réseau trophique)

Information : manque de données sur les impacts sanitaires, la transparence et la présence de macrophytes et nuisances

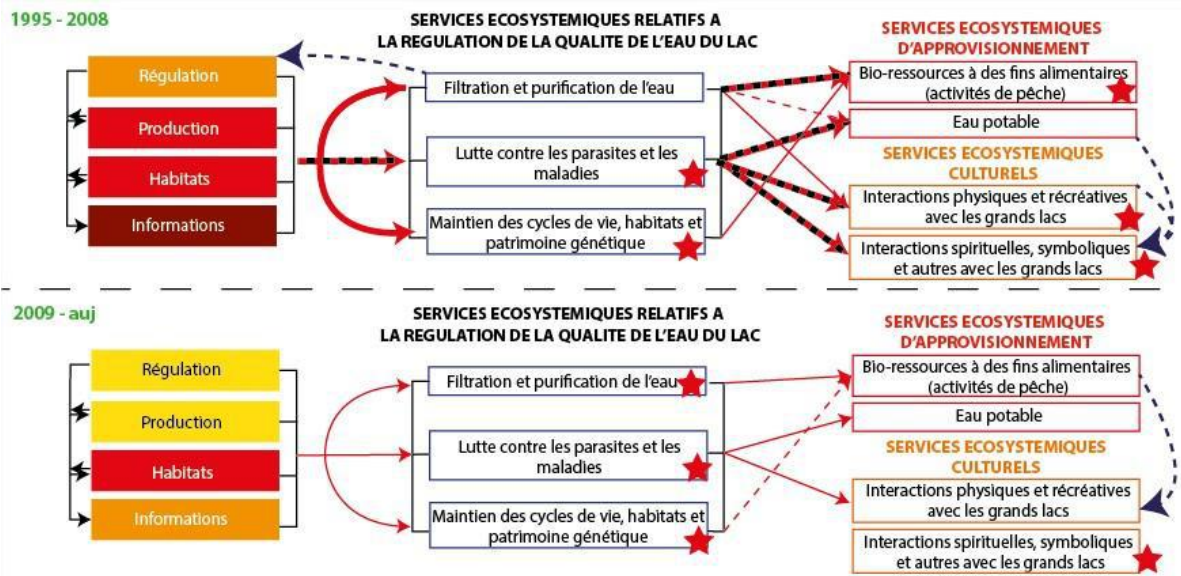
Un lac convalescent (1995 – aujourd'hui)

A partir de 1995, alors que tous les indicateurs semblaient montrer une amélioration depuis 1993, une cyanobactérie *Planctothrix rubescens* se développe subitement en été. Cette même année, la biomasse de phytoplancton augmente de nouveau et la transparence est réduite. Une nouvelle phase d'impact sur le lac commence. La cyanobactérie a des impacts forts sur les SE d'approvisionnement et culturels, du fait qu'elle devient toxique lors de sa phase de

décomposition. Elle peut alors entraîner des risques sanitaires important pour la baignade, ce qui nécessite la fermeture de plusieurs plages. Par ailleurs, cette algue est connue pour sa couleur rouge (sang des bourguignon) qui colore l'eau et réduit le caractère avenant du lac (Jacquet et al. 2005). Par ailleurs, cette algue se développe au niveau de la thermocline du lac en été, niveau qui correspond à ceux des captages d'eau pour l'eau potable. Cette fonction du lac n'est alors plus possible et les prélèvements d'eau potable à partir du lac sont arrêté tout ou partie de l'année dès 1996. Les impacts croissants des pollutions du BV et du réchauffement climatique réduisent les quantités d'eau disponible en substitut dans les aquifère, ce qui inquiète beaucoup les gestionnaires. De nombreuses études sont alors menées pour diagnostiquer le phénomène de développement des cyanobactéries.

Le développement de cette algue est à relier à la restauration du lac. En effet, la diminution des concentrations en phosphate à la surface du lac couplé à un rehaussement de la température de l'eau du fait du réchauffement climatique ont entraîné l'apparition de conditions optimales au développement de cette cyanobactérie. Il semblerait que celle-ci se trouvait déjà enfouie dans les sédiments du lac, héritage de l'époque d'eutrophisation, et que les conditions ont permis à la bactérie de se développer de nouveau. La cyanobactérie disparaît avec une diminution de phosphore en dessous de 20µg/L, ce qui se produit en 2009. Cette même année voit l'amélioration de plusieurs fonctions écologiques du lac à la suite de la disparition de la cyanobactérie.

Les dernières années nous ont appris à ne pas nous réjouir trop tôt car d'autres épisodes de développement de cyanobactéries toxiques se sont développés en 2014 et 2016. Il ne s'agissait pas de la même espèce, mais ses impacts sur les SE sont les mêmes. Aussi, la désoxygénation du lac est toujours présente une partie de l'année dans le lac du Bourget et la production primaire n'est pas retournée à un état pré-eutrophisation, ce qui indique que le lac du Bourget est toujours actuellement dans un état de convalescent, plus sensible aux pressions à venir.



Impacts sur les fonctions :

Régulation : (niveau 1 - 1997) Le statut trophique du lac passe de eutrophe à mésotrophe – niv 2 si PCB ?

(niveau 0 - 2009) Le lac de obtient le statut de meso-oligotrophe – niv 1 si PCB ?

Production : (niveau 3 - 1996) augmentation de la production primaire et baisse subite de la transparence (Jacquet et al, 2005)

(niveau 2 - 2001) Amélioration de la transparence du lac (Jacquet et al, 2005)

(niveau 1 - 2007) réduction de la production primaire, mais pas retour à un état pré-eutrophe

Habitats : stabilisation au niveau d'impact 3 malgré un changement dans le réseau trophique en 1996, signe d'une réoligotrophisation du lac (hausse des captures de corégones et baisse des perches), mais apparition dès cette année là de la cyanobactérie toxique planktothrix rubescens

Information : (Niveau 2 - 1996) fermetures ponctuelles de plages du fait de l'apparition d'une cyanobactérie toxique. Cette cyano provoque également un changement de la couleur de l'eau

Annexes chapitre 6

Annexe 6-1 : Verbatims issus des entretiens de pêcheurs cités dans le texte.

Thématique	Libellé de l'enquêté	Verbatim
Les facteurs qui déterminent les pratiques sociales et techniques d'exploitation du SE		
Les pratiques sont déterminées par l'accessibilité aux SE	Amateur Léman 2	<i>Depuis que le lac devient de plus en plus propre, la perche y'en a un pti peu moins, par contre ça, la féra est favorisée.</i>
	Professionnel Léman 1	<i>J'ai connu des périodes où pendant 6 ans y'avait pas de perches, pas de poissons ... [...] C'était quand le lac était bourré de phosphates [...]. Quand l'ablette revient, l'eau, elle est de meilleure qualité parce qu'une ablette elle est toujours dans une belle eau. Comme le brochet, hein, le brochet est revenu 10 ans en arrière parce que y'a eu des stations d'épuration qui ont été faites partout et maintenant y'a du brochet partout.</i> <i>[Quand] il n'y [avait plus] de perche, on [s'est] axé sur la féra</i>
	Professionnel Léman 3	<i>Maintenant le pêcheur il pêche ce qui est le plus rentable, donc c'est la féra. [...] [après l'eutrophisation], les pêcheurs pêchaient de tout. [...] [et] on a eu des pêches de féra qui ont monté en flèche pendant disons une 20aine d'années [...] la commercialisation a monté en flèche, hein, tous les restaurants se sont mis à vendre de la féra, [...] [et] c'est vrai qu'on a un peu laissé tomber les autres pêches.</i>
	Professionnel Annecy 1	<i>J'ai remarqué une chose, c'est que je pêche à des endroits qui étaient improbables avant. [...] Sur les bords avant, y'avait beaucoup de friture, maintenant y'en a de moins en moins.</i>
	Amateur Annecy 4	<i>Au bord, y'a pratiquement plus de poissons. On voit bien, y'a plus de pêcheurs au bord.</i> <i>Au bord, on avait accès à plein de biodiversité. Y'avait énormément de perches, [...] des ablettes, la mirandelle ce qu'on appelait, alors ça on en attrapait facilement ! [...] A cette époque, y'avait les herbiers qui étaient en forte densité, et bon, y'avait des spots sympas, notamment au bout du lac, et où on prenait du brochet et on s'amusait avec des blancs [...] que maintenant c'est terminé, on n'arrive plus...</i>

L'accès aux SE dépend des caractéristiques techniques et innovations	Professionnel Léman 2	<i>Les fameuses algues filamenteuses [...] ça nous contraint beaucoup [...], c'est-à-dire pendant les épisodes de fort développement de ces algues filamenteuses, les filets deviennent quasiment inefficaces et ça peut durer quelques jours, inefficaces parce que trop visibles.</i>
	Amateur Annecy 4	<i>Sur Annecy, faut savoir qu'on peut pratiquer la pêche à la traîne [...] jusque fin avril. Après, déjà le mois de mai, c'est un petit coup le matin, et puis après faut ranger les canes, y'a trop d'utilisateurs maintenant. [...] Le pire, ce qui est pour nous gênant, c'est tout ce qui est wake board, avec ces fameuses vagues hein. C'est une activité qui est nuisante quand on aime bien être contemplatif, du moins être tranquillement sur l'eau, quand ils sont là, c'est vite le chaos hein.</i>
	Amateur Léman 2	<i>Quand vous pêchez la féra à la canne c'est un poisson qui se bagarre d'une façon extraordinaire, [...] quand vous pêchez à la traîne et que vous faites une truite de 4 - 5 kg vous êtes en admiration devant ; vous pêchez des ombles chevaliers, c'est un poisson qui est très noble.</i>
	Amateur Léman 3	<i>Maintenant donc on a des appareils, avec les téléphones et tout, on a des circuits de pêche installés [...] on pêche entre 3 et 4 km/h, on fait entre 25 et 35 km par journée de pêche.</i>
La demande est déterminée par les préférences individuelles de pratiques	Professionnel Léman 2	<i>Le Léman est devenu très réputé ces dernières années hein [...] pour la pêche au gros - la pêche du brochet et même maintenant du silure, petit à petit, ça commence, y'a des gens qui vont spécifiquement pêcher le silure sur le Léman</i>
	Amateur Annecy 3	<i>Les feras ici sont plus petites que dans le lac d'Aix-les-Bains et de Genève, mais la chair est meilleure [...] les feras sont plus petites au lac d'Annecy parce que y'a moins d'azote et de phosphore [...] et donc les poissons ont moins à manger, ils grossissent moins vite. Donc ça veut dire que le lac est beaucoup plus pur que les deux autres, ça veut dire que la chair du poisson elle est meilleure que les deux autres</i>
	Professionnel Annecy 1	<i>Mon objectif, [...] je vais acheter un bateau et puis après j'irai au Léman, [...] le cadre, cette immensité, et puis... quand tu vas sur le Léman, t'as une sensation de liberté, y'a de la place tout ça, et c'est vraiment agréable. » (Annecy Amateur 4) ; « Je ressens un attachement fort à ce lac, par rapport à toute son histoire [...] je me suis fait comme un mythe, un peu, et qui est un peu gravé en moi.</i>
Les facteurs qui déterminent la diffusion d'informations associées au SE		

La diffusion des informations dans le SSE est nécessaire à l'exploitation des SE	Amateur Annecy 4	<i>C'est très très fermé la pêche dans les lacs alpins, chacun ses petits secrets et on ne divulgue pas grand-chose.</i>
	Amateur Léman 3	<i>La pêche, si t'y vas pas, t'en fais pas ! Et je crois que c'est la première loi du pêcheur !</i> <i>Les pêcheurs sont vraiment les vigillances du lac hein. [...] Les pêcheurs on voit tout de suite si y'a quelque chose qui va pas sur le lac, si y'a une pollution</i>
	Amateur Léman 1	<i>Les meilleures conditions [pour pêcher en lac] : Faut que ça bouge un petit peu. C'est à dire qu'il faut qu'il y ait un [...] petit clapot ; qu'il y ait, pour les ombles, du soleil, impératif [...] ça donne des couleurs aux cuillers de surface. [...] Faut que le lac il soit assez agité pour la truite. [...] Si tu vois plonger les oiseaux dans un rayon d'1 km c'est que y'a du poisson. [...] Y'a les courants, [...] tous ces bouts de bois qui se baladent à plat, c'est que y'a beaucoup de courant [...] La couleur de l'eau : si c'est trop clair, c'est pas bon, si c'est trop blanc, l'eau de neige [chargée en pollen en surface], c'est pas bon. Ce qu'il faut, [...] il ne faut pas qu'on voit le plomb à 2 ou 3 m pour que ce soit bon, [...] le bruit, la façon dont on travaille, le poisson va attaquer ou pas.</i>
	Amateur Léman 2	<i>Quand vous pêchez la féra à la canne c'est un poisson qui se bagarre d'une façon extraordinaire, [...] quand vous pêchez à la traine et que vous faites une truite de 4 - 5 kg vous êtes en admiration devant ; vous pêchez des ombles chevaliers, c'est un poisson qui est très noble</i>
Les facteurs impliqués dans la construction d'objectifs de gestion		
Forme de la gouvernance des pêches	Amateur Léman 2	<i>L'équilibre est difficile à trouver [...] : il faut préserver les poissons et il faut préserver le lac.</i>
	Amateur Annecy 6	<i>Le lac il est de plus en plus propre, hein. Mais tu sais, un lac trop propre c'est pas... ce n'est pas bon pour les poissons. » (Amateur Léman 3) ; « l'état du lac il est vachement propre, hein, mais je sais même pas s'il est pas trop propre ...</i>
	Professionnel Annecy 1	<i>Y'a une très forte tension entre la pêche de loisir et la pêche professionnelle qui tend à s'améliorer. [...] La diminution de la féra ça a envenimé ces tensions.</i>

	Amateur Annecy 1	<p>Le nombre de filetiers [...] a quand même considérablement diminué. Aujourd'hui ils sont plus que deux. »</p> <p>« Ce qu'ils ont mis en place c'est pas mal, [...] c'est-à-dire limiter les corégones à 4 sauf journées exceptionnelles [...] Donc, ça, on voit que ça a une bonne influence sur la présence du poisson et puis [sur] les tailles du poisson.</p>
Les impacts indirects de la gestion des pêches sur le SSE	Amateur Léman 3	Avant on disait « oh, faut être en face des peupliers là-bas », on avait des repères visuels. [...]
	Amateur Annecy 4	<p>La pêche elle a muté, [...] avant qu'on ait l'échosondeur, on s'appelait énormément [...], c'était beaucoup plus convivial la pêche, les gens, [...] y'avait des regroupements de pêcheurs, mais fallait voir, à l'époque tu avais 20, 30 bateaux tu vois, et les gens étaient plus proches, ça discutait, c'était ... maintenant, on est devenus vachement plus indépendantistes, chacun prend son échosondeur, va dans son coin tout ça, on n'a pas besoin de l'autre. [...] Un cas flagrant, c'est [...] avant on pêchait toujours les bandes de rives, dès l'ouverture [...] et à l'heure d'aujourd'hui, on attaque l'ouverture, on est au milieu, tous, au milieu du lac. Et les bancs de féras, c'est tout au milieu du lac. [...] Pour ma part, [l'échosondeur] augmente les possibilités de pêche, c'est un bien que derrière ils aient diminué les quotas. [...] je pense on est partis sur une pêche moderne, [...] Sur les fonds, tu vois, j'y voyais pas comme ça [avant d'avoir le sondeur], quand je traîne moi maintenant je regarde beaucoup les tombants dans les zones des hauts fonds [...] et pour l'approche, tu sais, et bah ça c'est un sacré atout.</p>
	Professionnel Léman 1	[Avant le sondeur] on avait des mires ... c'est-à-dire, sur deux points fixes, et on savait sur quel endroit on pouvait les poser.
	Amateur Léman 1	<p>Alors l'évolution, y'a eu l'échosondeur. [...] Le fait de voir du poisson, on pêche pas dans une baignoire comme on dit, on sait que y'a le poisson. [...] C'est une indication. [...] comme ils voient du poisson à d'autres endroits, les pêcheurs [amateurs] s'espacent davantage. [...] [Avant] pour sonder le fond, [...] on avait un fil à plomb de maçon hein ! [...] mais on ne pêchait pas aussi vite, on pêchait doucement. Là maintenant on pêche beaucoup plus vite. [...] si tu pêches vite tu fais des gros. [...] Mais on ne pêchait pas au large comme maintenant, on pêchait à hauteur des filets</p>
	Amateur Léman 2	<p>Maintenant on a le droit au sondeur, donc du coup c'est beaucoup plus simple de retourner aux mêmes spots [...] avant c'était simple de regarder son collègue : ah tiens aujourd'hui il est là, demain, bon, je viendrai à sa place. [...] [J'ai des collègues] s'ils n'ont pas vu passer un poisson dans le sondeur, il faut bouger [...] Ils courent après le poisson, [...] la plupart, ils</p>

		<i>aiment bien, c'est pour ça que y'en a la plupart ils sont à la rame, ils bougent.</i>
	<i>Amateur Annecy 3</i>	<i>On peut se permettre de voir les dénivelés, le fond, les trucs comme ça [...] et détecter les poissons, même les poissons que je ne pêche pas. [...] Et maintenant on commence à pêcher la féra au large, parce que y'a les sondeurs qui nous disent que la féra est au large.</i>
	<i>Amateur Annecy 6</i>	<i>On n'avait pas de sondeur ... je me rappelle pas quelle année c'est, plus personne prenait des féras. Personne prenait des féras, on n'avait pas de sondeur, on dit « y'a plus de poissons dans le lac ? », l'année suivante, on avait les sondeurs : hé, les poissons avaient changé de coin.</i>
	<i>Professionnel Annecy 1</i>	<i>Dès que [les pêcheurs amateurs] ont eu le sonar, c'était tout à fait différent. Avant, ils se mettaient à un endroit, ils pêchaient, ils restaient 2 - 3 heures et en général ils prenaient quand même du poisson. [...] que maintenant, ils passent avec leur sondeur, ils n sortent pas les lignes, ils tournent jusqu'à ce qu'ils arrivent à des coins plus favorables, et ils lèvent tout de suite l'ancre, ils partent et vont ailleurs. [...] c'était peut-être des pêcheurs plus instinctifs, maintenant ils sont sur leur appareil. [...] Et ça a un avantage pour nous, c'est que avant, quand ils prenaient pas de poissons, c'était de notre faute. Que maintenant, ils ont leur appareil, ils voient que y'a du poisson, ils disent donc : « il y est mais on l'attrape pas ! », donc ils ont modifié un petit peu leur [point de vue]. [...] Parce qu'avant : « y'a pas de poissons ? ah bah c'est les pros qui sont passés !</i>

Forçages exogènes de changement d'état du SE

Les forçages biophysiques	<i>Professionnel Léman 3</i>	<i>Je vois que c'est difficile de trouver une eau qui corresponde au moment de la fraie à la température du poisson, hein, c'est ça le gros problème, c'est la reproduction</i>
	<i>Amateur Léman 1</i>	<i>Le lac il se renouvelle pas, [...] avant y'avait des grosses tempêtes, y'avait des gros froids, y'avait des - 15, - 20 [...] quand y'a les grosses tempêtes de bise, y'a du poisson après [...] et quand y'a pas eu d'hiver, c'est pas bon [...]. On pêche plus aux mêmes périodes, aux mêmes profondeurs qu'il y a 20, 25 ans » Quand on a introduit aussi les écrevisses, ça aussi ça a été une catastrophe, parce que ça rentre dans les ombrières et ça bouffe tout.</i>
	<i>Professionnel Annecy 1</i>	<i>Une autre variété qui a été mise, par inadvertance ou pas bêtise, je ne sais pas. Ce sont des pacifastacus, alors c'est une écrevisse qui a des pattes rouges, qui est de grosse taille, qui est très bonne gustativement, heureusement c'est une écrevisse qui fait encore pas trop de dégâts...</i>
	<i>Professionnel Léman 1</i>	<i>Au port, [...] avant on vendait du poisson, maintenant on ne voit plus personne... Avec les grandes surfaces, maintenant ça a tout changé. [...] Les gens mangent du poisson de mer maintenant, alors qu'avant ils consommaient des poissons du lac...</i>

Forçages socio-économiques et culturels	<i>Amateur Léman 2</i>	<i>Quand vous mangez des perches du bord du lac, 80% viennent de l'étranger... c'est toujours une question d'argent</i>
	<i>Professionnel Léman 2</i>	<i>Y'a quand même largement assez de clients qui veulent du poisson du lac [...] y'a pas de concurrence de l'importation [...] [parce que] la demande [de perche] est bien supérieure à l'offre, et sur la féra [...] y'a quasiment pas d'importation de féra [ou sauf] dans les périodes où y'a plus ou pas de féra qui sort du Léman quoi. [...]</i>
	<i>Professionnel Léman 3</i>	<i>Y'a que 10% du filet de perche qui provient du lac, même dans les bonnes années hein, faut pas rêver. Est-ce que ça a porté tort à la perche? non! elle s'est toujours vendue plus chère. [...] c'est devenu une économie locale le filet de perche du lac.</i>
Les relations avec les SSE adjacents	<i>Amateur Léman 3</i>	<i>La pêche à la féra elle est arrivée y'a 10 ans. [...] ça a démarré du Bourget, [...] parce qu'on a eu les gens du Bourget qui sont venus ici pêcher, et puis qui ont amené leurs techniques. [...] [...] Eux ont profité de la technique de la traîne, parce que eux ils étaient limités, mais ils ont amené toutes les techniques à la canne, c'est-à-dire pêche à la gambe, pêche à la féra, à l'omble, c'est eux, ça vient plutôt du Bourget et d'Annecy, parce qu'ici ça se faisait pas.</i>
	<i>Professionnel Léman 3</i>	<i>On a des pêcheurs qui sont venus d'un peu partout hein, on en a récupéré dans un premier temps de la Saône ou d'autres rivières qui avaient des problèmes de PCB</i>

Annexe 6-2 : Principales évolutions du Règlement d'application relatif à la pêche dans le Léman entre 1980 et 2016

Espèces	1980			1995			2001		
	Taille mini (cm)	Captures par an	Captures par jour	Taille mini (cm)	Captures par an	Captures par jour	Taille mini (cm)	Captures par an*	Captures par jour*
Perche	15			15			15		80
Omble chevalier	27			27			27	250	10
Truites	35			35			35	250	8
Brochet	40			50			45		5
Corégone	30			30			30		
Ombre commun	27			30			27		
<i>Autres modifications relatives à la protection des espèces</i>	1 - Interdiction de pêche dans les roselières et les réserves naturelles 2 - Tout poisson n'ayant pas atteint la taille légale doit être remis à l'eau			3 - Interdiction de pêche aux écrevisses à pattes blanches et à pattes rouges. 4 - La période de protection de la perche est supprimée			5 - Interdiction de remise à l'eau des perches capturées (même si elles ne mesurent pas la taille légale) 6 - Les poissons géniteurs des repeuplements doivent être autochtones au lac		
Espèces	2006			2011			2016		
	Taille mini (cm)	Captures par an*	Captures par jour*	Taille mini (cm)	Captures par an*	Captures par jour*	Taille mini (cm)	Captures par an*	Captures par jour*
Perche	15		100	15		100	15		100
Omble chevalier	27	250	10	27	250	10	30	200	8
Truites	35	250	8	35	250	8	35	200	8
Brochet	45		5	45		5	45		5
Corégone	30	250	10	30	250	10	30	250	10
Ombre commun	27			Pêche interdite			Pêche interdite		
<i>Autres modifications relatives à la protection des espèces</i>				7 - La pêche de l'Ombre commun est interdite 8 - Carnet de prises obligatoire pour tout pêcheur de loisir 9 - Interdiction de la pêche au brochet à 500m des embouchures de rivières pendant la période de protection des salmonidés.					
* Ne concerne que la pêche amateur									

Annexe chapitre 7

Annexe 7-1 : Critères d'évaluation des cadres conceptuels des SE (Nahlik et al. 2012)

Table 2 Specific criteria and associated statements used to evaluate peer-reviewed ecosystem service frameworks. Ecosystem services are abbreviated as "ES" in the statements. Scores range from 0 (completely lacking from the framework) to 4 (strongly addressed in the framework).

Criteria	Lacking → Addressed			
	0	1	2	3
Ecosystem service definition & classification system	<ul style="list-style-type: none"> There is no definition. OR only a general definition (i.e., vague, double-counting issues) is provided. 	<ul style="list-style-type: none"> A general definition is provided. AND the text includes examples of ES or places ES in context of other definitions to help clarify the general definition. 	<ul style="list-style-type: none"> Only a clear, precise definition (specific enough to lead to consistent ES identification, avoids double-counting) is provided. 	<ul style="list-style-type: none"> A clear, precise definition is provided. AND the text includes hypothetical examples and/or protocol for using the definition to classify ES.
Transdisciplinary	<ul style="list-style-type: none"> Only a single discipline is represented. AND there is use of discipline-specific language and terms. 	<ul style="list-style-type: none"> Major disciplines (e.g., ecology, economics) are identified. BUT only a single discipline is represented using discipline-specific language and terms. 	<ul style="list-style-type: none"> Several disciplines are included. BUT collaboration is not explicitly encouraged (i.e., "information hand-off" is promoted). 	<ul style="list-style-type: none"> Several disciplines are included and explicitly encouraged to collaborate. AND language and terms can be interpreted across many disciplines.
Community engagement	<ul style="list-style-type: none"> Individuals (i.e., people, groups, and firms) are not considered. 	<ul style="list-style-type: none"> Individual perspectives are identified as an important consideration. BUT individuals are not queried about ES. 	<ul style="list-style-type: none"> Individual perspectives are identified as an important consideration. AND individuals are queried about ES. 	<ul style="list-style-type: none"> Individuals actively participate through open dialog with each other and with scientists early in the process of framework development.
Resilient	<ul style="list-style-type: none"> The framework is restricted by linearity or details. AND it lacks flexibility in the event of changing conditions. 	<ul style="list-style-type: none"> The framework is so general or detailed that changes in conditions would not have an impact on the framework. 	<ul style="list-style-type: none"> The framework mentions the potential for changing conditions. BUT it is not flexible and could still be compromised by changes in conditions. 	<ul style="list-style-type: none"> The framework is operational in the long-term because it is adaptable to changing conditions.
Cohesive & coherent	<ul style="list-style-type: none"> The underlying assumptions of the framework are untested or based upon scarce information. AND it is not organized logically or realistically. 	<ul style="list-style-type: none"> The underlying assumptions of the framework are untested or based upon scarce information. BUT it is organized logically and realistically. 	<ul style="list-style-type: none"> The framework is conceptually sound. BUT it is not organized logically or realistically. 	<ul style="list-style-type: none"> The framework is conceptually sound and organized logically and realistically. AND its use has been demonstrated.
Policy-relevant	<ul style="list-style-type: none"> Policy (and/or decision-making) implications are not considered in the framework. 	<ul style="list-style-type: none"> Policy (and/or decision-making) is mentioned as a future implication. BUT policy issues are not specifically addressed. 	<ul style="list-style-type: none"> Policy (and/or decision-making) is a minor component of the framework. 	<ul style="list-style-type: none"> Policy (and/or decision-making) is a major component of the framework. AND specific policy needs are addressed.

Bibliographie

Abbott, B. W., K. Bishop, J. P. Zarnetske, C. Minaudo, F. S. Chapin, S. Krause, D. M. Hannah, L. Conner, D. Ellison, S. E. Godsey, S. Plont, J. Marçais, T. Kolbe, A. Huebner, R. J. Frei, T. Hampton, S. Gu, M. Buhman, S. Sara Sayedi, O. Ursache, M. Chapin, K. D. Henderson, and G. Pinay. 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience* 12(7):533–540.

About, J.-P. 1972. La pollution des lacs. La France défigurée.

Abson, D. J., and M. Termansen. 2011. Valuing ecosystem services in terms of ecological risks and returns. *Conservation Biology* 25(2):250–258.

Abson, D. J., and M. Termansen. 2011. Valuing ecosystem services in terms of ecological risks and returns. *Conservation Biology* 25(2):250–258.

Abson, D. J., H. von Wehrden, S. Baumgärtner, J. Fischer, J. Hanspach, W. Härdtle, H. Heinrichs, A. M. Klein, D. J. Lang, P. Martens, and D. Walmsley. 2014. Ecosystem services as a boundary object for sustainability. *Ecological Economics* 103:29–37.

Ala-Hulkko, T., O. Kotavaara, J. Alahuhta, P. Helle, and J. Hjort. 2016. Introducing accessibility analysis in mapping cultural ecosystem services. *Ecological Indicators* 66:416–427.

Alexandratos, N., and J. Bruinsma. 2012. World Agriculture Towards 2030/2050 : the 2012 Revision. Page ESA Working paper. Rome.

Alexandre, O., and R. Arrus. 2006. Les territoires de l'eau. Cybergeog.

Allan, D. J., N. F. Manning, S. D. P. Smith, C. E. Dickinson, C. A. Joseph, and D. R. Pearsall. 2017. Ecosystem services of Lake Erie: Spatial distribution and concordance of multiple services. *Journal of Great Lakes Research*:1–11.

Allan, D. J., N. F. Manning, S. D. P. Smith, C. E. Dickinson, C. A. Joseph, and D. R. Pearsall. 2017. Ecosystem services of Lake Erie: Spatial distribution and concordance of multiple services. *Journal of Great Lakes Research*:1–11.

Amigues, J., and B. Chevassus-au-louis. 2011. Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels. Page ONEMA : Comprendre pour agir.

Andersson, E., B. Nykvist, R. Malinga, F. Jaramillo, and R. Lindborg. 2015. A social–ecological analysis of ecosystem services in two different farming systems. *Ambio* 44(1):102–112.

Anneville, O., and J. P. Pelletier. 2000. Recovery of Lake Geneva from eutrophication : quantitative response of phytoplankton. *Archiv für Hydrobiologie* 148(4):607–624.

Anneville, O., C. Chang, G. Dur, S. Souissi, F. Rimet, and C. Hsieh. 2019. The paradox of re-oligotrophication: the role of bottom-up versus top-down controls on the phytoplankton community. *Oikos*(June):1–12.

Arnauld de Sartre, X., & Gagnol, L. (2020). Les échelles des territorialités. *Géographie et Cultures*, 81, 10.

Assad, A. 2014. Pollution anthropique de cours d'eau : caractérisation spatio-temporelle et estimation des flux.

Aubertin, C., D. Chartier, L. Desvallées, M. Grimaldi, O. Huet, N. Jéjou, C. Kull, S. Le, N. Ovono, X. A. De Sartre, M. Castro, S. Dufour, J. Oszwald, X. A. De Sartre, and M. Castro. 2001. Political ecology des services écosystémiques.

Aznar-Sánchez, J. A., J. F. Velasco-Muñoz, L. J. Belmonte-Ureña, and F. Manzano-Agugliaro. 2019. The worldwide research trends on water ecosystem services. *Ecological Indicators* 99(December 2018):310–323.

Baguet, R., A. Klein, A. Clémens, O. Gorin, M. Pinto, A. Cordonier, F. Kerrien, M. Lafforgue, C. Lépinard, S. Ramseier, P. Michal, D. Brondel, R. Jalinoux, A. Barillier, and C. Pousse. 2015. Chapitre 5 : Importance économique et usages. Page pp 95-118 *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions*.

Bajard, M., J. Poulénard, P. Sabatier, D. Etienne, F. Ficetola, W. Chen, L. Gielly, P. Taberle, A.-L. Develle, P.-J. Rey, B. Moulin, J.-L. Beaulieu, and F. Arnaud. 2017. Long-term changes in alpine pedogenetic processes: Effect of millennial agro-pastoralism activities (French-Italian Alps). *Geoderma* 306:217–236.

Balian, E. 1994. Evaluation de la qualité des eaux du Léman : de l'approche des scientifiques à la perception des utilisateurs.

Barbault, R. 2000. *Ecologie générale : structure et fonctionnement de la biosphère* (5ème édition). Dunod.

Barbier, E. B. 2012. Progress and challenges in valuing coastal and marine ecosystem services. *Review of Environmental Economics and Policy* 6(1):1–19.

Barbier, E., and S. D. Hacker. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs* 81(2):169–193.

Barnaud, C., M. Antona, and J. Marzin. 2011. Vers une mise en débat des incertitudes associées à la notion de service écosystémique. *VertigO* 11(Volume 11 Numéro 1):29 p.

Barraqué, B. 1986. L'eau du lac d'Annecy. *Les annales de la recherche urbaine* 30:24–33.

Barraqué, B. 2011. Aspects institutionnels de la gestion durable de l'eau en Europe Institutional dimension of sustainable water management in Europe. *Cybergeo*:0–6.

Barroin, G. 1990. La pollution des eaux par les phosphates. *La Recherche* 221(mai): pp 620-627.

Barroin, G. 1992. Dégradation et réhabilitation des eaux de surface, Tome 2, Dossier de la cellule environnement, INRA, n° 4, p. 145-159.

Barroin, G. 1995. Les phosphates, ou comment manipuler la science : du laboratoire à l'écosystème, il n'y a qu'un pas, vite franchi. *La Recherche* 281(novembre):56–60.

Beaulieu, R. 2008. Historique de l'aménagement des cours d'eau agricoles. Page 60.

Belle, E. 2014. Aix-les-Bains, carrefour de villégiatures : thermalisme, climatisme, sports d'hiver et bords de lac. *In Situ* (24):0–29.

Benedetti-Crouzet, E. 1972. Etude géodynamique du lac d'Annecy et de son bassin versant. Paris, France.

Bennett, E. M., G. D. Peterson, and L. J. Gordon. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters* 12(12):1394–1404.

Bergeret, A., E. George-marcelpoil, J. Delannoy, and D. Piazza-morel. 2015a. L'outil-frise : une expérimentation interdisciplinaire : Comment représenter des processus de changements en territoires de montagne ? *Carnets ITEM*:179.

Bergeret, P. A., J. Delannoy, E. George-marcelpoil, D. Piazza-Morel, S. Berthier-foglar, A. Bonnemaïn, P. Bourdeau, M. Duval, H. François, S. Girard, D. Laforgue, P. Lamarque, S. Madelrieux, and S. Tolazzi. 2015b. L'outil-frise, dispositif d'étude interdisciplinaire du changement territorial. *Espaces temps*:1–24.

Berkes, F., and C. Folke. 1998. *Linking Social and Ecological systems : management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge. Cambridge, United Kingdom.

Bertaux, D. 1980. L'approche biographique: sa validité méthodologique, ses potentialités. *Cahiers Internationaux de Sociologie* 69:197–225.

Bertaux, D. 1997. *L'enquête et ses méthodes: Le récit de vie*. Page (Armand Colin, editor). Second edition.

Beslagic, S. 2013. Histoire des interactions entre les sociétés humaines et le milieu aquatique durant l'anthropocène : évolutions des peuplements piscicoles dans le bassin de la Seine. Paris 1.

BFM TV. 2018. Sécheresse : le lac d'Annecy au plus bas depuis 70 ans (film).

Biggs, R., F. R. Westley, and S. R. Carpenter. 2010. Navigating the back loop: Fostering social innovation and transformation in ecosystem management. *Ecology and Society* 15(2):28.

Billen, L. 1997. *Le récit de vie – Daniel Bertaux*.

Binder, C., J. Hinkel, P. Bots, and P.-W. Claudia. 2011. Comparison of Frameworks for Analyzing Social-ecological Systems. *Ecology and Society* 18(4):26.

Blavoux, B., B. Dussart, H. Maneglier, and C. Salvetti. 1962. La région du Léman au point de vue hydrométéorologique. *Le Globe. Revue genevoise de géographie* 102:49–68.

Blicharska, M., R. J. Smithers, M. Hedblom, H. Hedenås, G. Mikusiński, E. Pedersen, P. Sandström, and J. Svensson. 2017. Shades of grey challenge practical application of the cultural ecosystem services concept. *Ecosystem Services* 23(June 2016):55–70.

Bonn, F. 2003. Erosion et pollution diffuse. *Page Ecologie physique des bassins versants. GEO* 400.

Bossuat, G. 1986. L' aide américaine à la France après la seconde guerre mondiale. *Vingtième siècle, revue d'histoire* 9:17–36.

Bouleau, G., P.-L. Marchal, M. Meybeck, and L. Lestel. 2017. La construction politique de la commune mesure de la qualité des eaux superficielles en France : de l'équivalent-habitant au bon état (1959-2013)The political construction of surface water quality commensuration in France: from the equivalent-inhabitant t. *Développement durable et territoires (Vol. 8, n°1):0–19.*

Boy, R. 2011. Evolution récente des paysages du lac du Bourget : le poids du projet Grand Lac.

Boyd, J., and S. Banzhaf. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63(2–3):616–626.

Bravard, J., and R. Pourtier. 2003. Les territoires de l'eau - introduction. Pages 239–241 *Bulletin de l'association de géographes français.*

Bréhaut, C., and G. Pflieger. 2017. De la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) au Nexus Eau-Energie-Nourriture et Ecosystèmes. *Page Mooc Gestion de l'eau.*

Brewer, G. D. 1995. Environmental challenges: interdisciplinary opportunities and new ways of doing business. *MISTRA. Stockholm.*

Brun, A. 2009. Gestion de l'eau en France. *Economie rurale*(309):4–8.

Brunet, L. 2016. Faire l'expérience des « services écosystémiques ». *Carnets de géographes* 9:19.

Brunet, R., R. Ferras, and H. Théry. 1992. Les mots de la géographie : dictionnaire critique. *Reclus-I. Montpellier-Paris.*

Burkhard, B., and J. Maes. 2017. Mapping Ecosystem Services. *Page (B. Burkhard and J. Maes, editors) Pensoft Publishers. Sofia.*

Burkhard, B., F. Kroll, S. Nedkov, and F. Müller. 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators* 21:17–29.

Burkhard, B., M. Kandziora, Y. Hou, and F. Müller. 2014. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification. *Landscape Online* 34(1):1–32.

Caillaud, S., & Flick, U. 2016. Triangulation méthodologique. Ou comment penser son plan de recherche. In *Les représentations sociales*. De Boeck, pp. 227–240.

Carignan, R., and S. Lorrain. 2000. Sediment dynamics in the fluvial lakes of the St. Lawrence River: accumulation rates and characterization of the mixed sediment layer. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57(S1):63–77.

Carpenter, S. R., and J. F. Kitchell. 1993. *The trophic cascade in lakes*. Cambridge. Cambridge, United Kingdom.

Carpenter, S. R., and K. L. Cottingham. 1997. Resilience and restoration of lakes. *Ecology and Society* 1(1):1–16.

Carpenter, S. R., B. J. Benson, R. Biggs, J. W. Chipman, J. A. Foley, S. A. Golding, R. B. Hammer, P. C. Hanson, P. T. J. Johnson, A. M. Kamarainen, T. K. Kratz, R. C. Lathrop, K. D. McMahon, B. Provencher, J. A. Rusak, C. T. Solomon, E. H. Stanley, M. G. Turner, M. J. Vander Zanden, C.-H. Wu, and H. Yuan. 2007. Understanding regional change: A comparison of two lake districts. *Bioscience* 57(4):323–335.

Carpenter, S., B. Walker, J. M. Anderies, and N. Abel. 2001. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems* 4(8):765–781.

Castro, A. J., P. H. Verburg, B. Martínez-López, M. Garcia-Llorente, J. Cabello, C. C. Vaughn, and E. López. 2014. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: A landscape-scale spatial analysis. *Landscape and Urban Planning* 132:102–110.

CEN. 2017. Étude des ressources paysagères naturelles du Lac du Bourget.

CGDD. 2010. *Projet de caractérisation des fonctions écologiques des milieux en France*.

Chan, K. M. A., T. Satterfield, and J. Goldstein. 2012. Rethinking ecosystem services to better address and navigate cultural values. *Ecological Economics* 74:8–18.

Chapdelaine, D., and I. Duchesne. 2009. On étouffe le Lac Saint-Pierre. *A Bâbord!* 29.

Chapin, F. S., S. R. Carpenter, G. P. Kofinas, C. Folke, N. Abel, W. C. Clark, P. Olsson, D. M. S. Smith, B. Walker, O. R. Young, F. Berkes, R. Biggs, J. M. Grove, R. L. Naylor, E. Pinkerton, W. Steffen, and F. J. Swanson. 2010. Ecosystem stewardship: sustainability strategies for a rapidly changing planet. *Trends in Ecology and Evolution* 25(4):241–249.

Chardon, M. 1984. Montagne et haute montagne alpine, critères et limites morphologiques remarquables en haute montagne. *Revue de géographie alpine* 72(2):213–224.

Chaxel, S., C. Fiorelli, and P. Moity-maïzi. 2014. Les récits de vie : outils pour la compréhension et catalyseurs pour l' action. *Interrogations* 17:14.

Chettiparamb, A. 2007. Interdisciplinarity: a literature review. Page The Interdisciplinary Teaching and Learning Group,.

CICES. 2018. CICES v 5.1.

CIPEL. 1964. Rapport sur l'état sanitaire du Léman de 1957-1960.

CIPEL. 1966. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique.

CIPEL. 1968. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique.

CIPEL. 1975. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique.

CIPEL. 1984. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin Lémanique.

CIPEL. 1995. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique.

CIPEL. 2007. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique.

CIPEL. 2013. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique.

CIPEL. 2017. Zones humides : des milieux à préserver. La lettre du Léman 53(janvier):8.

CIPEL. 2018. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique.

CIPEL. 2019. Vision Léman 2030.

CISALB. 2011. Suivi scientifique du lac du Bourget.

Clarimont, S. 2009. L'évolution des politiques française et espagnole de l'eau : entre directives communautaires et décentralisation administrative. *Economie rurale* 309:34–49.

Collen, B., F. Whitton, E. E. Dyer, J. E. M. Baillie, N. Cumberlidge, W. R. T. Darwall, C. Pollock, N. I. Richman, A. M. Soulsby, and M. Böhm. 2014. Global patterns of freshwater species diversity, threat and endemism. *Global Ecology and Biogeography* 23(1):40–51.

Collins, S. L., S. R. Carpenter, S. M. Swinton, D. E. Orenstein, D. L. Childers, T. L. Gragson, N. B. Grimm, G. J. Morgan, S. L. Harlan, J. P. Kaye, A. K. Knapp, G. P. Kofinas, J. J. Magnuson, W. H. McDowell, J. M. Melack, L. A. Ogden, R. G. Philip, M. D. Smith, and A. C. Whitmer. 2011. An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(6):351–357.

Conseil du Léman. 2014. Chiffres Clefs De L'Espace Lémanique.

Costanza, R. 2008. Letter to the Editor Ecosystem services : Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation* 141:350–352.

Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630):253–260.

Costanza, R., R. de Groot, P. Sutton, S. van der Ploeg, S. J. Anderson, I. Kubiszewski, S. Farber, and R. K. Turner. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change* 26(1):152–158.

Côté, J.-P., and J. Morin. 2003. Modifications anthropiques sur 150 ans au lac Saint-Pierre : une fenêtre sur les transformations de l'écosystème du Saint-Laurent. *Vertigo* 4(Volume 4 Numéro 3):1–10.

Cristofini, B., and D. Roybin. 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.

Crutzen, P. J. 2002. Geology of mankind. *Nature* 415(6867):23–23.

Culhane, F., H. Teixeira, A. J. A. Nogueira, F. Borgwardt, D. Trauner, A. Lillebø, G. Piet, M. Kuemmerlen, H. McDonald, T. O'Higgins, A. L. Barbosa, J. T. van der Wal, A. Iglesias-Campos, J. Arevalo-Torres, J. Barbière, and L. A. Robinson. 2018. Risk to the supply of ecosystem services across aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment* 660:611–621.

Cumberlidge, N., P. K. Ng, D. C. Yeo, C. Magalhaes, M. R. Campos, F. Alvarez, T. Naruse, S. Daniels, L. Esser, F. Attipoe, F.-L. Clotilde-Ba, W. Darwall, A. Mclvor, M. Ram, and B. Collen. 2009. Freshwater Crabs and the biodiversity crisis : Importance, threats, status, and conservation challenges. *Biological Conservation* 142:1665–1673.

Dachs, J., S. J. Eisenreich, and R. M. Hoff. 2000. Influence of eutrophication on air-water exchange, vertical fluxes, and phytoplankton concentrations of persistent organic pollutants. *Environmental Science and Technology* 34(6):1095–1102.

Daily, G. C. 1997. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems.

Daily, G. C., S. Polasky, J. Goldstein, P. M. Kareiva, H. A. Mooney, L. Pejchar, T. H. Ricketts, J. Salzman, and R. Shallenberger. 2009. Ecosystem services in decision making: Time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1):21–28.

Damesin, N. 2013. Economie de fonctionnalité: freins et levier de ce modèle économique dans les entreprises. Université de Sherbrooke (Canada) et Université de Troyes (France).

Dauphin, D., and B. Jobin. 2016. Changements de l'occupation du sol dans la plaine inondable du lac Saint-Pierre entre les années 1950 et 1997. *Le Naturaliste Canadien - La Société Provancher d'Histoire Naturelle du Canada* 140(1):42.

David, J. 1967. Pêche, pêcheurs professionnels, pollution dans le lac du Bourget. *Bulletin français de pisciculture* 224(4):14.

De Araujo Barbosa, C. C., P. M. Atkinson, and J. A. Dearing. 2015. Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators* 52:430–443.

De Freitas, L., E. Morin, and B. Nicolescu. 1994. Charte de la Transdisciplinarité.

De Groot, R. S., M. a Wilson, and R. M. J. Boumans. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41(May):393–408.

de Groot, R. S., R. Alkemade, L. Braat, L. Hein, and L. Willemen. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7(3):260–272.

de Groot, R. S., R. Alkemade, L. Braat, L. Hein, and L. Willemen. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7(3):260–272.

De Groot, R., B. Fisher, M. Christie, J. Aronson, L. Braat, J. Gowdy, R. Haines-young, E. Maltby, A. Neuville, S. Polasky, R. Portela, I. Ring, J. Blignaut, E. Brondízio, R. Costanza, K. Jax, G. K. Kadekodi, P. H. May, J. McNeely, and S. Shmelev. 2010. Chapter 1 Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. Pages 1–40 *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*.

de Groot, R., L. Brander, S. van der Ploeg, R. Costanza, F. Bernard, L. Braat, M. Christie, N. Crossman, A. Ghermandi, L. Hein, S. Hussain, P. Kumar, A. McVittie, R. Portela, L. C. Rodriguez, P. ten Brink, and P. van Beukering. 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services* 1(1):50–61.

De Koninck, R. 2000. *Les cent-îles du lac Saint-Pierre. Retour aux sources et nouveaux enjeux*. Laval.

Deléage, J. P. 2010. *Histoire de l'écologie : une science de l'homme et de la nature*.

Delorme, B., A.-M. Folliet, and M. Frezier. 2000. *Etude du plan Paysage : synthèse de la phase de diagnostic*.

Díaz, S., U. Pascual, M. Stenseke, B. Martín-López, R. T. Watson, Z. Molnár, R. Hill, K. M. A. Chan, I. A. Baste, K. A. Brauman, S. Polasky, A. Church, M. Lonsdale, A. Larigauderie, P. W. Leadley, A. P. E. van Oudenhoven, F. van der Plaats, M. Schröter, S. Lavorel, Y. Aumeeruddy-Thomas, E. Bukvareva, K. Davies, S. Demissew, G. Erpul, P. Failler, C. A. Guerra, C. L. Hewitt, H. Keune, S. Lindley, and Y. Shirayama. 2018. Assessing nature's contributions to people. *Science* 359(6373):270–272.

Dorioz, J. M., and D. Trevisan. 2007. Le transfert diffus du phosphore dans les bassins agricoles : ordres de grandeur, mécanismes, maîtrise. *Ingénieries n° Spécial*:27–47.

Dorioz, J. M., D. Wang, J. Poulénard, and D. Trévisan. 2006. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics-A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 117(1):4–21.

Downing, J. A., and C. M. Duarte. 2009. Abundance and Size Distribution of Lakes, Ponds and Impoundments. *Encyclopedia of Inland Waters* 51(5):469–478.

Drouin, J. M. 1987. La naissance du concept d'écosystème. *Aster*(3):1–10.

Dubois, N., É. Saulnier-Talbot, K. Mills, P. Gell, R. Battarbee, H. Bennion, S. Chawchai, X. Dong, P. Francus, R. Flower, D. F. Gomes, I. Gregory-Eaves, S. Humane, G. Kattel, J. P. Jenny, P. Langdon, J. Massaferrò, S. McGowan, A. Mikomägi, N. T. M. Ngoc, A. S. Ratnayake, M. Reid, N. Rose, J. Saros, D. Schillereff, M. Tolotti, and B. Valero-Garcés. 2018. First human impacts and responses of aquatic systems: A review of palaeolimnological records from around the world. *Anthropocene Review* 5(1):28–68.

Duc, G., A. Frei, and O. Perroux. 2009. *Eau, gaz, électricité : Histoire des énergies à Genève du XVIIIe siècle à nos jours*. Editions I.

Duclos, C. 2018. *Développement des pratiques touristiques sur et aux abords des grands lacs alpins : une construction multifactorielle des relations homme-nature*.

Dussart, B. 1966. *Limnologie, l'étude des eaux continentales*. Boubée.

EFESE. 2016. *Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services écosystémiques : Rapport intermédiaire*.

Evers, C. R., C. B. Wardropper, B. Branoff, E. F. Granek, S. L. Hirsch, T. E. Link, S. Olivero-Lora, and C. Wilson. 2018. The ecosystem services and biodiversity of novel ecosystems: A literature review. *Global Ecology and Conservation* 13:11.

Fabre-Le Hec, C. *Conception d'un système d'indicateurs pour la mise en place d'un observatoire de l'impluvium des eaux d'Évian*. Thèse de doctorat, INRA – Institut National Polytechnique de Lorraine, 213p

FAO. 2015. *Natural Capital Impacts in Agriculture: Supporting Better Business Decision-Making*.

Farley, J. 2012. Ecosystem services: The economics debate. *Ecosystem Services* 1(1):40–49.

Ferraton, M. 2017. *L'approche participative au service de la gestion intégrée de la ressource en eau : l'expérience des parcs naturels régionaux du Sud-Est de la France*. Université Savoie Mont Blanc.

Ferrier, C. 1998. *Gestion et protection des eaux transfrontalières : une perspective européenne pour le bassin lémanique*. Genève.

Fisher, B., and R. K. Turner. 2008. Ecosystem services: Classification for valuation. *Biological Conservation* 141(5):1167–1169.

Fisher, B., R. K. Turner, and P. Morling. 2008. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics* 68(3):643–653.

Floret, J., and P. Hubert. 1977. Les fonctions socio-économiques du Léman. *Revue de géographie alpine* 65(2):181–201.

Folke, C. 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16(3):253–267.

Forel, F. A. 1892. Le Léman : Monographie limnologique (Tome premier). Lausanne, Switzerland.

Forel, F. A. 1904. Le Léman. Monographie limnologique.

Francoeur, L.-G. 2004. Le lac Saint-Pierre aura disparu dans 100 ans. *Le Devoir*:3.

Francoeur, L.-G. 2004. Le lac Saint-Pierre aura disparu dans 100 ans. *Le Devoir*:3.

Frioux, S., and J.-F. Malange. 2013. Risque perçu et risque vécu. Les pêcheurs à la ligne et la pollution des cours d'eau en France aux XIX^e et XX^e siècles. Pages 335–348 *Au fil de l'eau. Ressources, risques et gestion du Néolithique à nos jours*. Presses Un.

Frossard, V., G. Chloé, J. Guillard, V. Hamelet, S. Jacquet, L. Laine, F. Rimet, and V. Tran-Khac. 2018. Suivi scientifique du lac d'Annecy.

Gagnaire, L. 1988. Rapport Institut de Limnologie : Rôle de la pêche française au Léman dans l'économie locale du Chablais.

Galligani, S. 2000. De l'entretien au récit de vie. *Ecart* 92:21–24.

Gallopín, G. 1994. *Impoverishment and Sustainable Development: A systems Approach*. Internatio. Winnipeg, Canada.

Gauchon, C. 2019. Conférence introductive. Page Territoires et paysages lacustres, des lacs de plaine aux lacs de montagne.

Ghiotti, S. 2005. Les Territoires de l'eau et la décentralisation. La gouvernance de bassin versant ou les limites d'une évidence. *Développement durable et territoires*.

Giget, D. 1998. *La dynamique stratégique de l'entreprise*. Dunod.

Giguet-Covex, C., F. Arnaud, J. Poulénard, D. Enters, J. L. Reyss, L. Millet, J. Lazzaroto, and O. Vidal. 2010. Sedimentological and geochemical records of past trophic state and hypolimnetic anoxia in large, hard-water Lake Bourget, French Alps. *Journal of Paleolimnology* 43(1):171–190.

Gillet, C. 1991. Egg production in an Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) brood stock: effects of temperature on the timing of spawning and the quality of eggs. *Aquatic Living Resources* 4(2):109–116.

Gillet, C. 2017. L'omble chevalier, une espèce d'origine arctique particulièrement bien adaptée à vivre dans les eaux froides. *Les Voix du Léman*:32–35.

Girardin, P., L. Guichard, and C. Bockstaller. 2005. Indicateurs et tableaux de bord : guide pratique pour l'évaluation environnementale.

Godelier, M. 1982. Société et territoire. Pages 112–117 *L'idéal et le matériel*. Fayard.

Godet, M. 2006. Creating Futures: Scenarios Planning as a Strategic Management Tool. *Economica*:369.

Godet, M., R. Monti, F. Meunier, and F. Roubelat. 2004. La Boîte à outils de prospective stratégique. *Lipsor working papers*(5):122.

Godmaire, H., and L. Sauvé. 2005. Une problématique d'éducation à la santé environnementale au Lac Saint-Pierre – Exploration de la dimension socioculturelle. *Education relative à l'environnement* 5:15–32.

Gómez-Baggethun, E., R. de Groot, P. L. Lomas, and C. Montes. 2010. The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics* 69(6):1209–1218.

Gril, J.-J., and J.-M. Dorioz. 2004. Des bassins versants de recherche aux bassins opérationnels : quels bassins versants pour connaître et maîtriser les pollutions diffuses agricoles ? *Ingénieries* 39:3–16.

Gumuchian, H., and B. Pecqueur. 2007. *La ressource territoriale*. Economica. Antoine Bailly.

Gunderson, H., and C. S. Holling. 2001. *Panarchy : Understanding transformations in human and natural systems*, 1st edition. Island Pre.

Gustafsson, K. M., and R. Lidskog. 2018. Boundary organizations and environmental governance: Performance, institutional design, and conceptual development. *Climate Risk Management* 19(October 2017):1–11.

Guston, D. H. 1999. Stabilizing the boundary between US Politics and Science : the rôle of the office of technology transfer as a boundary organization. *Social Studies of Science* 29(1):87–111.

Guston, D. H. 2001. *Boundary Organizations in Environmental Policy and Science: An Introduction*. *Science, Technology, & Human Values* 26(4):399–408.

GWP. 2000. *Integrated Water Resources Management Global Water Partnership Technical Advisory Committee (TAC) Background Paper No.4*.

Hackbart, V. C. S., G. T. N. P. de Lima, and R. F. dos Santos. 2017. Theory and practice of water ecosystem services valuation: Where are we going? *Ecosystem Services* 23(December 2016):218–227.

Haines-Young, R., and M. Potschin. 2010. The links between biodiversity , ecosystem services and human well-being. Page 30 *Ecosystem Ecology: A new synthesis*.

Hall, C. M., and T. Harkonen. 2006. *Lake Tourism*.

He, J., T. Poder, J. Dupras, and J. H. Enomana. 2016. La valeur économique de la pêche blanche et des services écosystémiques au lac Saint-Pierre : analyse coûts-avantages des stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

Hein, L., K. van Koppen, R. S. de Groot, and E. C. van Ierland. 2006. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics* 57(2):209–228.

- Hidalgo, C. 2015. Why information grows. Basic Book.
- Holling, C. S. 2001. Understanding the complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems* 4:390–405.
- Holzer, J. M. 2018. Negotiating local vs global needs in the International Long Term Ecological Research (ILTER) Network's Socio-Ecological Research Agenda. *Environmental Research Letters*.
- Hubault, E. 1947. Études thermiques, chimiques et biologiques des eaux des lacs de {l'Est} de la France (Vosges, Jura, Alpes de Savoie). *Annales de l'École Nationale des Eaux et Forêts*:164.
- Hudon, C., and R. Carignan. 2008. Cumulative impacts of hydrology and human activities on water quality in the St. Lawrence River (Lake Saint-Pierre, Quebec, Canada). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 65(6):1165–1180.
- Hudon, C., M. Jean, and G. Létourneau. 2018. Temporal (1970 – 2016) changes in human pressures and wetland response in the St . Lawrence River (Québec , Canada) *Science of the Total Environment* Temporal (1970 – 2016) changes in human pressures and wetland response in the St . Lawrence River (. *Science of the Total Environment* 643(October).
- IIASA. 2016. Water Futures and Solution.
- IPBES. 2018a. The assessment report on land degradation and restoration.
- IPBES. 2018b. The assessment report on land degradation and restoration - summary for policymakers.
- IPBES. 2018c. The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services.
- Jacquet, S., I. Domaizon, and O. Anneville. 2014. The need for ecological monitoring of freshwaters in a changing world: A case study of Lakes Annecy, Bourget, and Geneva. *Environmental Monitoring and Assessment* 186(6):3455–3476.
- Jacquet, S., I. Domaizon, J. Poulenard, and F. Arnaud. 2006. Autour du lac du Bourget, actes du colloque. Page 270 in Université Savoie Mont-Blanc, editor. *Autour du lac du Bourget. Le Bourget du lac*.
- Jacquet, S., J. F. Briand, C. Leboulanger, C. Avois-Jacquet, L. Oberhaus, B. Tassin, B. Vinçon-Leite, G. Paolini, J. C. Druart, O. Anneville, and J. F. Humbert. 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.
- Jacquet, S., O. Anneville, and I. Domaizon. 2012. Evolution de paramètres clés indicateurs de la qualité des eaux et du fonctionnement écologique des grands lacs péri-alpins (Léman, Annecy, Bourget): Etude comparative de trajectoires de restauration post-eutrophisation. *Archives des Sciences* 65(1–2):191–208.

Janssen, M. A., and E. Ostrom. 2006. Empirically Based , Agent-based models. *Ecology And Society* 11(2):37.

Jenny, J. P., F. Arnaud, J. M. Dorioz, C. Giguët Covex, V. Frossard, P. Sabatier, L. Millet, J. L. Reyss, K. Tachikawa, E. Bard, C. Pignol, F. Soufi, O. Romeyer, and M. E. Perga. 2013. A spatiotemporal investigation of varved sediments highlights the dynamics of hypolimnetic hypoxia in a large hard-water lake over the last 150 years. *Limnology and Oceanography* 58(4):1395–1408.

Jenny, J.-P., F. Arnaud, B. Alric, J.-M. Dorioz, P. Sabatier, M. Meybeck, and M. Perga. 2014. Inherited hypoxia: A new challenge for reoligotrophic lakes under global warming. *Global Biogeochemical Cycles* 28(12):1413–1423.

Jenny, J.-P., O. Anneville, Y. Baulaz, D. Bouffard, I. Domaizon, S. A. Bocaniov, N. Chèvre, M. Dittrich, J.-M. Dorioz, E. Dunlop, G. Dur, J. Guillard, T. Guinaldo, S. Jacquet, A. Jamoneau, Z. Jawed, E. Jeppesen, G. Krantzberg, J. Lenters, B. Leoni, M. Meybeck, V. Nava, T. Noges, P. Noges, M. Patelli, V. Pebbles, M.-E. Perga, S. Rasconi, C. R. Ruetz III, L. Rudstam, N. Salmaso, S. Sapna, D. Straile, O. Tammeorg, M. R. Twiss, D. G. Uzarski, A.-M. Ventela, W. F. Vincent, S. W. Wilhem, S.-A. Wangberg, and G. A. Weyhenmeyer. 2020. Scientist' Warning tu Humanity: Rapid Degradation of the World's Large Lakes. *Journal of Great Lakes Research*. 16p

Jobert, C. 2017. L'IMAGE TOURISTIQUE DES LACS d'Aiguebelette et du Bourget : Approche Géo-historique. Mémoire de master.

Jobin, B., J.-L. Des Granges, N. Plante, and C. Boutin. 1994. Relations entre la modification du paysage rural, les changements de pratique agricole et les fluctuations des populations d'oiseaux champêtres du sud du Québec.

Johannes, R. E., and B. Neis. 2007. The value of anecdote. *Unesco*:41–58.

Joly, D., and F. Langrogné. 2016. Pertinence du découpage spatial produit par deux méthodes de classification (CHA et MIXMOD). Application aux climats français. *CyberGeo* 2016. 23 p

Jordan-Meille, L., Dorioz, J.-M., Wand, D., 1998, Analysis of the export of diffuse phosphorus from a small rural watershed, *Agronomie*, n° 18, p. 5-26.

Jungwirth, M., and H. Winkler. 1984. The Temperature Dependence of Embryonic Development of Grayling, Danube Salmon, Arctic Char, and Brown Trout. *Aquaculture* 38:315–327.

Kalff, J. 2002. *Limnology*. Prentice H. New Jersey.

Kareiva, P., S. Watts, R. McDonald, and T. Boucher. 2007. Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science (New York, N.Y.)* 316 VN-(5833):1866–1869.

Keeler, B. L., S. Polasky, K. A. Brauman, K. A. Johnson, J. C. Finlay, A. O'Neill, K. Kovacs, and B. Dalzell. 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.

Kelble, C. R., D. K. Loomis, S. Lovelace, W. K. Nuttle, P. B. Ortner, P. Fletcher, G. S. Cook, J. J. Lorenz, and J. N. Boyer. 2013. The EBM-DPSER Conceptual Model: Integrating Ecosystem Services into the DPSIR Framework. *PLoS ONE* 8(8).

Klein, J. T. 2008. Evaluation of Interdisciplinary and Transdisciplinary Research. A Literature Review. *American Journal of Preventive Medicine* 35:116–123.

Kremen, C., and R. S. Ostfeld. 2005. A call to ecologists: Measuring, analyzing, and managing ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3(10):540–548.

La Notte, A., D'Amato, D. Mäkinen, H., Parracchini, M.L., Liqueste, C., Egoh, B., Geneletti, D., Crossman, N. D. 2017. Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecological Indicators* 74:1–11.

Lachavanne, J. B. 1980. Les manifestations de l'eutrophisation des eaux dans un grand lac profond: le Léman (Suisse). *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* 42(2):127–154.

Lachavanne, J. B. 1989. Etat du Léman : plutôt sur la bonne voie, mais attention. *Lémanique*(décembre):6–8.

Lambin, E. F., and P. Meyfroidt. 2010. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy* 27(2):108–118.

Langlois, C., and H. Sloterdijk. 1989. Contamination du lac Saint-Pierre (fleuve Saint-Laurent) par certains polluants organiques et inorganiques. *Revue des sciences de l'eau* 2(4):659.

Lavorel, S., Storkey, J., Bardgett, R. D., De Bello, F., Berg, M. P., Le Roux, X., Moretti, M., Mulder, C., Pakeman, R. J., D'Az, S., & Harrington, R. (2013). A novel framework for linking functional diversity of plants with other trophic levels for the quantification of ecosystem services. *Journal of Vegetation Science*, 24(5), 942–948.

Lavorel, S., A. Bierry, P.-Y. Longaretti, T. Cordonnier, É. Crouzat, R. Lasseur, B. Nettié, and A. Rolland. 2017. Futur des réseaux de services écologiques et conséquences pour la gestion de l'eau et des milieux aquatiques.

Le Fur, J., A. Guilavogui, A. Teitelbaum, and M.-J. Rochet. 2011. Contribution of local fishermen to improving knowledge of the marine ecosystem and resources in the Republic of Guinea, West Africa. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 68:1454–1469.

Lehmann, A. 2019. Lémaniques. *Lémanique* 111(3):2–5.

Lélé, S., and R. B. Norgaard. 2005. Practicing Interdisciplinarity. *BioScience* 55(11):967.

Lescourret, F., D. Magda, G. Richard, A. F. Adam-Blondon, M. Bardy, J. Baudry, I. Doussan, B. Dumont, F. Lefèvre, I. Litrico, R. Martin-Clouaire, B. Montuelle, S. Pellerin, M. Plantegenest, E. Tancoigne, A. Thomas, H. Guyomard, and J. F. Soussana. 2015. A social-

ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14:68–75.

Lestel, L., M. Meybeck, C. Carré, G. Bouleau, D. Tatiana, M. Chevreuil, and A. Boccarossa. 2017. Comment s'est construite la question de la qualité de l'eau depuis 1850 – Projet MAKARA. PIREN-Seine phase VII - rapport 2017:1–14.

Létourneau, A. 2019. La transdisciplinarité considérée en général et en sciences de l'environnement. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* 8(2):9.

Lévêque, C. 2013. *L'écologie est-elle encore scientifique?* Editions Q.

Lévesque, A. 2018. Les enjeux de gestion agriculture - faune au lac Saint-Pierre : application de la méthode Q à l'analyse des opinions des acteurs. Université du Québec en Outaouais.

Lévesque, A., J. Dupras, and J. Bissonnette. 2018. The Pitchfork or the Fishhook : Intensive Farming in Floodplains ; A Multi-Stakeholder Perspective.

Levin, S. A. 1998. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems* 1(5):431–436.

Levrel, H., and A. Missemer. 2018. La mise en économie de la nature , contrepoints historiques et contemporains. *Revue économique* 70.

Lévy, J., and M. Lussault. 2013. *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés.* Belin.

Likens, G. E. 1984. Beyond the shoreline : a watershed-ecosystem approach. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 22(1).

Liu, J., T. Dietz, S. R. Carpenter, C. Folke, M. Alberti, C. L. Redman, S. H. Schneider, E. Ostrom, A. N. Pell, J. Lubchenco, W. W. Taylor, Z. Ouyang, P. Deadman, T. Kratz, and W. Provencher. 2007. Coupled human and natural systems. *Ambio* 36(8):639–649.

Liu, J., T. Dietz, S. R. Carpenter, M. Alberti, C. Folke, E. Moran, A. N. Pell, P. Deadman, T. Kratz, J. Lubchenco, E. Ostrom, Z. Ouyang, W. Provencher, C. L. Redman, S. H. Schneider, and W. W. Taylor. 2007. Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science* 317(5844):1513–1516.

Locqueneux, R. 2004. *Préhistoire & histoire de la thermodynamique classique (une histoire de la chaleur).* Ens-LSH Ed.

Lods-Crozet, B., S. Jacquet, O. Anneville, I. Domaizon, F. Rimet, V. Verneaux, J. Guillard, C. Gillet, E. Lasne, G. Blake, A. Miquet, R. Perrin, L. Bollache, A. Dutartre, M.-E. Perga, M. Lafforgue, and R. Tadonlécé. 2015. Chapitre 2 : Biologie et écologie. Page pp 31-54 *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions.*

Loizeau, J. L., P. Edder, L. F. De Alencastro, C. Corvi, and S. Ramseier Gentile. 2013. La contamination du Léman par les micropolluants Revue de 40 ans d'études. *Archives des Sciences* 66(2):117–136.

Loizeau, J.-L., A. Guyomard, D. Decrouez, G. Nicoud, J. Jenny, B. Montuelle, A. Klein, U. Lemmin, R. Jalinoux, F. Pasquini, J.-F. Georgis, G. Bruno, J. M. Dorioz, and D. Trévisan. 2015. Chapitre 1: Naissance et essor. Page Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions.

Mace, G. M. 2014. Whose conservation? *Science* 345(6204):1558–1560.

Machlis, G. E., J. E. Force, and W. R. Burch. 1997. The human ecosystem Part I: The human ecosystem as an organizing concept in ecosystem management. *Society & Natural Resources* 10(4):347–367.

Maier, D. S. 2012. What's so good about biodiversity ? A call for better reasoning about nature's value. *The Intern.*

Maleval, V. 2018. La géographie appliquée en géographie limnologique . Le rôle des géographes dans la vie de la cité.

Malgat, C. 2018. Les peuples lacustres du néolithique, les premiers pêcheurs du Léman. *Les Voix du Léman*:p 24.

Marie-claude, B. 2014. La « présentation de soi » : cadre pour aborder l'analyse de récits de vie. *Interrogations* 17.

Maris, V. 2018. La part sauvage du monde - penser la nature dans l'Anthropocène. *Le Seuil.*

Martens, K., G. Coulter, and B. Goddeeris. 1994. Speciation in Ancient Lakes - 40 years after Brooks. *Ergebnisse der Limnologie* 44(December):75–96.

Massol, F., P. David, D. Gerdeaux, and P. Jarne. 2007. The influence of trophic status and large-scale climatic change on the structure of fish communities in Perialpine lakes. *Journal of Animal Ecology* 76(3):538–551.

Mathevet, R., J. Thompson, O. Delanoë, M. Cheylan, C. Gil-Fourrier, and M. Bonnin. 2010. La solidarité écologique : un nouveau concept pour une gestion intégrée des parcs nationaux et des territoires. *Natures Sciences Sociétés* 18(4):424–433.

Mathieu, J. 2019. Essai de définition des espaces touristiques lacustres périalpins à partir de l'analyse des documents promotionnels et des discours des offices de tourisme de Savoie Mont Blanc.

Maussin, M. 2004. Analyse comparative des modes de gestion et de valorisation des grands lacs "alpains" - lac d'Annecy, lac du Bourget, lac Léman. *Chambéry.*

MDDEFP. 2013. Le lac Saint-Pierre, un joyau à restaurer.

MEA. 2005. *Ecosystems and human well-being*. Page Island Press. Washington, DC.

Méral, P. 2012. Le concept de service écosystémique en économie : origine et tendances récentes. *Natures Sciences Sociétés* 20(1):3–15.

Méral, P., and D. Pesche. 2016. Les services écosystémiques : repenser les relations nature et société. *QUAE*.

Mermod, B. 1979. Une agonie surveillée. *Temps Présent*.

Metz, F., and K. Ingold. 2014. Sustainable wastewater management: Is it possible to regulate micropollution in the future by learning from the past? A policy analysis. *Sustainability (Switzerland)* 6(4):1992–2012.

Meybeck, M. 1978. La pollution des lacs. *La Recherche* 94(novembre):965–973.

Meybeck, M. 1990. La pollution des fleuves. *La Recherche* 221.

Meybeck, M. 2002. Riverine quality at the Anthropocene: Propositions for global space and time analysis, illustrated by the Seine river. *Aquatic Sciences* 64(4):376–393.

Meybeck, M., M. Kummu, and H. H. Dürr. 2013. Global hydrobelts and hydroregions: Improved reporting scale for water-related issues? *Hydrology and Earth System Sciences* 17(3):1093–1111.

Mingelbier, M., Y. Paradis, P. Brodeur, V. de la Chenelière, F. Lecomte, D. Hatin, and G. Verreault. 2016. Gestion des poissons d'eau douce et migrants dans le Saint-Laurent : mandats, enjeux et perspectives. *Le Naturaliste canadien* 140(2):74.

Moffatt, S., and N. Kohler. 2008. Conceptualizing the built environment as a social-ecological system. *Building Research & Information* 36(3):248–268.

Monjuvent, G., and G. Nicoud. 2014. Les paléo-lacs des vallées alpines du Gresivaudan, du Bourget et d'Annecy -France. *Travaux français en paléolimnologie- Colloque du Puy en Velay 4/6-10-1985:213–231*.

Monod, R. 1956. Contribution à l'étude des variations de la composition chimique de l'eau du lac Léman. *Lausanne*.

Montuelle, B. 2015. Qu'est ce qu'un lac ? Page 205 *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions*.

Montuelle, B., and A. Clémens. 2015. *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions*. Graie.

Moss, B. 2008. Approaches to Ecosystem services assessment in freshwater ecosystems. *Page Ecosystem services and drivers of biodiversity change*.

Muradian, R., E. Corbera, U. Pascual, N. Kosoy, and P. H. May. 2010. Reconciling theory and practice: An alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. *Ecological Economics* 69(6):1202–1208.

Nahlik, A. M., M. E. Kentula, M. S. Fennessy, and D. H. Landers. 2012. Where is the consensus? A proposed foundation for moving ecosystem service concepts into practice. *Ecological Economics* 77:27–35.

Nazarea, V. D. 2006. Local Knowledge and Memory in Biodiversity Conservation. *Annual Review of Anthropology* 35:317–335.

Nguinguiri, J.-C. 2002. Savoirs et pratiques liés aux variations saisonnières chez les pêcheurs vili du Congo. Pages 109–120 in E. Katz, A. Lammel, and M. Goloubinoff, editors. *Entre ciel et terre : climat et sociétés*. IRD Ibis Press.

Nicholls, S., and J. L. Crompton. 2018. The contribution of scenic views of, and proximity to, lakes and reservoirs to property values. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*(February):1–16.

Nicolescu, B. 1996. La transdisciplinarité - Manifeste. Page (J.-P. Bertrand, editor). Editions d.

Nieloud-Muller. 2019. Représentations et croyances relatives aux espaces lacustres savoyards de l'Antiquité à nos jours. Page *Territoires et paysages lacustres, des lacs de plaine aux lacs de montagne*.

Nikolli, A. 2018. Les rives lacustres comme espaces publics : essai de cartographie. L' exemple du lac d' Annecy Les littoraux lacustres, grands oubliés de la littérature sur l' accès aux espaces. *Mappemonde*:1–21.

Notte, O. 2013. L'institutionnalisation du public-témoin comme forme de gouvernementalité : la consultation du public de la directive cadre européenne sur l'eau.

Novel, E. 1948. De la pollution des eaux en général et de celles du Léman en particulier. *La Croix-Rouge Suisse*.

Observatoire National de la Biodiversité. 2011. Stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020 - Quels indicateurs retenir ?

OCDE. 1974. Le mercure et l'environnement.

OCDE. 2011. Valeur de la vie humaine : une méta-analyse. Vol. 33, Issue 2010.

OFEV 2018. Statistiques de pêche dans le Léman de 1897 à 2016

Ohl, C., K. Krauze, and C. Grünbühel. 2007. Towards an understanding of long-term ecosystem dynamics by merging socio-economic and environmental research. Criteria for long-term socio-ecological research sites selection. *Ecological Economics* 63(2–3):383–391.

Olivaux, Y. 2007. La nature de l'eau. Résurgence. Embourg.

ONEMA. 2013. Biodiversité aquatique : du diagnostic à la restauration.

ONEMA. 2014. Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : état des lieux et pistes pour l'adaptation.

Ostrom, E. 2007. "Governing the Commons" the evolution of institutions for collective action, 20th printing (first published 1990). Cambridge. New York.

Ostrom, E. 2009. A general framework for analyzing sustainability of Social-Ecological Systems. *Science* 325(July):419–422.

Ostrom, E. 2012. *Gouvernance des biens communs*:1–19.

Özçaglar-Toulouse, N. 2009. Quel sens les consommateurs responsables donnent-ils à leur consommation ? Une approche par les récits de vie. *Recherche et Applications en Marketing* 24:3–24.

Pahl-Wostl, C. 2007a. The implications of complexity for integrated resources management. *Environmental Modelling and Software* 22(5):561–569.

Pahl-Wostl, C. 2007b. Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management* 21(1):49–62.

Pahl-wostl, C. 2018. Transforming water governance : A diagnostic approach Transformer la gouvernance de l ' eau - Une approche diagnostique Transforming water governance A diagnostic approach. Pages 1–3 *I.S.Rivers* 2018.

Pahl-Wostl, C., G. Holtz, B. Kastens, and C. Knieper. 2010. Analyzing complex water governance regimes: The Management and Transition Framework. *Environmental Science and Policy* 13(7):571–581.

Pahl-Wostl, C., J. Sendzimir, P. Jeffrey, J. C. J. H. Aerts, G. Berkamp, and K. Cross. 2007. Managing Change toward Adaptive Water Management through Social Learning. *Ecology and Society* 12(2):1–18.

Papon, P., and L. Touchart. 2008. Le Balaton, archétype du lac-étang? *Annales de Géographie* 112(632):339–356.

Parrott, L. 2010. Measuring ecological complexity. *Ecological Indicators* 10(6):1069–1076.

Passeron, J. 1990. Biographies, flux, itinéraires, trajectoires. *Revue française de sociologie* 31/1(janvier-mars):3–22.

Patoine, M. M. 2017. Charges de phosphore , d'azote et de matières en suspension à l'embouchure des rivières du Québec – 2009 à 2012. Ministère. Québec.

Pelte, T., B. Montuelle, M.-E. Perga, J. Jenny, C. Chaix, O. Anneville, S. Jacquet, C. Gillet, A. Champigneule, A. Barillier, J. M. Dorioz, and D. Trévisan. 2015. Chapitre 8: changement global. Page 15 *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions*.

Perga, M.-E., C. Pignol, and E. Naffrechoux. 2016. Global Biogeochemical Cycles dioxide concentration of lakes. *Global biogeochem. Cycles* 30:93–104.

Périat, G., and P. Vonlanthen. 2014. Etude du peuplement pisciaire du Lac Léman.

Pflieger, G., and C. Brethaut. 2012. *GOUVRHONE : Gouvernance transfrontalière du Rhône , du Léman à Lyon*. Page Colloque Mémoire du Rhône. Aigle, Suisse.

Phillips, A. 2003. Turning some ideas on their head. *The George Wright Forum*(Article 2).

Pietu, C. 2004. *Des pionniers de l'environnement : émergence et institutionnalisation de la politique de sauvetage du lac d'Annecy, de l'après-guerre aux années 1970 (Mémoire)*.

Pinay, G., C. Gascuel, A. Ménesguen, Y. Souchon, M. Le Moal, A. Levain, C. Etrillard, F. Moatar, A. Pannard, and P. Souchu. 2013b. *Eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité (Résumé)*.

Pinker, S. 2018. *Le triomphe des lumières*.

Pinto, M. 2014. *Les impacts socio-économiques du bon état des lacs alpins : Application au lac d'Annecy*. Université Aix - Marseille.

Pinto, R., J. Patrício, J. M. Neto, F. Salas, and J. C. Marques. 2010. Assessing estuarine quality under the ecosystem services scope: Ecological and socioeconomic aspects. *Ecological Complexity* 7(3):389–402.

Piriou, J. 2012. *Enquête sur la région touristique. Une recherche sur les pratiques spatiales de dimension régionale des acteurs du tourisme*. Université d'Angers.

Pleux, C. 2011. *Analyse de la stratégie en matière d'assainissement pluvial sur le bassin versant du lac du Bourget*. Mémoire ENTPE:110.

Potschin, M. B., and R. H. Haines-Young. 2011. Ecosystem services: Exploring a geographical perspective. *Progress in Physical Geography* 35(5):575–594.

Pourriot, R., and M. Meybeck. 1995. *Limnologie générale*. Masson.

Pousse, C., M. Condamines, F. Della Casa, M.-C. Rayssac, J.-P. Cart, L. Ayot, S. Mercier, A. Klein, G. Lapiere, R. Jalinoux, F. Pasquini, A. Miquet, G. Blake, C. Moiroud, and SILA. 2015. *Chapitre 6 : Aménagement et zones naturelles*. Page pp 119-138 *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions*.

Puydarrieux, P., W. Beyou, Y. Kervinio, O. Darses, J. Sapijanskas, C. Fiorina, P. Degeorges, J. Devaux, G. Beaufaron, and E. Bruley. 2015. *Cadre conceptuel EFESE*. Pages 1–15 *Référence EFESE*.

Ramade, F. 1993. *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*. Ediscience. Paris, France.

Rapin, F. 1992. *Le Léman, sa protection, son état / Lake Léman : present condition and protection*. *Revue de géographie de Lyon* 67(4):305–308.

Rapin, F. 2008. *Le Léman, sa protection, son état*. *Revue de géographie de Lyon* 67(4):305–308.

Rapin, F., and D. Gerdeaux. 2013. La protection du Léman : priorité à la lutte contre l'eutrophisation. *Archives des Sciences* 66(2):103–116.

Rapin, F., P. Blanc, J. P. Pelletier, G. Balvay, D. Gerdeaux, C. Corvi, J. Perfetta, and C. Lang. 1995. Chapitre 28 : Impacts humains sur les systèmes lacustres : exemple du Léman. Pages 807–840 *Limnologie générale*.

Rau, A.-L., H. von Wehrden, and D. J. Abson. 2018. Temporal Dynamics of Ecosystem Services. *Ecological Economics* 151(May):122–130.

Raudsepp-Hearne, C., G. D. Peterson, M. Tengö, E. M. Bennett, T. Holland, K. Benessaiah, G. K. MacDonald, and L. Pfeifer. 2010. Untangling the Environmentalist's Paradox: Why Is Human Well-being Increasing as Ecosystem Services Degrade? *BioScience* 60(8):576–589.

Raworth, K. 2012. A Safe and Just Space For Humanity: Can we live within the Doughnut? *Oxfam Discussion Papers* 461:1–26.

Raymond, C. M., G. G. Singh, K. Benessaiah, J. R. Bernhardt, J. Levine, H. Nelson, N. J. Turner, B. Norton, J. Tam, and K. M. a. Chan. 2013. Ecosystem Services and Beyond : using multiple metaphors to understand human-environment relationships. *BioScience* 63(7):536–546.

Redman, C. L., J. M. Grove, and L. H. Kubyl. 2004. Integrating Social Science into the Long-Term Ecological Research (LTER) Network: Social Dimensions of Ecological Change and Ecological Dimensions of Social Change. *Ecosystems* 7:161–171.

Reignier, D., L. Navarro, S. Stroffek, J.-C. Reymond, G. Beaujeu, G. Paolini, J. M. Dorioz, D. Trévisan, F. Pezet, C. Girel, E. Naffrechoux, J.-L. Bescombes, C. Bourg, N. Chèvre, D. Ortelli, M. Lafforgue, A. Gaudard, and L. Felipe de Alencastro. 2015. Chapitre 3: Qualité des eaux 3. Page Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions.

Reynaud, A., and D. Lanzanova. 2017. A Global Meta-Analysis of the Value of Ecosystem Services Provided by Lakes. *Ecological Economics* 137:184–194.

Richard, S., and T. Rieu. 2008. Une approche historique de la gouvernance pour éclairer la gestion concertée de l'eau en France. Pages 1–15 *XXIIIème Congrès mondial de l'eau de l'IWRA*.

Rigolet, A. 2016. Mémoire de Master : Caractériser la demande sociale et les compromis entre services écosystémiques : Une étude du bouquet de services lié au service de régulation des nutriments en baie de St-Brieuc et en baie du Mont St-Michel.

Ringold, P. L., J. Boyd, D. Landers, and M. Weber. 2009. Report from the Workshop on Indicators of Final Ecosystem Services for Streams. *Environmental Protection* 2009.

Rinke, K., K. Stephen, X. Kong, D. Borchardt, and M. Weitere. 2015. Ecosystem services from inland waters and their aquatic ecosystems. *Atlas of Ecosystem Services*.

Roch, J. 1992. La lutte contre la pollution du lac Léman.

Roche, P., I. Geijzendorffer, H. Levrel, and V. Maris. 2016. Valeurs de la biodiversité et services écosystémiques : Perspectives interdisciplinaires. Quae editi.

Rolland, T. 2018. Peut-On Se Passer Du Concept D'écosystème ? Partie I : Questions Epistemologiques Et Methodologiques. *European Scientific Journal* 14(32):306–325.

Rounsevell, M. D. A., T. P. Dawson, and P. A. Harrison. 2010. A conceptual framework to assess the effects of environmental change on ecosystem services. *Biodiversity and Conservation* 19(10):2823–2842.

Rudzewicz, L., Y. Baulaz, and V. Peyrache-Gadeau. 2020. Le paysage lacustre par le prisme du tourisme : le cas du lac d'Aiguebelette (Savoie - France). *Mondes du Tourisme*:19.

Sanséau, P.-Y. 2005. Les récits de vie comme stratégie d'accès au réel en sciences de gestion : pertinence, positionnement et perspectives d'analyse. *Recherches Qualitatives* 25(2):33–57.

Sapin, L. 1973. Il dépollue le lac de Lamartine. *Paris Match*:64–65.

Saunders, C. D. 2003. The Emerging Field of Conservation Psychology. *Human Ecology Review* 10(2):137–149.

Scheffer, M., S. Carpenter, J. a Foley, C. Folke, and B. Walker. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413(6856):591–6.

Schlaepfer, M., A. Lehmann, and J. J. Fall. 2017. Ecosystem Services : a Method for sustainable development. Page Mooc Ecosystem Services.

Science for Environment Policy. 2015. Ecosystem Services and Biodiversity. Page In-depth Report 11 produced for the European Commission, DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol.

Servettaz, P.-L. 1977. L'eau, vie d'un lac alpin : chronique de la sauvegarde du lac d'Annecy.

Shiklomanov, I. A., and J. C. Rodda. 2003. *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. Page Cambridge University Press (UK).

Siegenthaler, J. E. 1983. Pollution lémanique : Menace pour le tourisme ? Sauvons le Léman:75–80.

SILA. 2012. Gestion durable de la pêche de loisir et professionnelle à l'échelle du partenariat SILMAS : pratiques de gestion des ressources, de suivi et de résolution des conflits:88.

SILA. 2019. Observatoire de la fréquentation nautique du lac d'Annecy.

Silva, T. A., S. Girardclos, L. Stutenbecker, M. Bakker, A. Costa, F. Schlunegger, S. N. Lane, P. Molnar, and J.-L. Loizeau. 2018. The sediment budget and dynamics of a delta-canyon-lobe system over the Anthropocene timescale: The Rhone River Delta, Lake Geneva (Switzerland/France). *Sedimentology*:0–2.

Simoneau, M. 2014. Qualité de l' eau des tributaires du lac Saint-Pierre : évolution temporelle 1979-2014 et portrait récent 2012-2014. Québec.

Slobodkin, L. B. 1993. An appreciation : George evelyn Hutchinson. *Journal of Animal Ecology* 62(2):390–394.

Smith, V. H., G. D. Tilman, and J. C. Nekola. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* 100:179–196.

Soga, M., and K. J. Gaston. 2016. Extinction of experience: The loss of human-nature interactions. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14(2):94–101.

Soulé, M. 2014. The “New Conservation.” Pages 66–80 *Keeping the Wild : Against the domestication of earth*.

Staes, J., Broekx, S., Van der Biest, K., Vrebos, D., Beauchard, O., de Nocker, L., Liekens, I., Poelmans, L., Verheyen, K., Jeroen, P., & Meire, P. 2017. Quantification of the potential impact of nature conservation on ecosystem services supply in the Flemish Region: A cascade modelling approach. *Ecosystem Services*, 24, 124–137.

Steffen, W., J. Crutzen, and J. R. McNeill. 2007. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of Nature? *Ambio* 36(8):614–621.

Steinman, A. D., B. J. Cardinale, W. R. Munns, M. E. Ogdahl, J. D. Allan, T. Angadi, S. Bartlett, K. Brauman, M. Byappanahalli, M. Doss, D. Dupont, A. Johns, D. Kashian, F. Lupi, P. McIntyre, T. Miller, M. Moore, R. L. Muenich, R. Poudel, J. Price, B. Provencher, A. Rea, J. Read, S. Renzetti, B. Sohngen, and E. Washburn. 2017. Ecosystem services in the Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research* 43(3):161–168.

Sterner, R. W., B. Keeler, S. Polasky, R. Poudel, K. Rhude, and M. Rogers. 2020. Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes. *Ecosystem Services*, 41

Stephenson, J. 2008. The Cultural Values Model: An integrated approach to values in landscapes. *Landscape and Urban Planning* 84(2):127–139.

Stern, P. C., and T. Dietz. 1994. The value basis of environmental concern. *Journal of social issues* 50(3):65–84.

Stiegler, B. 2015. Sortir de l'anthropocène. *Multitudes* 60:137–146.

Tarpin, M., S. Berti, M. Haldimann, F. Rossi, and L. Steiner. 1999. Le bassin lémanique gallo-romain. Pages 33–44 *Gallia*, tome 56.

TCRLSP. 2016. La qualité de l' eau au lac Saint-Pierre, actes du forum TCRLSP.

TCRLSP. 2017. Cohabitation agriculture-faune en zone littorale au lac Saint-Perre.

TEEB. 2010. L'économie des écosystèmes et de la biodiversité.

Tempera, F., Liqueste, C., & Cardoso, A. C. 2016. Spatial distribution of marine ecosystem service capacity in the European seas. In JRC Technical Report.

Therville, C. 2013. Des clichés protectionnistes aux approches intégratives : l'exemple des réserves naturelles de France. Université de Brest Occidentale.

Thomas, R., M. Meybeck, and A. Beim. 1996. chapter 7- Lakes. Pages 1–46 Water quality assessments - A guide to use Biota, Sediments and water in Environmental Monitoring.

Timms, B. V. 1992. Lake Geomorphology. Adelaide. Gleneagles.

Touchart, L. 1993. La machine lacustre : l'exemple du Léman. Annales de Géographie 102(573):449–471.

Touchart, L. 2000. Qu'est-ce qu'un lac ? (What is a lake ?). Bulletin de l'association de géographes français 4:313–322.

Touchart, L. 2006. Lac. Hypergéô:1–3.

Touchart, L. 2007. Bassin-versant. Hypergéô:1–3.

Touchart, L., and P. Bartout. 2018. Le limnosystème est-il un concept géographique ? Annales de Géographie 719:29–58.

Touchart, L., P. Bartout, and R. Nedjai. 2014. La géographie limnologique en France : conjugaison de l'espace et du temps pour la compréhension des relations homme-milieu. BSGL:81–91.

Touraud, E., B. Roig, J. P. Sumpter, and C. Coetsier. 2011. Drug residues and endocrine disruptors in drinking water: Risk for humans? International Journal of Hygiene and Environmental Health 214(6):437–441.

Turner, R. K., and G. C. Daily. 2008. The ecosystem services framework and natural capital conservation. Environmental and Resource Economics 39(1):25–35.

UMR CARTELE. 2018. Station d'Hydrobiologie lacustre (INRA) de Thonon-les-Bains : 70 ans de connaissances scientifiques en limnologie.

Van der Sluis, T., M. Bogers, K. Kok, G. Cosor, N. Geamana, E. Crouzat, E. Pavlis, A. Busck, P. Frederiksen, K. Sepp, and I. L. Ramos. 2015. Assessing drivers of landscape change in environmental zones in Europe through Fuzzy Cognitive Maps. VOLANTE Project reports. Deliverable no: 2.3b. [accessed on 01.01.14 on URL: ...].(August):58.

Van Oudenhoven, A. P. E., K. Petz, R. Alkemade, L. Hein, and R. S. De Groot. 2012. Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. Ecological Indicators 21:110–122.

van Oudenhoven, A. P. E., M. Schröter, E. G. Drakou, I. R. Geijzendorffer, S. Jacobs, P. M. van Bodegom, L. Chazee, B. Czúcz, K. Grunewald, A. I. Lillebø, L. Mononen, A. J. A. Nogueira,

M. Pacheco-Romero, C. Perennou, R. P. Remme, S. Rova, R. U. Syrbe, J. A. Tratalos, M. Vallejos, and C. Albert. 2018. Key criteria for developing ecosystem service indicators to inform decision making. *Ecological Indicators* 95(January):417–426.

Varaschin, D., H. Bonin, Y. Bouvier, R. Boulat, M. Boulet, J. Coppier, M. Faïta, H. Joly, P. Judet, Y. Kinossian, and S. Tomamichel. 2014. *Histoire économique et sociale de la Savoie de 1860 à nos jours*. Page (Librairie droz, editor). Genève.

Vernex, J. 1998. Qu'est-ce qu'un lac ? De l'imaginaire lacustre à l'aménagement. *Le globe* 138:7–16.

Vernex, J.-C. 1989. Evolution des pratiques de loisirs et espace littoral lacustre; une étude de cas : le lac d'Annecy (France). *Le Globe. Revue genevoise de géographie* 129(1):37–47.

Vernex, J.-C., J. Serralongue, E. Rieth, M. Parsy, D. Cavalli, N. Massip, A. Bal, C. Gauchon, Plassat, Y. Billaud, A. Dutheil, and G. Bondaz. 2015. Chapitre 9 : Patrimoine et culture. Page pp : 179-197 *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions*.

Verpoorter, C., and L. J. Tranvik. 2014. A Global Inventory of Lakes Based on High-Resolution Satellite Data. *Journal of Great Lakes Research* (September):6396–6402.

Vitousek, P. M., H. a Mooney, J. Lubchenco, and J. M. Melillo. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277(5325):494–499.

Vivier, P. 1961. *La vie dans les eaux douces*. Que sais-j.

Vollenweider, R. A. 1968. Water management research. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication.

Vörösmarty, C., D. Lettenmaier, C. Leveque, M. Meybeck, C. Pahl-Wostl, J. Alcamo, W. Cosgrove, H. Grassl, H. Hoff, P. Kabat, F. Lansigan, R. Lawford, and R. Naiman. 2004. Humans transforming the global water system. *Eos* 85(48):1–6.

Walker, B., C. S. Holling, S. R. Carpenter, and A. Kinzig. 2004. Resilience, Adaptability and Transformability in Social – ecological Systems. *Ecology and Society* 9(2):5.

Walker, B., S. Carpenter, J. Anderies, N. Abel, G. Cumming, M. Janssen, L. Lebel, J. Norberg, G. D. Peterson, and R. Pritchard. 2002. Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology* [online] 6(1):14.

Wallace, K. J. 2007. Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation* 139(3–4):235–246.

Watson, K., G. Galford, L. Sonter, I. Koh, and T. H. Ricketts. 2019. Effects of human demand on conservation planning for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Biology* 0(ja).

Wernand, M. R., and H. J. van der Woerd. 2010. Spectral analysis of the Forel-Ule ocean colour comparator scale. *Journal of the European Optical Society* 5.

Wirtz-Susini, R. 2018. Approvisionnement en eau potable et réceptacle d'eaux usées, deux fonctions contradictoires des grands lacs.

Wolff, S., C. J. E. Schulp, T. Kastner, and P. H. Verburg. 2017. Quantifying Spatial Variation in Ecosystem Services Demand: A Global Mapping Approach. *Ecological Economics* 136:14–29.

Wu, J., and J. L. David. 2002. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling* 153(1–2):7–26.

WWAP. 2019. United Nations World Water Development Report 2019 : Leaving no one behind, main messages.

WWF. 2016. Rapport Planète Vivante 2016.

Young, O. R., F. Berkhout, G. C. Gallopin, M. A. Janssen, E. Ostrom, and S. van der Leeuw. 2006. The globalization of socio-ecological systems: An agenda for scientific research. *Global Environmental Change* 16(3):304–316.

Zhang, L. 1989. Evaluation de la charge de phosphore amenée au Léman par la Vénoge et les principaux affluents suisses. *Cahier de la faculté des sciences de l'Université de Genève* 19(juin):45–56.

Zurlini, G., K. Riitters, N. Zaccarelli, I. Petrosillo, K. B. Jones, and L. Rossi. 2006. Disturbance patterns in a socio-ecological system at multiple scales. *Ecological Complexity* 3(2):119–128.

SITOGRAPHIE

Chapitre 1

www.universalis-edu.com/encyclopedie/maladie-de-minamata/

Chapitre 2

www.légifrance.gouv.fr

www.eaurmc.fr

www.inspirez.savoie-mont-blanc.com/lacs/

www.cnr.tm.fr

www.cntl.fr

www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr

Chapitre 3

www.resalliance.org

Chapitre 4

www.si-ola.inra.fr

Chapitre 6

http://fondationdelafaune.qc.ca/initiatives/programmes_aide/162

Chapitre 7

www.ijc.org