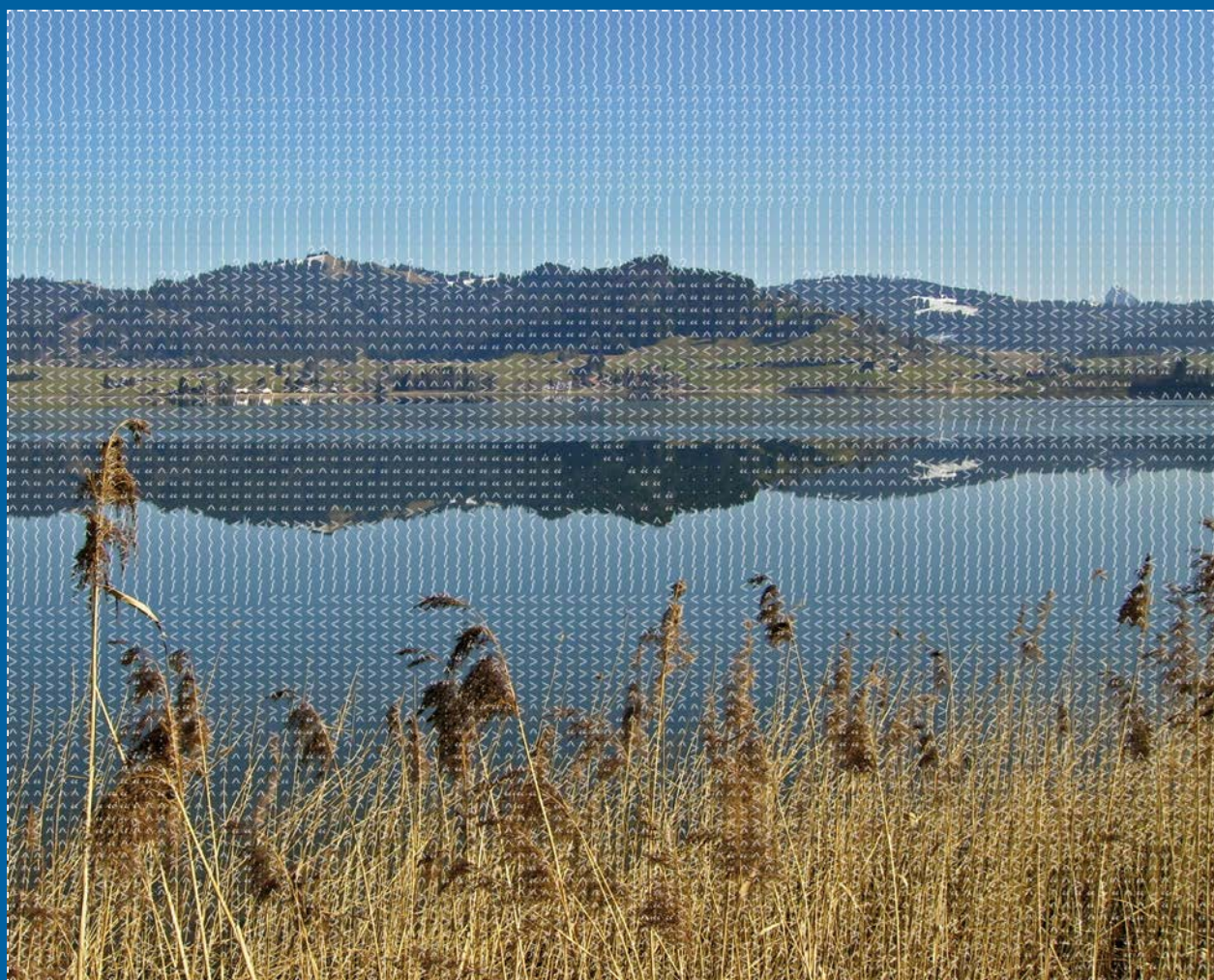


> Système d'analyse et d'appréciation des lacs en Suisse

Guide pour l'élaboration de modules d'appréciation



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

eawag
aquatic research ooc

> **Système d'analyse et d'appréciation des lacs en Suisse**

Guide pour l'élaboration de modules d'appréciation

Impressum

Editeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Eawag: Institut de recherche sur l'eau du domaine des EPF

Auteurs

Jacqueline A. Schlosser, Eawag; Susanne Haertel-Borer, OFEV;
Paul Liechti, Sponsolim; Peter Reichert, Eawag

Accompagnement

Heinz Ehmann, Amt für Umwelt, Thurgovie; Jukka Jokela, Eawag;
Brigitte Lods-Crozet, Direction générale de l'environnement (DGE),
Protection des eaux, Vaud;

Pius Niederhauser, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft,
Zurich (canton);

Marco Simona, Scuola Universitaria Professionale della Svizzera
Italiana, Tessin;

Pascal Vonlanthen, Eawag; Alfred Wüest, Eawag;

Markus Zeh, Laboratoire de la protection des eaux et du sol,
Berne (canton)

Référence bibliographique

Schlosser J. A., Haertel-Borer S., Liechti P., Reichert P. 2013:
Système d'analyse et d'appréciation des lacs en Suisse. Guide pour
l'élaboration de modules d'appréciation. Office fédéral de
l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1326:
38 p.

Traduction

Milena Hrdina, Moutier

Graphisme, mise en page

Karin Nöthiger, 5443 Niederrohrdorf

Photo de couverture

Lac de Sihl (de Einsiedeln). Photo: Jacqueline A. Schlosser

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-1326-f

(il n'existe pas de version imprimée)

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2013

> Table des matières

Abstracts	5
Avant-propos	7
Résumé	8
<hr/>	
1 Introduction	9
<hr/>	
2 Objectif et but de l'analyse et de l'appréciation des lacs	12
<hr/>	
3 Le système proposé	13
3.1 Système modulaire – objectifs hiérarchisés avec leurs attributs	13
3.2 Choix méthodologique pour une évaluation exhaustive (synthèse)	15
3.3 Guide pour l'élaboration des modules	17
<hr/>	
Annexe	19
A1 Evaluation de l'état écologique	19
A2 Hiérarchie des objectifs	23
A3 Ordre des priorités dans l'élaboration des modules	26
A4 Sélection de méthodes existantes servant à évaluer l'état écologique des lacs (état en 2010)	27
<hr/>	
Bibliographie	35
Répertoires	38

> Abstracts

This publication describes the concept for the ecological assessment of the condition of Switzerland's lakes. It is published as part of the FOEN «Environmental studies» series. The concept is an integral part of the modular stepwise procedure for studying and assessing surface bodies of water. It describes the use of instruments supporting the decision-making process in the development and application of modules for assessing the condition of lakes, and provides an overview of the priorities in the area of module development.

Die vorliegende Publikation in der BAFU-Reihe «Umwelt-Wissen» beschreibt das Konzept für die ökologische Zustandsbeurteilung der Schweizer Seen. Das Konzept ist Bestandteil des Modul-Stufen-Konzepts zur Untersuchung und Beurteilung der Oberflächengewässer. Es erläutert die Anwendung von Instrumenten zur Entscheidungsunterstützung bei der Entwicklung und Anwendung von Modulen für Seenbeurteilungen und gibt einen Überblick über die Priorisierung der Modulentwicklung.

Cette publication de la série «Connaissance de l'environnement» de l'OFEV décrit le système servant à évaluer l'état écologique des lacs suisses. Celui-ci fait partie intégrante du système modulaire gradué d'analyse et d'appréciation des eaux de surface. Le document explique comment utiliser les instruments d'aide à la décision lors de l'élaboration et de l'application des différents modules d'évaluation et présente l'ordre des priorités à respecter.

La presente pubblicazione della collana «Studi sull'ambiente» dell'UFAM presenta il sistema per la valutazione ecologica dello stato dei laghi svizzeri, che fa parte integrante del sistema modulare graduale (detto anche concetto basato su moduli e livelli) per l'analisi e la valutazione delle acque superficiali. Il documento illustra l'utilizzo di strumenti di supporto decisionale nell'ambito dello sviluppo e dell'applicazione di moduli per la valutazione dei laghi e fornisce una panoramica delle priorità da rispettare nello sviluppo di moduli.

Keywords:

Lake assessment, concept, decision-making support, module development

Stichwörter:

Seenbeurteilung, Konzept, Entscheidungsunterstützung, Modulentwicklung

Mots-clés:

évaluation des lacs, système, aide à la décision, modules

Parole chiave:

valutazione dei laghi, strategia, supporto decisionale, sviluppo di moduli

> Avant-propos

Véritables joyaux dans le paysage suisse, les lacs revêtent aussi une importance primordiale pour la préservation de la biodiversité, la qualité de vie et le tourisme. Ils abritent de nombreuses espèces animales et végétales et interagissent en permanence avec les zones environnantes. Leur état écologique est déterminé par des processus physiques, chimiques et biologiques complexes.

Les lacs subissent l'impact de diverses activités humaines. Si les gros efforts consentis dans la protection des eaux sont parvenus, ces dernières années, à réduire la surcharge de nutriments, l'apport de composés traces organiques (micropolluants) constitue un nouveau défi. Les rives des lacs suisses n'échappent pas non plus aux atteintes écologiques: toutes sortes d'aménagements détériorent la qualité des habitats naturels.

La loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux et l'ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux ont pour buts de protéger les eaux, de veiller à ce qu'elles conservent leurs multiples fonctions de biotopes naturels et d'en garantir une utilisation durable.

Une protection globale des lacs passe par une bonne connaissance de leur état. Il importe dès lors d'étudier non seulement la chimie et la physique de l'eau, mais aussi les communautés animales et végétales qui les peuplent, de même que la structure des eaux (en particulier la morphologie des rives). Le système décrit ici définit le cadre qui permettra aux spécialistes de l'OFEV, des instituts de recherche, des services cantonaux spécialisés, des commissions internationales et d'organisations privées d'élaborer ensemble des méthodes d'analyse qui déboucheront sur une évaluation harmonisée des lacs.

Franziska Schwarz
Sous-directrice
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

> Résumé

Le système d'analyse et d'évaluation des lacs s'inspire de la volonté de protéger les eaux, telle qu'elle est formulée dans la loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux, et donne des instructions quant à l'élaboration de méthodes (modules) destinées à évaluer l'état écologique des eaux. Des modules sont ainsi prévus pour évaluer leur état chimique, physique et biologique.

Le choix des modules et leur application se fondent sur les objectifs visés par l'étude des eaux, ces objectifs étant déterminés par les bases légales et l'état des eaux.

Dans toute la mesure du possible, le système d'analyse s'inspire des méthodes appliquées jusqu'ici, tout en étant à même de s'adapter aux évolutions futures. L'utilisation de méthodes éprouvées assure une exploitation optimale des données existantes et un maximum de continuité dans les analyses. Le travail consiste toujours à relever des grandeurs objectives, appelées attributs.

Le système d'évaluation de l'état écologique se fonde sur un état de référence proche de l'état naturel. Pour structurer chaque module et quantifier l'état écologique des eaux, le système recourt à des méthodes de la théorie de la décision. L'état de référence constitue alors l'objectif global à atteindre, qui est subdivisé en sous-objectifs hiérarchisés. La réalisation des objectifs est mesurée sur une échelle continue allant de 0 (pour un état très mauvais) à 1 (qui correspond à un état proche de l'état naturel). La quantification est associée à des classes d'état discrètes (mauvais, médiocre, moyen, bon, très bon, p. ex.).

La même méthode permet d'évaluer les mesures destinées à améliorer l'état des eaux. Au lieu de s'appliquer à un état observé, elle sert alors à apprécier un état prédit par modélisation ou d'après des connaissances d'experts.

1 > Introduction

La Suisse compte un nombre impressionnant de lacs: même si l'on ne considère que les plans d'eau les plus grands, soit ceux dont la surface dépasse 10 ha, on dénombre 70 lacs naturels et une centaine de lacs d'accumulation. Capables d'emmagasiner la chaleur, les lacs influent sur le microclimat local et leur beauté naturelle constitue la marque distinctive de nombreux paysages. De plus, ils jouent un rôle primordial pour la biodiversité et en tant que réserve d'eau potable.

La Suisse
un pays riche en lacs

L'habitat naturel formé par un lac comprend la zone de pleine eau, ou **zone pélagique**, et la zone proche du fond, ou **zone benthique** (Schwoerbel 1987).

Les zones pélagique,
littorale et profonde

En raison du réchauffement engendré par le rayonnement solaire à certains niveaux du lac, la **zone pélagique** présente une stratification dynamique qui varie avec les saisons. Les biocénoses qui la peuplent sont appelées phytoplancton et zooplancton, ce dernier constituant une importante source de nourriture pour diverses espèces piscicoles.

Selon sa profondeur, la **zone benthique** se subdivise en zone littorale, qui est associée à la rive, et en zone profonde.

- > La **zone littorale** comprend la portion de la zone benthique exposée à lumière. Sa limite inférieure correspond à la profondeur euphotique, où une production primaire nette est encore possible (Schwoerbel 1987), et elle est donc colonisée par les algues et les végétaux supérieurs. Ce biotope de transition entre habitats terrestre et lacustre abrite une grande variété d'espèces animales et végétales, en particulier lorsque la berge est plate. La zone d'eau peu profonde sert de frayère et d'habitat aux juvéniles (c'est la nurserie des poissons).
- > La **zone profonde** est la portion du lac où la production primaire n'est plus possible, faute de lumière (Schwoerbel 1987). Cette zone joue toutefois un rôle crucial dans la transformation des substances: son état détermine en effet la stabilisation et la fixation des substances sédimentaires, qui servent de nutriment aux végétaux. La biocénose qui peuple cette zone est uniquement constituée de consommateurs, la population animale dépendant de la densité des nutriments et de la concentration d'oxygène dans les eaux profondes.

Les lacs subissent l'influence de nombreuses activités anthropiques. Si les gros efforts consentis ces dernières années dans la protection des eaux sont parvenus à réduire la surcharge de nutriments, l'apport de composés traces organiques (micropolluants) constitue un nouveau défi. De plus, les rives de nombreux lacs suisses ont été dénaturées par des aménagements.

La loi du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux; RS 814.20) a pour but de protéger les eaux contre toute atteinte nuisible. Elle vise notamment à préserver les lacs en tant que biotopes naturels pour la faune et la flore indigènes et à sauvegarder les eaux piscicoles et les eaux en général en tant qu'éléments du paysage (art. 1). L'ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux; RS 814.201) définit en particulier des objectifs écologiques pour les eaux superficielles (annexe 1 OEaux) et des exigences relatives à la qualité des eaux (annexe 2 OEaux).

Objectifs concernant l'état des lacs fixés par la LEaux et l'OEaux

La LEaux oblige la Confédération et les cantons à informer le public sur la protection des eaux et sur leur état. Pour ce faire, les autorités doivent disposer de connaissances exhaustives sur les relations qui existent entre l'état des eaux et les facteurs qui le déterminent. De même, l'exécution de nombreuses tâches, telle la revitalisation des eaux, passe par une analyse détaillée de l'état des eaux. Voilà pourquoi l'art. 57, al. 1, et l'art. 58, al. 1, LEaux obligent respectivement la Confédération et les cantons à effectuer les relevés nécessaires.

Nécessité d'analyser et d'apprécier l'état des eaux sur la base d'un système global

Afin de s'acquitter de cette tâche, les cantons ont besoin d'une solution réaliste qui permette de procéder à des analyses selon une approche écologique globale. Ce système doit comprendre des méthodes servant à évaluer l'état des divers domaines et habitats spécifiques, puis, par synthèse, à apprécier l'état du lac dans son ensemble.

Les *Recommandations concernant l'analyse des eaux superficielles en Suisse* (DFI 1982) ne comprennent que quelques-uns des aspects d'une évaluation complète des eaux, en particulier dans le domaine des méthodes et relevés chimico-physiques; des instructions méthodologiques destinées à évaluer la morphologie et la biologie en sont absentes. Or ces recommandations servaient de base aux services cantonaux spécialisés pour élaborer leurs programmes de surveillance.

Méthodologie permettant d'élaborer des programmes cantonaux de surveillance

En 2008, l'association Cercl'eau a interrogé ces services spécialisés sur les travaux entrepris pour surveiller l'état des plans d'eau. Les réponses de 24 cantons ont été compilées dans un bref rapport (Zeh 2009).

Depuis 1993, la Suisse élabore des modules méthodologiques afin d'analyser et d'apprécier ses cours d'eau (Système modulaire gradué, SMG 2012; Langhans et al. 2008). Nombre de ces méthodes ont été publiées ou existent à l'état de projet destiné à être testé. Pour les plans d'eau, une telle approche harmonisée fait aujourd'hui encore largement défaut. Entre 1996 et 2000, divers groupes d'experts ont toutefois envisagé des méthodes d'appréciation des lacs, puis les ont résumées dans des rapports internes (actualisation de 2008). Une approche a même été mise au point afin d'apprécier la morphologie des rives, approche que la Commission internationale pour la protection des eaux du lac de Constance (IGKB) a appliquée après l'avoir revue et complétée (rapport n° 55, 2009). Cette approche a par la suite servi à évaluer l'état des rives des lacs des Quatre-Cantons et de Zoug, ainsi que de l'Ägerisee. La Suisse ne possède toutefois pas de méthode standardisée dans ce domaine et de telles méthodes n'existent pas non plus pour les autres relevés (Zeh 2009).

La Suisse a des modules d'appréciation des cours d'eau depuis 1993, mais pas de méthodes standardisées pour évaluer l'état des plans d'eau

Dans le cadre des projets Stratégie MicroPoll (réduction des composés traces organiques dans les eaux usées urbaines) et Observation coordonnée des eaux de surface (mené conjointement par l'OFEV et la Conférence des chefs de service et des offices de protection de l'environnement de Suisse, CCE), ainsi qu'au sein des commissions internationales de protection des eaux (CIPR, IGKB, CIPEL et Cipais), les spécialistes ont envisagé des programmes de surveillance et des listes d'indicateurs afin de mesurer la présence de composés traces organiques. Lors de l'élaboration d'une méthode idoine, il conviendra donc de compléter en conséquence la liste des substances chimiques mesurées jusqu'ici dans les lacs.

Entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2011, la modification du 11 décembre 2009 de la loi fédérale sur la protection des eaux oblige les cantons à délimiter l'espace réservé aux eaux, de même qu'à planifier et à réaliser des projets de revitalisation des eaux. La mise en œuvre de ces derniers doit tenir compte de leurs bienfaits pour la nature et le paysage, ainsi que de leur impact économique. Leur planification devant relever d'une véritable stratégie, elle doit pouvoir s'appuyer sur des données fondamentales, en particulier quant à l'écomorphologie des eaux. Il est dès lors devenu urgent d'élaborer une méthode pour analyser et évaluer l'état morphologique des rives des plans d'eau.

Depuis l'entrée en vigueur de la Convention sur la diversité biologique (CDB), en février 1995, la Suisse s'est donné pour objectif de préserver la biodiversité (SIB 2010). A cette fin, le Conseil fédéral a défini, en 2009, l'objectif qu'il convient d'atteindre sur le long terme: «La biodiversité est riche et en mesure de réagir aux changements. La biodiversité et ses écosystèmes sont conservés à long terme.» (Stratégie Biodiversité Suisse 2012).

Or la biodiversité est menacée partout dans le monde, et cette menace concerne plus particulièrement les milieux aquatiques (WWF Rapport Planète vivante 2008). Outre les atteintes anthropiques, des facteurs biologiques, telles les espèces exotiques, peuvent influencer sur la biodiversité indigène. Depuis le début du XXI^e siècle, diverses espèces animales exotiques envahissantes se répandent ainsi rapidement dans le lac de Constance (Werner 2010). Jusqu'ici, on en sait pourtant très peu sur les conséquences de cette invasion. Les méthodes qui serviront à l'avenir à mesurer les facteurs biologiques devraient dès lors prendre les espèces exotiques en considération.

Les différences qui apparaissent du côté des méthodes appliquées et des données collectées jusqu'ici, de même que les exigences à satisfaire, plaident en faveur de l'élaboration d'un système complet qui couvre tous les domaines d'analyse (chimie, physique, biologie). L'élaboration de méthodes d'analyse dans ces divers domaines, qui pourront s'appliquer aux divers habitats lacustres (zones pélagique, littorale et profonde), conduira à la mise au point d'un système modulaire d'appréciation de l'état des eaux.

Modification du 11 décembre 2009 de la LEaux (en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2011)

Tenir compte des espèces exotiques

Un système modulaire pour relever l'état des eaux

2 > Objectif et but de l'analyse et de l'appréciation des lacs

Le principal objectif d'une surveillance utile des eaux est d'évaluer leur état sur la base de relevés récents.

Principal objectif de la surveillance: évaluer l'état des plans d'eau

Elle permet ainsi de:

- > vérifier la réalisation des objectifs écologiques (analyse des déficits);
- > déterminer le besoin d'agir, notamment en vue de remplir les exigences relatives à la qualité de l'eau (annexe 2 OEaux) et de revitaliser les eaux (art. 38a OEaux);
- > détecter d'éventuels problèmes de manière précoce;
- > vérifier les effets des mesures appliquées;
- > surveiller et préserver le degré de protection atteint jusqu'ici.

Voici les objectifs accessoires du relevé de l'état des eaux:

Objectifs accessoires du relevé de l'état des eaux: évaluer les mesures appropriées et accroître les connaissances existantes

- > Réunir les bases nécessaires afin d'évaluer les mesures prévues à partir des prévisions, c'est-à-dire évaluer les mesures appropriées pour améliorer l'état des eaux.
- > Accroître les connaissances disponibles grâce à des relevés standardisés:
 - améliorer la compréhension des processus en cours grâce à des relevés sur le long terme et à la comparaison de diverses eaux évaluées à l'aide de méthodes identiques;
 - acquérir des connaissances de base sur divers biotopes et domaines d'analyse.

L'évaluation des eaux se réfère à un état proche de l'état naturel, tel qu'il est décrit dans l'annexe 1 OEaux, et se fonde sur les exigences relatives à la qualité de l'eau définies dans l'annexe 2 OEaux. Ces dernières exigences visent à garantir certaines utilisations spécifiques des eaux, en particulier comme eaux de baignade et ressource en eau potable.

L'évaluation se réfère à un état quasi naturel

L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et l'Office fédéral de la santé publique (OSP) ont d'ailleurs mis à jour l'aide à l'exécution «Evaluation des eaux de baignade. Recommandations concernant l'analyse et l'évaluation de la qualité des eaux de baignade (lacs et rivières)», publiées en 2013: www.bafu.admin.ch/uv-1310-f.

3 > Le système proposé

3.1 Système modulaire – objectifs hiérarchisés avec leurs attributs

Le système présenté ici offre aux autorités compétentes des moyens de planifier et de réaliser des relevés sur les lacs suisses et d'exploiter les données recueillies pour apprécier l'état des eaux. Il permet de plus d'élaborer, sur une base uniformisée, les méthodes (ou modules) nécessaires à ces observations.

Modules

Afin d'assurer une appréciation transparente et complète (synthèse) de la qualité des lacs, nous recommandons de recourir aux instruments de la théorie de décision. Cette appréciation devrait par ailleurs se rapporter à un **état de référence** proche de l'état naturel. Il est dès lors judicieux de se fixer comme objectif à atteindre l'aspect naturel tel qu'il est décrit dans la législation sur la protection des eaux. Pour procéder à l'évaluation globale d'une étendue d'eau, cet objectif est subdivisé en sous-objectifs plus concrets. Cela revient à établir une **hiérarchie des objectifs** (Eisenführ et Weber 2003; cf. fig. 1). Aux niveaux inférieurs de cette hiérarchie, l'objectif global (état de référence) est subdivisé en sous-objectifs spécifiques et si possible complémentaires, qui doivent englober les principaux aspects de l'objectif global. La réalisation de ces objectifs peut être quantifiée à l'aide de fonctions de valeur (cf. annexe A1).

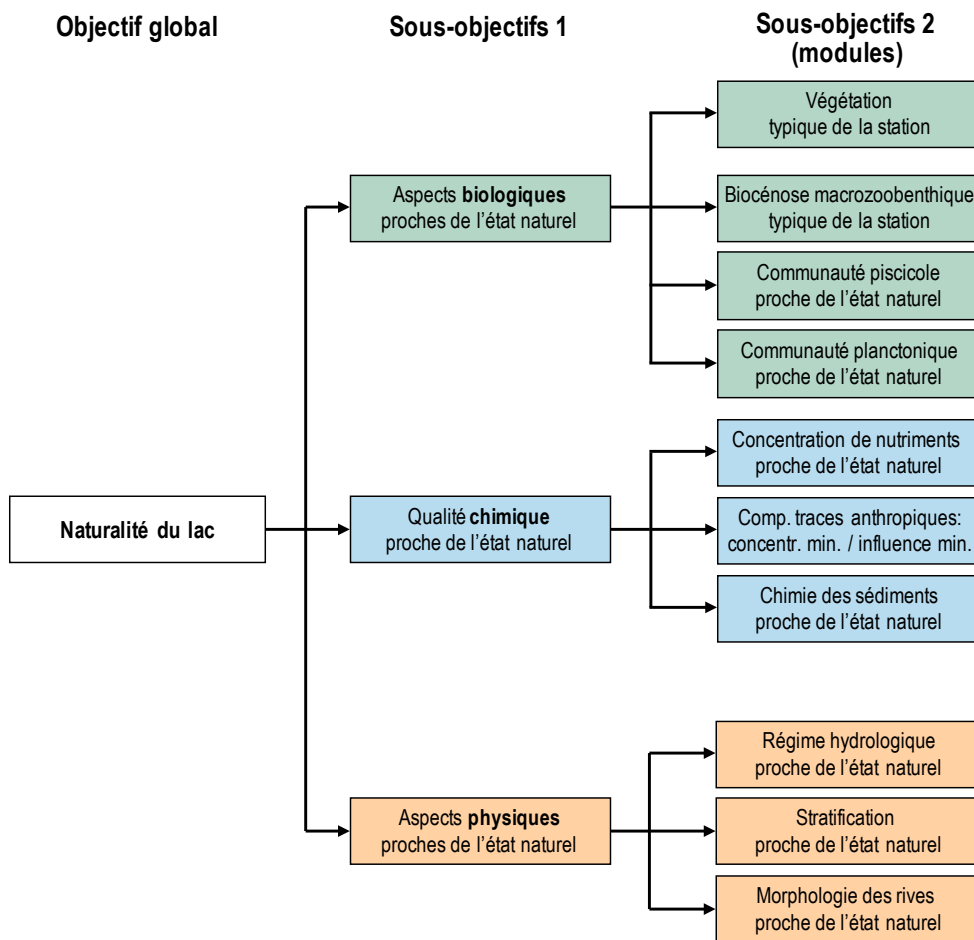
Evaluation exhaustive

Les sous-objectifs du niveau le plus bas (en bout de chaîne) se voient attribuer des grandeurs objectivement mesurables, appelées **attributs** (ou paramètres), qui servent à vérifier si l'objectif est atteint. Ces attributs sont choisis de telle sorte que la réalisation de l'objectif puisse être quantifiée aussi simplement que possible.

Hiérarchie des objectifs dans l'évaluation des lacs

Dans l'exemple ci-dessous (fig. 1), l'**objectif global** est subdivisé en **sous-objectifs** répartis sur deux niveaux:

Fig. 1 > Possibilité de hiérarchie des objectifs applicable lors de l'évaluation des lacs



Chaque sous-objectif du niveau 1 peut être subdivisé en d'autres sous-objectifs de niveau inférieur. L'annexe propose ainsi trois niveaux hiérarchiques, avec des exemples d'attributs, servant à évaluer si l'état biologique, chimique et physique d'un lac est proche de l'état naturel (fig. 4 à fig. 6). A l'avenir, l'évolution des connaissances et la mise au point de nouvelles méthodes permettront de compléter cette hiérarchisation et de l'adapter aux besoins du moment. Les sous-objectifs et les attributs présentés dans la fig. 1 et, plus en détail encore, dans les figures 4 à 6 illustrent la structure du système et devront être définis avec plus de précision lors de l'élaboration des modules correspondants. De futures modifications restent donc possibles.

Avant de se lancer dans l'étude de l'état actuel, il conviendra de choisir les objectifs à évaluer et les modules à appliquer. Ces décisions serviront ensuite à planifier la collecte de données et les prélèvements d'échantillons.

Si la mise au point des divers modules recourt à certains fondements de la théorie de la décision, telles la hiérarchisation des objectifs et la quantification de leur réalisation au moyen de fonctions de valeur, il sera possible d'intégrer les valeurs attribuées, comme décrit dans l'annexe A1, à la biologie, à la chimie et à la physique en vue d'une synthèse globale.

Intégration des aspects biologique, chimique et physique

3.2 Choix méthodologique pour une évaluation exhaustive (synthèse)

Une évaluation exhaustive des lacs se fonde sur des relevés opérés pour les domaines d'analyse chimique, physique et biologique dans les habitats lacustres pertinents (zones pélagique, littorale et profonde). Il n'est pour l'heure pas encore possible de fixer définitivement les modules requis afin d'établir une synthèse, et il faut commencer par élaborer les modules destinés à l'évaluation des domaines prioritaires (cf. annexe A3). La mise au point des modules s'appuiera sur les connaissances pratiques actuelles et les recherches scientifiques, mais également sur les méthodes existantes.

Synthèse

L'élaboration de chaque module d'évaluation exigeant beaucoup de temps, il importe de définir un **ordre des priorités**, qui sera établi sur la base des six critères suivants:

Définition de priorités

- > intégration d'effets dus à différentes causes et de différentes ampleurs (locales et temporelles);
- > génération de bases pertinentes issues de l'observation sur le long terme;
- > déficits connus ou degré de l'urgence politique;
- > recours à des données ou à des méthodes d'appréciation existantes;
- > intégration de méthodes existantes lors de la mise au point des modules et applicabilité pratique des modules;
- > possibilité de déterminer les mesures requises.

Se fondant sur ces six critères, les experts du groupe d'accompagnement ont pondéré les différents modules, et cette pondération définit un ordre des priorités bien défini (annexe A3). Le groupe conclut que les premiers modules à élaborer concernent **la morphologie des rives et les nutriments**.

Morphologie des rives et nutriments

Comme les cantons doivent établir un plan stratégique de la revitalisation de leurs plans d'eau d'ici à 2018, la mise au point d'une méthode harmonisée pour évaluer l'écomorphologie des rives lacustres s'impose de toute urgence, ce qui nécessite des données spécifiques à ce sujet. Puisque plusieurs cantons se sont déjà dotés de méthodes d'évaluation méritant d'être prises en compte, le quatrième critère «Recours à des données ou à des méthodes d'appréciation existantes» est assorti d'un coefficient de pondération élevé (tab. 2). Le coefficient attribué au premier critère est par contre faible, car les atteintes subies par les rives ne relèvent guère de l'effet intégré de causes différentes.

La grande priorité du module Nutriments résulte de la pondération élevée accordée à quatre des six critères. L'observation des nutriments est en effet cruciale pour déterminer d'éventuelles corrélations entre l'évolution des concentrations de nutriments et des

modifications au sein des biocénoses aquatiques. Mesurer les concentrations de nutriments faisant partie intégrante de la surveillance de nombreux cours d'eau, des méthodes ainsi que les résultats de nombreux relevés existent déjà. La méthode pourra dès lors s'appliquer rapidement à l'échelle suisse. De même, la réalisation de mesures destinées à remédier à d'éventuels déficits caractérisant les eaux ne devrait pas poser de grands problèmes, puisque les causes qui modifient les concentrations de nutriments sont connues et qu'il est possible d'identifier les responsables.

La deuxième priorité revient au module Poissons. Sa pondération découle essentiellement de deux éléments: d'une part, les données sur le long terme restent rares, de sorte que l'on connaît mal la communauté piscicole; d'autre part, les poissons sont un bon indicateur de l'état de l'écosystème lacustre. Les poissons réagissent en effet de manière différenciée à diverses atteintes ayant un impact aigu ou chronique. Les expériences pratiques en matière d'évaluation demeurent toutefois rares. Il faut donc s'attendre à des difficultés lors de l'application de la méthode, car le recensement du peuplement piscicole d'un lac représente un travail considérable et qu'il s'avère difficile de déterminer les mesures à prendre pour combler des déficits.

Poissons

La troisième priorité revient aux modules Macrophytes, Macrozoobenthos et Plancton. Dans leur cas aussi, il sera difficile de déterminer des mesures efficaces. Des méthodes d'appréciation existent toutefois déjà et des déficits sont connus, en particulier pour ce qui est des espèces exotiques. Il est donc urgent d'étudier ces biocénoses.

Macrophytes, macrozoobenthos et plancton

Au quatrième rang des priorités figure le module Composés traces. Son importance s'explique avant tout par les déficits déjà identifiés et par l'urgence qui en découle, de même que par les adaptations légales en préparation, l'applicabilité de la méthode et la facilité à déterminer les mesures à prendre. Dans le cas des composés traces, il est cependant impossible de prouver des causes cumulatives et des expériences font défaut quant à l'application de méthodes d'appréciation.

Composés traces

La priorité accordée au module physique (régime hydrologique et stratification) est plus faible, notamment parce que quatre des six critères affichent une pondération faible (1). Ce module ne présente aucune urgence, il ne donne visiblement pas lieu à des effets intégrés et ne permet guère de déterminer des mesures à prendre.

Physique (régime hydrologique et stratification)

Les sédiments constituent un cas particulier. Comme le prélèvement d'une seule carotte de forage suffit pour obtenir de précieuses informations sur l'évolution à long terme des eaux concernées, il n'est pas nécessaire d'élaborer un module d'appréciation.

Sédiments

Pour résumer, il convient dans un premier temps d'élaborer les modules Ecomorphologie des rives et Nutriments, puis les modules biologiques. Les autres suivront en fonction des besoins.

Il convient d'élaborer des modules destinés en particulier à évaluer l'état des lacs suisses relativement grands à grands (25 environ), qui font d'ores et déjà l'objet d'analyses régulières. Les lacs alpins d'accumulation ou les lacs dont le niveau subit de grandes variations artificielles (tel le lac de Sihl) ne revêtent pas une grande importance écologique et ne sont pas pris en considération ici. Quant à l'adéquation d'un module

Modules pour les lacs relativement grands à grands

en fonction de la taille du plan d'eau, elle n'apparaîtra qu'au cours de l'élaboration du module lui-même. Certains modules pourraient donc fort bien convenir pour évaluer de petits lacs.

A l'instar du système modulaire gradué pour les cours d'eau, chaque module doit pouvoir être appliqué indépendamment des autres et permettre une analyse des déficits.

Les divers modules devront toutefois être harmonisés de telle sorte que leur synthèse débouche sur une évaluation de l'objectif global et qu'il soit possible, à partir de là, de déterminer des plans de mesures complets destinés à améliorer l'état des eaux. Ce système a le mérite d'être souple: le choix des modules peut d'une part être ajusté aux besoins d'analyse spécifiques de chaque lac; à l'avenir, le système d'évaluation pourra d'autre part s'adapter à des scénarios et à des besoins aujourd'hui imprévisibles.

Pour opérer une synthèse, toutes les méthodes d'appréciation doivent recourir à une fonction de valeur (cf. annexe A1-1).

Analyse des déficits dans chacun des modules

Evaluation de l'objectif global à l'aide de plusieurs modules

Fonction de valeur

3.3 Guide pour l'élaboration des modules

En vue de garantir une unité méthodologique et de faciliter la synthèse de toutes les appréciations, l'élaboration de chaque module devra respecter les points ci-après:

Elaboration des modules

1. Hiérarchie des objectifs

Pour chaque module, il faut commencer par établir une hiérarchie des objectifs qui permettra d'identifier les objectifs à mesurer en recourant à des relevés.

2. Attributs

Aux objectifs les plus spécifiques (ceux du niveau le plus bas), il convient d'associer des attributs à même de quantifier la réalisation de l'objectif. Les domaines de valeur des attributs devraient être estimés et fixés par des experts. Le choix des attributs doit respecter les intérêts de l'observation sur le long terme et sera le cas échéant restreint.

3. Fonction de valeur

Pour chaque objectif, il importe ensuite de définir une fonction de valeur qui servira à quantifier la réalisation d'un objectif en fonction des attributs (dans le cas des sous-objectifs plus spécifiques) ou en fonction de la réalisation des objectifs du niveau inférieur (dans le cas d'objectifs plus élevés dans la hiérarchie).

4. Souplesse

La description du module doit mettre en évidence les sous-objectifs et les attributs indispensables à une évaluation et ceux qui sont optionnels. Si les analyses routinières d'un canton comprennent des attributs supplémentaires, il doit être possible de les inclure dans l'évaluation.

5. Distinction claire entre données recueillies et appréciation

Les données recueillies pour chaque attribut et l'appréciation ne seront pas enregist-

trées ensemble. Etablie à l'aide de la fonction de valeur, l'appréciation se fonde sur des valeurs mesurées et non pas sur des degrés, des points ou autres. Lors d'études sur le long terme, les utilisateurs des méthodes pourront ainsi retrouver les causes des différences d'appréciation et vérifier leur plausibilité. Si les modules doivent être adaptés à des connaissances nouvelles (qui modifient la manière d'apprécier la qualité des eaux) ou à des modifications de textes législatifs, il sera également possible de réévaluer d'anciennes données et de les comparer avec des données plus récentes.

6. Variables continues

Dans la mesure du possible, il convient de mesurer les attributs en variables concrètes et, dans l'idéal, de les enregistrer avec une marge d'erreur estimée. Durant les relevés, il ne faut pas convertir les valeurs continues en valeurs discrètes.

7. Cadre international

Les mesures destinées à protéger les eaux font de plus en plus l'objet de débats internationaux. L'Union européenne exige notamment que ses Etats membres poursuivent les mêmes objectifs écologiques et appliquent des méthodes d'analyse uniformisées fournissant des résultats comparables (directive-cadre sur l'eau (DCE)¹). Membre de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), la Suisse s'est notamment engagée à fournir à l'agence des données sur l'état écologique de ses lacs. Ces données se fondent sur les exigences de la directive-cadre de l'UE sur l'eau et englobent des éléments concernant la biologie, la chimie et l'hydromorphologie. Pour pouvoir à l'avenir inclure ses lacs dans un classement à l'échelle européenne, la Suisse devra veiller à se doter d'une méthodologie appropriée pour évaluer les eaux. Ce besoin devra être pris en considération lors de l'élaboration des modules destinés à analyser et à apprécier l'état des lacs.

8. Documentation

Une bibliographie complète des ouvrages spécialisés consultés accompagnera chaque module. En annexe, il serait par ailleurs utile d'expliquer les fondements de l'appréciation. Les diverses réflexions formulées au cours de l'élaboration seront ainsi consignées et pourront être prises en compte lors d'une adaptation ultérieure des modules.

¹ Directive 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (DCE).

> Annexe

A1 Evaluation de l'état écologique

A1-1 Appréciation de l'état écologique – fonction de valeur

Pour évaluer l'état écologique, le système se rapporte à un **état de référence** proche de l'état naturel, qui varie avec le **type de lac étudié**. Nous partons de l'hypothèse que la hiérarchie des objectifs peut être établie de manière suffisamment générale pour s'appliquer à tous les lacs. Le type de lac joue toutefois un rôle essentiel dans l'appréciation. Le niveau trophique, la taille, la profondeur et l'altitude peuvent constituer des critères importants dans la typologie des lacs (cf. p.ex. Mathes et al. 2002), mais celle-ci peut parfois se fonder sur un aspect partiel, telle la déclivité de la berge. L'appréciation d'une berge plate ne sera à l'évidence pas identique à celle d'une berge abrupte, mais certains types de berges pourront être soumis à une procédure d'évaluation similaire pour différents types de lacs. L'état de référence et les types de lacs devront être définis lors de l'élaboration de chaque module.

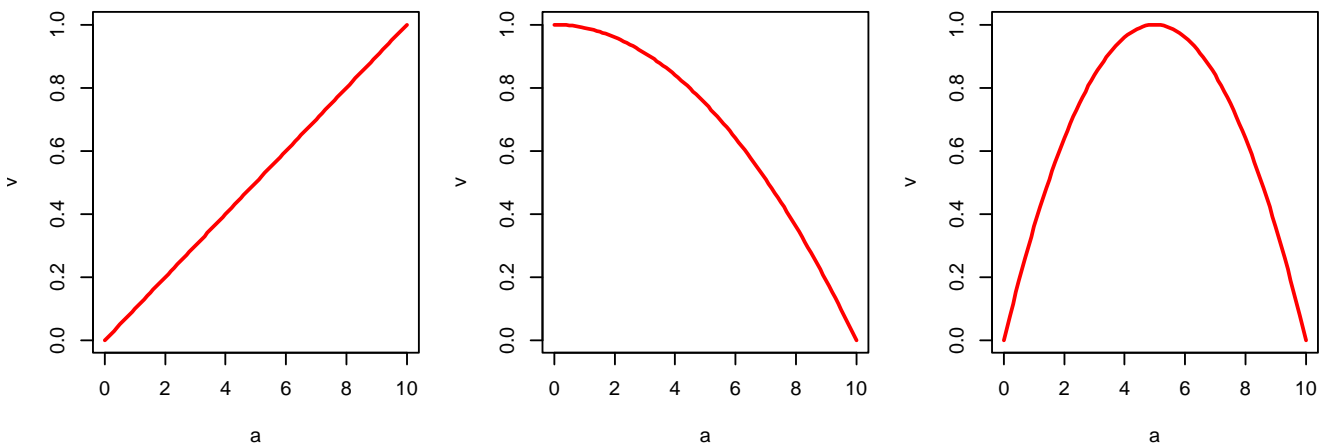
Etat de référence proche de l'état naturel

L'appréciation est exprimée à l'aide d'une **fonction** dite **de valeur**, qui comprend les valeurs allant de 0, qui désigne un état très mauvais, à 1, pour un état proche de l'état naturel (état de référence; Eisenführ et Weber 2003). La fonction exprime le degré de réalisation d'un objectif en partant des relevés des **attributs** mesurables. Le même écart de valeur entre deux états correspond au même gain ou à la même perte écologique lors du passage d'un état à l'autre. Vu le grand nombre d'attributs, il est très difficile de formuler la valeur à partir de tous les attributs et la fonction de valeur s'appuie sur une hiérarchisation. On commence ainsi par formuler des fonctions de valeur pour les sous-objectifs du niveau le plus bas. Cela s'avère nettement plus aisé que d'énoncer une fonction pour un objectif d'un niveau supérieur, car les attributs sont moins nombreux et que l'objectif est plus concret. Pour chaque objectif, la fonction est conçue indépendamment des relevés sur le terrain, à partir d'une modélisation ou d'une enquête menée auprès d'experts. Partie intégrante du système méthodologique, elle est ensuite mise à disposition pour l'évaluation des eaux. Le cas échéant, après l'acquisition de nouvelles connaissances concernant la valeur d'un objectif par exemple, les personnes chargées d'élaborer la méthode peuvent adapter les fonctions de valeur. La fig. 2 illustre des exemples de fonctions de valeur établies pour des sous-objectifs déterminés par un seul paramètre.

Fonction de valeur

Fig. 2 > Exemples de fonctions de valeur

Fonctions de valeur qui expriment la valeur v (sur l'axe des ordonnées) en fonction du niveau de l'attribut a (paramètre à mesurer, reporté sur l'axe des abscisses). Dans l'exemple de gauche, la valeur augmente de manière linéaire avec le niveau de l'attribut; dans l'exemple du milieu, elle diminue de manière non linéaire; dans l'exemple de droite, enfin, elle atteint un maximum lorsque le niveau de l'attribut est moyen. Des courbes montantes sont typiques de l'indice de biodiversité ou de la diversité des habitats; les courbes descendantes comprennent les concentrations de polluants et les courbes en cloche sont typiques de l'abondance et de la densité de la biomasse.

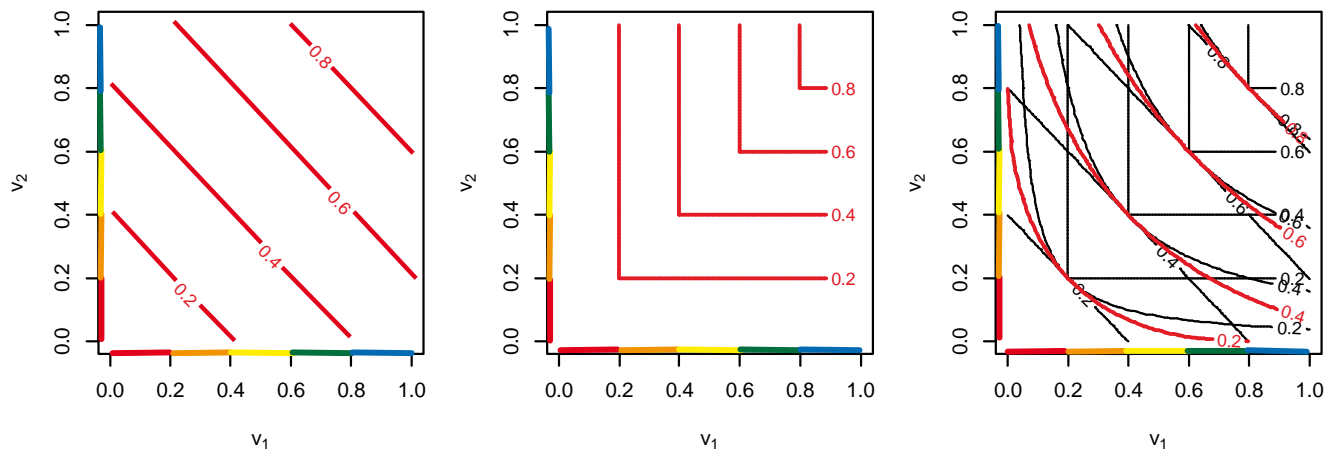


Une fois formulées, les fonctions de valeur pour les objectifs du niveau le plus bas de la hiérarchie, les valeurs sont agrégées pour quantifier la réalisation de l'objectif global. Le choix de la fonction d'agrégation dépend du mécanisme de compensation entre sous-objectifs (mesure dans laquelle la bonne réalisation d'un sous-objectif permet de compenser la mauvaise réalisation d'un autre objectif partiel). Dans le scénario du pire (*worst case*), il est impossible de compenser la mauvaise appréciation d'un sous-objectif. L'agrégation la plus simple consiste à calculer une moyenne pondérée des degrés de réalisation des sous-objectifs. La fig. 3 illustre des fonctions d'agrégation typiques en considérant deux sous-objectifs (valeurs v_1 et v_2) et un objectif global (valeur v).

Agrégation de sous-objectifs

Fig. 3 > L'agrégation de deux sous-objectifs

Exemples de l'agrégation de deux sous-objectifs, de valeur v_1 et v_2 , en un objectif global de valeur v . Les valeurs v_1 et v_2 et les cinq classes d'état (couleurs) sont reportées sur les axes des ordonnées et des abscisses, la valeur v de l'objectif global est représentée par des «courbes de niveau» correspondant à une certaine valeur. Le graphique à gauche correspond à l'établissement de la moyenne (ici, la pondération des éléments est identique), le graphique au centre représente le scénario du pire et le graphique à droite résulte d'une fonction d'agrégation qui est un compromis entre les deux autres. Ce mode d'agrégation est appliqué non seulement à chaque niveau hiérarchique à l'intérieur d'un module, mais aussi lors de la synthèse des différents modules.



Lors de l'évaluation de l'état écologique, le sommet de la hiérarchie ne devrait comprendre que les objectifs les plus importants. Selon les analyses réalisables, les cantons seraient ainsi en mesure d'évaluer les eaux de surface aussi bien sur la base d'un nombre minime d'attributs que sur une foule d'attributs mesurés. Plus le nombre de ces derniers est grand, plus l'évaluation globale est fiable. Si la quantité des données réunies pour l'évaluation est minime, il convient d'adapter leur pondération dans l'agrégation des valeurs. Les exigences minimales requises pour une évaluation globale devront être définies avec précision dans la description du module, afin d'harmoniser l'appréciation des lacs dans toute la Suisse.

Les valeurs calculées pour n'importe quel objectif dans la hiérarchie établie peuvent être rangées dans les **classes d'état** discrètes ci-dessous et représentées à l'aide de couleurs (cf. fig. 3):

Classes d'état

Tab. 1 > Classes d'état

Classement en chiffres et en couleurs.

	0,0	≤	valeur	<	0,2:	mauvais	rouge
	0,2	≤	valeur	<	0,4:	médiocre	orange
	0,4	≤	valeur	<	0,6:	moyen	jaune
	0,6	≤	valeur	<	0,8:	bon	vert
	0,8	≤	valeur	≤	1,0:	très bon	bleu

Dans le cas des attributs pour lesquels l'annexe 2 de l'OEaux formule des exigences spécifiques de qualité de l'eau, le respect de la valeur limite devrait déboucher sur une appréciation de 0,6 au moins. Conformément à l'art. 47 OEaux, il conviendra d'envisager évaluer des mesures destinées à améliorer l'état écologique si cette valeur limite est dépassée dans le sens d'une aggravation, que ce soit vers le haut ou vers le bas. Un tel état correspond à l'appréciation «mauvais», «médiocre» ou «moyen» (soit <0,6).

Apprécier l'état écologique des lacs à l'aide de fonctions de valeur harmonise les protocoles, tout en optimisant la transparence et la souplesse de la méthode. Il est facile de compléter les hiérarchies des objectifs et, dès lors, les modules, tout en respectant les exigences légales. Dans chaque module, il est possible de spécifier les attributs à analyser absolument, afin de garantir une évaluation fiable des eaux. De plus, les objectifs atteints et non atteints apparaîtront d'emblée à chaque niveau hiérarchique, de sorte qu'il sera possible de déterminer des mesures ciblées aptes à améliorer la situation. L'application uniformisée des fonctions de valeur facilite en outre la synthèse des différents modules afin d'obtenir une appréciation globale.

Evaluation uniformisée grâce aux fonctions de valeur

A1-2 Aide à la décision dans la gestion des lacs

La fonction de valeur décrite au annexe A1-1 peut également servir à évaluer les mesures destinées à améliorer l'état des eaux. A cet effet, il faut **prévoir** les valeurs que les attributs atteindront grâce à la mise en œuvre des mesures envisagées. Cette prévision peut être établie à l'aide d'un modèle de calcul ou sur la base des avis d'experts. Dans les deux cas, il convient toutefois aussi de quantifier la fiabilité de la prévision.

Aide utile lors du choix des mesures à prendre

En introduisant les valeurs d'attribut pronostiquées dans la fonction de valeur, on obtient le degré de réalisation de l'objectif auquel la mesure correspondante permet de parvenir. Une comparaison de l'état actuel avec l'état escompté après application de diverses mesures indique l'amélioration obtenue grâce à la mise en œuvre de toutes les mesures proposées. Or cette information est extrêmement utile pour choisir les mesures à prendre.

A2 Hiérarchie des objectifs

Dans les trois hiérarchies ci-après, l'objectif global est un lac d'aspect naturel (fig. 1). Les sous-objectifs et les couleurs utilisées correspondent aux objectifs indiqués dans la fig. 1. Certains sous-objectifs sont illustrés par quelques attributs envisageables.

Hiérarchie des objectifs

Fig. 4 > Exemple de hiérarchie des objectifs permettant d'atteindre un état biologique proche des conditions naturelles

Lors de l'élaboration des différents modules, les sous-objectifs et leurs attributs devront être spécifiés compte tenu de la législation sur la protection des eaux et des exigences fixées par les autorités d'exécution.

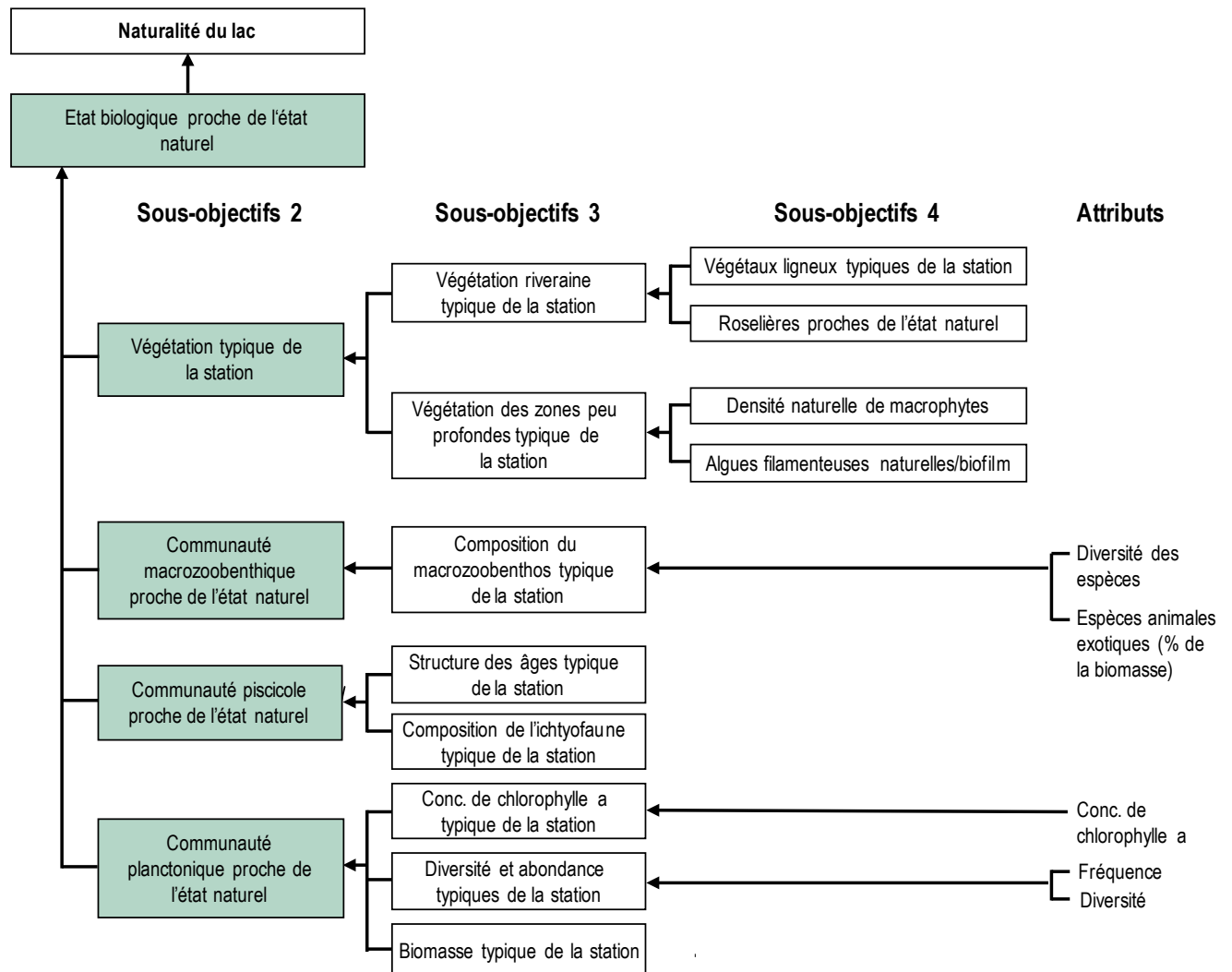


Fig. 5 > Exemple de hiérarchie des objectifs permettant d'atteindre un état chimique proche des conditions naturelles

Lors de l'élaboration des différents modules, les sous-objectifs et leurs attributs devront être spécifiés compte tenu de la législation sur la protection des eaux et des exigences fixées par les autorités d'exécution.

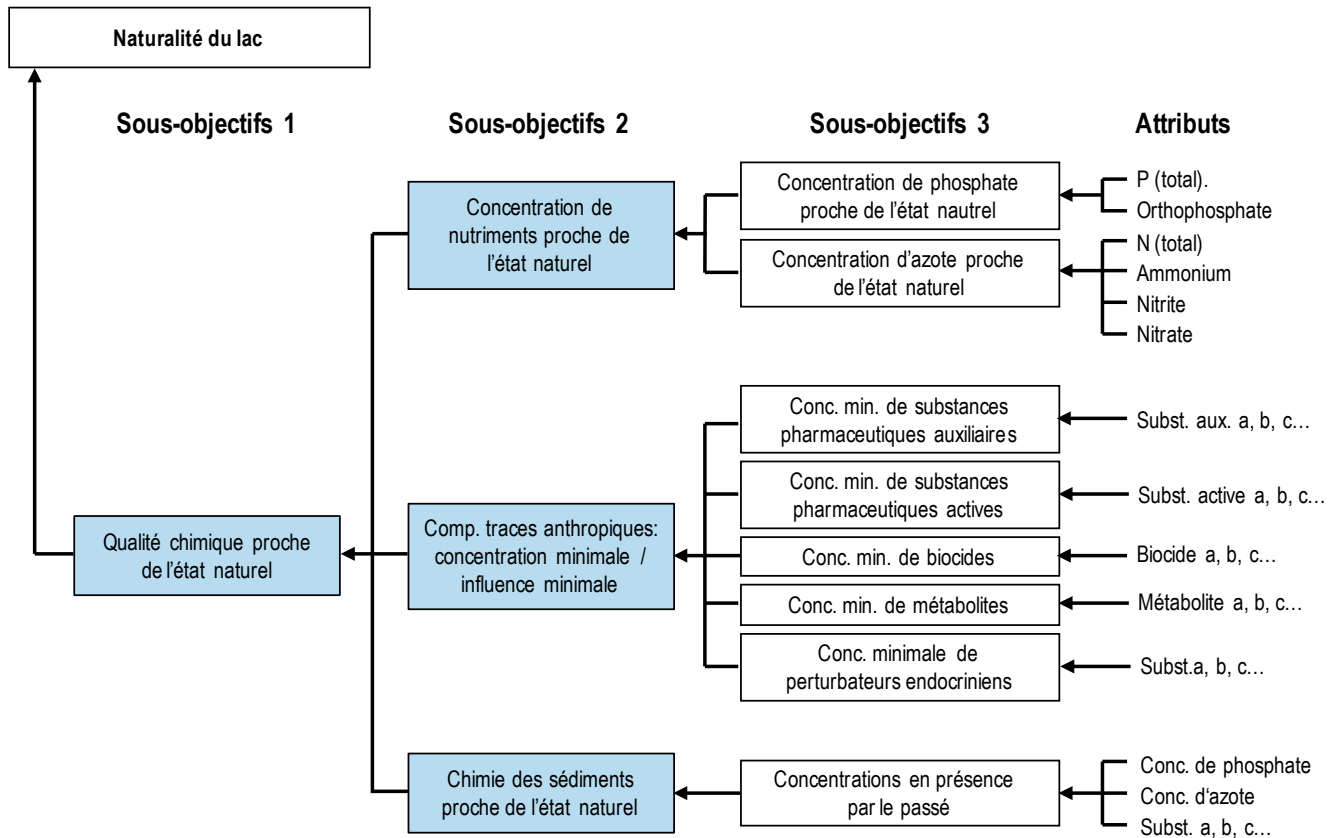
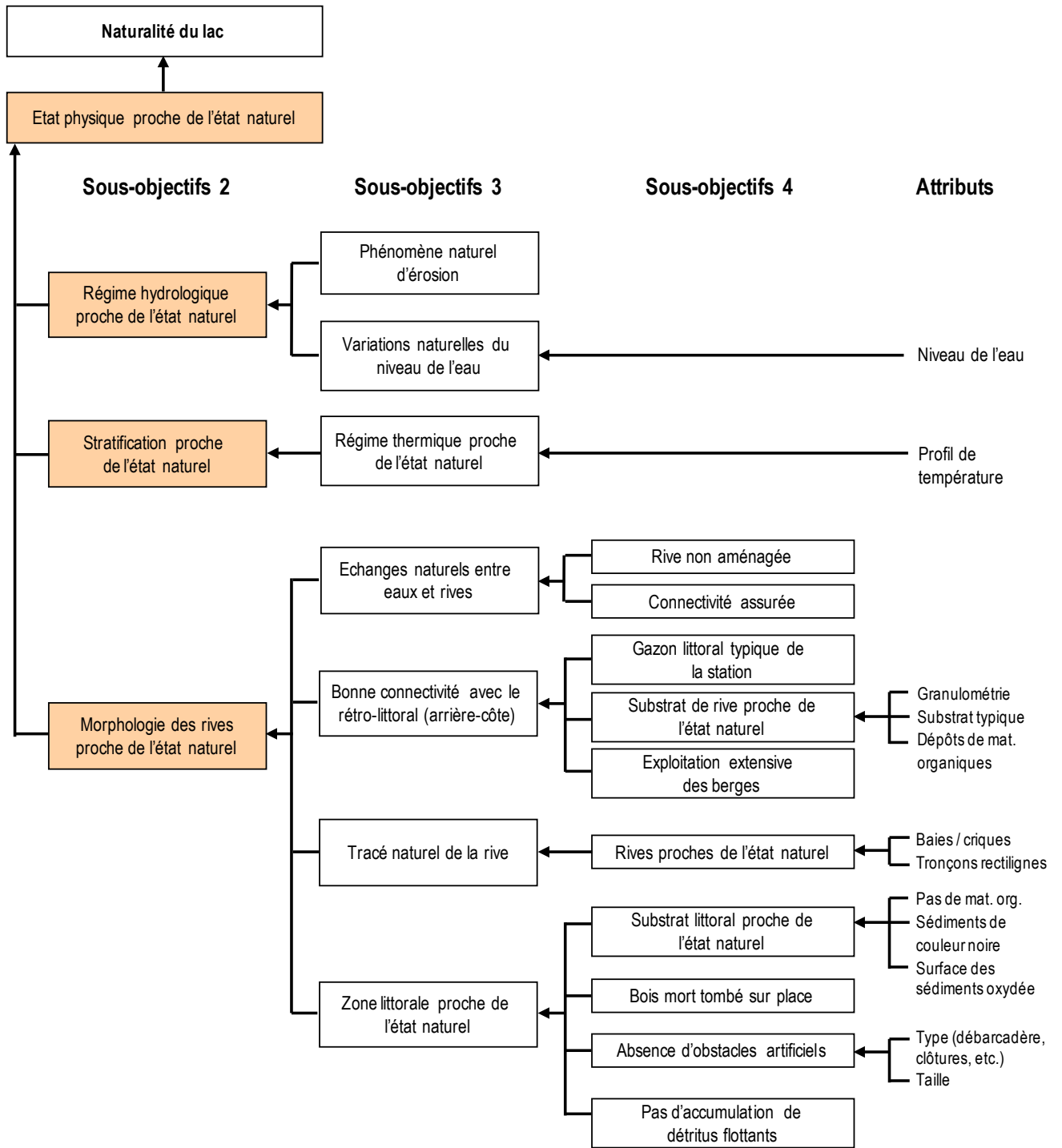


Fig. 6 > Exemple de hiérarchie des objectifs permettant d'atteindre un état physique proche des conditions naturelles

Lors de l'élaboration des différents modules, les sous-objectifs et leurs attributs devront être spécifiés compte tenu de la législation sur la protection des eaux et des exigences fixées par les autorités d'exécution.



A3 Ordre des priorités dans l'élaboration des modules

Selon la moyenne des avis exprimés par les différents experts (spécialistes de l'OFEV, des cantons et de l'Eawag), l'élaboration des modules doit intervenir dans l'ordre suivant:

Elaboration des modules
ordre des priorités

Tab. 2 > Ordre des priorités défini pour l'élaboration des différents modules sur la base des avis des experts

Les degrés d'importance (1 = faible; 2 = moyenne; 3 = grande) accordés aux six critères ont été additionnés pour chaque module. Les critères sont énumérés dans l'ordre allant de la cause à l'effet; ils ne sont pas pondérés.

*Chimie des sédiments: Un module Sédiments ne sera pas nécessaire.

	Morphologie des rives	Végétation (macrophytes)	Macrozoobenthos (espèces animales exotiques)	Poissons	Plancton	Nutriments	Composés traces	Régime hydrologique et stratification	*Chimie des sédiments
1) Intégration d'effets dus à différentes causes et de différents ampleurs (locales et temporelles).	1	2	2	3	2	2	1	1	2
2) Génération de bases pertinentes issues de l'observation sur le long terme.	2	2	2	3	2	3	2	1	2
3) Déficits connus ou degré de l'urgence politique.	3	2	2	2	1	2	2	1	1
4) Recours à des données ou à des méthodes d'appréciation existantes.	3	2	2	2	2	3	1	2	2
5) Intégration de méthodes existantes lors de la mise au point des modules et applicabilité pratique des modules.	3	2	2	2	2	3	2	2	1
6) Possibilité de déterminer les mesures requises.	3	1	1	1	1	3	2	1	1
Total	14	11	11	12	11	14	10	9	9
Priorisation	1	3	3	2	3	1	4	5	*5

A4 Sélection de méthodes existantes servant à évaluer l'état écologique des lacs (état en 2010)

A4-1 Généralités

En 1982, le Département fédéral de l'intérieur (DFI) a publié une version revue et corrigée des *Recommandations pour l'analyse des eaux superficielles en Suisse*, parues en 1974. Depuis lors, des méthodes d'analyse standardisées ont été mises au point pour les cours d'eau suisses, mais pas pour les lacs. Pendant ce temps, dans le cadre de l'exécution de la Directive-cadre européenne sur l'eau (DCE), des spécialistes ont comparé divers protocoles d'appréciation au sein de l'UE et vérifié leur applicabilité (cf. p. ex. Deneke et Nixdorf 2002; Wiser).

Afin de pouvoir, comme l'exige la DCE, ranger chaque lac dans une classe d'état écologique, différents groupes de travail ont formulé des propositions visant à définir des états de référence. La plupart des nouvelles méthodes mises au point au sein de l'UE utilisent dès lors le ratio de qualité écologique (*ecological quality ratio, EQR*), qui se réfère à l'écart entre l'état observé et l'état de référence correspondant au type considéré. Chaque Etat de l'Union européenne définit toutefois à sa manière la typologie des eaux (cf. p. ex. Deneke et Nixdorf 2002 et Schaumburg et al. 2004 pour l'Allemagne; UKTAG 2008a à 2008e pour la Grande Bretagne et l'Irlande du Nord; Pall et Moser 2009 pour l'Autriche).

Des travaux étant en cours à l'échelle de l'UE afin d'élaborer des méthodes uniformisées pour analyser les lacs conformément à la DCE, nous présentons ci-après un aperçu de quelques-unes de ces approches. Nous avons retenu une sélection de protocoles mis au point au sein de l'UE ou aux Etats-Unis et ayant fait l'objet d'une publication en allemand ou en anglais. Lors de la mise au point d'une méthode d'appréciation pour les lacs suisses, il conviendra dès lors de prendre en considération d'autres méthodes encore (éventuellement actualisées) et des rapports sur les essais de différents protocoles.

A4-2 Ecomorphologie des rives

La zone riveraine assume une fonction écologique importante, que ce soit en tant que zone tampon ou en tant que nurserie pour les poissons (cf. Walz et al. 2003). Dans le même temps, les rives sont parfois intégrées dans l'espace urbain ou servent aux loisirs de proximité (Informus GmbH 2004). Pour connaître les conséquences de ce conflit d'intérêts sur l'intégrité biologique de la zone riveraine, divers pays de l'UE, la Suisse et les Etats-Unis ont mis au point des méthodes d'analyse.

Les approches publiées pour évaluer la zone riveraine diffèrent sur un point essentiel: les indications relatives à tous les attributs sont soit collectées à partir de prises de vue aériennes référencées à l'aide de géodonnées (Kollatsch et al. 2005, Ostendorp et al. 2008, A. Klein [membre de la commission], CIPEL 2010), soit directement recueillies sur place (Rowan et al. 2006a, IGKB 2009, EPA 2010a), mais aucune approche ne combine ces deux manières de procéder. Ostendorp et al. (2009) ont comparé la carto-

Quelques méthodes existantes
en bref

graphie basée sur des orthophotos et les résultats des levés cartographiques sur le terrain (IGKB 2009) dans le cas du lac de Constance. Ils ont constaté que la sensibilité du procédé varie selon la portée des atteintes écologiques. Le procédé utilisant les orthophotos s'est montré plus sensible aux atteintes plus marquées et plus étendues, tandis que le travail sur le terrain révélait mieux les atteintes structurelles de moindre portée. L'indice global des deux méthodes présentait une corrélation significative (Ostendorp et al. 2009). La cartographie utilisant les orthophotos présente le gros avantage d'être environ dix fois moins coûteuse (Ostendorp et al. 2009). De plus, les divers segments étant enregistrés sous forme de calques, il sera possible d'évaluer à nouveau exactement les mêmes sites lorsque de nouvelles prises de vue aériennes seront disponibles (Ostendorp et al. 2008).

Dans le Land de Mecklembourg-Poméranie antérieure, les experts ont élaboré un procédé utilisant des photos aériennes pour évaluer des aspects hydromorphologiques (LUNG 204, Kollatsch et al. 2005 et 2006). Ce procédé consiste à cartographier des portions de rive d'une longueur de 1000 m. Pour chaque tronçon, l'espace cartographié englobe la zone peu profonde allant du pied de la berge à une profondeur de 4 m (mais au maximum jusqu'à 100 m de la rive), une bande de 15 m de large sur la berge et une bande de terre voisine de 100 m supplémentaires. Le protocole consiste à établir la valeur de 19 paramètres isolés pour chacune de ces zones, des points bonus et malus étant attribués à 13 de ces paramètres. Des calculs permettent ensuite de déterminer leurs indices. Dans l'appréciation globale de chaque tronçon de rive cartographié, on établit la moyenne des indices pour les ranger dans l'une des sept classes d'état. Le travail de cartographie englobe les roselières, la morphologie de la rive, l'aménagement des berges ainsi que l'affectation des surfaces sur la rive et de la zone voisine. LUNG (2004) fournit une description détaillée de cette méthode.

Rowan et al. (2006a) ont mis au point la méthode «Lake Habitat Survey (LHS)» pour la Grande-Bretagne. Cette méthode consiste à analyser en détail dix tronçons de rives d'une largeur de 15 m à partir d'un bateau (relevé des habitats) et à consigner un aperçu de l'ensemble de la berge lacustre. Dans le relevé des habitats, chaque tronçon est subdivisé en trois zones: la zone d'eau peu profonde (bande de 10 m à partir du pied de la berge en direction du bateau), la rive (de largeur variable) et une bande de 15 m allant de la rive vers l'intérieur des terres. Dans ces tronçons, l'analyse porte sur les attributs les plus divers de la structure de la rive, de l'utilisation du sol, des zones humides et d'autres habitats. C'est la seule méthode, qui invite ses utilisateurs à consigner également la présence de néophytes. L'élaboration de la méthode et son exploitation statistique sont décrites dans Rowan et al. (2006b).

Dans son rapport n° 55, la Commission internationale pour la protection des eaux du lac de Constance (IGKB 2009) présente un protocole détaillé d'appréciation des rives du lac de Constance. Cette méthode consiste à observer et à évaluer la rive, découpée en tronçons de 50 m, à partir d'un bateau. Le travail comprend le relevé des attributs correspondant à quatre groupes de critères pour la zone d'eau peu profonde, les berges de pente moyenne et les berges abruptes: structures typiques et non typiques de la station ainsi que végétation riveraine à durée de vie longue ou éphémère. Selon les résultats des relevés, chaque attribut est classé dans une des trois à cinq catégories de qualité. Cette méthode ne respecte pas les exigences d'une distinction claire entre la

description de l'état écologique et son appréciation (Informus GmbH 2004). Pour chacun des tronçons, un calcul débouche sur une note globale qui pondère les attributs et les agrège. Les classes d'état sont définies en fonction d'un état de référence.

Aux Etats-Unis, les spécialistes ont également élaboré des méthodes pour étudier les rives lacustres, qui recourent à des relevés sur le terrain. Les tronçons des rives ne sont toutefois pas rangés dans des classes d'état numériques, mais leur état est qualifié de bon, moyen ou mauvais après comparaison avec l'état de référence (EPA 2010b). La méthode appliquée par l'EPA (2010c) en Ohio est le seul protocole à relever également la présence d'espèces exotiques.

A4-3 Chimie de la zone pélagique (nutriments et attributs pertinents pour l'état trophique)

En ce qui concerne l'analyse des plans d'eau, les recommandations du DFI (1982) se limitent à l'étude des concentrations de nutriments déversés dans un lac avec les eaux usées. Afin de connaître la concentration d'oxygène et de nutriments, le DFI (1982) recommande de procéder à des relevés durant la période allant du terme de la stratification estivale jusqu'au début du brassage hivernal. Il s'agit de mesurer les paramètres suivants: température, conductivité électrique, pH, dureté carbonatée, oxygène, hydrogène sulfuré (lorsque son odeur est perceptible), fer et manganèse (en cas de faible concentration d'oxygène), orthophosphate, phosphore total, nitrate et ammonium. Les échantillons doivent être prélevés à trois profondeurs de l'épilimnion, à deux profondeurs du métalimnion, à deux ou trois profondeurs de l'hypolimnion et à plusieurs hauteurs différentes au-dessus des sédiments. Pour connaître les concentrations de nutriments et d'oxygène au terme du brassage printanier, les mêmes attributs doivent être mesurés entre février et avril aux mêmes profondeurs que lors des relevés opérés durant la stratification estivale. Selon l'état du lac, les analyses doivent intervenir chaque année ou au plus tous les cinq ans (DFI 1982).

Les concentrations de nutriments dans les lacs suisses étant surveillées, nous ne dressons pas de liste des ouvrages traitant de ce sujet.

A4-4 Biocénoses de la zone littorale: macrophytes

Grâce à une bonne luminosité et une grande hétérogénéité, la zone d'eau peu profonde du littoral abrite une grande variété d'espèces animales et végétales. Elle est donc aussi colonisée par des macrophytes. La diversité et la densité de ce peuplement permettent de tirer des conclusions quant à l'état du lac (DFI 1982).

Le peuplement de macrophytes corrèle très bien avec l'état trophique d'un plan d'eau, mais moins avec d'autres facteurs spécifiques de pollution. Les méthodes appliquées au sein de l'UE pour évaluer la qualité de l'eau des lacs à partir des macrophytes considèrent donc surtout la charge en nutriments. Seule l'Autriche a mis au point une méthode (l'indice autrichien des macrophytes ou module AIM) qui permet d'évaluer le trophisme, ainsi que d'autres types d'atteintes (Pall et Moser 2009). Les macrophytes fournissant des informations sur l'évolution à long terme de l'état trophique, certaines

méthodes, comme celle de Schaumburg et al. (2007), combinent l'analyse des macrophytes avec celle du phytobenthos, afin de suivre aussi les changements à court terme.

Toutes les méthodes élaborées conformément à la DCE ont mis l'accent sur la faisabilité pratique, c'est-à-dire sur les moyens de rendre l'analyse du peuplement de macrophytes aussi simple et peu coûteuse que possible. Ainsi, elles ne cartographient plus tout le littoral comme les méthodes plus anciennes. La méthode autrichienne (Pall et Mayerhofer 2009) utilise tout d'abord des échosondeurs, afin d'obtenir un aperçu détaillé du peuplement de macrophytes dans la zone littorale. Sur la base des informations obtenues, elle étudie ensuite des transects de 25 m dans les peuplements représentatifs. Dans ces transects perpendiculaires à la rive, des plongeurs observent la composition du peuplement, la densité végétale par espèce (selon Kohler 1978) et la hauteur moyenne des végétaux. Pour chaque transect, la méthode consiste à calculer la densité végétale, l'emplacement de la limite de végétation, la zonation, la trophie et la composition du peuplement, ainsi que leur écart par rapport à l'état de référence. La pondération des résultats et l'établissement de moyennes permettent alors de déterminer la classe de qualité écologique (Pall et Mayerhofer 2009).

La méthode mise au point par Schaumburg et al. (2007) pour l'Allemagne consiste à étudier, aux emplacements caractéristiques, des transects perpendiculaires à la rive qui mesurent de 20 à 30 m de large. Les échantillons sont prélevés par des plongeurs ou à partir d'un bateau à l'aide d'appareils appropriés. Le travail consiste à déterminer les espèces en présence et leur abondance, la profondeur de la limite inférieure de végétation et des données sur les types morphologiques à quatre profondeurs différentes. L'appréciation intervient sur la base d'un indice de référence établi au préalable pour le type de lac correspondant (d'après Mathes et al. 2002). L'appréciation globale selon cette méthode faisant aussi intervenir le phytobenthos, l'indice de référence des macrophytes est converti, puis reporté sur une échelle allant de 0 (mauvais) à 1 (très bon). Un tableau permet alors de connaître la classe de qualité écologique du lac étudié (Schaumburg et al. 2007). L'office bavarois de gestion des eaux a publié une description détaillée de cette méthode (BLW 2005).

Pour évaluer l'état d'un lac à l'aide des macrophytes, l'UKTAG recommande l'indice de macrophytes libres pour la Grande-Bretagne et l'Irlande du Nord (UKTAG 2008a) et la méthode LAKE-LEAFPACS pour l'Angleterre, l'Ecosse et le Pays de Galles (UKTAG 2008b). Dans ces méthodes, élaborées pour étudier l'influence de nutriments, les échantillons sont prélevés dans quatre transects au moins, mesurant 100 m de long et perpendiculaires à la rive. Chaque transect est subdivisé en sections de 5 m², où l'on recense les espèces en présence et leur abondance relative. Le calcul de l'indice repose sur la moyenne arithmétique de la profondeur moyenne colonisée, l'abondance relative des characées et des élodéides, l'abondance moyenne d'espèces tolérantes et la classe trophique du lac. A partir de cet indice et la valeur de référence de 0,8 (attribuée à tous les lacs), on détermine le ratio de qualité écologique, qui fournit une bonne indication de l'état écologique du lac (UKTAG 2008a).

Lors de l'élaboration et de l'évaluation des méthodes, une étude portant sur 24 lacs menée en Rhénanie-du-Nord-Westphalie a permis de comparer la qualité des relevés réalisés par des plongeurs ou à partir d'un bateau. Si les ressources humaines mises à

contribution sont identiques, les plongeurs ont recensé un plus grand nombre d'espèces et fourni des données plus précises sur la profondeur colonisée (LUA 2006).

A4-5 **Communautés de la zone littorale: macrozoobenthiques, espèces animales exotiques**

Alors que le macrozoobenthos est utilisé comme indicateur de la qualité de l'eau des rivières, l'impact des pollutions anthropiques sur les macro-invertébrés benthiques de la zone littorale des lacs est mal connu (O'Toole et al. 2008). Il n'existe donc guère de méthodes qui se fondent sur le macrozoobenthos pour évaluer l'état de plans d'eau (Little et al. 2006). Afin de pouvoir utiliser cette faune pour apprécier l'état écologique des lacs conformément à la DCE, plusieurs études ont tenté ces dernières années d'établir des corrélations entre diverses influences anthropiques et leurs effets sur les macro-invertébrés benthiques peuplant la zone littorale (Tolonen et al. 2001, O'Toole et al. 2008, Donohue et al. 2009, Free et al. 2009). Leurs résultats sont parfois contradictoires, en particulier en ce qui concerne les indicateurs de l'eutrophisation. Free et al. (2009) n'ont ainsi découvert qu'un faible indice témoignant d'une réaction directe du macrozoobenthos à l'eutrophisation. Donohue et al. (2009) ont au contraire prouvé que le macrozoobenthos permet de prévoir avec fiabilité une surcharge de nutriments lorsque les échantillons d'invertébrés sont prélevés sur un substrat solide. La différence entre leurs conclusions pourrait résulter du fait que la seconde étude a porté sur la zone littorale, tandis que Free et al. (2009) ont étudié la zone sublittorale.

Vu le manque de connaissances attestées sur les liens entre une pollution anthropique et son influence sur le macrozoobenthos de la zone littorale, la littérature spécialisée ne contient que peu de méthodes qui évaluent l'état écologique de plans d'eau à l'aide de ces indicateurs biologiques. Zenker et al. (2006) présentent un protocole d'appréciation pour l'Allemagne, qui réagit à différentes pollutions, tels des apports de nutriments ou une détérioration de la morphologie. Cette méthode consiste à prélever huit à douze échantillons dans la zone sublittorale au printemps ou en automne, puis d'y mesurer sept paramètres. Ceux-ci permettent de déduire l'origine de la pollution correspondante. L'appréciation de l'état écologique intervient par standardisation des paramètres et leur agrégation en un indice global.

L'UKTAG a publié deux protocoles permettant d'apprécier les lacs de Grande-Bretagne à l'aide d'invertébrés benthiques. La «Lake acidification macroinvertebrate metric (LAMM)» (mesure de l'acidification des lacs à l'aide de macro-invertébrés; UKTAG 2008c) illustre les effets de l'acidification des lacs, tandis que la «Chironomid pupal exuviae technique (CPET)» (technique des exuvies nymphales de chironomidés; UKTAG 2008d) permet d'évaluer la charge en nutriments. La méthode LAMM consiste à prélever entre mars et mai des échantillons dans le sous-sol caillouteux de la zone littorale (≤ 75 cm). Dans la CPET, on prélève quatre échantillons entre avril et octobre à la surface de l'eau. Comme son nom l'indique, cette seconde technique ne relève que les taxons de chironomidés et pas de l'ensemble du zoobenthos, comme le fait la méthode LAMM.

Deux protocoles d'évaluation des lacs étudient les espèces envahissantes, mais uniquement à titre de complément d'information. Leur présence n'a aucune influence sur

l'évaluation des eaux. La Lake Habitat Survey (recensement des habitats lacustres) (Rowan et al. 2006a) inventorie les néophytes en Grande-Bretagne, tandis que la méthode de l'EPA (2010c) recense les espèces animales exotiques. Les espèces envahissantes pouvant exercer une grande influence sur un écosystème, elles peuvent modifier sa classe d'état (Cardoso et Free 2008). Cardoso et Free (2008) proposent dès lors de les évaluer séparément. Un programme de surveillance ciblé sur les espèces animales et végétales exotiques pourrait servir de système d'alerte précoce et permettrait ainsi de prendre des mesures appropriées afin d'éradiquer ces espèces, ou du moins d'en limiter l'expansion (publication anonyme).

A4-6 Poissons (zones littorale, pélagique et benthique)

Nombre de pays de l'Union européenne n'étaient pas préparés à évaluer l'état écologique des lacs sur la base du peuplement piscicole (p. ex. Champ et al. 2009) et ont dû élaborer des protocoles d'évaluation en un temps record. Dans tous les cas, l'échantillonnage des poissons suit plus ou moins la méthode élaborée par le Comité européen de normalisation (CEN 2005), mais les attributs et les paramètres mesurés varient selon les pays. Brämick et Rittersbusch (2010) testent le système d'appréciation en préparation pour l'Allemagne, dans lequel deux modules peuvent entrer en ligne de compte. Le premier module utilise des indicateurs semi-quantitatifs et apprécie l'état écologique en se fondant sur une communauté piscicole spécifique aux eaux étudiées. Le second module se base sur des types de plans d'eau et recourt à des indicateurs quantitatifs. Des points sont attribués à chaque indicateur et la somme de tous les indicateurs est convertie pour donner le ratio de qualité écologique. Sur la base de cette valeur, le lac est rangé dans une classe d'état. Les deux modules tiennent compte du peuplement des lacs. La méthode applique une approche intégrative d'appréciation, puisqu'elle recourt à divers indicateurs de la communauté piscicole (tels le nombre d'espèces caractéristiques ou l'abondance des reproducteurs), mais cela ne lui permet toutefois pas d'identifier le type d'atteinte (Brämick et Rittersbusch 2010).

L'élaboration d'un protocole d'appréciation pour l'Autriche est achevée (Gassner et al. 2009). Pour connaître les espèces de poissons et leur reproduction, la méthode opère les prélèvements standardisés par pêche électrique dans la zone littorale et à l'aide de filets maillants dans la zone pélagique et la zone benthique. Outre ces deux types d'échantillon-nages, un relevé hydroacoustique permet d'estimer la biomasse piscicole et la distribution des poissons. Pour ce qui est des poissons pêchés, on consigne leur espèce, leur longueur totale et leur poids. Dans le cas des espèces caractéristiques, on détermine aussi l'âge de chaque individu. La reproduction des poissons dans les biotopes considérés est établie à partir de la présence de larves et de poissons 0+. Cette méthode révèle également les atteintes anthropiques de manière intégrative. Le recours à cinq facteurs d'appréciation permet toutefois de cerner le type d'atteinte. La longueur et l'âge des poissons servent ainsi d'indicateurs sur le long terme, tandis que la biomasse permet de tirer des conclusions quant à l'eutrophisation et à l'acidification. Enfin, la somme des points des divers facteurs correspond à une classe d'état écologique.

Les poissons jouissant d'une longue durée de vie et jouant le rôle de prédateur au sein de la biocénose lacustre, il faut un certain temps pour percevoir les effets d'atteintes anthropiques sur leur peuplement. Des indicateurs écologiques ne permettent dès lors guère de déterminer la relation entre l'effet et sa cause. Pour que les poissons servent de bioindicateurs, il faudrait mesurer également des attributs qui réagissent de manière sensible et sélective à des modifications (Burkhardt-Holm 2001). Afin de déceler des changements et d'identifier leur origine, il faudrait utiliser d'autres biomarqueurs, comme les protéines du stress, l'ultrastructure de la peau ou les parasites (Burkhardt-Holm 2001). Les méthodes d'évaluation mises au point pour l'Allemagne et l'Autriche n'utilisent pas de bio-indicateurs. Lors du recensement des peuplements piscicoles dans le lac Michigan (Etats-Unis), les spécialistes étudient aussi, non seulement l'abondance, la croissance, etc., mais aussi le contenu de l'estomac, l'état général et l'état de santé des poissons. A cet effet, ils procèdent à des tests sanguins sur une partie des individus pêchés, déterminent la part de graisse dans leur organisme et examinent leurs reins (Schneeberger et al. 1998). Le «Health assessment index» (HAI; indice de l'état de santé) permet d'évaluer rapidement, simplement et sans grands frais, la santé des poissons sur le terrain.

Le travail de Zimmermann (2010) donne une liste exhaustive des publications spécialisées consacrées à ce sujet.

A4-7 **Plancton dans la zone pélagique**

La DCE exige que l'état écologique soit également évalué sur la base du phytoplancton (CE 2000). La plupart des méthodes se contentent cependant de mesurer la concentration de chlorophylle a, à partir de laquelle il est possible d'apprécier l'état d'un lac. Quelques rares méthodes analysent également la composition et la biomasse du phytoplancton (cf. p. ex. Deneke et Nixdorf 2002, Mischke et Nixdorf 2008, Wolfram et Dokulil 2009). La méthode d'évaluation des lacs de l'UKTAG (2008e) considère quant à elle, non seulement la concentration de chlorophylle a, mais également le pourcentage de cyanobactéries perturbatrices. Dans le canton de Zurich, l'état des lacs est également évalué à partir de la concentration de chlorophylle. Selon l'état de référence considéré, diverses clés sont ensuite appliquées pour l'appréciation (AWEL).

Pour calculer le ratio de qualité écologique, toutes les méthodes de l'UE définissent un état de référence. Le plus souvent, les appréciations basées sur le phytoplancton utilisent comme référence les valeurs mesurées dans des lacs (relativement) peu chargés en nutriments (cf. p. ex. Mischke et Nixdorf 2008). Pour la chlorophylle a, on a étudié des conditions typiques de la station (cf. p. ex. Carvalho et al. 2009) et ces conditions de référence ont également servi à l'intercalibration de l'état écologique dans divers pays (Carvalho et al. 2008). Carvalho et al. (2006) fournissent des explications détaillées sur la définition des cinq classes et leur délimitation, fondée sur le ratio de qualité écologique.

Comme l'abondance de phytoplancton dépend de plusieurs facteurs, Kaiblinger et al. (2009) estiment qu'un indice du phytoplancton n'est pas suffisamment sensible pour déterminer l'atteinte à l'origine des modifications observées dans un lac.

Des descriptions détaillées des méthodes élaborées, typologie des lacs comprise, existent pour l'Allemagne (Mischke et Nixdorf 2009) et l'Autriche (Wolfram et Dokulil 2009). Un logiciel permettant de calculer les divers paramètres et l'évaluation globale de l'état écologique sur la base du phytoplancton existe également pour faciliter l'application de la méthode allemande (Mischke et Nixdorf 2008).

> Bibliographie

Systeme et A4-1 Généralités

CE 2000: Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Journal officiel des Communautés européennes L 327: 1–72.

DFI 1982: Recommandations pour l'analyse des eaux superficielles en Suisse (état en 1982). Département fédéral de l'intérieur. Berne.

Eisenführ F. et Weber M. 2003: Rationales Entscheiden, 4. Aufl., Springer.

Forum Biodiversité Suisse 2004: La biodiversité en Suisse: état, sauvegarde, perspectives. Fondements d'une stratégie nationale. Haupt Verlag, Berne.

Langhans S.D., Weber C., Gögge W. 2008: D'une méthode à l'autre vers une évaluation intégrale des cours d'eau. ARPEA 238: 5–11.

Schaffner M., Studer P., Ramseier C. 2013: Evaluation des eaux de baignade. Recommandations concernant l'analyse et l'évaluation de la qualité des eaux de baignade (lacs et rivières). Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1310: 42 p. www.bafu.admin.ch/uv-1310-f

Schwoerbel J. 1987: Einführung in die Limnologie. 6. Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

SIB 2010: Système d'information sur la biodiversité en Suisse. Texte de la convention. www.sib.admin.ch/fr/convention-sur-la-biodiversite/la-convention/texte-de-la-convention/index.html (27.8.2012)

Stratégie Biodiversité Suisse du Conseil fédéral 2012: www.bafu.admin.ch/ud-1060-f (18.09.2013)

Système modulaire gradué SMG, 2012: www.modul-stufen-konzept.ch/index_FR (27.8.2012)

Werner S. 2010: Sind aquatische Neozoen eine Gefahr für die Biodiversität von Bodensee und Hochrhein? Verborgener Reichtum – Die Artenvielfalt der Seen. KOMPAZ Forum Zürichsee, 26 août 2010. ZHAW Wädenswil (27.8.2012)

Wiser. Deliverable D3.2–1: Overview and comparison of macrophyte survey methods used in European countries and a proposal of harmonized common sampling protocol to be used for WISER uncertainty exercise including a relevant common species list. Water bodies in Europe: Integrative Systems to assess Ecological status and Recovery.

WWF 2008: Rapport Planète vivante. WWF International, Gland, Suisse.

Zeh M. 2009: Comment les lacs suisses sont-ils étudiés? Résultats de l'enquête Cercl'eau de 2008 – Etat de la situation: www.cercleau.ch/files/8913/3035/1893/Statuspapier_Seen_V3_F.pdf (27.8.2012)

A4-2 Ecomorphologie

EPA 2010a: Methods of assessing habitat in Lake Erie shoreline waters using the Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) Approach (Version 2.1). U.S. Environmental Protection Agency, Ohio.

EPA 2010b: National Lakes Assessment: Technical Appendix. Data Analysis Approach. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water / Office of Research and Development, Washington, D.C. EPA 841-R009-001a.

EPA 2010c: National Lakes Assessment – A collaborative Survey of the Nation's Lakes. Chapter 2. Design of the Lakes Survey. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water / Office of Research and Development, Washington, D.C. EPA 841-R-09-001.

IGKB 2009: Limnologische Bewertung der Ufer- und Flachwasserzone des Bodensees. (Bericht Nr. 55). Langenargen. www.igkb.de/pdf/blaue_berichte/blauer_bericht_55.pdf (27.8.2012)

Informus GmbH 2004: Entwicklung eines Kartierverfahrens zur Bestandsaufnahme des Strukturzustandes der Ufer von Seen >=50 ha in Mecklenburg-Vorpommern – Endbericht. Berlin.

Kollatsch R.-A., Küchler A., Olbert C., Hölzl K. 2005: Bestandsaufnahme der Standgewässer nach der Wasserrahmenrichtlinie – Struktur der Standgewässeruferzonen in Mecklenburg-Vorpommern. KA-Abwasser, Abfall 52: 1085–1088.

Kollatsch R.-A., Küchler A., Olbert C., Hölzl K. 2006: Kartierung und Bewertung der Struktur von Standgewässeruferzonen in Mecklenburg-Vorpommern. Wasserwirtschaft: 78–82.

LUNG 2004: Entwicklung eines Kartierverfahrens zur Bestandsaufnahme des Strukturzustandes der Ufer von Seen >=50 ha in Mecklenburg-Vorpommern. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie. Berlin.

Mathes J., Plambeck G., Schaumburg J. 2002: Das Typisierungssystem für stehende Gewässer in Deutschland mit Wasserflächen ab 0,5 km² zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. In: Nixdorf B. et R. Deneke (éd.), Ansätze und Probleme bei der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Aktuelle Reihe BTU Cottbus, Sonderband: 15–24.

Ostendorp W., Ostendorp J., Dienst M. 2008: Hydromorphologische Übersichtserfassung, Klassifikation und Bewertung von Seeufern. *Wasserwirtschaft*: 8–12.

Ostendorp W., Dienst M., Spitzbarth H., Ostendorp J. 2009: Naturschutzfachliche Interpretationsmöglichkeiten gewässerstruktureller Seeuferkartierungen am Beispiel des HMS-Verfahrens. *Natur und Landschaft* 12: 545–552.

Rowan J.S., Soutar I., Bragg O.M., Carwardine J., Cutler M.E.J. 2006a: Lake Habitat Survey in the United Kingdom. Field Survey Guidance Manual Version 3.1. Final Report. Sniffer Project WFD42. Edinburgh.

Rowan J.S., Carwardine J., Duck R.W., Bragg O.M., Black A.R., Cutler M.E.J., Soutar I., Boon P.J. 2006b: Development of a technique for Lake Habitat Survey (LHS) with applications for the European Union Water Framework Directive. *Aquatic Conserva: Mar. Frescw. Ecosyst.* 16: 637–657.

Walz N., Ostendorp W., Brüggemann R. 2003: Die ökologische Bewertung von Seeufern in Deutschland. *UWSF – Z Umweltchem. Ökotox.* 15: 1–8.

A4-3 Chimie de la zone pélagique (nutriments et attributs pertinents pour l'état trophique)

DFI 1982: *Recommandations pour l'analyse des eaux superficielles en Suisse (état en 1982)*. Département fédéral de l'intérieur. Berne.

A4-4 Biocénoses de la zone littorale: macrophytes

BLW. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (éd.). 2005: *Bewertungsverfahren Makrophyten & Phytobenthos. Fliessgewässer- und Seen-Bewertung in Deutschland nach EG-WRRL*. Informationsbericht Heft 1/05.

Kohler A. 1978: *Methoden der Kartierung von Flora und Vegetation von Süßwasserbiotopen*. *Landschaft + Stadt* 10: 73–85.

LUA 2006: *Klassifikation und Bewertung der Makrophytenvegetation der grossen Seen in Nordrhein-Westfalen gemäss EG-Wasserrahmenrichtlinie*. (Merkblatt 52). Essen: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen.

Pall K., Mayerhofer V. 2009: *Leitfaden zur Erhebung der biologischen Qualitätselemente Teil B3 – Makrophyten. B3-01e_MPH*. Bundesamt für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Pall K., Moser V. 2009: *Austrian Index Macrophytes (AIM-Module 1) for lakes: a Water Framework Directive compliant assessment system for lakes using aquatic macrophytes*. *Hydrobiologia* 633: 83–104.

Schaumburg J., Schranz C., Stelzer D., Hofmann G. 2007: *Handlungsanweisung für die ökologische Bewertung von Seen zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie: Makrophyten und Phytobenthos*. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft.

Schaumburg J., Schranz C., Hofmann G., Stelzer D., Schneider S., Schmedtje U. 2004: *Macrophytes and phytobenthos as indicators of ecological status in German lakes – a contribution to the implementation of the Water Framework Directive*. *Limnologica* 34(4): 302–314.

UKTAG 2008a: *Macrophytes (Free Index). UKTAG lake assessment methods. Macrophytes and phytobenthos*. Edinburgh: Water Framework Directive – United Kingdom Technical Advisory Group.

UKTAG 2008b: *Macrophytes (LAKE LEAFPACS). UKTAG lake assessment methods. Macrophyte and phytobenthos*. Edinburgh: Water Framework Directive – United Kingdom Advisory Group.

A4-5 Communautés de la zone littorale: macrozoobenthiques, espèces animales exotiques

Auteur anonyme. *Developing an EU Framework for Invasive Alien Species*. Discussion Paper (Final).

Cardoso A.C., Free G. 2008: *Incorporating invasive alien species into ecological assessment in the context of the Water Framework Directive*. 4: 361–366.

Donohue I., Donohue L.A., Ainin B.N., Irvine K. 2009: *Assessment of eutrophication pressure on lakes using littoral invertebrates*. *Hydrobiologia* 633(1): 105–122.

Free G., Solimini A.G., Rossaro B., Marziali L., Giacchini R., Paracchini B. et al. 2009: *Modelling lake macroinvertebrate species in the shallow sublittoral: relative roles of habitat, lake morphology, aquatic chemistry and sediment composition*. *Hydrobiologia* 633: 123–136.

Little R., Bowman J.J., McGarrigle M.L., Free G., Donnelly K., Tierney D. et al. 2006: *Implementation of the Water Framework Directive: Investigations for establishing a lake typology using littoral macroinvertebrates in the Republic of Ireland*. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 29: 2192–2196.

O'Toole C., Donohue I., Moe S.J., Irvine K. 2008: *Nutrient optima and tolerances of benthic invertebrates, the effects of taxonomic resolution and testing of selected metrics in lakes using an extensive European data base*. *Aquat. Ecol.* 42: 277–291.

Tolonen K.T., Hamalainen H., Holopainen I.J., Karjalainen J. 2001: *Influences of habitat type and environmental variables on littoral macroinvertebrate communities in a large lake system*. *Arch. Hydrobiol.* 152: 39–67.

UKTAG 2008c: Lake acidification macroinvertebrate metric (LAMM). UKTAG lake assessment methods. Benthic invertebrate fauna. Edinburgh: Water Framework Directive – United Kingdom Advisory Group.

UKTAG 2008d). Chironomid pupal exuviae technique (CPET). UKTAG lake assessment methods. Benthic invertebrate fauna. Edinburgh: Water Framework Directive – United Kingdom Advisory Group.

Zenker A., Baier B., Böhmer J. 2006: Feinabstimmung des Bewertungsverfahrens für Makrozoobenthos in stehenden Gewässern. Abschlussbericht 2005. Institut für Zoologie, Universität Hohenheim.

A4-6 Poissons (zones littorale, pélagique et benthique)

Adams S.M., Brown A.M. et Goede R.W. 1993: A quantitative health assessment index for rapid evaluation of fish condition in the field. *Transactions of the American Fisheries Society*, 122, 63–73.

Brämick U. et Ritterbusch D. 2010: Praxistest Seenbewertung sowie Interkalibrierung Seenbewertung für Fische. Projekt Nr. O 2.09. Endbericht. Institut für Binnenfischerei e.V. (IfB), Potsdam.

Burkhardt-Holm P. 2001: Der Fisch – wie lässt er sich als Indikator für die Qualität seiner Umwelt einsetzen? *GAIA*, 10(1), 6–15.

CEN 2005: EN 14757 Water quality – sampling of fish with multi-mesh gillnets. <http://surveygillnet.com/Z-files/multimesh%20standard.pdf> (9.11.2010)

Champ W.S.T., Kelly F.L., King J.J. 2009: The Water Framework Directive: using fish as a management tool. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*. 109B:191–206.

Gassner H., Achleitner D., Bruscek G., Mayrhofer K., Frey I. 2009: Leitfaden zur Erhebung der biologischen Qualitätselemente Teil B1 – Fische. B1-01d_FIS. Vienne: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Schneeberger P., Toney M., Elliott R., Jonas J., Clapp D., Hess R., Passino-Reader D. 1998: Lakewide assessment plan for Lake Michigan fish communities. www.glfrc.org/pubs/SpecialPubs/lwasses01.pdf (8.11.2010)

Zimmermann M. 2010: Ein entscheidungstheoretischer Ansatz zur Bewertung der biologischen Integrität von Seen – Ein Vorschlag für Ziele und Attribute. *Travail de semestre, EPF Zurich et Eawag*.

A4-7 Plancton dans la zone pélagique

AWEL. Mess- und Beurteilungsmethoden Seen. www.gewaesserqualitaet.zh.ch/internet/bd/awel/qs/gg/de/see.html (27.08.2012)

Carvalho L., Phillips G., Maberly S.C., Clarke R. 2006: Chlorophyll and Phosphorus Classifications for UK Lakes. WFD38. Edinburgh: SNIFFER.

Carvalho L., Solimini A., Phillips G., van den Berg M., Pietilainen O.P., Solheim A.L. et al. 2008: Chlorophyll reference conditions for European lake types used for intercalibration of ecological status. *Aquat. Ecol.* 42: 203–211.

Carvalho L., Solimini A.G., Phillips G., Pietilainen O.P., Moe J., Cardoso A.C. et al. 2009: Site-specific chlorophyll reference conditions for lakes in Northern and Western Europe. *Hydrobiologia* 633: 59–66.

Deneke R., Nixdorf B. (éd.) 2002: Implementierung der EU-Wasser-rahmenrichtlinie in Deutschland: Ausgewählte Bewertungsmethoden und Defizite, BTUC-AR 5/2002, ISSN 1434-6834.

Kaiblinger C., Anneville O., Tadonleke R., Rimet F., Druart J.C., Guillard J., Dokulil M.T. 2009: Central European water quality indices applied to long-term data from peri-alpine lakes: test and possible improvements. *Hydrobiologia* 633: 67–74.

Mischke U., Nixdorf B. (Hrsg.) 2008: Gewässerreport (Nr. 10): «Bewertung von Seen mittels Phytoplankton zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie». BTUC-AR 2/2008, ISBN 978-3-949471-06-2, ISSN 1434-6834.

UKTAG 2008e: UKTAG lake assessment methods. Phytoplankton. Chlorophyll a and percentage nuisance cyanobacteria. Edinburgh: Water Framework Directive – United Kingdom Advisory Group (WFD-UKTAG).

Wolfram G., Dokulil M.T. 2009: Leitfaden zur Erhebung der biologischen Qualitätselemente Teil B2 – Phytoplankton. B2-01e_PHP. Vienne.

> Répertoires

Figures

Fig. 1 Possibilité de hiérarchie des objectifs applicable lors de l'évaluation des lacs	14
Fig. 2 Exemples de fonctions de valeur	20
Fig. 3 L'agrégation de deux sous-objectifs	21
Fig. 4 Exemple de hiérarchie des objectifs permettant d'atteindre un état biologique proche des conditions naturelles	23
Fig. 5 Exemple de hiérarchie des objectifs permettant d'atteindre un état chimique proche des conditions naturelles	24
Fig. 6 Exemple de hiérarchie des objectifs permettant d'atteindre un état physique proche des conditions naturelles	25

Tableaux

Tab. 1 Classes d'état	21
Tab. 2 Ordre des priorités défini pour l'élaboration des différents modules sur la base des avis des experts	26