

> Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau

Analyses physico-chimiques, nutriments



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

> Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau

Analyses physico-chimiques, nutriments

Valeur juridique

La présente publication est une aide à l'exécution élaborée par l'OFEV en tant qu'autorité de surveillance. Destinée en premier lieu aux autorités d'exécution, elle concrétise des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances et favorise ainsi une application uniforme de la législation. Si les autorités d'exécution en tiennent compte, elles peuvent partir du principe que leurs décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions sont aussi licites dans la mesure où elles sont conformes au droit en vigueur. Les aides à l'exécution de l'OFEV (appelées jusqu'à présent aussi directives, instructions, recommandations, manuels, aides pratiques) paraissent dans la collection «L'environnement pratique».

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).

Auteur

Paul Liechti, Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Collaboration

Jürg Zobrist, Eawag, Eidg. Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs
Beat Mattmann, ONION Energie- und Umweltmanagement AG

Accompagnement

Werner Goeggel, Adrian Jakob, Office fédéral de l'environnement (OFEV)
Barbara Känel, Pius Niederhauser,
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), canton de Zurich
Simone Langhans, Christine Weber,
Eawag, Eidg. Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs

Référence bibliographique

Liechti Paul 2010: Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Analyses physico-chimiques, nutriments. L'environnement pratique n°1005. Office fédéral de l'environnement, Berne. 44 p.

Traduction

David Fuhrmann, 2014 Bôle

Graphisme, mise en page

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Photo de couverture

OFEV

Téléchargement au format PDF

www.environnement-suisse.ch/uv-1005-f

(il n'existe pas de version imprimée)

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2010

> Table des matières

Abstracts	5
Avant-propos	7

1	Introduction	8
1.1	Le système modulaire gradué (SMG)	8
1.2	Bases légales	9
1.3	But du présent document	10

2	Analyse de paramètres physico-chimiques	11
2.1	Stratégie	11
2.2	Bassin versant et contexte	11
2.3	Marche à suivre	12
2.3.1	Questions à résoudre	12
2.3.2	Stations de prélèvement	12

3	Méthodes d'appréciation	14
3.1	Généralités	14
3.2	Paramètres physico-chimiques	14
3.3	Dépouillement et appréciation	16
3.3.1	Indices	16
3.3.2	Classement	17
3.4	Observation coordonnée des eaux de surface	19

Annexes	20	
A1	Caractérisation des paramètres	20
A2	Prélèvement d'échantillons	32
A3	Opérations de conversion pour l'ammonium et les nitrites, représentation cartographique	38
A4	Sondages avec 4 à 5 mesures par année	41

Index	44
Figures	44
Tableaux	44
Bibliographie	44

> Abstracts

The Modular Stepwise Procedure for the analysis and assessment of watercourses includes survey methods in the areas of hydrodynamics and morphology, biology, and chemical or toxic effects. The present report describes how to assess watercourses using chemical and physical parameters. The water quality requirements are either those specified directly in numerical terms in Annex 2 of the Water Protection Ordinance or are obtained by converting the qualitative requirements specified in this Annex into quantitative terms (“target values”). Indicator values are obtained by aggregation of the chemical parameters measured for the water samples. They can be compared with the requirements and target values in an assessment based on a 5-point scale.

Im Rahmen des Modul-Stufen-Konzeptes (MSK) werden Methoden zur Untersuchung und Bewertung der Fließgewässer erarbeitet für die Bereiche Hydrodynamik und Morphologie, Biologie sowie chemische Inhaltsstoffe und toxikologische Effekte. Der vorliegende Bericht beschreibt die Methoden, mit welchen Fließgewässer anhand chemisch-physikalischer Kenngrößen beurteilt werden können. Die Beurteilung orientiert sich an den Anforderungen an die Wasserqualität, wie sie im Anhang 2 der Gewässerschutzverordnung beschrieben sind: die numerischen Anforderungen werden direkt übernommen, die verbalen Anforderungen in numerische Größen umgesetzt und als Zielvorgaben verwendet. Aus den Resultaten der chemischen Untersuchung der Gewässerproben werden statistische Schätzwerte berechnet. Deren Vergleich mit den Anforderungen/Zielvorgaben führt zu einer Beurteilung in 5 Klassen.

Le système modulaire gradué (SMG) prévoit la mise au point de méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau dans les domaines «Hydrodynamique et morphologie», «Biologie» et «Effets chimiques et toxiques». Le présent guide décrit la manière d'apprécier les cours d'eau à l'aide de paramètres chimiques et physiques. Les exigences relatives à la qualité des eaux figurent à l'annexe 2 de l'ordonnance fédérale sur la protection des eaux, soit directement sous forme chiffrée, soit sous une forme descriptive, permettant une transposition en valeurs numériques, adoptées comme objectifs de qualité. Pour apprécier la qualité des échantillons d'eau, les résultats des analyses chimiques sont combinés en des indices statistiques, ceux-ci pouvant ensuite être comparés aux exigences et objectifs dans un système comprenant 5 classes d'état.

Keywords:

chemical and physical surveys, nutrients, requirements as to water quality, assessment on a 5-point scale

Stichwörter:

Chemisch-Physikalische Erhebungen, Nährstoffe, Anforderungen an die Wasserqualität, Beurteilung in 5 Klassen

Mots-clés:

analyses physico-chimiques, nutriments, exigences à la qualité des eaux, appréciation en cinq classes

Il sistema basato su moduli e livelli, adottato per l'analisi e la valutazione dei corsi d'acqua, prevede un sistema di rilevamento a due livelli di intensità nei settori «Idrodinamica e morfologia», «Biologia» ed «Effetti chimici e tossici». Il presente rapporto descrive il metodo in base ai quali i corsi d'acqua possono essere valutati applicando parametri chimici e fisici. Nell'allegato 2 dell'ordinanza sulla protezione delle acque le esigenze relative alla valutazione dei corsi d'acqua figurano direttamente in forma numerica oppure, sulla base di descrizioni, sono trasposte in valori numerici, qui denominati obiettivi prestabiliti. I risultati dell'analisi chimica dei prelievi d'acqua effettuati servono poi a calcolare dei valori di stima, che sulla base del loro confronto con le esigenze e gli obiettivi prestabiliti sono suddivisi in cinque classi.

Parole chiave:
rilevamenti chimici e fisici,
nutrienti, esigenze relative alla
qualità dell'acqua, suddivisione
in 5 classi

> Avant-propos

Berceau de la vie et agent de son développement, l'eau recueille les produits de l'érosion de l'écorce terrestre, notamment les substances indispensables à la croissance des organismes aquatiques et terrestres. Doivent être considérés comme sources de problèmes ceux de ces éléments et composés que les activités humaines concentrent dans les eaux au point d'y menacer la vie.

Les cours d'eau et leurs rives constituent des biotopes pour l'homme, les animaux et les plantes. L'état des cours d'eau dépend non seulement de leur pollution par les eaux usées, mais, pour une bonne part, des perturbations de leur régime, liées par exemple à l'utilisation des forces hydrauliques, au drainage des zones bâties et à la protection contre les crues. Les biocénoses aquatiques sont sensibles à la morphologie et à l'hydrologie, ainsi qu'à la qualité des eaux. Les caractéristiques chimiques et physiques des eaux sont déterminantes pour les espèces qu'elles abritent; elles doivent dès lors être analysées dans le cadre d'études approfondies. La présente version du module Analyses physico-chimiques, nutriments, décrit des méthodes d'appréciation des composants inorganiques et des nutriments.

La loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux et l'ordonnance fédérale du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux ont pour but la protection globale des eaux et des communautés végétales et animales qu'elles abritent, ainsi que leur utilisation durable par l'homme. Le système modulaire gradué prolonge ce mandat dans le domaine de la surveillance des eaux et propose des méthodes ciblées (modules), tenant compte des divers aspects des cours d'eau. Un groupe de spécialistes de l'OFEV, de l'Eawag et de services cantonaux ont ainsi adapté et complété les *Recommandations concernant l'analyse des eaux superficielles en Suisse*, publiées en 1982, pour les intégrer au système modulaire gradué.

Stephan Müller
chef de la division Eaux
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

1 > Introduction

1.1 Le système modulaire gradué (SMG)

Il s'agit d'examiner l'état des cours d'eau afin de savoir si cet état correspond aux objectifs et aux exigences de la loi du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux) et à ceux de son ordonnance d'application. Selon les dispositions de l'article 50 LEaux et de l'article 49 Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), la Confédération et les cantons sont tenus d'informer la population sur l'état des eaux. Une synthèse appropriée des résultats obtenus par les études à ce sujet fournit aux autorités les bases dont elles ont besoin pour décider d'éventuelles mesures de protection. Cela demande un travail d'analyse et d'appréciation impossible à accomplir en se contentant d'une méthode ou d'une autre mais qui doit donc procéder d'une approche pluridisciplinaire.

Examen de conformité avec la législation en vigueur

Des travaux sont en cours depuis plusieurs années au niveau fédéral pour établir un système d'appréciation globale des cours d'eau. Ce système est constitué de méthodes (modules) à caractère partiel, lesquelles sont harmonisées de manière à se compléter mutuellement. Mis à part celui intitulé «Aspect général», chacun de ces modules peut être utilisé de façon indépendante. La vision d'ensemble qu'implique le système assure la complémentarité des résultats obtenus par les différents modules. La liste de ces derniers reste ouverte. Nous présentons dans le cadre de ce système une série de méthodes ou modules applicables aux cours d'eau suisses dans trois domaines d'appréciation – hydrodynamique, morphologie et biologie –, ainsi que pour les critères chimiques et toxiques.

Analyse et appréciation des cours d'eau

Un autre aspect essentiel du système modulaire gradué est sa subdivision en trois niveaux d'investigation d'intensité différente, avec des analyses plus ou moins fouillées selon les besoins et les buts visés:

Niveaux d'analyse

R: «Région», donc l'ensemble des cours d'eau d'une région avec leurs principaux affluents; quelques paramètres-clés; analyses plutôt succinctes; moyens engagés relativement modestes pour chaque étude.

Niveau R

Objectif: obtenir un aperçu général de l'état des cours d'eaux sur un territoire donné et des déficits écologiques que comportent ces eaux.

C: «Cours d'eau», donc un cours d'eau sur toute sa longueur, avec ses affluents; nombre important de paramètres; niveau d'analyse intermédiaire; davantage de moyens mis en jeu pour chaque étude.

Niveau C

Objectif: faire un relevé détaillé de l'état du cours d'eau, analyser les déficits et établir un programme de mesures à prendre.

T: «Tronçon», donc certaines parties d'un cours d'eau; investigations adaptées à des questions concrètes; études spécifiques à l'échelle locale.

Niveau T

Objectif: approfondir des questions de détail.

Le document de base *Système modulaire gradué* publié dans la série *L'environnement pratique (Informations concernant la protection des eaux n° 26)* décrit le fondement des modules et des niveaux d'investigation, ainsi que les principes écologiques et législatifs qui sous-tendent le SMG. Les divers modules donnent lieu à des documents partiels publiés dans la même série, par exemple *Écomorphologie – niveau R (région)*, *Poissons – niveau R*, *Diatomées – niveau R* ainsi que la méthode *Aspect général*. D'autres méthodes relevant du SMG paraîtront à intervalles irréguliers, toujours dans la série *L'environnement pratique*. Des ébauches concernant les modules *Écomorphologie – niveau C*, *Macroinvertébrés – niveau R*, et *Hydrologie – niveau R* peuvent être consultées par Internet à l'adresse www.modul-stufen-konzept.ch. D'autres projets suivront dès qu'ils pourront servir de fondement à une phase de mise à l'épreuve.

Autres méthodes

1.2 Bases légales

La présente publication décrit concrètement comment analyser les paramètres physico-chimiques des eaux et comment juger si les exigences qualitatives figurant à l'annexe 2, chiffres 11 et 12, de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) sont respectées. Il appartient à l'autorité cantonale de fixer les modalités de prélèvement, d'analyse et d'appréciation des résultats – dans la mesure où l'ordonnance ne contient aucune prescription à ce sujet – en vertu des articles 47 et 48 OEaux:

Exigences selon l'annexe 2 de l'ordonnance sur la protection des eaux

Art. 47 Marche à suivre en cas de pollution des eaux

Article 47 OEaux

¹ Si l'autorité constate que les eaux ne satisfont pas aux exigences fixées dans l'annexe 2 ou que l'utilisation spécifique des eaux n'est pas garantie, elle:

- a. détermine et évalue la nature et l'ampleur de la pollution;
- b. détermine les causes de la pollution;
- c. évalue l'efficacité des mesures possibles, et
- d. veille à ce que les mesures requises soient prises en vertu des prescriptions correspondantes.

² Si plusieurs sources de pollution sont impliquées, les mesures à prendre par les responsables doivent être harmonisées

Art. 48 Analyses et mesures

Article 48 OEaux

¹ Les analyses et les mesures sont établies d'après les règles reconnues de la technique; sont notamment reconnues comme telles les normes du CEN (Comité européen de normalisation)¹ ou d'autres normes qui permettent d'obtenir des résultats équivalents.

² Dans la mesure où la présente ordonnance ne contient aucune prescription sur le mode et la fréquence des prélèvements ainsi que sur la manière de procéder pour déterminer si les exigences sont respectées, l'autorité fixe elle-même des prescriptions au cas par cas.

¹ Commande: Association Suisse de normalisation, Bürglistrasse 29, 8400 Winterthur

1.3

But du présent document

Il sera question ici d'analyses physico-chimiques au niveau R, portant en particulier sur les nutriments. L'examen de l'aspect général d'un cours d'eau en application de l'OEaux (chiffre 11 de l'annexe 2) fait l'objet d'un module à part – de sorte que la présente publication laisse de côté le critère «aspect général» (colonies de bactéries, de champignons ou de protozoaires, proliférations excessives ou anormales d'algues et de plantes aquatiques supérieures, boues, turbidité, coloration, mousse, odeur, etc.).

L'annexe 2 de l'OEaux fixe les exigences à respecter concernant des substances nuisibles pour l'environnement. Le présent module *Analyses physico-chimiques* fournit des repères sur le choix des substances à rechercher, sur les prélèvements à effectuer et sur l'interprétation des données obtenues. Quant aux problèmes soulevés par les micropolluants organiques, ceux-ci seront traités selon une méthode particulière à élaborer lorsque les dispositions légales (annexe 2 de l'OEaux) auront été modifiées en conséquence. Cette adaptation a été rendue nécessaire par la stratégie de l'OFEV visant à réduire les taux de micropolluants contenus dans les eaux urbaines.

Par ailleurs, la présente publication propose des valeurs chiffrées – sous forme d'objectifs à atteindre – pour les exigences spécifiées de manière purement verbale dans l'ordonnance. Ces objectifs doivent être considérés comme des recommandations: l'autorité cantonale compétente peut y déroger si elle apporte la preuve que d'autres valeurs respectent également l'esprit de la loi.

Nutriments**Objectifs chiffrés pour les exigences verbales**

2 > Analyse de paramètres physico-chimiques

2.1 Stratégie

Les investigations portant sur des paramètres physico-chimiques de cours d'eau doivent viser des objectifs précis, seul moyen d'obtenir des résultats concluants. Il ne sera possible de bien choisir les sites et les périodes à examiner, ainsi que les méthodes à appliquer, que si l'on est préalablement au clair sur les paramètres déterminants et sur les exigences à remplir.

Une étude susceptible d'apporter des réponses claires et de mettre en évidence les améliorations nécessaires comprendra les étapes suivantes:

- > Délimiter le bassin versant.
- > Dresser la liste des paramètres à mesurer, en se concentrant sur les contaminants d'origine anthropique – par exemple les nutriments.
- > Choisir des stations de mesure facilement accessibles, présentant une masse d'eau bien mélangée (voir *conductivité électrique*). Ce choix doit tenir compte de ce que l'on sait déjà sur l'état chimique du cours d'eau et sur les emplacements des apports de substances.
- > Fréquence des sondages: 12 échantillons/année au minimum.
- > Refroidir les échantillons (<4°C) pour ne pas fausser l'analyse des paramètres instables (substances azotées)
- > Calculer le 90^e centile et classer les résultats comme décrit au chapitre 3.3.2.

2.2 Bassin versant et contexte

Il convient d'examiner le bassin versant d'un cours d'eau avant de procéder à des analyses chimiques. Face à des problèmes manifestes – par exemple en présence de STEP importantes ou surchargées, et surtout en cas de dilution insuffisante dans le milieu récepteur – il peut s'avérer judicieux de remplacer les analyses que propose le présent module par une campagne d'investigations approfondies au niveau des objets critiques.

On constate en général que les anomalies chimiques ou morphologiques ont également des répercussions d'ordre biologique. Dans une situation inverse, donc lorsqu'on observe certains déficits biologiques sans implications apparentes côté morphologie ou chimie, il sera peut-être nécessaire d'allonger de façon ciblée la liste des paramètres à examiner dans le cadre du module Analyses physico-chimiques, nutriments, d'adapter

Investigations spéciales en cas de problèmes dans le bassin versant

le mode de prélèvement d'échantillons ou la fréquence de ces prélèvements. C'est pourquoi la solution idéale consiste à intégrer les analyses chimiques dans un plan d'investigation général. Et l'évaluation des résultats se fera dans une même perspective inter modulaire.

2.3 Marche à suivre

2.3.1 Questions à résoudre

Le programme d'analyses doit se baser sur des questions concrètes:

- > Quel est le but des analyses prévues? Y a-t-il des questions ouvertes?
- > Quels paramètres peuvent apporter une réponse aux questions qui à résoudre?
- > Quelles sont les sources de pollution situées dans le bassin versant du tronçon de cours d'eau considéré? Quels sont les autres facteurs susceptibles d'agir sur la teneur en substances de l'eau?
- > En cas de déversements d'eaux usées: quel est le régime hydraulique du tronçon considéré; à quelle distance en aval peut-on compter sur un mélange parfaitement homogène? Voir aussi sous annexe A1: *Conductivité électrique*.
- > A-t-on déjà collecté des données en amont ou en aval du site de prélèvement envisagé? Quels problèmes et déficits l'interprétation de ces données met-elle en lumière?
- > Quels moyens faudra-t-il engager pour le prélèvement d'échantillons, l'analyse et l'interprétation des données?
- > La cadence de 12 échantillons par année est-elle appropriée, ou la situation demande-t-elle un autre mode ou une autre fréquence de prélèvement (voir annexe A2)?

Sources de pollution dans le bassin versant

Données existantes?

2.3.2 Stations de prélèvement

Le choix des sites de prélèvement requiert une attention particulière. Souvent, il n'est possible d'adopter des emplacements convenables qu'après avoir parcouru le tronçon de cours d'eau à examiner. Et pour diagnostiquer les changements survenus au cours d'une période déterminée, il convient d'effectuer les analyses aux mêmes endroits afin de permettre des comparaisons à long terme. Si l'on prévoit des campagnes de prélèvement sur plusieurs années, il faut choisir des sites dont les abords immédiats subiront à vues humaines très peu de modifications; on évitera donc les endroits comportant des activités de construction en cours ou à venir.

Choisir des sites durablement stables

L'effort à consentir pour le prélèvement d'échantillons doit être en rapport avec ce qu'apportera l'évaluation des valeurs mesurées; il est notamment essentiel, à cet égard, que les stations de prélèvement soient aisément accessibles avec un véhicule, même en hiver.

Accessibilité des sites de prélèvement

Les critères de sélection des sites de prélèvement sont la dimension du cours d'eau, les atteintes ou pollutions supputées et le système de prélèvement adopté par le service compétent.

En cas de problèmes locaux affectant de petits cours d'eau, il peut s'avérer nécessaire de multiplier les points de prélèvement. Les analyses physico-chimiques se feront de préférence pour des endroits situés avant la confluence avec un cours d'eau plus important, ainsi qu'en amont et en aval de sources de pollution critiques. Il est en général superflu de prévoir un réseau dense de points de mesure pour les grands cours d'eau, du fait qu'une forte dilution y masque les faibles variations des taux de pollution.

Il est judicieux de choisir des stations identiques ou très proches pour les différents modules comportant des analyses ponctuelles (Analyses physico-chimiques, nutriments).

Sites identiques pour d'autres méthodes?

3 > Méthodes d'appréciation

3.1 Généralités

Le travail d'évaluation consiste à comparer les exigences de l'OEaux (chiffres 11 et 12 de l'annexe 2) ou les objectifs de qualité présentés au chapitre 3.2 avec un indice statistique basé sur les valeurs mesurées. Le jugement à porter sur ces résultats et les dispositions à prendre pour remédier aux déficits constatés se réfèrent également aux règles prescrites par l'OEaux (p. ex. l'article 47).

OEaux, annexe 2, chiffres 11 et 12

Les facteurs à prendre en considération pour obtenir des résultats utilisables sont non seulement la fréquence des mesures et la répartition chronologique des prélèvements d'échantillons, mais aussi le mode de prélèvement (voir annexe A2).

Il n'est pas possible de calculer les charges polluantes pour des substances partiellement contenues dans des particules en suspension – notamment COT, N_{tot} et P_{tot} – si les mesures se limitent plus ou moins aux périodes d'eaux basses ou moyennes. Pour ce calcul on effectuera aussi un certain nombre de prélèvements durant les périodes de crue.

Calcul de charges polluantes et épisodes de crue

L'annexe A4 présente une méthode simplifiée d'examen rapide (sondage) applicable à des sites d'eaux peu polluées qui ont rarement ou jamais fait l'objet d'une telle investigation.

Sondage: annexe A4

3.2 Paramètres physico-chimiques

La méthode présentée ici laisse de côté la question des analyses chimiques. Les laboratoires des services cantonaux de protection des eaux ont élaboré des directives applicables à tous les paramètres mentionnés ci-après (<http://www.labeaux.ch/>).

Règles d'analyse édictées par les services cantonaux de protection des eaux

Il faut éviter toute confusion entre les exigences chiffrées de notre législation (OEaux, annexe 2, ch. 12, al. 5) et les objectifs de qualité qui figurent dans la présente publication (Tab.1 et Tab.4); ceux-ci revêtent un caractère complémentaire et sont inspirés des exigences verbales de la même ordonnance (OEaux, annexe 2, ch. 11 et 12, al. 1 à 3). Comme il s'agit ici d'un document d'aide à l'exécution, ces objectifs ont valeur de recommandations – en particulier pour les nitrites et l'ammoniac² (OEaux, annexe 2, ch. 12, al. 1):

Objectifs de qualité à titre de recommandations

² Comme le montre la figure 1, les exigences légales relatives à l'ammonium (OEaux, annexe 2, ch. 12, al. 5, n° 3) ont été complétées par le critère du pH.

«La qualité des eaux doit être telle:

- a. qu'il ne se forme pas de taches de sulfure de fer visibles à l'œil nu sur le fond du cours d'eau; des conditions naturelles particulières sont réservées;
- b. que les concentrations de nitrite et d'ammoniac n'entravent pas la reproduction ni le développement des organismes sensibles tels que les salmonidés.»

Les étendues d'eau font l'objet d'exigences particulières quant à leur teneur en nutriments (OEaux, annexe 2, ch. 13, al. 2): «La teneur en nutriments doit permettre une production de biomasse qui ne dépasse pas la moyenne; ...». Il convient donc de mesurer et de catégoriser les quantités de phosphore total et biodisponible dans le bassin versant des lacs auscultés. Si l'on souhaite également en calculer ou estimer les apports, il ne faut pas négliger les situations de crue – car un débit en augmentation rapide entraîne normalement des concentrations accrues de particules solides ainsi que des déversements des réseaux d'égouts. En règle générale, l'activité biologique d'un émissaire d'un lac n'est pas limitée par le phosphore: une forte concentration de cet élément n'y a guère d'incidences négatives et ne fait qu'indiquer des niveaux de charge anthropique. Il n'est donc pas indispensable d'évaluer les teneurs en composés phosphorés en aval des lacs.

Exigence verbale concernant le phosphore pour les eaux dormantes uniquement

La **liste des paramètres** comprend:

- > phosphore total non filtré (ou phosphore total filtré)
- > orthophosphates
- > nitrates
- > nitrites
- > ammonium
- > carbone organique dissous, COD
- > pH
- > température
- > débit (évent. estimé) pour caractériser le point de mesure (débit moyen, débit de crue et débit d'étiage)
- > oxygène

Paramètres complémentaires possibles (selon la problématique et les facteurs ambiants [voir chap. 3.3.3]):

- > conductivité électrique (sur un profil en travers du cours d'eau afin d'apprécier l'homogénéité du mélange)
- > chlorures
- > azote total
- > carbone organique total, COT
- > demande biochimique en oxygène, DBO₅
- > paramètres géochimiques, alcalinité ou dureté totale

- > métaux lourds
- > (pesticides; de préférence lors de campagnes de mesure)

Les prélèvements d'échantillons peuvent être moins fréquents pour les paramètres géochimiques que pour d'autres, car leurs valeurs restent stables à long terme même si elles varient nettement au cours des saisons en fonction de la température et du débit. Il en va de même pour les métaux lourds, du fait que les exigences chiffrées – Cu et Zn mis à part – sont le plus souvent respectées dans la phase aqueuse de nos eaux. On se contentera donc, pour ceux-ci, de campagnes de contrôle espacées de cinq à dix ans. L'analyse des pesticides et autres micropolluants est évoquée au chapitre 1.3 (méthode complémentaire).

Fréquence des prélèvements pour paramètres géochimique et métaux lourds

Tab.1 > Objectifs chiffrés supplémentaires³

en complément des exigences selon OEaux, annexe 2, chiffre 12, alinéa 5

Objectifs de qualité

Substance	Ortho-P	Phosphore total filtré/non filtré	Azote total	Nitrites	COT
[mg/L]	0,04	0,05 / 0,07	7,0	0,05	3,0–5,0

3.3 Dépouillement et appréciation

3.3.1 Indices

Pour faire l'évaluation d'un site de cours d'eau, il faut tirer des chiffres mesurés une valeur «représentative» ou un indice statistique basé sur une méthode normalisée. Ce résultat est ensuite comparé à l'exigence formulée par exemple au chiffre 12 de l'annexe 2 de l'OEaux. Cet indice statistique est une valeur critique en ce sens que le jugement porté sur l'état du cours d'eau dépendra directement de la méthode statistique utilisée. L'indice adopté pourra être la moyenne arithmétique, la moyenne géométrique, la médiane ou d'autres quantiles.

Comparaison avec les exigences de l'OEaux

Lorsqu'on détermine les paramètres chimiques à prendre en considération, il est souvent difficile de faire la distinction entre événements réels et mesures erronées. Quelques valeurs frappantes peuvent constituer les seuls signes d'une situation anormale pour le bassin versant considéré. Le recours à des paramètres chimiques ou physiques complémentaires aidera alors à décider s'il convient de rejeter certaines données; mais cela reste souvent délicat, même si l'on possède des connaissances approfondies sur le réseau hydrographique de la région. Il convient d'observer ici que les valeurs très élevées ou «extrêmes» sont prises en compte de manière différente selon la méthode utilisée pour déterminée les indices (moyennes, centiles).

Mesures erronées (valeurs aberrantes)

³ Comme le présent document est une aide à l'exécution, ces objectifs complémentaires ont valeur de recommandations et ne correspondent à aucune obligation légale.

L'OEaux (annexe 2, ch. 12) prévoit des dérogations en cas de conditions naturelles particulières – notamment apport d'eau en provenance de zones marécageuses, pointes de crue inhabituelles ou étiages inhabituels. En tout état de cause, les indices adoptés ne seront conformes aux exigences de l'ordonnance que si les valeurs extrêmes non prises en compte dans leur calcul correspondent clairement aux exceptions mentionnées sous chiffre 12. Un tel calcul ne peut se faire après coup que si les débits ont été enregistrés en même temps que les autres paramètres. L'OEaux, annexe 2, chiffre 12 ne fournit pas de précisions sur le terme «pointes de crue inhabituelles». Les fortes précipitations survenant par exemple lors d'orages estivaux sont un facteur de turbidité qui produit des effets considérables sur la quantité de matières en suspension dans l'eau. Une turbidité très marquée témoigne en elle-même d'une situation exceptionnelle, mais revêt par ailleurs une grande importance pour l'évaluation des charges en phosphore total par exemple. On observe également des «étiages inhabituels» selon les termes de l'OEaux après des périodes de sécheresse dépassant un à deux mois (selon les réserves d'eau du bassin versant).

Pointes de crue ou étiages à caractère inhabituel

Un critère essentiel pour le choix des indices est d'adopter une distribution des valeurs mesurées facile à évaluer sous forme graphique, par exemple à l'aide d'une courbe de distribution des fréquences cumulées. Le chapitre 60 du Manuel suisse des denrées alimentaires (Office fédéral de la santé publique, OFSP, 1989) fournit d'autres informations sur les indices dérivés de données empiriques et sur les problèmes que cela comporte.

Les quantiles indiquent à partir de quelle valeur telle ou telle partie des résultats obtenus est atteinte ou dépassée. La médiane, par exemple, correspond au 50^e centile: la moitié des valeurs enregistrées lui est inférieure ou égale. Le tracé des fréquences cumulées met en évidence les quantiles, lesquels procurent de meilleurs indices que les moyennes arithmétiques lorsque les valeurs mesurées présentent une distribution non normale ou logarithmique. Les tableurs disponibles actuellement simplifient le calcul; mais il n'est pas facile pour autant d'estimer correctement la dispersion des valeurs calculées.

Centiles, médiane

Afin de faciliter la comparaison des résultats obtenus par les différents services chargés d'étudier l'état des cours d'eau, nous proposons d'utiliser comme indice statistique le 90^e centile d'au moins 12 échantillons.

3.3.2 Classement






Par analogie avec la directive-cadre de l'UE sur l'eau, le système modulaire gradué adopte une répartition en *cinq catégories* ou *classes d'état*, à savoir:

5 classes d'état

très bon / bon / moyen / médiocre / mauvais

Les critères applicables à ces catégories ou classes d'état sont présentés dans le tableau 2.






Tab.2 > Appréciation des valeurs mesurées, répartition en classes d'état chimique

Appréciation		Condition/description		Objectif de qualité
	très bon	L'indice obtenu ⁴ (I) est inférieur à la moitié de l'objectif visé (O) ⁵	$I < \frac{1}{2} O$	Objectif atteint
	bon	L'indice obtenu (I) est inférieur à l'objectif visé (O)	$\frac{1}{2} O \leq I < O$	
	moyen	L'indice obtenu (I) est inférieur à une fois et demie l'objectif visé (O)	$0 \leq I < 1,5 * O$	Objectif non atteint
	médiocre	L'indice obtenu (I) est inférieur au double de l'objectif visé (O)	$1,5 * O \leq I < 2 * O$	
	mauvais	L'indice obtenu (I) est égal ou supérieur au double de l'objectif visé (O)	$I \geq 2 * O$	

Classement, principe général






Les tableaux ci-dessous présentent séparément les critères applicables à chaque paramètre. Les différences par rapport aux proportions du tableau 2 sont commentées dans une note de bas de page.

Tab.3a > Classement de l'état chimique

Appréciation		Ortho-P [mg/L P]	P total non filtré ⁶ [mg/L P]	P total filtré [mg/L P]
	très bon	jusqu'à < 0,02	jusqu'à < 0,04	jusqu'à < 0,025
	bon	0,02 à < 0,04	0,04 à < 0,07	0,025 à < 0,05
	moyen	0,04 à < 0,06	0,07 à < 0,10	0,05 à < 0,075
	médiocre	0,06 à < 0,08	0,10 à < 0,14	0,075 à < 0,10
	mauvais	0,08 et plus	0,14 et plus	0,10 et plus

Classement par paramètre

Tab.3b > Classement de l'état chimique

Appréciation		Nitrites [mg/L N] ⁷ (<10 mg/L Cl ⁻)	Nitrites [mg/L N] (10 à 20 mg/L Cl ⁻)	Nitrites [mg/L N] (>20 mg/L Cl ⁻)
	très bon	jusqu'à < 0,01	jusqu'à < 0,02	jusqu'à < 0,05
	bon	0,01 à < 0,02	0,02 à < 0,05	0,05 à < 0,10
	moyen	0,02 à < 0,03	0,05 à < 0,075	0,10 à < 0,15
	médiocre	0,03 à < 0,04	0,075 à < 0,10	0,15 à < 0,20
	mauvais	0,04 et plus	0,10 et plus	0,20 et plus

⁴ Le choix d'un indice approprié se base sur la distribution des valeurs et sur la question examinée ; nous proposons le 90^e centile comme indice standard.

⁵ Les objectifs de qualité correspondent ici aux exigences chiffrées de l'annexe 2 OEaux, auxquelles s'ajoutent les objectifs complémentaires figurant dans les tableaux 1 et 4

⁶ En présence d'une forte proportion d'apatites, la délimitation des classes pourra être modifiée en conséquence.

⁷ Les objectifs de qualité adoptés ici sont les valeurs figurant au tableau 4 (annexe 1). Le chapitre *Objectifs de qualité indexés sur d'autres paramètres* (annexe 3) explicite la méthode de calcul utilisée.

Tab.3c > Classement de l'état chimique

Appréciation	Ammonium ⁸ [mg/L N] (>10°C ou pH >9)	Ammonium [mg/L N] (<10°C)	Nitrates ⁹ [mg/L N]
très bon	jusqu'à <0,04	jusqu'à <0,08	jusqu'à <1,5
bon	0,04 à <0,2	0,08 à <0,4	1,5 à <5,6
moyen	0,2 à <0,3	0,4 à <0,6	5,6 à <8,4
médiocre	0,3 à <0,4	0,6 à <0,8	8,4 à <11,2
mauvais	0,4 et plus	0,8 et plus	11,2 et plus

Tab.3d > Classement de l'état chimique

Appréciation	N total [mg/L N]	DBO ₅ ¹⁰ [mg/L O ₂]	COD ¹¹ [mg/L C]	COT [mg/L C]
très bon	jusqu'à <2,0	jusqu'à <2,0	jusqu'à <2,0	jusqu'à <2,5
bon	2,0 à <7,0	2,0 à <4,0	2,0 à <4,0	2,5 à <5,0
moyen	7,0 à <10,5	4,0 à <6,0	4,0 à <6,0	5,0 à <7,5
médiocre	10,5 à <14,0	6,0 à <8,0	6,0 à <8,0	7,5 à <10,0
mauvais	14,0 et plus	8,0 et plus	8,0 et plus	10,0 et plus

3.4 Observation coordonnée des eaux de surface

Le projet *Observation coordonnée des eaux de surface* lancé par la CCE et par l'OFEV vise à améliorer la comparabilité des données sur des territoires étendus; il prévoit ainsi le recours à des méthodes coordonnées pour répondre à certaines questions. En ce qui concerne le relevé des paramètres chimiques décrits au chapitre 3.2, il propose une norme de 12 échantillons par année afin de faciliter des comparaisons qui ne se limitent pas aux frontières cantonales. En l'absence de questions impliquant le prélèvement d'échantillons à des moments particuliers, on veillera à une chronologie aléatoire des prélèvements (heure, jour de la semaine).

Comparabilité des relevés effectués par différents services

⁸ L'ammonium résulte de NH₄⁺-N et NH₃-N additionnés. Lors de températures supérieures à 10 °C ou de pH dépassant 9, on applique des critères plus sévères en raison de la protolyse de NH₄⁺-N conduisant à une proportion accrue d'ammoniac. Des concentrations d'ammoniac qui se maintiennent durablement à 0,008 mg/L N ou plus peuvent s'avérer toxiques pour les œufs et les alevins de poissons nobles; il ne faudrait jamais dépasser 0,02 mg/L N. Le chapitre *Objectifs de qualité indexés sur d'autres paramètres* (annexe 3) explicite la méthode de calcul utilisée. Si la température n'a pas été enregistrée, on applique la variante rigoureuse des critères. Et si l'on n'a pas mesuré le pH, seule la température est prise en compte.

⁹ Pour les nitrates, la limite entre les classes *très bon* et *bon* a été abaissée à 1,5 mg/L N en vertu des critères écologiques énoncés par l'OEaux (annexe 1, ch. 1, al. 3c), d'où une dérogation au principe de la répartition proportionnelle; la limite de 5,6 mg/L N fixée à l'annexe 2, chiffre 12 OEaux se base sur les critères de l'eau potable. Avec un système proportionnel, la valeur limite pour la classe *très bon* serait de 1 mg/L N; mais la contamination de fond naturelle est encore inférieure à ce chiffre.

¹⁰ On peut prévoir un classement plus sévère pour les eaux naturellement peu polluées. L'OEaux en tient compte en proposant une fourchette de 2 à 4 mg/L O₂. Dans les situations globalement favorables, il convient donc d'adopter des valeurs proportionnellement plus basses pour chaque classe d'état.

¹¹ Les émissaires de marais et de lacs se caractérisent par des concentrations élevées en COD d'origine naturelle. En automne, les teneurs de l'eau en COD/COT peuvent aussi augmenter par suite de la décomposition de feuilles mortes tombées dans l'eau. L'OEaux en tient compte en fixant une fourchette de 1 à 4 mg/L COD. Nous proposons par conséquent une fourchette de 2 à 5 mg/L COT. Dans les situations globalement favorables, on y adaptera le classement avec des valeurs proportionnellement plus basses.

> Annexes

A1 Caractérisation des paramètres

A1-1 Remarques relatives aux différents paramètres

Le phosphore parvient dans les eaux de manière diffuse par lessivage de terres agricoles et, ponctuellement, par les rejets d'eaux usées et les déversoirs d'orage. Les apports de phosphore dans les eaux superficielles ont diminué grâce aux progrès de l'épuration des eaux usées et à l'interdiction, en 1986, des phosphates dans les produits de lessive.

Phosphore total (P_{tot})

Le phosphore est un nutriment vital pour les organismes aquatiques. Comme les eaux n'en reçoivent que de faibles quantités dans un environnement naturel, ce sont les apports d'origine anthropique qui conditionnent la croissance des plantes aquatiques. Si l'on souhaite avoir une idée de sa provenance, il faut analyser le phosphore total sur des échantillons d'eau filtrés et non filtrés. Pour les lacs, on se réfère d'une part au phosphore total contenu dans le filtrat des affluents et, d'autre part, au phosphore total brut (non filtré) dans l'effluent des rejets directs de STEP. Le filtrat contient des phosphates inorganiques et organiques: orthophosphates, polyphosphates (p. ex. de produits de nettoyage et pour lave-vaisselle), phosphore organique d'origine animale et végétale, phosphore organique de produits de nettoyage (phosphonates). Les composés phosphorés insolubles retenus par les filtres proviennent soit de matière biologique (p. ex. algues), soit – sous forme de particules solides – de l'érosion du sol ou de la désagrégation de roches (p. ex. apatite, qui n'est pas directement biodisponible).

Le phosphore, facteur limitant pour la croissance des organismes aquatiques

L'OEaux fixe des exigences exclusivement verbales pour les étendues d'eau et des exigences chiffrées pour les émissions. L'adoption d'un objectif de qualité¹² se justifie ainsi en amont des lacs. De fortes concentrations de phosphore n'ont guère d'incidences négatives en aval des lacs, où cet élément sert avant tout d'indicateur de pollutions anthropiques: 0,07 mg/L P non filtré; cette valeur peut être rehaussée en présence d'une forte proportion d'apatite, mais doit alors être complétée par des mesures du phosphore total dissous dans l'échantillon filtré (objectif: 0,05mg/L P).

Pas d'exigences légales pour les cours d'eau

Le phosphore total (non filtré) est important pour le calcul de la charge polluante, qui doit largement tenir compte des valeurs mesurées en situation de débits élevés (voir annexe A2).

En règle générale, le phosphore n'est pas un facteur limitant de l'activité biologique en aval des lacs. Des concentrations élevées n'ont guère d'effets nuisibles sur ces cours d'eau, sauf, peut-être, si ceux-ci coulent très lentement; le phosphore y constitue donc un indicateur de pollutions anthropiques. Il appartient ainsi aux services cantonaux de

¹² Comme le présent document est une aide à l'exécution, ces objectifs de qualité ont valeur de recommandations et ne figurent pas tels quels parmi les exigences de l'OEaux (annexe 2, ch. 12)..

protection des eaux d'adapter en conséquence les objectifs à respecter en matière de phosphore et d'orthophosphates en aval des lacs, ou même de renoncer à une appréciation de ce paramètre.

Les orthophosphates agissent directement sur la physiologie des végétaux et sont un indicateur de pollution des eaux par des activités humaines. (Pas d'exigence imposée par l'OEaux; objectif proposé: 0,04 mg/L P).

Orthophosphates (PO₄-P)

Il n'y a pas d'exigences relatives au phosphore pour les stations d'épuration des eaux usées en aval de lacs non situés dans le bassin versant du Rhin, ou dont la capacité est inférieure à 10 000 EH. Après une épuration secondaire de bonne qualité, le phosphore restant dans l'effluent de la STEP s'y trouve essentiellement sous forme dissoute. Lorsque le rapport de dilution dans un milieu récepteur n'est que de 1:10, il se peut que la concentration en orthophosphates dépasse le plafond susmentionné alors que la STEP en question respecte les exigences de l'OEaux. Les objectifs figurant dans la présente publication ne correspondent pas à une obligation légale (hormis ceux qui reprennent les exigences fixées par l'OEaux, annexe 2, ch. 12).

On utilise de plus en plus l'azote total (somme de tous les paramètres N) pour compléter ou remplacer les nitrates. Avec ce paramètre global on met en évidence l'ensemble de ses formes organiques et particulaires. L'azote particulaire est constitué en majeure partie de matériel organique.

Azote total (N_{tot})

Lorsqu'on détermine directement l'azote total, cela permet de renoncer à la méthode plus compliquée de l'azote Kjeldahl, dont on combinait jusqu'ici le résultat avec les teneurs en nitrates et en nitrites pour calculer ce total. (Pas d'exigence imposée par l'OEaux; objectif proposé: 7 mg N/L; une valeur de 3 ou 4 mg/L serait écologiquement justifiée, mais l'exigence de l'OEaux, annexe 2, ch. 12 en matière de nitrates y fait obstacle.)

L'azote est un nutriment indispensable pour les organismes aquatiques, et les végétaux l'absorbent plus particulièrement sous forme de nitrates. Ceux-ci constituent l'essentiel de l'azote inorganique contenu dans les eaux. Dans les cours d'eau suisses, il est exceptionnel que de faibles concentrations de nitrates soient un facteur limitant pour la prolifération des algues et autres végétaux aquatiques. Des teneurs en nitrates inférieures à 10 mg/L ne produisent pas d'effets manifestement nuisibles sur les biocénoses des eaux superficielles. Mais si un manque d'oxygène fait des nitrates des accepteurs d'électrons (oxydants), il peut en résulter des composés azotés eux-mêmes toxiques – nitrites et ammonium. Si les teneurs en nitrates dépassent 1,5 mg/L N, il y a probablement eu inondation et lessivage de terres agricoles, ou le déversement d'eaux usées communales. L'OEaux (annexe 2, ch. 12) fixe la teneur maximale à 5,6 mg/L N pour les cours d'eau qui servent à l'approvisionnement en eau potable. Un objectif purement écologique (nitrate servant d'indicateur de pollution) selon OEaux, annexe 1, chiffre 1, alinéa 3c devrait prévoir une limite plus basse, par exemple 2 mg/L N. C'est pourquoi la valeur limite entre les classes *très bon* et *bon* a été ramenée à 1,5 mg/L N, en dérogation à la répartition proportionnelle. La teneur en nitrates de l'eau exfiltrée des forêts du Plateau suisse se situe autour de 1 mg/L N et subit l'influence de dépôts d'azote

Nitrates (NO₃-N)

atmosphérique. Cette teneur se divise souvent par deux dans les lacs et dans les émissaires, en raison des processus de dénitrification qui s'y déroulent. La contamination de fond naturelle devrait se situer quant à elle dans une fourchette allant de 0,5 mg/L N sur le Plateau à 0,2 mg/L N dans les Alpes.

Les nitrites sont instables sur le plan biochimique. Si l'on met les échantillons dans des bouteilles pour les analyser en laboratoire, il faut s'attendre à un phénomène de décomposition biologique substantielle au cours du transport. Une forte concentration d'ammonium dans la bouteille peut aussi engendrer des nitrites (nitrification). Il convient donc d'analyser les échantillons peu après leur prélèvement, ou tout au moins de les filtrer. Il faut aussi les refroidir (à <math><4^{\circ}\text{C}</math>) après prélèvement et transport. L'OEaux se limite à des exigences verbales quant à la teneur en nitrites.

Nitrites ($\text{NO}_2\text{-N}$)

Les nitrites sont très toxiques pour les poissons, en particulier pour les salmonidés. On peut constater une concentration anormale de nitrites lors de la transformation biologique d'ammonium en nitrates, ou bien la formation de N_2O ou N_2 gazeux lors des processus de dénitrification.

Nitrites: toxiques pour les poissons

Il convient de mesurer les taux de nitrites dans les eaux poissonneuses (présence de salmonidés ou frayères) lorsque la concentration d'ammonium dépasse 0,2 mg/L. Comme la toxicité des nitrites dépend de la quantité de chlorures dans l'eau, il faudrait aussi déterminer celle-ci. Proposition concernant l'appréciation des teneurs en nitrites en corrélation avec celles en chlorures:

Tab.4 > Objectifs concernant les nitrites dans les eaux à salmonidés

Teneur en chlorures [mg/L Cl ⁻]	Objectif [mg/L $\text{NO}_2\text{-N}$]
<10	0,02
10-20	0,05
>20	0,10

La méthode de calcul à utiliser pour obtenir un indice compte tenu d'objectifs variables est décrite dans l'annexe A3, *Objectifs de qualité indexés sur d'autres paramètres*.

Les concentrations d'ammonium indiquent l'état de pollution des eaux causée par des eaux usées communales ou par érosion et lessivage de terres agricoles.

Ammoniac/ammonium
($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$)

L'ammonium n'est pas très stable. En particulier avec de faibles teneurs dans les échantillons mis en bouteille pour analyse au laboratoire, il faut s'attendre à une décomposition biologique considérable par nitrification au cours du transport. Il convient donc de refroidir les échantillons (<math><4^{\circ}\text{C}</math>) dès le prélèvement et durant leur transport au laboratoire.

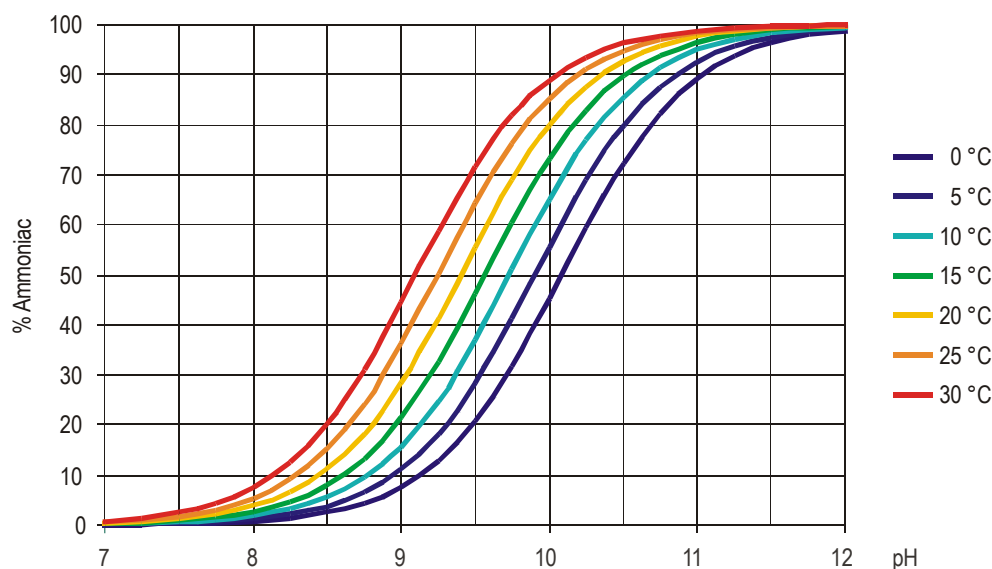
Les analyses de routine pour la détermination quantitative de l'ammonium et le calcul de l'ammoniac devraient se réaliser avec des pH supérieurs à 9 ou des températures supérieures à 10°C: ces conditions déplacent la situation d'équilibre entre ces deux substances en faveur de l'ammoniac toxique pour les poissons^{13,14}. Il suffit que ces deux conditions soient remplies pour que la proportion d'ammoniac dépasse 15% (voir Fig. 1). La méthode de calcul à utiliser pour obtenir un indice compte tenu d'objectifs variables est décrite dans l'annexe A3, *Objectifs de qualité indexés sur d'autres paramètres*.

Ammoniac: toxique pour les poissons

Des petits cours d'eau très pollués peuvent parfois présenter des concentrations inadmissibles d'ammonium ou d'ammoniac. Ce phénomène menace en particulier les tronçons où l'eau coule lentement, dont les rives n'offrent aucune protection contre le soleil, et caractérisés par une abondante production primaire (tapis d'algues, peuplement dense de macrophytes). Une forte activité de photosynthèse impliquant l'absorption accrue de gaz carbonique et carbonates augmente la concentration d'hydroxydes (OH⁻) et peut conduire localement à des valeurs de pH supérieures à 9.

Photosynthèse et concentrations d'ammoniac

Fig. 1 > Proportions d'ammoniac/ammonium en fonction du pH; à diverses températures



Les exigences fixées par l'OEaux tiennent compte de la température. Si celle-ci n'est pas connue, il faut se référer à la plus sévère des deux valeurs.

Étant donné les fortes variations enregistrées pour ce paramètre, la limite entre les classes *très bon* et *bon* est ramenée à respectivement 0,04 et 0,08 mg/L N en dérogation au principe d'une répartition régulière.

¹³ $NH_3[\%] = 100 / (10^{pKa - pH} + 1)$ où $pKa = 0.09018 + 2729.92 / T[K]$ (EMERSON et al., 1975)

¹⁴ Des concentrations d'ammoniac durablement égales ou supérieures à 0,008 mg/L N peuvent s'avérer toxiques pour les œufs et les alevins de poissons nobles; il faut considérer 0,02 mg/L N comme un plafond absolu.

Le carbone organique dissous (COD) peut constituer un indicateur de pollution anthropique du cours d'eau examiné. Il est rare d'observer une corrélation entre ce paramètre et les conditions de température et de débit. On se souviendra que la valeur mesurée se compose d'une partie inhérente à la situation naturelle et d'une partie imputable aux activités humaines. Les cours d'eau des régions alpines comportent en général de faibles teneurs en COD (<1 mg/L C). Cette forme de carbone est présente dans un cours d'eau à l'état naturel, par décomposition de matière organique et par lessivage des sols du bassin versant. On en constate de fortes concentrations dans les émissaires de lacs eutrophes ou de marais. La décomposition des feuilles tombées dans l'eau en automne peut aussi accroître momentanément le taux de COD, dont des teneurs élevées peuvent ainsi avoir des causes purement naturelles. L'ordonnance sur la protection des eaux tente d'en tenir compte en prévoyant une plage d'exigences allant de 1 à 4 mg/L C. Mais il peut y avoir des taux nettement plus élevés de COD difficilement dégradables d'origine naturelle sans effets nuisibles sur l'état du cours d'eau. Il y a souvent corrélation entre la composition de la biocénose et la fraction de COD facilement dégradable (en général d'origine anthropique) – dont il suffit de 1,0 mg/L C pour provoquer par exemple une prolifération de *Sphaerotilus*. C'est donc la fraction anthropique dégradable – souvent minime en valeur absolue – qui constitue le critère décisif pour une appréciation qualitative. Si la part naturelle est considérable ou plus ou moins inconnue, cela complique l'attribution à une classe d'évaluation déterminée.

Carbone organique dissous (COD)

Le carbone organique total (COT) comprend, en plus du COD, une fraction organique particulaire qui provient notamment des déversoirs de STEP au moment d'épisodes orageux, du ruissellement d'engrais organiques ou de l'érosion du sol. Dans les périodes de crue, des organismes aquatiques ayant proliféré sur place sont emportés et contribuent à accroître la charge de COT. Pour les calculs de charges il convient donc de prendre en compte les concentrations mesurées en situation de débits élevés. Les exigences relatives au COT doivent faire l'objet d'une formulation aussi souple que pour le COD. Pas d'exigence dans l'OEaux; objectif de qualité proposé: 3 à 5 mg/L C. Les difficultés et restrictions évoquées à propos du COD sont à plus forte raison valables pour le COT.

Carbone organique total (COT)

La demande biochimique en oxygène indique la consommation d'oxygène par des processus de dégradation biologiques au cours d'une période déterminée, par exemple en l'espace de cinq jours (DBO_5). Les substances consommant de l'oxygène sont notamment: carbone organique, ammoniac, nitrites, acide sulfhydrique et d'autres composés réduits – en majeure partie des substances facilement dégradables.

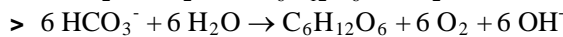
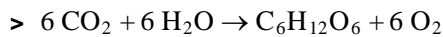
Demande biochimique en oxygène (DBO_5)

Les processus d'oxydation dépendent fortement des caractéristiques morphologiques et hydrologiques du cours d'eau, ainsi que de sa température. Les eaux sensibles sont celles qui s'écoulent lentement ou atteignent une certaine profondeur (retenues). Lorsque de la matière organique sédimente, la consommation d'oxygène sur le fond et à proximité de celui-ci peut aller jusqu'à instaurer des conditions anaérobies; il en résultera la formation de substances réduites – nitrites ou même ammonium, méthane et acide sulfhydrique. (Exigence selon OEaux: 2 à 4 mg/L O_2).

Lorsque les eaux sont froides, la décomposition de substances naturelles (entraînement d'organismes aquatiques ou apport de feuilles mortes) peut s'en trouver également ralentie.

Le pH d'un cours d'eau est déterminé principalement par les équilibres calco-carboniques et par les conditions géochimiques du bassin versant. Les zones très calcaires se caractérisent par une capacité tampon de l'eau élevée et un pH d'environ 8,3. D'autres facteurs agissant sur le pH sont la température et des processus biologiques tels que la photosynthèse ou la décomposition de matériel organique. Une température croissante diminue la solubilité du CO₂ et fait baisser la valeur du pH. La photosynthèse prend à l'eau du CO₂ et du HCO₃⁻, ce qui accroît le pH.

pH



La décomposition aérobie de matière organique libère du CO₂ et provoque ainsi une baisse du pH. Celui-ci varie également selon l'origine de l'eau examinée: des eaux souterraines, par exemple, contiennent en général davantage de CO₂ dissous que les eaux superficielles, et sont de ce fait plus acides.

La courbe de variation annuelle du pH (moyennes journalières) dans un cours d'eau présente une allure sinusoïdale qui est due aux corrélations entre pH, température et processus biologiques à caractère saisonnier. On observe aussi une courbe journalière du pH. Ces variations sont particulièrement marquées en aval de lacs eutrophes, car les processus biologiques qui s'y déroulent (photosynthèse, respiration) renforcent ceux constatés dans les cours d'eau.

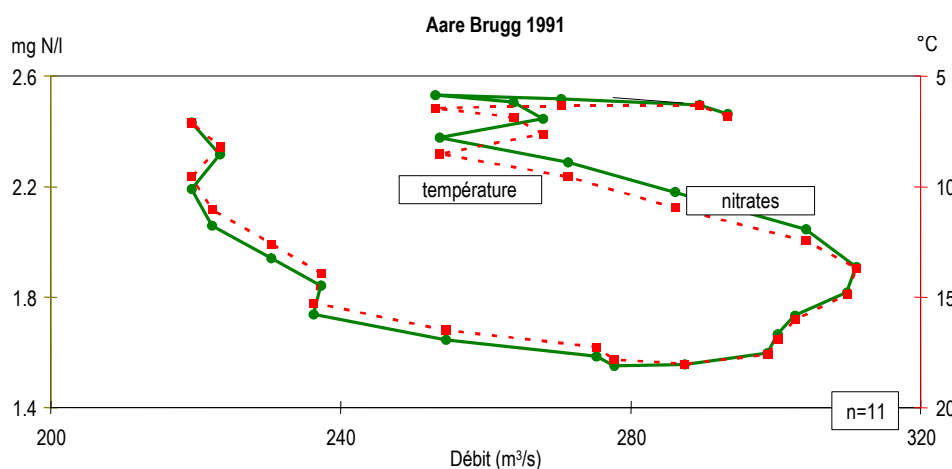
Les déversements d'eaux usées provoquent également une baisse de pH lorsque la matière organique apportée par ces eaux favorise l'activité microbienne et accroît la production de CO₂. Et les apports d'acides d'origine industrielle ou artisanale font aussi baisser le pH des cours d'eau récepteurs. La déphosphatation au chlorure ferrique (FeCl₃) et la nitrification de l'ammonium agissent dans le même sens. Des eaux usées déversées à intervalles réguliers peuvent agir sur les courbes annuelle et journalière du pH à tel point que leur allure sinusoïdale s'en trouve affaiblie ou complètement effacée.

Comme la dureté de l'eau est suffisamment élevée au nord des Alpes, les déversements d'eaux usées n'y ont normalement pas d'effets préjudiciables sur le pH. Des valeurs inférieures à 5 favorisent la désagrégation des minéraux argileux par exemple, et peuvent entraîner ainsi des concentrations excessives en substances toxiques contenant de l'aluminium. Des valeurs supérieures à 9 favorisent la dissociation d'ammonium, donc la formation d'ammoniac. Il faudrait donc que le pH se maintienne dans une fourchette de 6,5 à 8,5. Sa valeur peut devenir critique en cas de production végétale excessive, notamment sur les tronçons à écoulement lent dont les rives n'offrent pas d'ombrage. Le pH est une valeur logarithmique; il ne peut donc pas être évalué et classé selon la méthode décrite à la section 3.3.3. L'OEaux (annexe 2, ch. 11, al. 2d) traite la question du pH sous une forme descriptive.

La température est un paramètre physique clé, en ce sens qu'elle agit de manière déterminante sur les processus chimiques et, plus encore, biologiques au sein des cours d'eau. On le constate par exemple pour les nitrates, dont la teneur est fortement influencée par l'activité biologique des sols (dénitrification) (Fig. 2).

Température (T)

Fig. 2 > Température, nitrates et débit

Données: NADUF, www.naduf.ch

Le régime thermique annuel (températures journalières moyennes) d'un cours d'eau présente une allure sinusoïdale asymétrique, décalée de quelques semaines par rapport à la courbe des températures moyennes de l'air. Celle de l'eau augmente en règle générale plus lentement au cours de l'année qu'elle ne baisse. De gros apports d'eaux souterraines peuvent retarder et déformer cette courbe. On voit se superposer à la courbe annuelle une variation thermique journalière, laquelle dépend de la distance parcourue depuis la source. À proximité de celle-ci, les variations sont faibles et parallèles aux changements de température du milieu ambiant; les fluctuations temporelles atteignent un maximum dans le cours moyen et deviennent asymétriques. On enregistre le minimum journalier le matin entre 6 et 8 heures, et le maximum entre 15 et 18 heures. Les températures sont à nouveau plus régulières dans le cours inférieur. Il est recommandé, lors du prélèvement d'échantillons en continu sur 24 heures, de relever les températures minimales et maximales au moyen d'enregistreurs munis d'une sonde thermique, aujourd'hui peu coûteux. Les relevés limités à 12 échantillons par année servent essentiellement à évaluer les teneurs en ammonium; dans les cours d'eau comportant de fortes fluctuations journalières, ils ne fournissent pas une base de données statistiques suffisante pour en apprécier les effets écologiques.

Tout changement marqué dans le régime thermique d'un cours d'eau agit fortement sur la distribution des espèces vivantes. Il faut donc éviter que des interventions ne modifient sensiblement les écarts de température ou la répartition temporelle des minima et des maxima. L'OEaux proscriit les modifications artificielles de la température de l'eau supérieures à 3°C (1,5°C dans les zones à truites), ainsi que tout dépassement du plafond de 25°C. Ces exigences sont en général respectées. On a cependant constaté

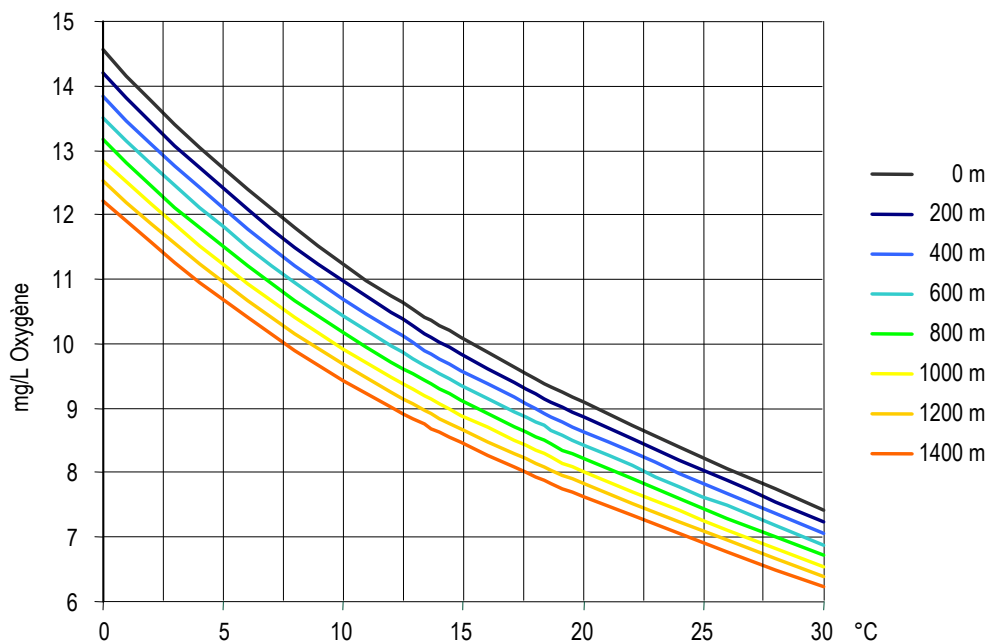
que la température moyenne des cours d'eau du Plateau suisse a augmenté au cours des 40 dernières années de 1 à 2,5°C – selon le taux de glaciation du bassin versant considéré. Une température moyenne de juillet excédant 22°C est déjà trop élevée pour des poissons nobles comme la truite ou l'ombre de rivière, qui évitent alors ces eaux. La limite supérieure est encore plus basse pour la survie des œufs de salmonidés, puisqu'elle se situe à 15°C. Les hécatombes enregistrées en août 2003 ont clairement démontré que les poissons sont tributaires d'une étroite fourchette de températures. Ce paramètre revêt ainsi une importance croissante dans l'appréciation d'un cours d'eau, alors qu'il dépend de nombreux facteurs. Le traiter en détail dépasserait le cadre du présent module; des discussions sont en cours pour savoir s'il devrait faire l'objet d'un module à part.

La méthode d'évaluation et de classement décrite au chapitre 3.3.3 est axée sur les paramètres chimiques. Quant aux paramètres physiques, ils sont également relevés en raison de leur importance pour la compréhension globale des processus au sein d'un cours d'eau et pour le classement des teneurs en ammonium; mais ils ne sont pas classés.

Les facteurs déterminants de la concentration d'oxygène dans un cours d'eau sont la solubilité de cet élément en fonction de la température, les échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère, ainsi que photosynthèse, respiration et minéralisation de substances organiques. La solubilité de l'oxygène diminue lorsque la température va en augmentant (voir Fig.1). Les échanges gazeux dépendent d'une part du taux de réoxygénation, lui-même fonction de la turbulence du cours d'eau. Par ailleurs, ces échanges sont d'autant plus marqués que la différence est grande entre concentration effective et saturation dans l'eau en question. Quant aux activités de photosynthèse, elles augmentent en fonction des apports de nutriments facilement dégradables déversés avec les eaux usées et le lessivage des sols agricoles exploités de façon intensive. Il en résulte un accroissement des processus de production primaire et de respiration, lesquels se traduisent par des variations journalières également accrues de la concentration en oxygène. Les phénomènes de minéralisation augmentent parallèlement aux apports de matières organiques.

Oxygène (O₂)

Fig.1 > Oxygène: concentration [mg/L O₂] de saturation (100%) en fonction de la température et de l'altitude.



Comme la solubilité de l'oxygène dépend de la température, la courbe annuelle des concentrations de cet élément dans l'eau revêt une allure sinusoïdale – avec des valeurs plus basses en été qu'en hiver. Les variations journalières qui s'y superposent sont très influencées par les processus biologiques, donc d'autant plus marquées que l'activité biologique est forte dans le cours d'eau considéré. En règle générale, c'est en fin de nuit que l'on observe la plus faible teneur de l'eau en oxygène. Dans les eaux fortement polluées, les variations journalières vont en diminuant vers l'aval en raison du phénomène d'autoépuration qui se déroule au fil de l'eau.

L'oxygène ne constitue généralement pas un problème dans les cours d'eau d'une certaine importance. C'est là un paramètre délicat à déterminer dans des échantillons isolés. Pour les échantillons collectés en continu, il convient d'installer une sonde à oxygène avec enregistreur de données afin de bien saisir la concentration minimum. L'OEaux (annexe 2, ch. 11, al. 2d) traite la question de l'oxygène sous une forme descriptive.

La conductivité électrique, indicateur de la teneur en sels dissous, est un paramètre facile à mesurer. Elle dépend essentiellement de la nature géochimique des roches rencontrées dans le bassin versant, en particulier des substances provenant de l'altération de ces roches. Elle est d'abord fonction de la dureté de l'eau (calcium, magnésium, bicarbonates). Quant aux facteurs d'origine anthropique agissant sur la conductivité électrique, il faut retenir en premier lieu les nutriments tels que nitrates, nitrites, ammonium et phosphates, ainsi que les sels issus d'échangeurs d'ions, de

Conductivité électrique (κ25)

l'entretien des routes en hiver et de précipitants dans les stations d'épuration (sodium, chlorures, etc.).

Comme le pH, la conductivité électrique varie en fonction de l'équilibre calco-carbonique; de sorte qu'elle dépend également de la température et des processus biologiques. C'est pourquoi la courbe annuelle de ce paramètre revêt aussi un caractère sinusoïdal, avec des valeurs estivales inférieures à celles de l'hiver en raison d'une plus faible solubilité ionique et d'une activité biologique plus intense. Cet effet se trouve renforcé dans les émissaires des lacs en raison de la production primaire lacustre et de la précipitation de calcite qui en résulte – d'où une amplitude encore accrue des variations journalières.

Les mesures peuvent s'effectuer au moyen d'appareils portables fonctionnant sur batteries et munis d'un dispositif de compensation de la température. De brusques sauts de conductivité observés le long d'un cours d'eau signalent souvent des pollutions ponctuelles ou des rejets; tandis que les variations transversales témoignent de panaches d'eaux usées ou d'un mélange peu homogène. La conductivité électrique n'est pas directement proportionnelle à la minéralisation du fait qu'elle dépend non seulement de la composition chimique, mais aussi de la mobilité des ions et du phénomène de complexation; elle ne peut donc pas faire l'objet d'un classement selon la méthode présentée au chapitre 3.3.2.

Les chlorures sont naturellement présents dans les eaux en faibles concentrations (2 à 4 mg/L Cl⁻). La part géogène des charges en chlorures est inférieure à 10% sur le Plateau suisse, le reste étant d'origine anthropique (p. ex. salage des routes, échange d'ions, engrais de ferme, précipitants de STEP, etc.). Il faut également prendre en compte les teneurs en chlorures lorsqu'on évalue la toxicité des nitrites à l'égard de la faune piscicole. À fortes concentrations (>200 mg/L Cl⁻), les chlorures sont toxiques pour les plantes, en particulier pour les algues. (Pas d'exigences OEaux, pas de proposition pour un objectif de qualité).

Chlorures (Cl)

Sur la liste des paramètres géochimiques figurent calcium, magnésium et carbonates (par altération de roches calcaires), silice (par altération de granite, de feldspaths et de minéraux argileux), sulfates (par altération de gypse), sodium et chlorures (par altération de sel gemme) et potassium (par altération de granite et de minéraux argileux). Dans les régions constituées de roches cristallines (silicates d'aluminium et autres silicates), la capacité tampon de l'eau qui s'écoule est souvent insuffisante en raison d'une faible dureté carbonatée. Plus particulièrement à la fonte des neiges, la masse de précipitations acides accumulées au cours de l'hiver vient gonfler les cours d'eau et abaisse leur pH. Les eaux usées d'origine industrielle, artisanale ou domestique peuvent apporter des surcroûts de substances déjà présentes dans les eaux naturelles, notamment sulfates, sodium et chlorures. Du potassium vient par ailleurs enrichir les cours d'eau de façon diffuse, par lessivage des engrais épandus sur les terres agricoles. Ces apports anthropiques de sodium, de chlorures et de potassium peuvent dépasser en volume ceux d'origine naturelle.

Paramètres géochimiques

Comme les paramètres géochimiques sont par définition liés à l'altération des roches, ils conviennent mal pour évaluer la pollution anthropique des eaux. L'influence des activités humaines n'apparaît en général qu'avec des analyses portant sur de très longues durées (p. ex. modification des phénomènes d'altération par des substances contenues dans l'atmosphère [pluies acides] ou par le réchauffement climatique). C'est pourquoi il n'est pas prévu de soumettre ces paramètres à un schéma d'appréciation selon la méthode décrite au chapitre 3.3.2.

Les paramètres géochimiques, comme ceux sur lesquels ils agissent, évoluent normalement selon un cycle annuel qui dépend en premier lieu de la température de l'eau et, dans une moindre mesure, du volume d'eau considéré. Comme leurs valeurs changent peu d'une année à l'autre, ils ne doivent pas être mesurés aussi souvent que les paramètres relevant essentiellement des activités humaines.

Les règles applicables à l'importation, à l'utilisation et au traitement du mercure et du cadmium font que ces métaux ne constituent plus guère un problème aujourd'hui dans les eaux de surface. Il en va de même pour le plomb, depuis son interdiction dans l'essence. Cuivre et zinc, lessivés sur les toits et dans les conduites de distribution d'eau potable, aboutissent par contre en quantités appréciables dans les eaux. D'autres sources possibles de pollution sont l'usure des pneus et des freins; et, pour le cuivre, les caténaires de chemins de fer et de transports publics urbains. Le cuivre sert aussi de fongicide en viticulture, en agriculture biologique et d'additif alimentaire pour les porcs à l'engrais.

Métaux lourds
(Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn)

Ce sont les composés à l'état libre – non liés sous forme de complexes – qui ont un impact écotoxicologique. Comme ils ne sont pas directement analysables, on se contente généralement de déterminer la fraction dissoute. Les métaux lourds se présentent sous forme dissoute ou adsorbés à la surface de particules, selon la concentration des matières en suspension dans l'eau et selon le pH de celle-ci. Ils sont d'autant plus solubles qu'il y a moins de matières en suspension et que l'acidité du milieu est plus forte. Les valeurs totales mesurées doivent ainsi être comprises comme un plafond pour les concentrations dissoutes, et appréciées en fonction de leur impact écologique.

Les concentrations de métaux lourds ne subissent guère d'effets saisonniers et dépendent des quantités d'eaux usées d'origine industrielle. Tout comme les matières en suspension, ces concentrations sont très nettement influencées par le débit du cours d'eau – notamment en cas de fortes pluies – en raison de l'affinité des métaux lourds pour les particules solides. L'OEaux définit des exigences applicables aux métaux suivants: Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg et Zn.

Pour se faire une idée de la répartition dans l'espace des charges polluantes, on analyse souvent la teneur en métaux lourds des sédiments. Ces études ont un caractère intégratif et donnent des résultats représentatifs pour de longues périodes.

Le chiffre 1 de l'annexe 1 de l'OEaux fixe des objectifs écologiques pour les eaux superficielles. Son alinéa 3 prescrit que les substances pouvant polluer les eaux et y aboutir par suite de l'activité humaine ne doivent pas avoir d'effet néfaste sur les biocénoses. Cette règle s'applique à l'impact que des substances organiques de synthèse pourraient avoir sur les écosystèmes aquatiques. Des méthodes sont en voie d'élaboration pour le suivi des pesticides et des traces de composés organiques; ces méthodes d'appréciation ad hoc feront l'objet d'un module à part.

**Pesticides,
composés traces organiques**

A2 Prélèvement d'échantillons

A2-1 Technique de prélèvement

La déclivité des cours d'eau se traduit par un renouvellement constant de l'eau présente en un lieu sur le fond et les bords. Si l'on effectue en un point fixe l'enregistrement en continu des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau, l'observation porte au cours du temps sur des eaux toujours nouvelles. Les valeurs mesurées se modifient par rapport à l'eau située plus loin en aval, du fait des changements plus ou moins rapides qui surviennent dans le bassin versant. Contrairement aux eaux dormantes, les cours d'eau s'avèrent très fluctuants en termes de régime thermique et des substances qu'ils contiennent. Les prélèvements d'échantillons d'eau courante doivent tenir compte de cette dynamique en fonction du paramètre à mesurer. L'expérience a montré que les ruisseaux à faible débit ou les cours d'eau dont le bassin versant ne comporte pas de lac présentent, pour la plupart des substances qu'ils contiennent, des concentrations plus variables que les rivières du Plateau.

Moment, fréquence et mode de prélèvement

La majeure partie des substances contenues dans les cours d'eau proviennent de l'altération des roches. La charge en substances de l'élément liquide est ici déterminée essentiellement par des processus géochimiques naturels. Elle varie en fonction des variations saisonnières de la provenance de l'eau (fonte des neiges, eau de pluie, émissaire de lac, résurgence d'eau souterraine, etc.).

Substances géogènes

Inondations et ruissellement de terres agricoles contribuent à la pollution par des nutriments (phosphore et carbone organique), en fonction de l'intensité des précipitations. Il peut suffire par exemple de quelques orages d'été pour apporter jusqu'à 50% de la charge annuelle en phosphore. Les concentrations et la répartition des substances contenues dans un cours d'eau dépendent aussi des contacts entre celui-ci et la végétation riveraine (p. ex. chute de feuilles). Les déversements d'eaux usées enrichissent également les cours d'eau en substances organiques, azotées et phosphorées. Ces eaux usées contiennent également des traces de substances toxiques – métaux lourds, produits biocides et organochlorés – ainsi que des composés organiques difficilement dégradables. On constate des variations journalières, hebdomadaires et saisonnières des eaux à évacuer dans les égouts. De fortes pluies peuvent faire fonctionner les déversoirs des égouts, lesquels rejettent ainsi directement dans le ruisseau ou la rivière des eaux usées avant épuration.

Nutriments d'origine agricole

Dans les eaux elles-mêmes se déroulent cependant des processus biochimiques et biologiques revêtant une grande importance pour les concentrations en nutriments ou en substances dégradables, et pour l'évolution de ces concentrations dans le temps. La production de matière végétale ne fait pas qu'enlever du gaz carbonique à l'eau et modifier la dureté carbonatée de celle-ci; cela absorbe des nutriments tels que le phosphore et l'azote, qui se trouvent ainsi soustraits à la phase aqueuse. Comme les processus biologiques dépendent fortement de la température et de la lumière ambiantes, on enregistre à cet égard de grandes différences selon l'heure ou la saison.

Transformations biologiques

Variations saisonnières et journalières du débit et de la température, modification de l'ensoleillement, pollution changeante par les activités humaines – tous ces facteurs contribuent à des fluctuations plus ou moins marquées des substances contenues dans les eaux. La concentration d'ammonium, par exemple, peut changer de plusieurs centaines de pour-cent au cours d'une seule et même journée.

C'est pourquoi le moment et la durée du prélèvement – échantillon ponctuel ou prélevé en continu – exercent une influence considérable sur les paramètres chimiques de l'eau examinée. Toute appréciation de ces paramètres doit en tenir compte. Il convient de toujours s'interroger sur l'exactitude des résultats obtenus, en particulier au moment d'établir des moyennes ou de calculer des quantiles. Sans connaître les fluctuations habituelles des teneurs pour les substances en question, il ne sera guère possible d'évaluer correctement si les exigences figurant à l'annexe 2 de l'OEaux sont satisfaites. La plupart des substances présentes en partie sous forme particulaire, notamment celles d'origine anthropique, font généralement l'objet d'une distribution log-normale.

Influence du mode de prélèvement

On respectera certaines exigences minimales quant au mode et à la fréquence des prélèvements, afin de pouvoir apprécier à bon escient les valeurs obtenues. La probabilité d'une erreur d'appréciation dépend entre autres du nombre de mesures effectuées et de la répartition temporelle des prélèvements. Les différentes solutions possibles sont examinées ci-après.

Un *échantillon ponctuel* est un «instantané» de la situation qui règne dans le cours d'eau à un moment donné (ou durant une période de durée négligeable). Les variations au cours du temps peuvent être rendues par une série d'échantillons ponctuels si les prélèvements se font à une cadence nettement supérieure aux changements du paramètre à mesurer. Il faut par exemple au moins six prélèvements pour saisir plus ou moins clairement le cycle journalier d'un cours d'eau. La «résolution temporelle» des résultats obtenus sera proportionnelle à la fréquence des prélèvements.

Echantillons ponctuels

On distingue ici quatre catégories d'échantillonnage, qui dépendront du type d'analyse (Tab.5):

- > échantillonnage ponctuel
- > échantillonnage ponctuel saisonnier (4 par année)
- > échantillonnage ponctuel périodique (entre hebdomadaire et plus que trimestriel)
- > échantillonnage ponctuel quasi-continu (p. ex. 12–24 par jour)

Contrairement aux échantillons ponctuels, les *échantillons prélevés en continu* procurent une moyenne de l'état chimique du cours d'eau pour une période déterminée (quelques heures ou plusieurs jours). L'intégration peut se faire en fonction du temps, du niveau ou du débit. La référence statistique proposée est également le 90^e centile, même si les pics de concentration et les variations journalières s'en trouvent plus ou moins atténués selon la période de prélèvement.

Echantillons prélevés en continu

Il n'y a pas de technique de prélèvement supérieure aux autres. Chacune a ses atouts et ses faiblesses. On choisira la méthode à utiliser pour une question spécifique en confrontant les besoins (quelle est l'information recherchée?) aux avantages et inconvénients des méthodes de prélèvement à disposition. Le tableau 5 présente une récapitulation de celles-ci, tandis que le tableau 6 indique à titre de recommandations les méthodes applicables à différents cas de figure.

Appréciation des différents modes de prélèvement

Tab.5 > Vue d'ensemble des divers modes de prélèvement d'échantillons (fréquences)

Type	Principe	Avantages	Inconvénients	Convient pour	Remarques
é.p. isolé	réaction à des événements	<ul style="list-style-type: none"> relevé instantané précis 		saisir une situation momentanée	
é.p. saisonnier	4 é.p. par année		régime annuel et événements de courte durée échappent à l'examen	effectuer une opération de dépistage (voir annexe A4)	<ul style="list-style-type: none"> à répéter tous les 5 à 10 ans des relevés plusieurs années de suite ne présentent pas d'intérêt
é.p. périodique	5 à 52 é.p. par année		les événements de courte durée échappent à l'examen	surveiller l'état chimique des cours d'eau selon les critères de l'OEaux	répartir les prélèvements sur tous les jours de la semaine ou fériés!
é.p. qualifié	é.p. composite de plusieurs heures	lissage des fluctuations de courte durée	relativement coûteux	déterminer des paramètres très variables	selon DIN 38402
é.p. quasi-continu	12-24 é.p. par jour	<ul style="list-style-type: none"> applicable à quasi n'importe quel paramètre mesure au besoin ultrasensible 	<ul style="list-style-type: none"> grand nombre d'échantillons en cas de longue série de mesures demande aussi un gros travail d'analyse 	<ul style="list-style-type: none"> étudier des événements avec fortes fluctuations et analyses complexes variations journalières stations de mesure importantes 	
é.c. journalier passif	échantillonneur à diaphragme, se remplit progressivement en fonction de la pression	<ul style="list-style-type: none"> dispositif de prélèvement bon marché pas besoin d'alimentation électrique 	<ul style="list-style-type: none"> boîtier synthétique (PVC) inadéquat pour l'analyse de traces et de composés organiques délicat à utiliser (exige beaucoup de soin et de compétence!) accumulation possible de particules 	<ul style="list-style-type: none"> examiner les apports de nutriments par des affluents (concentrations et charges) examiner les situations de crue 	<ul style="list-style-type: none"> échantillons de crue: les accompagner d'infos sur la météo et les précipitations évaluation des charges: courbe de tarage requise (>100 mesures)
é.c. journalier actif	somme de petits échantillons partiels durant 24h	<ul style="list-style-type: none"> corrélation temporelle définie et modulable de l'échantillon intégré effet préventif d'un prélèvement sans lacunes 	<ul style="list-style-type: none"> pas d'information sur le régime journalier infrastructure et installation complexes alimentation électrique nécessaire réipients ouverts, pollution atmosphérique possible altérations chimiques possibles dans les conduites d'amenée 	surveiller en permanence des sites importants d'un cours d'eau	
Mesure en ligne	enregistrement quasi-continu au moyen de sondes	<ul style="list-style-type: none"> haute résolution temporelle résultats disponibles sans attendre une analyse 	<ul style="list-style-type: none"> installation et entretien coûteux choix de paramètres limité sensibilité limitée alimentation électrique nécessaire 	surveiller des sites importants d'un cours d'eau en assurant une haute résolution temporelle	

é.p. = échantillon(nage) ponctuel, é.c. = échantillon(nage) par prélèvement en continu

Tab.6 > Domaines d'application des différentes techniques de prélèvement

Question à traiter	Technique de prélèvement	Remarques
Surveillance de l'état d'un cours d'eau en application de l'OEaux (contrôle permanent, niveau C)	é.p. périodique	<ul style="list-style-type: none"> • 12 é.p. par année • durant plusieurs années • bilans de charges difficiles à établir
Sondage régionale ou à caractère préalable, selon annexe 3	é.p. périodique	<ul style="list-style-type: none"> • à répéter tous les 5 à 10 ans • limiter les analyses aux cours d'eau (stations) dont le bassin versant laisse présager des problèmes (donc bien laisser de côté les cours d'eau dont l'état ne pose pas de problème)
Analyses d'affluents de lacs (bilans des nutriments, niveau T)	<ul style="list-style-type: none"> • é.c. journaliers passifs et échantillonnage d'épisodes de crue • é.c. journaliers passifs et échantillonnage d'épisodes de crue 	<ul style="list-style-type: none"> • requièrent aussi des informations sur le débit • résultats relativement incertains; ont valeur d'estimations
Examen de cas particuliers, présentant de fortes variations (p. ex. en relation avec des précipitations, niveau T)	é.p. quasi continu	<ul style="list-style-type: none"> • logistique sophistiquée (système d'alerte!) • demande un sérieux effort de planification
Surveillance permanente de stations importantes (au niveau T)	<ul style="list-style-type: none"> • mesure en ligne • e.c. journaliers actifs 	

A2-2 Concentrations et charges

Les analyses à faire doivent permettre de savoir si l'état des cours d'eau correspond aux objectifs et aux exigences de la loi sur la protection des eaux (et de l'ordonnance qui en découle). Cela se fait en déterminant les *concentrations* de substances contenues dans les eaux. Certaines questions spécifiques nécessitent le calcul des *charges* que représentent ces concentrations.

Une *concentration* se détermine habituellement sous forme de *quantité* (de substance contenue) *par unité de volume d'eau* (p. ex. [mg/L PO₄-P]) ou en tant que «quantité par quantité» (z.B. ppm: parties par million). Pour décrire l'état d'un cours d'eau, on se sert en général de moyennes représentatives et, le cas échéant, de valeurs extrêmes (minima, maxima).

L'effet biologique des substances dépend de leur concentration et de la durée de leur action. Ce qui compte, ce sont avant tout les substances dissoutes ou, pour certaines (métaux), uniquement les composants libres – donc non liés et non-complexés. Il apparaît ainsi que la concentration de substances est un bon critère de l'état chimique d'un cours d'eau.

La *charge* correspond à une *quantité* (de substance contenue) *par unité de temps* (p. ex. kg de PO₄-P/année). On y recourt pour établir des bilans. Questions typiques à cet égard:

- > Apports de nutriments depuis le bassin versant d'un lac; d'où proviennent quelles parties de ces substances?
- > Nutriments exportés par un cours d'eau.

- > Déversement dans un cours d'eau (milieu récepteur) de nutriments ou de substances toxiques provenant d'une STEP ou d'une autre source ponctuelle.

Il n'est pas possible de déterminer la charge en substances d'un cours d'eau dont on ne connaît pas le débit. Pour effectuer des calculs valables à cet égard sur de longues périodes, il faut disposer de séries complètes d'échantillons prélevés en continu avec les débits qui s'y rapportent. La prise d'échantillons proportionnels au débit constitue la meilleure solution: les charges en substances s'obtiennent en multipliant la concentration par le débit correspondant. Les prélèvements sur des périodes prolongées présentent cependant le risque de transformations biologiques et physico-chimiques dans la bouteille; même le refroidissement des échantillons n'empêche pas ces processus ou ne fait que les ralentir. Par ailleurs, la concentration des diverses substances est plus éloignée de l'équilibre biochimique dans le milieu naturel que dans les bouteilles d'échantillonnage, surtout en présence d'une phase solide et après un séjour prolongé dans le flacon. Ces observations s'appliquent plus particulièrement aux paramètres instables (ammonium, nitrites) ou sensibles aux phénomènes d'adsorption/désorption (phosphore et carbone organique).

Détermination de charges sur des échantillons prélevés en continu

Il n'est pas indispensable de mesurer le débit exactement à l'endroit du prélèvement, mais on devrait pouvoir déterminer ce paramètre essentiel au moyen d'instruments de jaugeage (en fonction du débit) ou d'autres appareils enregistreurs (p. ex. à ultrasons); à défaut, en recourant à des mesures de fortune ou à des modèles de calcul. Si l'on ne dispose que d'échantillons ponctuels ou s'il y a des lacunes dans les échantillons prélevés en continu, un calcul approximatif de la charge effective reste possible pour autant que le débit ait été mesuré en permanence. Les concentrations déterminées par analyse seront alors présentées en fonction des débits correspondants. Il peut aussi s'avérer judicieux d'exprimer les concentrations en fonction de deux variables, par exemple débit et température ou date du prélèvement. On prendra en compte des périodes assez longues – une année ou davantage. Ces fonctions permettront ainsi de calculer les concentrations ou les charges à partir du débit effectif. Comme les plus fortes concentrations se mesurent souvent lorsque le débit est élevé – surtout pour les substances transportées en partie sous forme particulaire – l'évaluation par calcul ne donnera des résultats probants que si l'on a suffisamment de données mesurées dans les périodes de crue. Mais même avec des conditions idéales, les erreurs restent considérables: celles-ci se chiffrent à 30% lorsqu'on détermine ainsi les charges annuelles de phosphore total dans les petits cours d'eau.

Détermination de charges par calcul à partir d'échantillons ponctuels

A2-3 Assurance qualité

Alors que la qualité des opérations de prélèvement est déterminante pour une appréciation ciblée de l'état chimique des cours d'eau, ce facteur reste souvent négligé. Les conséquences d'un prélèvement mal organisé ou peu soigné ne peuvent pas être corrigées en laboratoire, même avec des méthodes sophistiquées. Prélèvement et analyse réclament ainsi la même attention.

Le facteur prélèvement

Toute procédure d'échantillonnage vise à sélectionner un ensemble d'échantillons représentatif de la masse d'eau qui s'écoule à la hauteur de la station de mesure durant l'unité de temps considérée.

On peut combattre les sources d'erreurs en prenant les précautions suivantes:

- > Chaque opération, même la plus simple en apparence – comme la prise d'échantillons (remplissage du flacon) – doit être exécutée par un professionnel qualifié. L'idéal, c'est que le prélèvement soit confié au personnel qui fera ensuite l'analyse. Il faut au moins assurer une collaboration étroite et une bonne communication entre tous les intervenants.
- > En ce qui concerne l'assurance qualité, il convient de normaliser toutes les opérations sous forme de prescriptions de travail (voir <http://www.labeaux.ch/>).
- > Les récipients destinés à recevoir les échantillons sont fournis par le laboratoire (nettoyés et étiquetés).
- > Il incombe aux responsables du projet de contrôler la plausibilité des résultats obtenus. Pour en juger correctement, ils doivent disposer d'informations relatives aux conditions de prélèvement (p. ex. météo, niveau de l'eau, circonstances inhabituelles).
- > On évalue la qualité des analyses (le travail du laboratoire) par des analyses comparatives sur des échantillons réels prélevés dans des cours d'eau et des lacs (éventuellement eau potable).

Combattre les erreurs possibles lors du prélèvement, de la manipulation et de l'analyse des échantillons

A3 Opérations de conversion pour l'ammonium et les nitrites, représentation cartographique

A3-1 Objectifs de qualité indexés sur d'autres paramètres

Les exigences chiffrées – ou objectifs de qualité et limites de classes pour l'ammonium et les nitrites – dépendent des conditions ambiantes: température et pH de l'eau pour l'ammonium, teneur en chlorures pour les nitrites dans les eaux à salmonidés. Et comme pour les objectifs à atteindre, les limites des classes d'état dépendent de la température, du pH ou de la concentration de chlorures dans les eaux (tab. 3b, c).

Ammonium (T, pH),
nitrites (Cl)

Comment déterminer le quantile à retenir compte tenu de ces objectifs indexés? On n'y parviendrait pas en répartissant les valeurs obtenues en fonction de la température, du pH ou de la concentration en chlorures: il y aurait un trop petit nombre d'échantillons ponctuels attribuables à chaque groupe pour en évaluer utilement les quantiles. Et l'on ne saurait pas comment associer maxima et quantiles de chaque groupe dans un schéma de classement. Mais si l'on indexe les valeurs mesurées en fonction des objectifs de qualité correspondants, le calcul statistique pourra porter sur l'ensemble des échantillons prélevés.

Si la teneur en chlorures ne varie pas trop, on peut éventuellement simplifier l'appréciation des nitrites en utilisant la moyenne annuelle des concentrations en chlorures pour déterminer l'objectif correspondant. Dans le cas contraire, il faut examiner pour chaque mesure si l'objectif spécifique indexé est atteint.

Soit $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, une série de n mesures, et $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$, celle du paramètre mesuré parallèlement. Concernant l'ammonium il y a deux séquences Y_i pour température et pH de l'eau; dans le cas des nitrites il s'agit des teneurs en chlorures. Chaque mesure X_i donne lieu à un objectif indexé $O(Y_i)$ à tirer du tableau 1 ou 4. Les variables ainsi indexées en termes d'objectifs de qualité sont désignées par \tilde{X}_i :

$$\tilde{X}_i = X_i / O(Y_i) \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

Il résulte de cette normalisation qu'à chaque paramètre correspond un objectif de qualité égal à 1. Les exigences physico-chimiques applicables à un cours d'eau sont satisfaites dès le moment où le quantile correspondant à une série normalisée $\{\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n\}$ est inférieur à 1.

Dans le système modulaire gradué, O_{-2} , O_{-1} , O_0 , O_1 correspondent aux limites des classes définissant l'état «écologique» des cours d'eau:

$Z_{-2}(Y_i)$: limite entre mauvais et médiocre

$Z_{-1}(Y_i)$: limite entre médiocre et moyen

$Z_0(Y_i)$: limite entre moyen et bon

$Z_1(Y_i)$: limite entre bon et très bon

$O_0(Y_i)$ correspond alors à l'objectif de qualité ou à l'exigence $O(Y_i)$. Dans l'hypothèse d'une corrélation linéaire entre O_k et O , les limites des classes indexées

$$\bar{O}_k = O_k/O \quad (k = -2, -1, 0, 1)$$

pourraient s'appliquer à la série normalisée des O et servir ainsi à déterminer la classe d'état. Mais cette corrélation ne se vérifie pas toujours (notamment pour les nitrates, les nitrites ou l'ammonium). Pour classer correctement le cours d'eau considéré, il faut alors indexer chaque série de mesures pour chaque limite de classe et examiner son quantile par rapport à 1.

Comme la méthode décrite ci-dessus est compliquée et réalisable uniquement si l'on a également mesuré les paramètres supplémentaire qu'elle demande, il est possible d'y renoncer exceptionnellement. On se référera à une évaluation statistique des paramètres en question sur l'ensemble de la Suisse pour simplifier le calcul de la manière suivante: pour l'ammonium on adopte le critère le plus rigoureux (0,2 mg/L N), et pour les nitrites, la valeur moyenne (0,05 mg/L N).

A3-2 Représentations cartographiques

Afin de visualiser les résultats des études sur l'état des cours d'eau et les rendre aisément intelligibles pour les profanes, il convient d'en faire la synthèse sous forme de cartes en couleurs. Les catégories d'état *très bon*, *bon*, *moyen*, *médiocre* et *mauvais* seront symbolisées respectivement par les couleurs bleu, vert, jaune, orange et rouge.

Une appréciation globale des paramètres chimiques n'est possible qu'avec des résultats analogues pour les différentes substances. Dans le cas contraire il faut présenter chaque paramètre séparément. Il est délicat de vouloir pondérer les paramètres chimiques pour en tirer une valeur à caractère global, surtout lorsqu'on n'a pas de justification plausible à faire valoir. Une présentation aussi simplifiée requiert donc l'application du principe de sévérité (*worst case*): c'est le paramètre le plus mal classé qui définira la valeur globale.

Appréciation globale

Une présentation souvent utilisée en Europe consiste à dessiner des bandes de couleur le long du cours d'eau, ou à colorer celui-ci d'après son classement. Mais comme il n'est guère possible de prévoir une analyse chimique pour chaque tronçon de cours d'eau ayant fait l'objet de relevés écomorphologiques, on ne sait pas très bien à quels endroits délimiter les traits de couleur dans le sens de la longueur. Seule une connaissance approfondie des conditions ambiantes – par exemple points de rejet d'eaux usées épurées ou non, points de confluence avec des cours d'eau latéraux plus fortement pollués, émergences d'eaux souterraines, etc. – permettra d'aboutir à une présentation convenable.

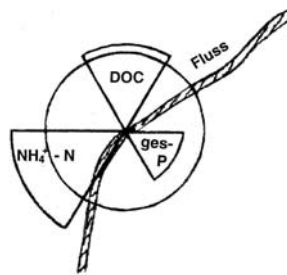
On peut surmonter ces problèmes par une présentation en forme de secteurs circulaires centrés sur les stations de mesure, et dont la surface est proportionnelle à l'indice statistique du paramètre considéré.

Présentation sous forme de secteurs circulaires

Le repère utilisé pour l'appréciation est un cercle unitaire dont la surface correspond à la concentration adoptée comme objectif de qualité.

Les rayons des secteurs se calculent selon la formule suivante:

$$R = a * \sqrt{\frac{\text{indice}}{\text{objectif de qualité}}}$$



R = rayon du secteur; a = facteur arbitraire définissant le rayon du cercle unitaire en cm

Un autre mode de présentation approprié est le diagramme en barres, qui donne en plus une idée de l'évolution chronologique. On dessine pour chaque station de mesure et chaque paramètre une barre constituée de rectangles successifs. Chaque rectangle correspond à la même unité de temps (trimestre, année, plus d'une année); sa couleur – bleu, vert, jaune, orange ou rouge – correspond à l'appréciation qui est faite pour la période considérée, soit de *très bon* à *mauvais*.

Diagramme en barres

On peut représenter simultanément plusieurs paramètres en empilant les barres correspondantes.

Tab.7 > Diagramme en barres

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Ammonium	rouge	rouge	rouge	orange	jaune	jaune	vert
Nitrites	orange	rouge	jaune	jaune	vert	vert	vert
Ortho-P	vert	vert	vert	bleu	bleu	bleu	bleu
COD	rouge	rouge	orange	orange	jaune	jaune	vert

Il est aussi possible de rapetisser ces diagrammes de manière à visualiser une évolution chronologique. Mais il faudra alors renoncer à présenter plusieurs paramètres sur une même carte.

A4 Sondages avec 4 à 5 mesures par année

A4-1 Généralités

Le sondage, décrit ci-dessous peut s'appliquer aux petits cours d'eau dont l'état n'a jamais ou guère été étudié jusqu'ici. Elle ne devrait pas être utilisée pour des tronçons qui font déjà l'objet d'analyses régulières, car elle ne saurait remplacer les programmes de routine présentés au chapitre 3. Cette méthode succincte ne convient pas non plus pour les stations de mesure définies dans le cadre du projet «observation coordonnée des eaux de surface» (voir chap. 3.4).

Pour les petits cours d'eau dont l'état n'a pas encore été examiné

Il faut effectuer au moins quatre mesures par an, avec des analyses bien réparties sur toute l'année. Comme un dépouillement statistique n'aurait guère de sens avec aussi peu de données, l'appréciation se basera uniquement sur la plus haute des valeurs enregistrées.

Au minimum 4 mesures par an

A4-2 Paramètres physico-chimiques

Le choix se limite aux principaux paramètres servant d'indicateurs de pollutions anthropiques et pouvant être relevés à peu de frais.

Partie des paramètres énumérés au chapitre 3.2

Les **orthophosphates** sont des composés phosphorés directement assimilables par les plantes. Leur présence dans les cours d'eau a diverses origines: rejets de STEP, déversoirs d'orage des égouts, ruissellement et lessivage de terres agricoles ou décomposition biochimique de matières organiques.

Orthophosphates

Des concentrations élevées en **nitrate** (>1,0 mg/L N) témoignent d'une exploitation agricole intensive des terres avoisinantes, d'un épandage d'engrais inadéquat ou d'une proportion élevée d'eaux usées. Les exigences de l'OEaux (annexe 2, ch. 12) se basent sur les critères à respecter pour l'eau potable. D'un point de vue purement écologique, il faudrait adopter un plafond plus sévère pour la teneur en nitrates si l'on veut respecter les critères figurant à l'annexe 1, chiffre 1, alinéa 3c de l'OEaux.

Nitrates

Les **nitrites** sont des produits intermédiaires de la nitrification, c'est-à-dire de la transformation oxydative par voie biologique de l'ammonium en nitrate. Dans les retenues pauvres en oxygène, il peut aussi y avoir des nitrites résultant d'une dénitrification (transformation de nitrates en protoxyde d'azote ou en azote élémentaire) incomplète.

Nitrites

Une réaction de protolyse sur l'**ammonium** peut produire de l'ammoniac toxique pour les poissons. La concentration d'ammoniac dans l'eau est fonction de la teneur de celle-ci en ammonium, de la température et du pH. Il convient donc de mesurer le pH

Ammonium

en plus de la température dans les émissaires d'eaux dormantes à forte bioproduction et en cas de prolifération végétale dans des zones ensoleillées¹⁵.

Température, pH

Il y a souvent une corrélation entre la biocénose d'un cours d'eau et la concentration dans celui-ci de **carbone organique dissous** (COD). Il faut se souvenir qu'une partie du COD est d'origine naturelle, l'autre partie étant imputable aux activités humaines.

COD

La liste des *paramètres de base* comprendra ainsi:

- > orthophosphates (et/ou P total non filtré)
- > nitrates
- > nitrites
- > ammonium
- > COD (carbone organique dissous)
- > pH
- > température
- > débit (éventuellement estimation)

Paramètres complémentaires possibles (selon le sujet et les facteurs ambiants; voir annexe A1 *Remarques relatives aux différents paramètres*):

- > oxygène
- > conductivité électrique
- > chlorures

Ces sondages à caractère très succinct ne s'occupent pas de la question des charges polluantes, impossibles à évaluer sur la base de quelques échantillons. Il vaut par contre la peine de relever la caractéristique essentielle que constitue le débit du cours d'eau – même sous la forme d'une estimation approximative – car 500 l/s ou 5 m³/s n'ont pas le même poids dans une appréciation globale.

La question des charges polluantes n'est pas examinée

Alors qu'on dispose de laboratoires bien équipés et de systèmes d'analyse automatisés, ce qui revient cher est moins le nombre de paramètres à mesurer que le temps à consacrer aux opérations de prélèvement. On peut étendre la liste des paramètres à prendre en considération (voir chapitre 3) si cela étoffe utilement une appréciation générale; dans cette optique, il faut garder à l'esprit la limite entre les états écologique *bon* et *moyen* telle qu'elle a été fixée selon les exigences de l'OEaux ou selon les objectifs de qualité décrits au chapitre 3.

¹⁵ Des concentrations d'ammoniac durablement égales ou supérieures à 0,008 mg/L N peuvent s'avérer toxiques pour les œufs et les alevins de poissons nobles; il faut considérer 0,02 mg/L N comme un plafond absolu (voir annexe 1 sous ammonium/ammoniac).

A4-3 Dépouillement et appréciation

On se réfère aux valeurs mesurées pour attribuer au cours d'eau sa place dans l'une des cinq classes de qualité ou d'état suivantes:

très bon / bon / moyen / médiocre / mauvais

L'appréciation se fait uniquement d'après la valeur maximum, et non selon le 90^e centile. De même, le classement s'effectue en fonction des critères récapitulés dans le tableau 3 (chap. 3). En cas de résultat moyen à mauvais, on fera une nouvelle appréciation sur la base des analyses complémentaires décrites au chapitre 3 avant d'envisager les mesures à prendre en application de l'article 47 OEaux.

Cinq classes d'état

Ce sondage ne permet pas une appréciation définitive

> Index

Figures

Fig. 1 Proportions d'ammoniac/ammonium en fonction du pH; à diverses températures	23
Fig. 2 Température, nitrates et débit	26
Fig.1 Oxygène: concentration [mg/L O ₂] de saturation (100%) en fonction de la température et de l'altitude.	28

Tableaux

Tab.1 Objectifs chiffrés supplémentaires	16
Tab.2 Appréciation des valeurs mesurées, répartition en classes d'état chimique	18
Tab.3a Classement de l'état chimique	18
Tab.3b Classement de l'état chimique	18
Tab.3c Classement de l'état chimique	19
Tab.3d Classement de l'état chimique	19
Tab.4 Objectifs concernant les nitrites dans les eaux à salmonidés	22
Tab.5 Vue d'ensemble des divers modes de prélèvement d'échantillons (fréquences)	34
Tab.6 Domaines d'application des différentes techniques de prélèvement	35
Tab.7 Diagramme en barres	40

Bibliographie

Emerson K., Russo R.C., Thurston R.E., Lund R.V. 1975: Aqueous ammonia equilibrium calculations: Effect of pH and temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 32: 2379–2383.

Bührer H., Wagner H. 1979: Die Berechnung der totalen Menge gelöster Stoffe in Seen. *Schweiz. Z. Hydrol.* 41: 418–420.

Département fédéral de l'intérieur 1982: Recommandations concernant l'analyse des eaux superficielles en Suisse.

Keleher C.J., Rahel F.J. 1996: Thermal Limits to Salmonid Distribution in the Rocky Mountain Region and Potential Habitat Loss due to Global Warming. *Trans. Am. Fish. Soc.* 125: 1–13.

Karr J.R., Chu E.W. 1999: *Restoring Life in Running Waters: Better Biological Monitoring*, Island Press, Washington D.C. and Covelo California; ISBN 1-55963-674-2.

Parlement européen et Conseil: Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Moosmann L., et al, (2005), Trend-oriented sampling strategy and estimation of soluble reactive phosphorus loads in streams, *Water Resour. Res.* 41, W01020.

www.naduf.ch