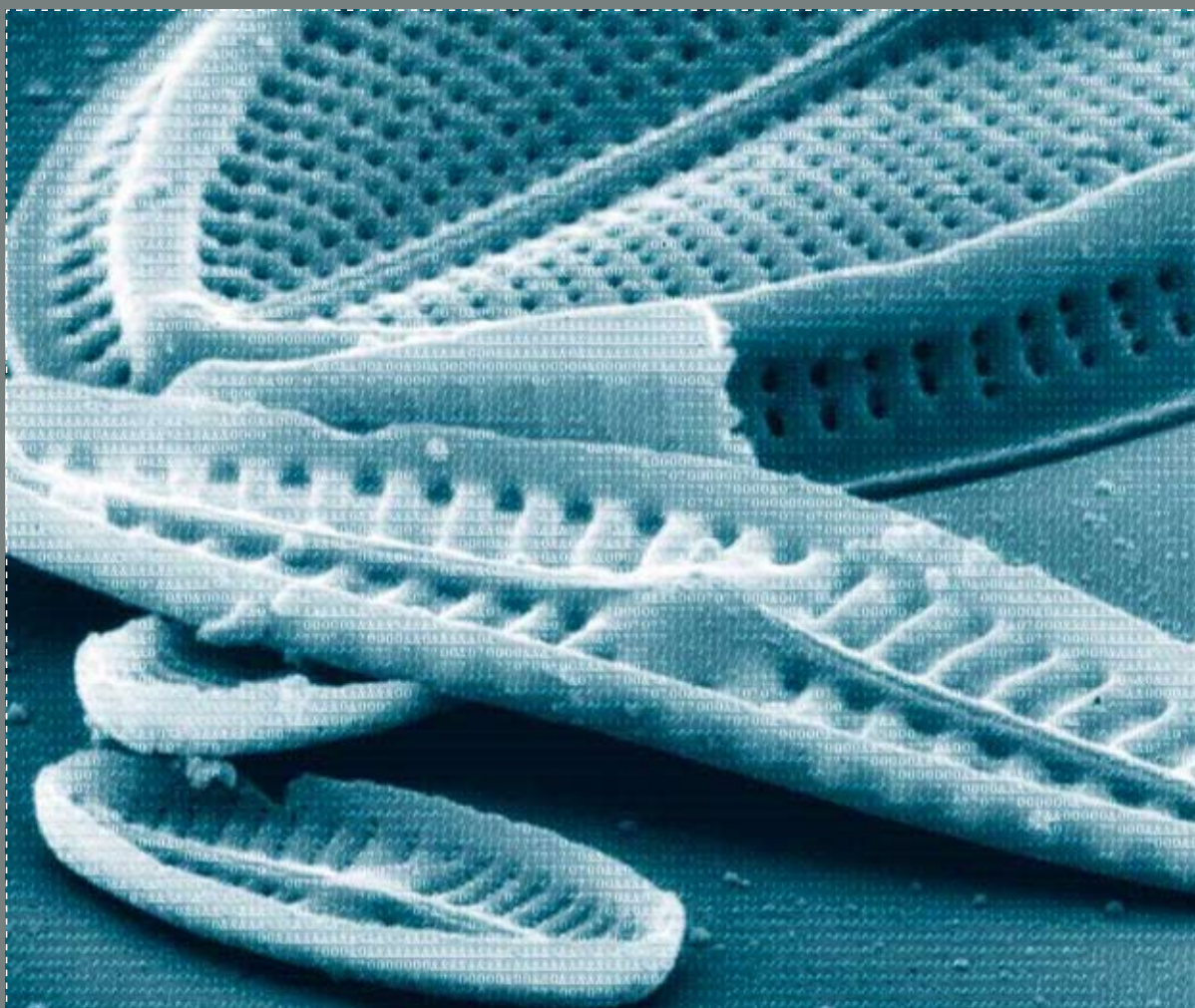


40
—
07

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

Diatomées Niveau R (région)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

40
—
07

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

Diatomées Niveau R (région)

Valeur juridique de cette publication

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

Éditeur

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).

Auteurs

Joachim Hürlimann, AquaPlus, écologie appliquée, problèmes d'hydrologie et de pêche, gestion des paysages et de la protection de l'environnement, Zoug

Pius Niederhauser, AWEL, Office des déchets, des eaux, de l'énergie et de l'air du canton de Zurich

Groupe de travail d'accompagnement

Paul Liechti (présidence), Office fédéral de l'environnement
Werner Göggel, Eawag : L'Institut de Recherche de l'Eau du Domaine des EPF

Angela von Känel, Office de la protection des eaux et de la gestion des déchets du canton de Berne

Arno Stöckli, Département des constructions, des transports et de l'environnement du canton d'Argovie, Service de l'environnement

Référence bibliographique

Hürlimann J., Niederhauser P. 2007: Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Diatomées Niveau R (région). État de l'environnement n° 0740. Office fédéral de l'environnement, Berne. 132 p.

Traduction

François Straub, La Chaux-de-Fonds

Photo de couverture

Valves préparées, vue latérale (MEB).

Téléchargement du fichier PDF

www.environnement-suisse.ch/uv-0740-f

(il n'existe pas de version imprimée)

Référence: UV-0740-F

Cette publication existe aussi en allemand (UV-0740-D).

> Table des matières

Abstracts	5
Avant-propos	7

1	Introduction	8
----------	---------------------	----------

2	Objectif et bases légales	10
2.1	Objectif	10
2.2	Bases légales	10

Partie I	Guide méthodologique	11
-----------------	-----------------------------	-----------

3	Relevés	12
3.1	Relevés de terrain, échantillonnage	12
3.1.1	Choix des sites d'échantillonnage	12
3.1.2	Échantillonnage, choix du substrat, protocole, conservation	13
3.2	Travaux de laboratoire, techniques de préparation	16
3.3	Travaux de microscopie (détermination et dénombrement des espèces)	17
3.4	Interprétation	18
3.5	Remarques sur les principaux taxons de diatomées des cours d'eau suisses	21
3.6	Difficultés, limites d'application	25

Partie II	Fondements et relations avec d'autres méthodes d'évaluation	27
------------------	--	-----------

4	Les diatomées comme bioindicateurs	28
4.1	Les diatomées en tant qu'organismes	30
4.2	Types de procédures d'examen des pollutions des eaux	32

5	Caractérisation des bases de données biologiques et chimiques utilisées pour le développement de la méthode	34
5.1	Base de données sur les diatomées	34
5.2	Base de données physico-chimiques	36

6	Fondements de l'indice des diatomées	38
6.1	Appréciation des sites d'étude à l'aide des paramètres chimiques	38
6.2	Indice des diatomées DI-CH	44
6.3	Classes d'état de santé et relation avec la qualité de l'eau	49

7	Valorisation des résultats obtenus jusqu'à présent et exemples d'application	50
7.1	Comparaison entre l'ancien et le nouvel indice des diatomées DI-CH	50
7.2	Représentations géographiques	51
7.3	Survol des variations de charge produites par les STEP	52
7.4	Variations de charge le long d'un cours d'eau et au fil du temps, suite à la suppression d'une station d'épuration.	53
7.5	Comparaison entre des relevés printaniers et automnaux	54
7.6	Tour d'horizon sur la flore, la diversité et l'indice DI-CH	55

Bibliographie	57
----------------------	-----------

Annexe (voir pdf à part: www.bafu.admin.ch/uv-0740-f)

> Abstracts

This method for assessing the status of rivers and streams using diatoms forms part of the Modular Stepwise Procedure published by the FOEN (Federal Office for the Environment). This guide for Level 1 (regional survey) describes a standardised procedure for the assessment of watercourses using the frequencies and distribution of diatom species. The methodological procedure for field, laboratory and evaluation work is described in detail. The goal of diatom assessment is to characterise the biological status of watercourses in Switzerland using the new Swiss Diatom Index (DI-CH). Status descriptions have a known relationship with chemical parameters which indicate anthropogenic pollution and are therefore an important aspect with regard to assessment of the ecological objectives according to the Water Protection Ordinance dated 28 October 1998 ('GSchV', Appendix 1, Art. 1, para. 1).

Keywords:

Modular Stepwise Procedure,
Watercourses, Diatoms,
Bioindication, Water body status,
Evaluation

Die Methode zur Untersuchung von Kieselalgen (Diatomeen) ist Teil des vom BAFU veröffentlichten Modul-Stufen-Konzeptes. Die vorliegende Anleitung für die Stufe F (flächendeckend) beschreibt ein harmonisiertes Vorgehen bei der Beurteilung der Fliessgewässer anhand der Häufigkeiten und Verteilung der Kieselalgenarten. Das methodische Vorgehen bei den Feld-, Labor- und Auswertarbeiten wird detailliert beschrieben. Ziel der Kieselalgenuntersuchung ist es, den biologischen Zustand der Fliessgewässer der Schweiz anhand des neu entwickelten Kieselalgenindex DI-CH (Diatomeen Index Schweiz) zu charakterisieren. Die Zustandsbeschreibungen haben einen bekannten Bezug zu chemischen Parametern, die anthropogene Stoffbelastungen anzeigen, und sind somit ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Überprüfung der ökologischen Zielsetzung gemäss der Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (Anhang 1 Art. 1 Abs. 1 GSchV).

Stichwörter:

Fliessgewässer, Kieselalgen,
Bioindikation, Bewertung,
Gewässerzustand

Le guide des méthodes d'étude des diatomées fait partie du système modulaire gradué publié par l'OFEV. Ce guide propose une démarche intégrée qui permet d'apprécier l'état des rivières au niveau R (région) à l'aide de l'abondance et de la répartition des diatomées. Les méthodes de prélèvement, de préparation, puis d'analyse en laboratoire et de valorisation des résultats sont décrites en détail. Le but de l'étude des diatomées est de caractériser l'état biologique des rivières à l'aide de l'indice DI-CH (diatomées indice suisse) récemment développé. Les évaluations de qualité des eaux sont en relation étroite avec des paramètres chimiques, qui traduisent des pollutions d'origine anthropique. Ces appréciations représentent donc un critère important de vérification des objectifs écologiques définis par l'ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (annexe 1, art. 1, al. 1, OEaux).

Mots-clés :

Système modulaire gradué,
Cours d'eau, Diatomées,
Bioindication, État des cours
d'eau, Évaluation

Le istruzioni metodologiche per l'analisi delle diatomee fanno parte del sistema basato su moduli e livelli pubblicato dall'UFAM. Le presenti istruzioni per il livello R (regione) descrivono una procedura armonizzata di valutazione dei corsi d'acqua sulla base della consistenza e distribuzione delle diatomee. Inoltre illustrano in maniera dettagliata la procedura metodica adottata per le indagini sul campo, le analisi in laboratorio e le valutazioni. L'indagine concernente le diatomee ha l'obiettivo di caratterizzare, sulla base dell'indice delle diatomee DI-CH (indice diatomico svizzero), recentemente adottato, lo stato biologico dei corsi d'acqua svizzeri. Le descrizioni dello stato delle diatomee si basano su parametri chimici per il rilevamento di inquinanti antropogenici e costituiscono pertanto un aspetto importante in vista dell'esame degli obiettivi ecologici previsti dall'ordinanza del 28 ottobre 1998 sulla protezione delle acque (allegato 1 art. 1 cpv. 1 OPAC).

Parole chiave:

Sistema basato su moduli e livelli, Corsi d'acqua, Diatomee, Bioindicazione, Stato delle acque, Valutazione

> Avant-propos

La loi sur la protection des eaux (LEaux, RS 814.20) du 24 janvier 1991 et l'ordonnance révisée sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (OEaux, RS 814.201) ont pour but la protection globale des eaux et de leurs diverses fonctions en tant que biotopes de plantes et d'animaux ainsi que leur utilisation durable par l'homme. Le système modulaire gradué souhaite mettre en œuvre cette tâche aussi dans le domaine de la surveillance des eaux en élaborant des méthodes adaptées (modules) pour les différents aspects des cours d'eau.

Lors de l'appréciation de l'état des cours d'eau dans le cadre de son application, l'examen des biocénoses est d'une importance essentielle en complément de l'évaluation de la qualité chimique de l'eau et des conditions morphologiques et hydrologiques. Seul le relevé de l'état biologique permet finalement une comparaison directe avec les objectifs écologiques relatifs aux eaux. Les diatomées se prêtent particulièrement bien à l'indication de l'état des eaux car leur répartition et leur fréquence dépendent des substances contenues dans les eaux pendant une assez longue période. Le module diatomées est donc un complément idéal aux analyses chimiques des eaux.

En Europe, l'appréciation de l'état des rivières et des ruisseaux à l'aide des diatomées repose sur une tradition de plusieurs décennies. En raison des succès de l'épuration des eaux usées et de la dilution généralement bonne des substances d'origine anthropique, une appréciation des cours d'eau suisses au moyen des systèmes de relevé développés ailleurs en Europe est cependant trop peu indicatrice, car la distinction entre différentes classes d'état est difficile. C'est pourquoi, dans le cadre du système modulaire gradué destiné à analyser et à apprécier les cours d'eau suisses, un groupe d'experts de l'OFEV, de l'Eawag et des services cantonaux a chargé un bureau privé de développer une méthode d'appréciation pour l'analyse des diatomées qui soit adaptée aux conditions des cours d'eau suisses. Ce travail n'a pu être réalisé que grâce à l'intense soutien de l'AWEL (Office des déchets, des eaux, de l'énergie et de l'air du canton de Zurich) et d'autres services cantonaux.

La présente directive pour le niveau R (régional) décrit une procédure harmonisée d'appréciation des cours d'eau de Suisse au moyen de la fréquence et de la distribution des espèces de diatomées. La description générale du système modulaire gradué, ainsi que les méthodes « Ecomorphologie – niveau R », « Poissons – niveau R » et « Aspect général », ont déjà été publiés dans la série de l'OFEV, « L'environnement pratique, Informations concernant la protection des eaux ». D'autres méthodes du système paraîtront dans la même série à intervalles irréguliers.

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

1 > Introduction

Conformément à l'idée du système modulaire gradué de l'OFEFP (1998), des modules pour l'étude des cours d'eau de Suisse doivent être définis, dans les domaines de l'hydrodynamique et de la morphologie (hydrologie, écomorphologie), de la biologie (rives et végétation des environs, plantes supérieures des eaux et des marais, algues, macrozoobenthos, poissons) et des effets chimiques et toxiques (chimie de l'eau, écotoxicologie). Ce concept énumère trois niveaux d'analyse : le niveau R (région, ressources faibles engagées par étude), niveau C (cours d'eau, ressources moyennes engagées par étude) et niveau T (tronçon, ressources élevées). Le choix des modules à utiliser et du niveau d'analyse dépend des différents buts poursuivis par l'étude du cours d'eau.

Le présent rapport explique la démarche méthodologique pour l'étude des diatomées au niveau R. Les diatomées sont considérées de façon approfondie parce que ce groupe d'organismes se prête particulièrement bien à l'appréciation biologique de la qualité de l'eau. Tous les résultats probants des études menées sur les diatomées dans les cours d'eau suisses ces 20 dernières années ont servi de données de base pour élaborer cette méthodologie. De plus, les données chimiques et physiques correspondantes ont été prises en compte pour calibrer cette méthode. Le grand nombre d'études déjà menées sur les diatomées (3'649 relevés) a permis de dresser la liste des taxons de diatomées les plus importants des cours d'eau suisses, d'en établir un dossier photographique et de caractériser leur autoécologie au point de vue de leur tolérance aux pollutions anthropiques. Sur la base de cette classification écologique des espèces, un indice suisse des diatomées (DI-CH) a pu ensuite être défini. Il permet de *caractériser biologiquement la qualité de l'eau d'un cours d'eau par rapport aux paramètres chimiques*.

Bien qu'il existe déjà dans les pays limitrophes comme l'Allemagne, l'Autriche, l'Italie et la France, et dans d'autres pays, des démarches publiées d'appréciation biologique de la qualité de l'eau au moyen des diatomées (indices de saprobie et de trophie), qui peuvent aussi être appliquées, une adaptation aux conditions chimiques actuelles des cours d'eau suisses était nécessaire. Plusieurs arguments plaident en faveur d'une adaptation spécifique pour la Suisse :

- > Les procédures existantes d'appréciation biologique basées sur l'indication du degré de saprobie ne permettent pas une différenciation suffisante compte tenu des exigences actuelles, car une grande partie des cours d'eau suisses ne présentent aujourd'hui qu'une pollution organique moyenne à critique (qualité des eaux II à II-III), au maximum.
- > De plus, les limites des classes de qualité des eaux ne concordent pas avec les critères fixés dans la législation suisse (ordonnance sur la protection des eaux, OEaux) quant aux exigences de qualité. Ainsi, la classe de qualité des eaux II est

qualifiée de modérément polluée pour des substances organiques alors que la législation suisse exige que la composition en organismes soit caractéristique du type d'eau peu ou non polluée (annexe 1, art. 1, OEaux).

- > Grâce au succès de l'épuration des eaux usées, les charges organiques ont très fortement régressé et les teneurs en phosphore et en azote ont diminué de manière significative. La pollution résiduelle en substances nutritives peut en principe être identifiée à l'aide d'un indice trophique. La multiplicité actuelle des pollutions organiques et inorganiques des cours d'eau suisses explique cependant qu'une appréciation biologique des eaux basée sur un système étalonné grâce à un seul paramètre indicatif, par exemple le phosphore, n'appréhende pas les nombreux modèles de pollution possibles et apparaisse trop partielle. C'est particulièrement vrai lorsque l'on doit apprécier avec les diatomées au niveau R l'état biologique des eaux de cours d'eau également en aval de stations d'épuration équipées avec la précipitation du phosphore (3e phase d'épuration). Dans ces cas les charges de phosphore peuvent être très faibles, mais la qualité de l'eau rester insuffisante par rapport à d'autres paramètres comme le COD, le nitrate, le nitrite, l'ammonium ou le chlorure.
- > Une adaptation aux conditions suisses est aussi nécessaire dans la mesure où elle seule permet d'établir une relation entre l'indice des diatomées et les concentrations effectives de substances dans les cours d'eau suisses.

Pour pouvoir comparer les résultats des études basées sur les diatomées à l'échelle européenne, il existe toujours la possibilité de calculer d'autres indices (trophique ou saprobique).

Le présent rapport comprend deux parties. La première contient le **guide méthodologique**, c.-à-d. tous les travaux de terrain et de laboratoire, ainsi que l'exploitation et l'évaluation des résultats qui sont nécessaires à la réalisation de l'étude des diatomées. La 2^e partie contient des renseignements généraux sur les diatomées en tant qu'indicateurs biologiques ainsi que les **éléments de base**, chimiques et biologiques, nécessaires à la présente méthode. Le mode d'étalonnage de l'indice DI-CH est expliqué. L'annexe contient, en complément du guide méthodologique, des renseignements importants comme la liste des taxons, les planches d'illustrations des espèces de diatomées importantes pour les cours d'eau suisses et des instructions détaillées pour la préparation des diatomées.

2 > Objectif et bases légales

2.1 Objectif

Les études des diatomées représentent une démarche biologique qui permet de suivre dans le temps les effets de substances sur les espèces particulières et les communautés entières. Le but essentiel de la présente méthodologie est de permettre de se prononcer de façon simple et sûre sur l'état biologique des cours d'eau de Suisse, au moyen de l'étude des diatomées dans l'optique de l'application de la loi sur la protection des eaux. Comme les cours d'eau abritent un grand nombre d'autres organismes, ces indications ne sont cependant pas exhaustives. Les descriptions des états de santé doivent avoir une relation connue avec les paramètres chimiques qui traduisent les pollutions anthropiques. L'indice suisse des diatomées (DI-CH) est une méthode d'indication possible, qu'on peut utiliser pour le contrôle des objectifs écologiques de l'ordonnance sur la protection des eaux (annexe 1, art. 1, al. 1, OEaux).

2.2 Bases légales

La loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux, RS 814.20) charge les cantons (art. 57) et la Confédération (art. 58) de mener des investigations sur les eaux. Il s'agit notamment d'effectuer des relevés servant à vérifier si les objectifs écologiques pour les eaux superficielles définis à l'annexe 1, ch. 1, de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux, RS 814.201), ont été atteints. Ceux-ci doivent, en vertu de l'art. 1, al. 2, OEaux, être pris en compte lors de l'exécution.

L'annexe 1, ch. 1, OEaux, a la teneur suivante:

Les communautés animales, végétales et de micro-organismes (biocénoses) des eaux superficielles et de l'environnement qu'elles influencent doivent:

- a) être d'aspect naturel et typiques de la station, et pouvoir se reproduire et se réguler d'elles-mêmes;
- b) présenter une composition et une diversité d'espèces spécifiques à chaque type d'eau peu ou non polluée.

La Confédération et les cantons effectuent également des relevés portant sur le respect des exigences relatives à la qualité des eaux superficielles figurant à l'annexe 2, ch. 1, OEaux.

La présente publication expose les méthodes utilisées pour mener de telles investigations grâce à l'étude des diatomées.

> Partie I

Guide méthodologique

3 > Relevés

3.1 Relevés de terrain, échantillonnage

Les indications qui suivent concernent les techniques d'échantillonnage. Elles s'appuient sur les recommandations de Kelly et al. (1998), élaborées pour les diatomées en relation avec l'appréciation de la qualité de l'eau des cours d'eau d'Europe.

3.1.1 Choix des sites d'échantillonnage

Le choix de l'emplacement et du moment de l'étude des diatomées dépend du but de l'étude et varie de cas en cas (mode d'échantillonnage, nombre d'échantillons, choix des sites d'échantillonnage). On devrait cependant tenir compte des principes suivants dans un programme d'échantillonnage :

1. Possibilité de comparaison avec d'autres programmes de mesure (p. ex. relevés de la chimie et du benthos) et avec les relevés exécutés précédemment (p. ex. échantillons historiques servant de références).
2. Examen de la possibilité de prise en compte de certaines études dans un programme de routine déjà existant.
3. Choix spatial et temporel des sites d'échantillonnage de sorte que les pollutions éventuelles puissent être autant que possible attribuées à une cause. Lors de déversements ponctuels (p. ex. aux stations d'épuration), cela signifie qu'il faut prévoir un lieu de prélèvement immédiatement en amont (référence locale) et au moins un lieu de prélèvement en aval du déversement ponctuel. Dans les ruisseaux et les petits émissaires, le lieu de prélèvement en aval d'un déversement devrait être suffisamment éloigné pour que l'on puisse admettre un mélange complet des eaux usées. Ce principe n'est pas applicable dans les fleuves et les autres milieux aquatiques dans lesquelles un mélange complet ne se produit pas ou seulement après un très long parcours. Pour appréhender les effets spatiaux d'un déversement ponctuel dans un cours d'eau, il est recommandé de définir plusieurs sites d'échantillonnage en aval du déversement (p. ex. à environ 200 m, à 500-1000 m et à 1500-2500 m de distance du lieu de déversement).
4. Dans les cas de pollution **diffuse** des eaux, pour pouvoir identifier les éventuels gradients de pollution, plusieurs sites d'échantillonnage devraient également être définis le long du cours d'eau.
5. Une bonne accessibilité aux sites d'échantillonnage doit être garantie même en hiver.
6. La répétition, voire le prélèvement régulier d'échantillons, dépendent fortement de la problématique. Pour les études de routine, deux échantillonnages annuels sont idéaux (fin de l'hiver/printemps et été/automne). Si un seul échantillonnage n'est

possible par année, il devrait être effectué lorsque l'on prévoit la pollution maximale des eaux. Il peut cependant survenir à des moments très différents de l'année en fonction de la dynamique des utilisations (décharge des stations d'épuration, nombre et intensité des décharges mixtes provenant de l'évacuation des eaux des agglomérations, activités touristiques, etc.) et des conditions hydrologiques (débits résiduels, infiltration dans les eaux souterraines, apports à partir des eaux souterraines, étiages).

7. Les études elles-mêmes ne devraient pas avoir lieu, dans la mesure du possible, pendant les épisodes de crues ou les jours qui suivent. Il est recommandé de laisser passer la phase des groupements pionniers qui, après une crue, sont les premiers à coloniser le substrat. L'expérience montre qu'après un mois environ une communauté stable s'est établie.

3.1.2 Échantillonnage, choix du substrat, protocole, conservation

Les recommandations suivantes relatives au choix du substrat, et des endroits d'une station d'un cours d'eau à caractériser, ainsi que la technique d'échantillonnage sont liées à l'**appréciation de l'état biologique des eaux (indice biologique de qualité d'eau)**. Si d'autres problématiques sont en cause, p. ex. la biodiversité, la biologie des populations ou la densité de la végétation, il faut choisir d'autres démarches.

Dans la mesure du possible, le même substrat devrait être échantillonné durant toute l'étude. Pour les cours d'eau suisses, le **substrat solide, en l'occurrence la surface des pierres (épilithon) situées dans le courant**, convient en principe. Ce substrat se rencontre presque partout et en toute saison et est très simple à échantillonner.

Échantillonnage du substrat
solide

Pour les petits cours d'eau que l'on peut traverser à pied et sans moyens ou mesures de sécurité spéciales, on collecte le long de la section transversale du cours d'eau (transect) des pierres de la taille d'un poing ou d'une tête. On devrait éviter les pierres plus petites dans la mesure du possible, car un débit légèrement supérieur les déplace, les entraîne et les recouvre par moment d'autres pierres ce qui érode la couche d'algues. Normalement, c.-à-d. dans les **eaux plutôt productives, trois à cinq pierres** suffisent par station de cours d'eau ; les pierres sont prélevées sur les deux rives et au milieu de l'eau (fig. 1). Dans les **torrents peu productifs des Préalpes et de montagne**, où la surface des pierres ne présente qu'une couche de diatomées clairsemée, on devrait prélever **au moins 5 pierres, mais de préférence 10 ou plus au besoin**. Les pierres doivent être prélevées dans le secteur du cours d'eau continuellement recouvert d'eau et bien parcouru par le courant. Il faut éviter si possible les zones à faible vitesse d'écoulement, car elles peuvent donner lieu à des accumulations (notamment de diatomées mortes). Pour des raisons de sécurité, on ne devrait pas dépasser une profondeur de prélèvement maximale de 0.5 à 1.0 m et une vitesse d'écoulement maximale d'environ 1 m/s. De même, il faut éviter les sites très ombragés, en permanence peu éclairés. En outre, les pierres devraient présenter un recouvrement de diatomées bien développé, caractérisé par une couche ou une pellicule brune, tout au plus légèrement touffue. Il faut éviter les pierres fortement recouvertes d'algues filamenteuses (p. ex. *Cladophora* sp., *Vaucheria* sp., *Hydrurus foetidus*, etc.),

de mousses ou de plantes aquatiques. La couche de diatomées de la série de pierres récoltée est prélevée sur le terrain selon la méthode mentionnée ci-dessous. Elle est traitée normalement comme échantillon composite. Dans les grands et larges cours d'eau que l'on ne peut pas traverser à pied, le milieu de la rivière ne peut être échantillonné qu'avec des moyens conséquents. Une technique possible d'échantillonnage a été appliquée au Rhin supérieur (OFEFP 1993). Normalement, il suffit cependant d'échantillonner séparément les deux rives de la rivière, toujours à l'aide de 3 à 5 pierres (1 échantillon composite pour chacune des deux rives).

Lorsque sur un site d'échantillonnage les pierres ou le substrat solide sont bien présents, mais ne peuvent être détachés du fond du lit (lit fortement colmaté, canal bétonné, murs verticaux mouillés, parois, etc.), la couche de diatomées peut être retirée sous l'eau, p. ex. au moyen de pipettes à aspiration.

En l'absence de substrat solide, des **substrats meubles**, c.-à-d. des parties de plantes aquatiques immergées (tige, feuilles, touffes de mousses) ou des sédiments fins, peuvent aussi être échantillonnés. L'état des plantes (en croissance, mortes, envasées, en décomposition) peut modifier légèrement l'appréciation de la qualité de l'eau en comparaison avec le substrat pierreux du même endroit. On devrait complètement renoncer à échantillonner des surfaces de bois.

Échantillonnage de substrats
meubles

Dans les endroits sans substrat pierreux, il est aussi possible d'exposer des pierres polies ou des **substrats artificiels** (cf. chapitre 4.2). Le temps d'exposition devrait être d'au moins 4 semaines, mais nettement plus long dans les eaux peu productives très propres ou dans les endroits fortement ombragés (p. ex. 8 semaines).

Le **prélèvement des diatomées** sur le substrat dur de la pierre s'effectue normalement par grattage ou raclage de la surface de la pierre selon la méthode de Douglas (1958). Pour ce faire, on applique un court tube en plastique (avec joint en caoutchouc et bord en néoprène) sur un endroit plutôt plat de la pierre, on ajoute un peu d'eau dans le tube et on gratte la couche de diatomées avec une brosse à long manche (fig. 1). Ensuite, on transfère la suspension de périphyton dans le récipient de prélèvement. Pour chaque pierre, on peut racler une ou deux surfaces. Des instructions pour la construction et l'utilisation dans le terrain de l'appareil à gratter les diatomées, peuvent être téléchargées sur le site du bureau AquaPlus (www.aquaplus.ch).

Prélèvement des diatomées

Si la préparation n'est pas effectuée le jour même de l'échantillonnage, la **conservation** des échantillons se fait tout de suite avec du formaldéhyde (37%, neutralisé pour éviter la dissolution des minces valves des diatomées). Comme concentration finale maximale, une solution de 4% de formaldéhyde suffit. A la place du formaldéhyde, on peut utiliser le iodo-ioduré, connu pour la conservation des échantillons de plancton. Indépendamment de la méthode de conservation, il est recommandé d'entreposer les échantillons au froid et à l'obscurité jusqu'à la poursuite de l'étude (boîte isotherme, réfrigérateur de laboratoire, chambre froide). Pour prévenir une contamination ou un transfert de diatomées d'un échantillon à un autre, tous les ustensiles d'échantillonnage doivent être soigneusement lavés avant et après l'échantillonnage.

Conservation des échantillons

Pour l'**observation microscopique sur le vivant** des diatomées périphytiques échantillonnées, on peut conserver avant la fixation au formaldéhyde une petite quantité de l'échantillon dans un récipient distinct, sans conservation, aussi à l'obscurité et au froid (boîte isotherme). La microscopie sur le vivant doit absolument être effectuée au plus tard le jour suivant.

Lors de l'échantillonnage des diatomées, le site et le milieu doivent être décrits de façon standardisée selon le module aspect général – niveau R (OFEV 2007) et les échantillons doivent être clairement étiquetés.

Fig. 1 > Racleur à diatomées (en haut, à gauche et à droite) et pierres racrées à revêtement d'algues de densité variable (au milieu et en bas à gauche). Les pierres couvertes par un fort développement d'algues filamenteuses ne devraient pas être échantillonnées (en bas à droite).



Observation microscopique
d'un échantillon non traité

3.2

Travaux de laboratoire, techniques de préparation

Il est recommandé d'effectuer un **examen au microscope du matériel échantillonné avant la préparation**, si nécessaire à l'état vivant sur l'échantillon spécialement séparé dans ce but. Cela permet d'identifier et de noter des singularités comme un nombre élevé de valves vides (diatomées mortes), la densité des individus, la présence massive d'autres organismes, et d'en tenir compte lors de la préparation ou de l'exploitation et de l'interprétation des résultats.

La **préparation** débarrasse l'échantillon de diatomées de la matière organique (cytoplasme des diatomées, autres organismes, détritiques) et du calcaire. L'échantillon préparé ne devrait plus contenir que des particules siliceuses, à savoir les valves des diatomées ou des fragments de valves, ainsi que des composants minéraux. Une fraction de cet échantillon est ensuite montée entre lame et lamelle dans le baume synthétique (en général Naphrax). Les diatomées sont ensuite déterminées et comptées. Comme on travaille au microscope à fort grossissement, il faut faire attention aux points suivants lors de la détermination et du dénombrement des diatomées :

Préparation de l'échantillon

1. bonne qualité de la préparation (pureté élevée, peu de cristaux et de détritiques),
2. inclusion soignée dans la résine synthétique (pas de bulles d'air, valves entièrement remplies par le baume d'inclusion),
3. dilution convenable des valves de diatomées (pas de superposition de valves de diatomées),
4. répartition homogène des valves (pas d'agglutination).

Conditions pour le travail au microscope

Pour préparer les échantillons de diatomées, des procédés très différents ont été développés. Ils sont décrits par Krammer et Lange-Bertalot (1997a). Tous les procédés de préparation – à l'exception du simple grillage – nécessitent fondamentalement les mêmes étapes de travail, mais qui, selon le procédé, ne sont pas exécutées exactement dans l'ordre suivant :

1. élimination des composants de grande taille,
2. décarbonatation au moyen d'acide chlorhydrique,
3. élimination des composants organiques par chauffage ou oxydation,
4. lavage, neutralisation,
5. inclusion dans le baume synthétique (Naphrax) pour les préparations permanentes,
6. conservation des échantillons préparés,
7. étiquetage et archivage des échantillons préparés et des préparations permanentes.

Procédés de préparation des échantillons

Dans l'annexe A4, ces 7 étapes de préparation sont expliquées plus en détail. Les procédés de préparation suivants entrent en ligne de compte : le grillage à la flamme (peu recommandé) et la calcination dans le four à moufle combinée à l'eau oxygénée, ainsi que l'oxydation à chaud à l'aide d'acide sulfurique (très appropriés). Les annexes A4.1, A4.2 et A4.3 décrivent en détail ces trois procédés de préparation comme modes opératoires de laboratoire.

3.3

Travaux de microscopie (détermination et dénombrement des espèces)

Le travail au microscope comprend la détermination des espèces et le comptage des valves de diatomées. Comme les petites ornements des valves des diatomées, c.-à-d. les caractères de détermination reconnaissables au microscope optique, atteignent les limites du pouvoir de résolution du microscope optique, il est nécessaire de travailler avec une très bonne optique, à un grossissement de 1000x et à l'huile à immersion. Le **microscope** devrait en conséquence disposer au moins des composants suivants : un statif stable, une platine à chariot orthogonal pour la fixation et le déplacement de la préparation, des objectifs 40x et 100x – ce dernier au moins adapté à l'huile à immersion, un tube binoculaire avec des oculaires 10x et un réticule gradué (à 10 µm), les types d'éclairage suivants : fond clair, contraste de phase, éventuellement interférence et fond noir. Les types d'éclairage agréables sont le contraste de phase et l'interférence. L'éclairage normal en fond clair convient aux prises de vue.

La détermination des diatomées demande, en plus de l'équipement technique, de l'expérience et une pratique régulière. La détermination s'effectue essentiellement selon les points de vue de la Süsswasserflora von Mitteleuropa (Krammer et Lange-Bertalot 1997-2004) et de quelques ouvrages complémentaires :

- > Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 1997: Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer, D., (eds.), Süsswasserflora von Mitteleuropa, 2 (1), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 2^e éd., 876 p.
- > Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 1997: Bacillariophyceae. 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer, D., (eds.), Süsswasserflora von Mitteleuropa, 2 (2), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 2^e éd., 611 p.
- > Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 2000: Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiae. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer, D., (eds.), Süsswasserflora von Mitteleuropa, 2 (3), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 2^e éd., 576 p.
- > Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 2004: Bacillariophyceae. 4. Teil: Achnanthaceae, kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. In: Ettl, H., Gärtner, G., Heynig, H. & Mollenhauer, D., (eds.), Süsswasserflora von Mitteleuropa, 2 (4), Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2^e éd., 468 p.
- > Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 2000: Bacillariophyceae. 5. Teil: English and french translation of the keys. In: Büdel, B., Gärtner, G., Krienitz, L., Lokhorst, G.M. (eds.), Süsswasserflora von Mitteleuropa, 2 (5), Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 599 p.
- > Krammer, K. 2000. The genus *Pinnularia*. Diatoms of Europe 1, 703 p.
- > Krammer, K. 2002. *Cymbella*. Diatoms of Europe 3, 584 p.
- > Krammer, K. 2003. *Cymboplectra*, *Delicata*, *Navicymbula*, *Gomphocymbellopsis*, *Afrocybella*. Diatoms of Europe 4, 530 p.
- > Lange-Bertalot, H. 1993: 85 neue Taxons und über 100 weitere neu definierte Taxons ergänzend zur Süsswasserflora von Mitteleuropa Vol. 2/1-4. Bibliotheca Diatomologica Band 27, 454 p.

Bibliographie

- > Lange-Bertalot, H. & Moser, G. 1994. Brachysira - Monographie der Gattung. Bibliotheca Diatomologica 29, 212 p.
- > Lange-Bertalot, H. & Metzeltin, D. 1996: Annotated Diatom Micrographs: Oligotrophie-Indikatoren. Iconographia Diatomologica 2, 390 p.
- > Lange-Bertalot, H. 2001. *Navicula* sensu stricto, 10 Genera separated from *Navicula* sensu lato *Frustulia*. Diatoms of Europe 2, 526 p.
- > Reichardt, E. 1999: Zur Revision der Gattung *Gomphonema*. Die Arten um *G. affine/insigne*. *G. angustatum/micropus*, *G. acuminatum* sowie gomphonemoide Diatomeen aus dem Obergliazän in Böhmen. Iconographia Diatomologica 8, 203 p.

Nous considérons que l'utilisation des ouvrages soulignés est impérative pour l'identification des diatomées dans le contexte des anciennes dénominations au sens de la « Süsswasserflora ». Les ouvrages d'identification de la série « Diatoms of Europe » (A. R. G. Gantner Verlag K. G. Rugell), avec 4 volumes parus actuellement (2000-2003) sont aussi très précieux pour la détermination des diatomées. Ces volumes contiennent beaucoup de photos, ainsi que des indications écologiques, de synonymie et de nomenclature moderne.

L'annexe A2 fournit une **aide complémentaire à la détermination** sous la forme de photos des principaux taxons de diatomées des cours d'eau suisses. Le tableau A1.1 de l'annexe A1 donne en outre la liste de toutes les diatomées classées en fonction de leur écologie. La terminologie des éléments anatomiques des parois silicatées des diatomées, peut être consultée dans le glossaire de Krammer et Lange-Bertalot (1997a).

Aide complémentaire

Après détermination des diatomées fréquentes dans un échantillon, on effectue le **dénombrement des valves de diatomées**. Un comptage comprend 400 à 500 valves. Toutes les valves trouvées en cours de dénombrement doivent être identifiées, même celles de taxons qui n'ont pas de valeur indicatrice D. Le comptage s'effectue sur toute la préparation le long de chemins parallèles mais non voisins. Le comptage tient compte de toutes les valves intactes; les cellules entières sont comptées comme 2 valves. Parmi les fragments, on ne compte que ceux qui présentent au moins une demi-valve. L'annexe A3 présente un exemple de feuille de protocole de dénombrement avec la liste alphabétique des diatomées fréquentes dans les cours d'eau suisses.

Dénombrement

3.4 Interprétation

Pour apprécier l'état de santé du site d'étude, l'indice des diatomées DI-CH, spécialement développé pour ce module, est calculé sur la base de la liste de comptage obtenue. En ce qui concerne la conception de l'indice, voir la partie II (chapitres 5 et 6).

L'indice des diatomées est calculé selon la formule 1 suivante :

$$DI-CH = \frac{\sum_{i=1}^n D_i G_i H_i}{\sum_{i=1}^n G_i H_i} \quad \text{Formule 1}$$

où :

DI-CH indice suisse des diatomées (Diatomées Indice Suisse, second étalonnage)

D_i valeur de classement du taxon i sur la base de sa préférence autoécologique (valeur indicatrice D)

G_i facteur de pondération du taxon i

H_i fréquence relative du taxon en pour cent (= nombre de valves recensées du taxon divisé par le nombre total de valves de l'échantillon étudié)

n nombre de taxons dans l'échantillon.

Les valeurs de classement des taxons (D_i) attribués à partir de leur préférence auto-écologique et les facteurs de pondération (G_i) figurent dans l'annexe A1. Le tableau 1 donne l'exemple d'une liste simple de comptage de diatomées qui permet de calculer l'indice des diatomées.

Tab. 1 > Exemple de dénombrement simple des diatomées, de calcul de la fréquence relative des différents taxons et de l'indice des diatomées DI-CH.

Informations sur les taxons							Comptage	Calcul de l'indice		
DVNR	Genre	Espèce	Variété	Auteur	D	G	Nombre de valves	H [%]	D*G*H	G*H
6139	Achnanthes	biasolettiana		GRUNOW	1.5	1	125	0.250	0.375	0.25
6707	Achnanthes	minutissima	var. jackii	(RABENHORST) LANGE-B.	1	8	50	0.100	0.8	0.8
6983	Amphora	pediculus		(KUETZING) GRUNOW	5	0.5	54	0.108	0.27	0.054
6315	Cymbella	delicatula		KUETZING	1	4	121	0.242	0.968	0.968
6402	Fragilaria	incognita		REICHARDT	1	4	41	0.082	0.328	0.328
6015	Navicula	gregaria		DONKIN	5.5	1	12	0.024	0.132	0.024
6961	Nitzschia	sociabilis		HUSTEDT	3.5	2	97	0.194	1.358	0.388
							500	1.000	4.231	2.812
DI-CH, arrondi										1.5

DVNR = numéro du taxon selon Schmedtje et al. (1998), D = valeur indicatrice, préférence autoécologique, G = facteur de pondération, H [%] = fréquence relative, calculs selon la formule 1

L'appréciation de l'état de santé des stations étudiées et la présentation graphique s'effectuent selon le système modulaire gradué à l'aide de cinq classes d'état. Le tableau 2 donne les limites des classes pour l'indice des diatomées et une désignation

des classes d'état de santé. Des exemples d'application, des possibilités de valorisation et des représentations graphiques sont présentées au chapitre 7.

Tab. 2 > Evaluation de l'indice des diatomées et attribution d'une couleur aux cinq classes d'état de santé.

Indice des diatomées	1	2	3	4	5	6	7	8
Limites des classes	1.0–1.49	1.5–2.49	2.5–3.49	3.5–4.49	4.5–5.49	5.5–6.49	6.5–7.49	7.5–8.0
Classes d'état selon le système modulaire gradué	très bon		bon	moyen	médiocre	mauvais		
Couleur pour les figures	bleu		vert	jaune	orange	rouge		

Les classes d'état de santé sont ainsi caractérisées par leur degré de pollution :

- > Les objectifs écologiques (OEaux, annexe 1, chiffre 1) sont nettement atteints au point de vue des diatomées. C'est une indication précise que les exigences relatives à la qualité des eaux pour les cours d'eau (OEaux, annexe 2, chiffre 1) sont respectées. **très bon**
- > Les objectifs écologiques¹ sont remplis au point de vue des diatomées. C'est une indication que les exigences relatives à la qualité des eaux pour les cours d'eau² sont vraisemblablement respectées. **bon**
- > Les objectifs écologiques¹ peuvent parfois ne pas être respectés. C'est une indication que les exigences relatives à la qualité des eaux pour les cours d'eau² ne sont probablement, également pas respectées. **moyen**
- > Les objectifs écologiques¹ ne peuvent le plus souvent pas être respectés. C'est une nette indication que les exigences relatives à la qualité des eaux pour les cours d'eau² ne sont vraisemblablement, également pas respectées. **médiocre**
- > Les objectifs écologiques¹ ne peuvent pas être respectés. C'est une indication univoque que les exigences relatives à la qualité des eaux pour les cours d'eau² ne sont également pas respectées. **mauvais**

Les eaux des classes d'état de santé bleu et vert remplissent en conséquence les objectifs écologiques de la nouvelle ordonnance sur la protection des eaux (OEaux, annexe 1) au point de vue des diatomées.

Quel que soit leur type, les eaux des classes d'état de santé jaune, orange et rouge ne peuvent plus être jugées comme faiblement polluées sur la base de leur communauté de diatomées et n'atteignent plus les objectifs écologiques de l'annexe 1 de la nouvelle ordonnance sur la protection des eaux.

¹ OEaux, annexe 1, chiffre 1

² OEaux, annexe 2, chiffre 1

3.5

Remarques sur les principaux taxons de diatomées des cours d'eau suisses

Sur la base des 3649 listes de dénombrements de diatomées utilisées (= échantillons), les taxons principaux de diatomées des cours d'eau suisses ont pu être mis en évidence. Les critères de choix suivants ont été appliqués :

- > Tous les taxons qui apparaissent au moins dans 10 échantillons (listes de dénombrements) et au moins dans un échantillon avec une abondance de plus de 5%.
- > Sélection complémentaire de taxons, qui ne satisfont pas au critère ci-dessus, mais sont néanmoins importants pour éviter des confusions d'identification ou pour illustrer des échantillons de référence d'eaux très propres.

Une documentation photographique de ces quelque 215 taxons figure dans l'annexe A2. Le nombre DVNR donné à chaque taxon est un numéro spécifique (clé primaire) tiré de Schmedtje et al. (1998). Il convient cependant de faire observer que les DVNR désignent plus de 100'000 taxons qui ne figurent pas tous chez Schmedtje et al. (1998).

Lors de la détermination et du dénombrement des diatomées, les remarques suivantes relatives à certains taxons particuliers devraient être prises en considération. Les critères de détermination de ces taxons peuvent être trouvés dans les ouvrages de détermination mentionnés. Les taxons relevés dans les annexes A1 (liste des taxons) et A2 (planches) contiennent aussi des formes planctoniques, car elles peuvent aussi apparaître aux émissaires des lacs.

Remarques sur les principaux
taxons de diatomées

Achnanthes biasolettiana, *A. eutrophila*

La distinction des deux taxons *Achnanthes biasolettiana* et *A. eutrophila*, morphologiquement proches, permet un diagnostic plus fin du niveau trophique de l'eau. *A. eutrophila* se rencontre dans une eau nettement plus riche en substances nutritives qu'*A. biasolettiana*. Cela se traduit aussi par des valeurs indicatrices différentes (D, cf. formule 1 et annexe A1) des deux taxons (*A. biasolettiana* D = 1.5 ; *A. eutrophila* D = 3.5). Dans la banque de données, ces deux taxons n'ont probablement pu être distingués, que dans des cas particuliers.

Complexe d'*Achnanthes minutissima*, *Achnanthes straubiana*

Les espèces du complexe d'*Achnanthes minutissima* devrait être distinguées le plus exactement possible. Le complexe comprend, en plus de la variété type (*Achnanthes minutissima* var. *minutissima*), les variétés *affinis*, *gracillima*, *jackii*, *saprophila*, *scotica* et *inconspicua*. L'espèce *Achnanthes straubiana* appartient aussi à ce groupe morphologique et devrait être différenciée.

La différenciation de ces taxons est essentielle parce que ceux-ci sont régulièrement présents dans presque tous les échantillons, que l'amplitude écologique sur laquelle ils s'échelonnent est très étendue (D = 1.0 à 7.5) et parce qu'une comparaison des échantillons contemporains avec des échantillons de référence historiques est nettement moins probante sans leur distinction. Le dépouillement suivant montre l'importance de

ce complexe d'espèces dans les eaux courantes suisses : dans la banque de données utilisée pour le nouvel étalonnage de l'indice, au moins un taxon du complexe d'*Achnanthes minutissima* est présent dans le 98.5 % des 3649 dénombrements utilisés. Dans 63.8 % des dénombrements (2331 échantillons) plus du 10 % de toutes les valves comptées et dans 5.4 % des dénombrements (197 échantillons) plus de 50 % des valves, sont attribuées à l'un des taxons de ce complexe. Ne pas tenir compte de ce complexe morphologiquement compliqué ou ne pas distinguer ses taxons constituerait une trop grande perte d'information écologique.

Complexe d'*Achnanthes lanceolata*

L'argumentation en faveur de la distinction des taxons du complexe d'*Achnanthes lanceolata* est très semblable à celle du complexe d'*Achnanthes minutissima*. Mais les caractères morphologiques permettant la distinction des sous-espèces *dubia*, *frequentissima*, *lanceolata* et *rostrata* sont plus nets.

Amphora pediculus et *A. inariensis*

Ces deux taxons morphologiquement proches devraient être différenciés pour des raisons écologiques. Alors qu'*Amphora pediculus*, avec une valeur indicatrice D de 5.0, se rencontre dans des eaux nettement polluées, *A. inariensis*, avec D = 3.5, préfère plutôt des eaux très peu ou faiblement polluées.

Cyclotella meneghiniana

Ce taxon mérite une mention spéciale bien que sa détermination ne pose pas de problème. La présence de cette diatomée coïncide presque toujours en Suisse avec une teneur en électrolytes élevée. Habituellement, il devrait s'agir de fortes concentrations de chlorure d'origine anthropique ; mais *Cyclotella meneghiniana* se rencontre aussi lors de hautes teneurs naturelles en sulfate.

Genre *Cymbella*

Bien que les taxons cymbelloïdes (jusqu'à présent le genre *Cymbella* sensu lato) soient répartis en plusieurs genres dans le cadre de leur révision par Krammer (1997a, b, 2003), nous continuons à utiliser les descriptions des taxons figurant dans la « Süßwasserflora von Mitteleuropa » (références bibliographiques, voir le chapitre 3.3). Ce choix est justifié pour des raisons pratiques et pour faciliter les comparaisons avec les dénombrements anciens. Dans les tableaux de l'annexe A1 et dans les planches de l'annexe A2, nous signalons cependant en complément la nouvelle dénomination de chacun de ces taxons lorsqu'elle est sans équivoque.

Genre *Diatoma* y compris *Diatoma problematica*, *Tetracyclus rupestris*, ainsi que *Fragilaria incognita*

Il faut distinguer de façon précise les espèces du genre *Diatoma*. *Diatoma moniliformis* et *Diatoma problematica*, par exemple, ont une morphologie très semblable, mais présentent des exigences nutritives légèrement différentes, si bien qu'elles devraient être différenciées. Alors que *D. moniliformis* présente une valeur D de 2.0, *D. problematica* indique, avec D = 5.0, des eaux plus riches en substances nutritives. Dans la banque de données du premier étalonnage, ces deux taxons n'ont probablement pu être distingués que dans des cas isolés. Le critère de distinction réside essentiellement

dans la largeur de la valve (*Diatoma moniliformis* : < 5 µm de largeur ; *D. problematica* : > 5 µm de largeur).

De plus, il faut savoir que dans des sites très propres, non pollués, *Fragilaria incognita* peut être confondue avec *Diatoma tenuis* qui est morphologiquement proche et *Tetracyclus rupestris* éventuellement avec *Diatoma moniliformis*. Tant *Fragilaria incognita* que *Tetracyclus rupestris* sont de nets indicateurs d'eaux non polluées d'après notre expérience, notre banque de données et d'après la littérature.

Complexe de *Fragilaria capucina*

Le complexe de *Fragilaria capucina* est lui aussi très important pour les cours d'eau suisses du point de vue écologique. Son importance réside aussi, comme pour le complexe *Achnanthes minutissima*, dans sa présence régulière, dans son amplitude écologique et dans le fait qu'une comparaison avec des échantillons de référence historiques a peu de sens, sans distinguer les taxons individuels. En plus de la variété type elle-même (*Fragilaria capucina* var. *capucina*), ce complexe comprend surtout les variétés *amphicephala*, *austriaca*, *gracilis*, *mesolepta*, *perminuta*, *rumpens* et *vaucheriae*. Les valeurs de l'indice vont de D = 1.0 (variétés *austriaca*, *amphicephala*, *gracilis* et *perminuta*) à D = 6.0 (variété *vaucheriae*) ; cette dernière variété peut se rencontrer partout dans des eaux et des stations d'épuration à forte pollution organique.

Groupe de *Gomphonema angustum*

L'aire centrale développée unilatéralement jusqu'au bord de la valve, ainsi que l'absence de stries transapicales à cet endroit sont caractéristiques du groupe de *G. angustum*. A côté de cette espèce, ce groupe comprend *G. tergestinum* et les formes autour de *G. occultum*.

Groupe de *Gomphonema micropus*

Les espèces qui gravitent autour de *G. micropus* se différencient bien les unes des autres. A côté de cette espèce, nous trouvons chez nous *G. cymbelliclinum* (très fréquent) et *G. sarcophagus* (très rare dans les eaux courantes, préfère les bas-marais, les mégaphorbaies humides et les collecteurs de drainages).

Gomphonema olivaceum var. *olivaceum* et *G. olivaceum* var. *olivaceoides* (aussi *G. olivaceoides*)

Ces deux formes sont assez faciles à distinguer morphologiquement et écologiquement. Il est donc opportun de les distinguer, surtout dans la perspective de références historiques. La variété *olivaceoides* (quatre points isolés dans la région de l'aire centrale), avec une valeur D de 1.0, préfère des conditions nettement plus oligotrophes, que la variété type (D = 3.0) de l'espèce.

Gomphonema parvulum

Gomphonema parvulum se présente sous trois variétés : *parvulum*, *exilissimum* et *parvulum* f. *saprophilum*. On ne sait cependant pas et on ne peut déterminer dans quelle mesure les deux variétés *parvulum* et *parvulum* f. *saprophilum* ont été distinguées l'une de l'autre dans nos données. Comme les deux taxons présentent du point de vue écologique la même valeur D, il devrait s'agir très vraisemblablement de la même forme. Mais il est important de distinguer *Gomphonema parvulum* var.

exilissimum (nouvelle dénomination : *Gomphonema exilissimum* Lange-Bertalot et Reichardt) qui, avec une valeur D de 3.0, se rencontre dans les eaux très faiblement polluées.

Complexe de *Gomphonema pumilum* et espèces ressemblantes

Ce complexe regroupe un très grand nombre de formes, qui ont été spécialement documentées dans les planches photographiques. Il s'agit des variations autour de *G. pumilum* var. *elegans* (le plus fréquent), *G. pumilum* var. *rigidum* (plus rare), des taxons *G. angustivalvata*, *G. minusculum* et *G. micropumilum*, ainsi que le groupe des *G. « pumiloide Kleinformen »*. Ce nom provisoire regroupe *G. micropumilum*, de petits *G. angustivalvata* et des variations pumiloides très petites. Ces petites formes colonisent les eaux carbonatées propres. Elles sont souvent associées à *G. pumilum* et *G. angustivalvata*, mais ne peuvent qu'à peine être distinguées les unes des autres.

Hantzschia amphioxys, *H. abundans* et *H. vivacior*

Ces trois taxons ne sont pas fréquents dans les cours d'eau, mais sont typiques des lieux à humidité variable et des sols. Dans notre base de données, ces trois taxons n'ont pu être distingués. Pour faire la distinction, nous renvoyons à Lange-Bertalot (1993), ainsi qu'à Krammer et Lange-Bertalot (1997b, dans la partie compléments et correction à partir de la p. 588).

Navicula atomus et ses variétés *permitis* et *excelsa* (actuellement dans le genre *Mayamaea*)

Dans notre base de données, les deux variétés *permitis* et *excelsa* de *Navicula atomus* n'ont probablement pas toujours été distinguées de la variété type. Bien que la valeur D de toutes ces variétés soit identique (D = 6.0), il conviendrait de tenter de les distinguer. Pour les critères séparatifs, se reporter à Lange-Bertalot (2001) sous *Mayamaea atomus* et sous les taxons proches (*M. excelsa* et les autres).

Diversité des taxons autour de *Navicula cryptotenella*, *N. reichhardtiana*, *N. aquaedurae* et *N. cryptotenel-loides*

La diversité morphologique autour de *Navicula cryptotenella*, *N. reichhardtiana*, *N. aquaedurae* et *N. cryptotenelloides* est très grande comme on le sait, et difficile à prendre en compte dans les travaux de routine. Notre banque de données sur les diatomées le montre aussi (surtout les dénombrement d'avant 1999); des dénominations différentes ont certainement été appliquées aux mêmes formes par les différents collaborateurs. Certaines listes de comptage sélectionnées ont bien été contrôlées sur ce point en discutant avec les collaborateurs; mais un contrôle complet était impossible. Tous les taxons mentionnés ont une valeur D de 4.0; ils ne se différencient donc écologiquement qu'au niveau du groupe et non pas des différents taxons. Il est cependant souhaitable d'en faire la distinction. Pour différencier ces taxons, se reporter également à Lange-Bertalot (2001).

Espèces planctoniques (genres *Cyclotella*, *Stephanodiscus*, *Aulacoseira*, *Thalassiosira*, *Asterionella formosa* et *Fragilaria crotonensis*)

Nous avons aussi attribué des valeurs D à beaucoup d'espèces planctoniques, bien qu'elle ne se développent normalement pas dans nos eaux courantes, à l'exception des

émissaires de lacs. Nous n'avons cependant donné qu'une pondération $G = 1$ aux espèces euplanctoniques. Pour calculer l'indice DI-CH, il faut décider de cas en cas, d'intégrer ou non les espèces planctoniques. En cours de dénombrement par contre, il faut les identifier et les compter également.

Surirella brebissonii et sa variété *kuetzingii*

Le taxon *Surirella brebissonii* et sa variété *kuetzingii* sont confondus dans notre banque de données. Dans la plupart des échantillons, il devrait s'agir de *Surirella brebissonii* var. *kuetzingii* et non pas de la variété type.

3.6 Difficultés, limites d'application

Cette méthode d'appréciation de la qualité de l'eau au moyen des diatomées peut être appliquée dans la plupart des cours d'eau. Il faut cependant toujours être conscient des limites ou des difficultés possibles de l'application, depuis l'échantillonnage jusqu'à l'exploitation et à l'interprétation. Des problèmes d'application sont imaginables dans les conditions suivantes :

1. Dans les cours d'eau périodiques, c.-à-d. à débit non permanent. On y rencontre une prédominance d'espèces aérophiles comme p.ex. *Hantzschia amphioxys*, *Navicula goeppertiana*.
2. Après des épisodes de crues à fort charriage. Après de tels épisodes, le périphyton est dominé par des espèces pionnières comme *Achnanthes minutissima* var. *minutissima*, qui peuvent n'avoir qu'un faible rapport avec la qualité de l'eau présente.
3. Aux exutoires des lacs, dans la mesure où le périphyton est fortement dominé par des espèces purement planctoniques des genres *Asterionella*, *Aulacoseira*, *Cyclotella*, *Cyclostephanos*, *Stephanodiscus*, *Tabellaria* ou *Thalassiosira*.
4. Probablement dans les collecteurs de drainages fortement envasés de façon naturelle dont le milieu vital rappelle davantage les conditions des rives lacustres que celles des cours d'eau.
5. Dans les sites aquatiques à très fort développement d'algues filamenteuses si bien que l'échantillon de diatomées doit être prélevé sur des pierres fortement recouvertes de filaments. Ici, la communauté de diatomées peut être dominée par des diatomées épiphytiques (*Cocconeis*, *Rhoicosphenia*).
6. Si l'échantillon de diatomées est dominé par de nombreuses cellules mortes. Cela peut indiquer des valves entraînées par le courant ou un événement très toxique.
7. Dans des eaux très turbulentes (par exemple dans des ruisseaux forestiers très raides), il est possible, que suite à une très bonne oxygénation, l'indication biologique de qualité (DI-CH), soit un peu meilleure que l'indication chimique.
8. Lors de densités très faibles d'individus, il faut au moins dénombrer 300 valves à l'espèce. Si moins de 300 valves sont présentes, l'interprétation du DI-CH est alors incertaine. Les listes de dénombrement à moins de 300 valves n'ont pas été retenues dans la banque de données, utilisée pour l'étalonnage du DI-CH.
9. Lorsque l'identification de certaines espèces pose problème, il faut alors dénombrer dans l'échantillon autant de valves identifiables, jusqu'à ce que la somme des

espèces bien déterminées atteigne au moins 300 valves. Ce cas se présente lorsque certaines espèces sont difficiles à identifier, lorsque de nombreux fragments sont présents ou lorsque beaucoup de diatomées sont en vue connective.

> Partie II

Fondements et relations avec d'autres méthodes d'évaluation

La partie II fournit les bases scientifiques de la méthode présentée dans la partie I. Elle complète ainsi la partie I axée sur la pratique. Pour l'essentiel, la partie II contient des informations générales sur les diatomées, l'origine des données, le calcul et l'étalonnage de l'indice des diatomées (DI-CH), ainsi que la valorisation des analyses réalisées jusqu'à présent et des exemples d'application.

4 > Les diatomées comme bioindicateurs

Tant dans la recherche que dans la pratique, les diatomées sont utilisées depuis le début du siècle pour apprécier la qualité des eaux (Lange-Bertalot 1978, 1979a, 1979b, Whitton et al. 1991, Hürlimann 1993). Certains thèmes essentiels sont apparus très tôt : système des halobies (salinité, salinisation), procédure de reconstitution de la valeur pH (acidification) et pollution organique (pollution par les eaux usées, Rott et al. 1997). Plus récemment est encore venue s'ajouter la détermination du niveau trophique (eutrophisation, Schiefele & Kohmann 1993, Coring et al. 1999, Rott et al. 1999). En Europe, en Amérique du Nord et au Japon, les diatomées sont utilisées pour des études de routine (Prygiel et al. 1999) ou pour des problématiques précises (Charles & Whitehead 1986, Watanabe et al. 1988, Kingston & Birks 1990, Whitton et al. 1991). En Suisse, les diatomées sont aussi régulièrement utilisées comme bioindicateurs depuis plus de 15 ans (Hürlimann et al. 1999a) ; les cantons font appel aux diatomées comme bioindicateurs dans les études de routine ou pour des évaluations biologiques ciblées des cours d'eau (voir également la fig. 3 et, en p. 52, la liste de rapports sur la qualité des eaux en Suisse, estimée à partir des populations de diatomées).

Le terme bioindication englobe les méthodes biologiques qui permettent de tirer des conclusions sur les conditions de l'environnement en se basant sur les organismes présents (Nagel 1991). Pour que des organismes ou des communautés d'organismes puissent être qualifiés de **bioindicateurs**, leur présence, leur comportement ou leurs adaptations physiologiques (= changements d'état réversibles) doivent être en relation aussi simple et étroite que possible avec des facteurs écologiques (facteurs de stress). La relation avec certains facteurs de stress (p. ex. des concentrations élevées de métaux lourds ou de biocides, acidification, réchauffement, etc.) n'est cependant pas toujours nette, car des facteurs écologiques naturels (sécheresse, froid, compétition, etc.) agissent aussi sur les organismes. Ils peuvent masquer ou modifier l'effet des facteurs de stress sur les organismes. D'après Kreeb (1990), les organismes permettent donc surtout de mettre en évidence la pollution totale s'il n'existe pas de facteur de stress dominant.

Principe de la bioindication

S'il existe une relation entre la réaction d'une espèce et un facteur de stress donné, elle dépend des particularités spécifiques, comme les **seuils de tolérance** (préférences autoécologiques) et la **capacité d'adaptation** (sténocéc, euryèce) par rapport à certains facteurs écologiques, le **niveau d'organisation** (unicellulaires, pluricellulaires) ou la **durée d'une génération** (heures, jours, ans).

Les espèces sténocécées sont des organismes spécialisés, à faible capacité d'adaptation, dont les réactions sont souvent en relation directe avec des facteurs écologiques. De ce fait ce sont de bons bioindicateurs. Le niveau d'organisation devrait aussi être important sur ce point, car les unicellulaires (p. ex. les bactéries, les protozoaires, les algues unicellulaires comme les diatomées) sont immédiatement exposés aux pollu-

tions du fait que le milieu environnant touche tout l'organisme (cellule), contrairement aux organismes plus évolués, pluricellulaires (p. ex. les mousses, les arbres, les invertébrés, les mammifères). Les unicellulaires réagissent ainsi plus vite aux changements de l'environnement que les organismes pluricellulaires. La connaissance de la durée de génération est importante dans les méthodes de bioindication qui mettent en évidence les pollutions surtout par les changements d'espèces. C'est ainsi que les communautés de diatomées, par exemple, dont la durée de génération va de un à quelques jours (Werner 1977), peuvent réagir en deux semaines aux changements du milieu en modifiant leur composition spécifique (Hürlimann 1993).

En plus des particularités spécifiques, certains facteurs de stress pourraient aussi avoir des effets différents en relation avec des particularités comme l'**âge**, l'**état physiologique** et l'**état de développement des individus**. D'après Arndt et al. (1987), les organismes ou les communautés d'organismes sont des bioindicateurs lorsqu'ils réagissent aux substances nocives en changeant leur fonction vitale. Ces auteurs distinguent fondamentalement entre les **indicateurs de réaction** et **d'accumulation**. Cette distinction clarifie comment les substances nocives ou les facteurs de stress existants peuvent agir sur les organismes. Sous l'influence de substances nocives, les espèces peuvent être ralenties, atteintes à court ou long terme, ou éliminées (= indicateur de réaction). Ou bien elles sont en mesure d'accumuler dans l'organisme les substances nocives en les métabolisant partiellement ou totalement (= indicateur d'accumulation). Pour les deux types d'indicateurs, on peut distinguer les **organismes témoins, test et de suivi**.

Pour qu'un organisme puisse être bioindicateur, il doit selon Arndt et al. (1987) satisfaire à plusieurs exigences dont toutes ne doivent pas être remplies simultanément. Voici ces exigences tirées de Arndt et al. (1987) et adaptées au suivi d'un cours d'eau :

Les organismes comme
bioindicateurs

1. Manipulation aisée pour la reconnaissance sur le terrain, l'échantillonnage, la détermination, la conservation et l'archivage,
2. standardisation possible de la méthode,
3. large connaissance des réactions aux changements de l'environnement,
4. bon rapport qualité/prix : diagnostic précis pour un coût modeste,
5. évidence des réactions (signaux) aux modification environnementales et possibilité de les quantifier,
6. exploitation facile du signal et
7. présence toute l'année dans toute la région d'étude (p. ex. cours d'eau).

Avec la méthode présentée, les diatomées devraient remplir la plupart de ces exigences à l'exception de l'identification des espèces sur le terrain. Elles conviennent donc comme bioindicateurs de la qualité de l'eau.

Après ces explications générales sur la bioindication, les deux chapitres suivants caractérisent brièvement la biologie des diatomées (chapitre 4.1) puis présentent de façon générale les procédures possibles d'examen des pollutions de l'environnement à l'aide des diatomées (chapitre 4.2). Les explications sur les types de procédures ont pour but de montrer les possibilités théoriques et celles connues aujourd'hui.

4.1

Les diatomées en tant qu'organismes

La classe des diatomées, appelées aussi Bacillariophyceae, fait partie de l'embranchement des Heterokontophyta d'après Van den Hoek (1993). Une cellule de diatomée est construite comme une boîte avec un fond (hypothèque) et couvercle (épithèque). L'un des caractères distinctifs essentiels des diatomées est le frustule contenant de l'acide silicique (dioxyde de silicium). La figure 2 présente des photos de diatomées prises au microscope optique et au microscope électronique à balayage.

Diatomées: algues unicellulaires avec un frustule contenant de l'acide silicique

Les diatomées sont des algues unicellulaires, non flagellées dont les espèces vivent libres, forment des colonies ou sont fixées à un substrat par une substance gélatineuse. Les chloroplastes présentent une coloration brune due à la xanthophylle fucoxanthine. Les substances de réserve sont le polysaccharide chrysolaminarine et des graisses stockées sous forme de gouttelettes. La reproduction est surtout asexuée par division mitotique de la cellule et seulement occasionnellement sexuée, par exemple lorsque la taille minimale de l'espèce est atteinte. Beaucoup d'espèces de l'ordre des *Pennales* possèdent une fente dans la paroi de la valve, le raphé, qui leur permet de se déplacer en glissant (Krammer et Lange-Bertalot 1997a).

Les diatomées vivent tant dans les eaux douces que salées, dans l'horizon supérieur du sol et même dans des milieux secs, comme sur les rochers, sur les murs ou dans les déserts. Elles habitent les eaux stagnantes et courantes, ainsi que les milieux humides et les marais. On peut même rencontrer des peuplements riches en espèces et en individus dans des milieux artificiels comme les caniveaux, les stations d'épuration ou les fontaines.

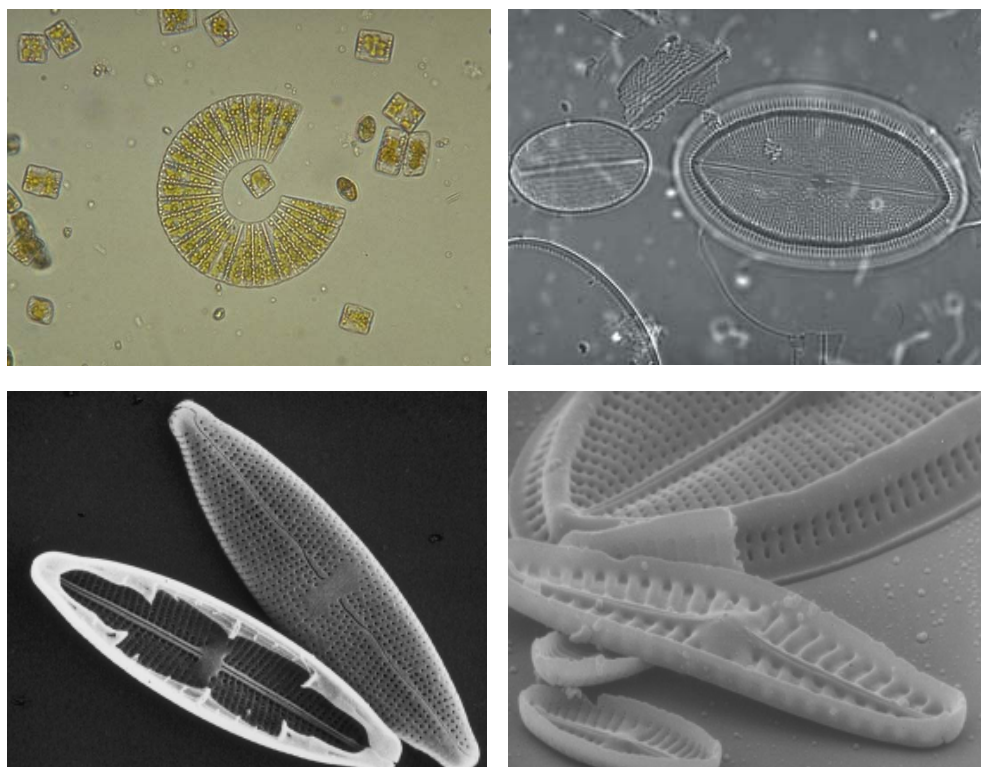
La classe des diatomées comprend de très nombreuses espèces. Leur nombre exact est cependant inconnu. A l'échelle mondiale, leur nombre dépasse de loin les 10'000 espèces (Norton et al. 1996). Des estimations supposent un nombre d'espèces supérieur d'un facteur 10 à 1'000. En Allemagne, on a recensé jusqu'à maintenant 1'437 taxons d'après les indications de Schmedtje et al. (1998) ; on estime cependant qu'il existe plus de 3'000 taxons. En Suisse, les proportions doivent correspondre à celles de l'Allemagne. Mais les chiffres ne sont pas connus. Dans la banque de données provenant des rivières suisses, utilisée pour l'étalonnage du DI-CH (période de 1985-2005 et pour quelques données historiques, de 1847-1950), figurent 708 taxons (à propos du nombre de taxons, voir aussi le chapitre 7.6).

Grande diversité d'espèces

En plus des diatomées contemporaines, les diatomées fossiles et subfossiles revêtent une grande importance. Les diatomées subfossiles sont les valves et restes de valves des cellules planctoniques ou benthiques mortes qui subsistent dans les sédiments lacustres ou marins. On exploite les diatomées fossiles dans de nombreux gisements du monde entier sous le nom de tripoli ou diatomite. Les diatomées les plus anciennes datent de quelque 200 millions d'années. Comme les valves de diatomées résistent mécaniquement et chimiquement longtemps, les diatomées mortes, subfossiles et fossiles, peuvent encore être reconnues aujourd'hui et déterminées au niveau de l'espèce.

Détermination des diatomées fossiles grâce à la grande résistance des valves

Fig. 2 > Diatomées en microscopies optique et électronique à balayage



En haut à gauche : cellules vivantes, microscopie optique (MO)

En haut à droite : valves préparées, incluses dans le Naphrax, MO

En bas à gauche : 2 valves préparées, vue interne et externe, microscopie électronique à balayage (MEB)

En bas à droite : valves préparées, vue latérale (MEB).

Cette propriété de la persistance des valves est utilisée aujourd'hui pour reconstruire par exemple l'histoire trophique d'un lac ; les valves de diatomées déposées par ordre chronologique dans les sédiments lacustres sont déterminées, comptées et valorisées au moyen de fonctions de transfert du phosphore (Lotter et al. 1998, Lotter 1998, Hürlimann et al. 1999b). Selon le même principe, on peut aussi en déduire si des eaux ont subi une acidification au cours du temps (Niederhauser 1993).

La détermination des diatomées repose sur les caractères morphologiques des valves reconnaissables en microscopie optique ou électronique à balayage. La détermination de la plupart des diatomées au niveau de l'espèce ne peut pas être effectuée sur des cellules vivantes, mais seulement après élimination du contenu cellulaire organique (préparation, cf. chap. 3.2 et annexe A4). Grâce à cette préparation, les échantillons de diatomées peuvent être archivés durablement en tant que préparations permanentes prenant peu de place (sur lames porte-objets) à des fins de documentation et de comparaison ultérieures.

Détermination de l'espèce grâce à la morphologie des valves

Des renseignements supplémentaires concernant la biologie, la systématique, l'écologie des diatomées et leur distinction avec d'autres groupes d'algues peuvent être trouvés notamment dans Hustedt (1930), Werner (1977), Krammer et Lange-Bertalot (1997a), Round et al. (1990) et Stoermer & Smol (1999).

4.2 Types de procédures d'examen des pollutions des eaux

Les réactions des différentes diatomées ou communautés de diatomées à la pollution et aux changements des conditions aquatiques peuvent se manifester de diverses manières. Selon les changements du milieu, les espèces de diatomées ou les communautés de diatomées réagissent par :

1. des variations d'ordre sociologiques comme la fréquence absolue ou relative, la diversité, la stabilité, la structure de la communauté,
2. la biomasse (poids humide ou sec, perte au feu, volume cellulaire, degré de recouvrement) ou
3. des activités physiologiques (photosynthèse, respiration, nutrition, accumulation de substances, déplacement).

Dans la pratique, les diatomées sont utilisées comme **indicateurs de réaction** dans l'appréciation de la qualité des eaux. Pour ce faire, les caractéristiques des communautés doivent être connues. Jusqu'à présent la question de savoir si les diatomées conviennent aussi comme indicateurs d'accumulation, a été moins étudiée. Cet aspect n'est pas traité ici. Dans les études écotoxicologiques, certaines espèces de diatomées sont utilisées comme organismes test (Walsh et al. 1988, Joy & Balakrishnan 1990). Reinhardt & Backhaus (1984), Otto (1987) et Backhaus (1991). Pour des études écotoxicologiques globales, des biocénoses entières riches en individus et en espèces de diatomées ont même été utilisées.

Parmi les procédures qui se basent sur les caractéristiques des communautés, les suivantes sont importantes :

4. suivi passif (recherches de terrain, organismes déjà présents dans l'écosystème),
5. suivi actif (expériences de terrain et de laboratoire, les organismes sont introduits dans l'écosystème) et
6. systèmes d'expérimentation biologique prédictifs.

Pour le **suivi passif** les diatomées récoltées sur le terrain sont étudiées. Ce type d'étude des diatomées est la procédure la plus utilisée. Pour le groupe des diatomées, le suivi passif s'est révélé comme particulièrement approprié pour les études relatives à l'écologie des eaux car :

- les diatomées se rencontrent en nombre (individus et espèces) partout et en toutes saisons ;
- l'échantillonnage peut être exécuté sans relation quantitative avec la surface occupée (périphyton) ou au volume (plancton).

Réaction à la pollution et aux changements des conditions aquatiques

Suivi passif

Toutes les interprétations se basent sur l'indication des fréquences relatives.

Les méthodes de **suivi actif** ont en commun que les organismes utilisés sont introduits de manière ciblée dans l'écosystème ou que d'enceintes expérimentales sont inoculées à l'aide d'organismes appropriés. Ces organismes peuvent provenir du même cours d'eau, d'un autre ou de cultures de laboratoire standardisées. L'utilisation d'une population qui a pu se développer dans des conditions standardisées a l'avantage :

Suivi actif

1. que le spectre des espèces peut être déterminé (inoculation),
2. que le développement se passe dans des conditions connues et
3. que différents substrats artificiels (pierres, lames porte-objets, pots de terre cuite/enrichis de substances nutritives, etc.) peuvent être proposés selon la problématique.

En Suisse, des études de ce type ont été exécutées tant dans les cours d'eau que dans les lacs. Elber & Schanz (1990) ont ainsi exposé dans la Limmat des pierres polies de la taille d'une tête pendant 9 à 10 semaines et ont comparé leur peuplement avec celui de pierres normales des rivières. Oehen (1991) et Hürlimann & Schanz (1993) ont aussi effectué des expériences dans la Limmat, simultanément dans un laboratoire de terrain et en plein air, en exposant des communautés de diatomées à différentes concentrations d'ammonium. Niederhauser & Schanz (1993) ont exposé des pots de terre cuite enrichis de substances nutritives dans des lacs de haute montagne et ont simulé ainsi dans des eaux oligotrophes, des conditions locales eutrophes.

Les systèmes d'expérimentation biologiques permettent d'apprécier à l'aide de bio-indicateurs les effets de facteurs déterminés sur un écosystème. Les organismes ou les groupes d'organismes utilisés sont des systèmes vivants qui permettent de simuler les effets de pollutions et de changements de l'environnement dans des essais en laboratoire ou sur le terrain.

**Systèmes d'expérimentation
biologiques**

Les communautés de diatomées périphtiques se prêtent particulièrement bien à l'expérimentation biologique, car les influences jouant un rôle sur les diatomées entraînent déjà en quelques jours ou semaines des changements de composition. On peut citer comme influences jouant un rôle, les pollutions des eaux ponctuelles ou diffuses, régulières ou sporadiques (déversement d'eaux usées, de purin, d'eaux mixtes, entraînement lors des épisodes de crue, etc.).

En écologie appliquée, on pourrait assez facilement apprécier biologiquement à l'aide d'enceintes expérimentales standardisées p. ex. la capacité d'absorption d'eaux usées épurées par un cours d'eau récepteur en tenant compte des conditions locales (communautés de diatomées périphtiques et eau du cours d'eau récepteur en amont du déversement, admission des eaux usées épurées de la station d'épuration dans une série de dilutions). De tels examens permettraient p. ex. de prendre en considération les composants spécifiques, surtout biologiques, du cours d'eau récepteur, lors du projet avant la réalisation d'une station d'épuration ou son assainissement.

5 > Caractérisation des bases de données biologiques et chimiques utilisées pour le développement de la méthode

5.1 Base de données sur les diatomées

La base de données sur les diatomées utilisée se compose en tout de 3'649 dénombrements de diatomées provenant d'échantillons prélevés entre 1985 et 2005 dans les cours d'eau suisses. En plus 43 relevés d'échantillons prélevés dans les stations d'épuration zurichoises en 1989 constituent une exception. Ces échantillons ont été prélevés dans le périphyton à la sortie des stations d'épuration ou sur les murs des bassins de décantation finale. Ils ont été introduits dans la base de données pour pouvoir aussi prendre en considération des situations hydriques très polluées.

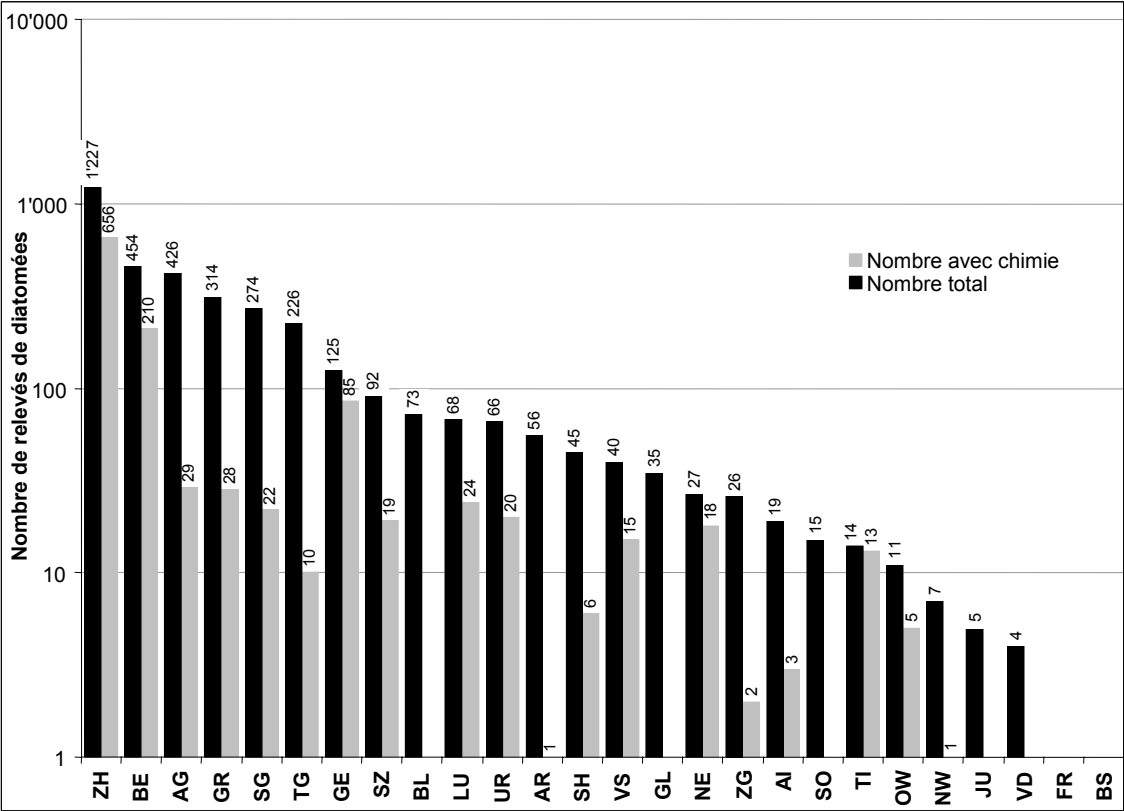
La figure 3 résume les données des dénombrements de diatomées. Elle donne le nombre de données par altitude, par année d'étude, par canton et celles qui sont associées à des indications chimiques. En tout, 1'167 dénombrements de diatomées avec des indications de la qualité chimique de l'eau ont été trouvés, soit environ un tiers.

1167 dénombrements de diatomées avec indication de la qualité chimique de l'eau

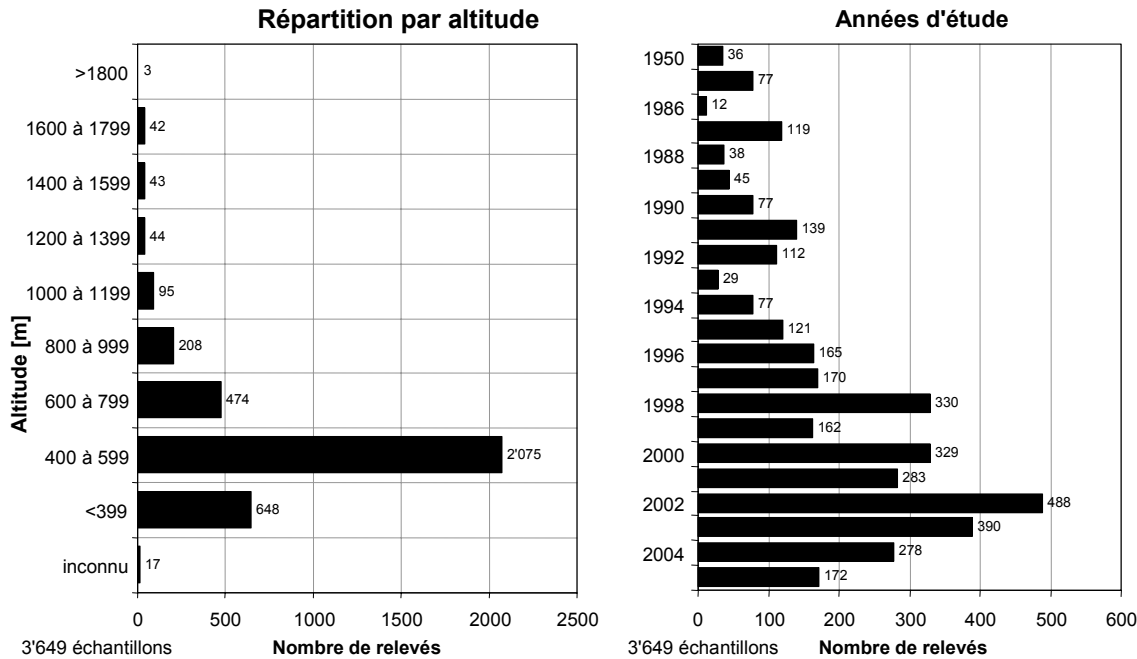
Les comptages de diatomées proviennent pour une grande part d'études cantonales mises à disposition pour le module diatomées. Quelques relevés ont été tirés de travaux scientifiques effectués dans des cours d'eau suisses par exemple du travail de diplôme d'Erni (1987) et des recherches de Kupe (2005). Pour que la base de données des diatomées dispose aussi d'échantillons du Sud de la Suisse, des échantillons ont été prélevés spécialement pour le module diatomées par Andreas Frutiger de l'Eawag dans les cantons des Grisons et du Tessin, et sur mandat de l'OFEPF par AquaPlus dans les affluents du lac de Lugano.

Les relevés de diatomées ont été effectués par les personnes suivantes : Arielle Cordonier, Margrit Egloff, Fredy Elber, Guido Erni, Joachim Hürlimann, Margy Koster, Lirika Kupe, Daniel Küry, Klemens Niederberger, Pius Niederhauser, Peter Pfister, Laurent Rebstein, Arnaud Sabatier, Stéphanie Schurch, François Straub et Jan Trübsbach. Ces personnes ont aussi été consultées par les auteurs, lors de la centralisation et la mise à jour de leurs relevés.

Fig. 3 > Caractérisation des dénombrements de diatomées utilisés (base de données)



Banque de données des diatomées des cours d'eau suisses



Les relevés et toutes les indications y relatives ont été introduits dans une banque de données. Comme base taxonomique et systématique, la liste des taxons des organismes aquatiques utilisée en Allemagne a été reprise, y compris le DVNR (numéro propre à chaque taxon, clé primaire) (Schmedtje et al. 1998). Une révision taxonomique relativement importante des comptages a cependant été nécessaire en consultant les responsables des différents dénombrements. Une attention spéciale a été consacrée aux taxons considérés de façon générale comme difficiles à déterminer. Il s'agit essentiellement des taxons et groupes de formes suivants :

- > le taxon *Achnanthes biasolettina*, sa différenciation de *A. eutrophila* et du complexe de *A. minutissima*,
- > tout le complexe *Achnanthes minutissima*,
- > tout le complexe *Achnanthes lanceolata*,
- > les deux taxons *Amphora pediculus* et *A. inariensis*,
- > le taxon *Cyclotella meneghiniana*,
- > tout le genre *Diatoma* y compris l'espèce *Diatoma problematica*,
- > les petites espèces de *Diploneis* comme *D. oculata* et *D. oblongella*,
- > les taxons autour de *Fragilaria capucina*,
- > les formes autour de *Fragilaria ulna*,
- > les formes autour de *Gomphonema angustum*
- > *Gomphonema olivaceum* et *G. olivaceum* var. *olivaceoides*,
- > les formes autour de *Gomphonema micropus*,
- > les variétés autour de *Gomphonema parvulum*,
- > les formes autour de *Gomphonema pumilum*
- > le genre *Gyrosigma*,
- > le taxon *Navicula atomus* et ses variété *permitis* et *excelsa*
- > la diversité des taxons autour de *Navicula cryptotenella* et *N. reichhardtiana* ainsi que *N. aquaedurae* et *N. cryptotenelloides*,
- > les taxons *Nitzschia pusilla*, *N. palea* et *N. supralitorea*.

Taxons et groupes de formes
difficiles à déterminer

Vu le grand nombre de relevés que nous avons reçus, il a été impossible de contrôler chaque préparation microscopique. Après cette 'harmonisation' taxonomique ciblée des données, nous disposons d'après notre estimation d'une base de données bonne et étendue permettant sans autre d'aller de l'avant.

5.2 Base de données physico-chimiques

Les données physico-chimiques avaient pour but de caractériser chimiquement et physiquement les eaux dans lesquelles ont été prélevés les échantillons de diatomées et d'étalonner l'indice des diatomées. A l'exception des travaux scientifiques déjà mentionnés, les données proviennent de nouveau pour l'essentiel des études des cantons et de l'Eawag. Le tableau 3 indique le nombre de données obtenues pour les 13 paramètres examinés.

Pour choisir les données chimiques, des critères géographiques et temporels ont été fixés. Comme critère spatial, toutes les études chimiques effectuées à l'emplacement de l'étude des diatomées ou à une distance insignifiante pour les diatomées, ont été retenues. Entre les sites d'échantillonnage chimique et celui des diatomées, il ne devait pas y avoir de pollution (déversement d'eaux usées épurées, d'eaux mixtes, etc.) ou de dilution (par des affluents, des remontées d'eau souterraine, etc.). Comme critère temporel, nous avons pris en considération toutes les mesures chimiques effectuées le mois de l'échantillonnage des diatomées, deux mois avant et un mois plus tard. Ces quatre mois ont permis normalement de mettre en relation quatre relevés chimiques (c'est à dire quatre valeurs pour chaque paramètre) avec chaque prélèvement de diatomées. Cette façon de procéder nous a permis de disposer de nettement plus de données chimiques convenables, que si l'on n'avait utilisé uniquement les données chimiques correspondant exactement aux échantillons de diatomées, temporairement et spatialement. Pour étalonner un système de bioindication basé sur les diatomées, les données chimiques antérieures à l'échantillonnage des diatomées sont particulièrement importantes, car les conditions passées sont responsables pour l'essentiel du développement des communautés de diatomées.

Pour pouvoir juger de l'adéquation des données chimiques et du respect des normes spatiales et temporelles, une qualification des données chimiques a été effectuée par les fournisseurs de données. L'adéquation a) signifie une bonne concordance en ce qui concerne les normes spatiales et temporelles, l'adéquation b) une moyenne et l'adéquation c) une mauvaise concordance. La majeure partie des données chimiques étaient de bonne (93%) et moyenne (6%) adéquation. Seules 20 données (1%) avaient une mauvaise adéquation (tab. 3).

Tab. 3 > Liste des paramètres chimiques mis à notre disposition, nombre de valeurs mesurées par paramètre et adéquation des données chimiques.

Paramètres	Nombre de mesures	Adéquation	Nombre de comptages	Pourcent de comptages
Température	5'145	a, bonne	1'578	93
Conductivité	1'194	b, moyenne	101	6
pH	4'689	c, mauvaise	20	1
Ammonium	4'982	Totaux	1'699	100
Nitrite	4'838			
Nitrate	4'818			
Azote minéral	4'795			
Azote organique	1'018			
Azote total	3'779			
Phosphate	4'633			
Phosphore total	4'831			
Chlorure	4'321			
Sulfate	3'977			
Oxygène	4'343			
Taux de saturation en oxygène	816			
DBO5	2'228			
COD	4'809			

Caractérisations chimique
et physique des sites
d'échantillonnage

6 > Fondements de l'indice des diatomées

6.1 Appréciation des sites d'étude à l'aide des paramètres chimiques

Sur la base des analyses de diatomées, le présent module vise au diagnostic de l'état de santé biologique des sites étudiés. L'indication doit avoir une relation connue avec des paramètres chimiques, qui caractérisent les impacts humains. Pour étalonner la méthode, des paramètres chimiques adéquats ont d'abord dû être définis. Les paramètres entrant en ligne de compte devaient remplir les critères suivants :

- > présence d'un nombre suffisant de mesures dans la banque de données à disposition, en particulier pour les pollutions très faibles et très fortes
- > le paramètre doit permettre une bonne différenciation de tous les degrés possibles d'un type de pollution
- > le paramètre doit augmenter ou diminuer régulièrement en parallèle avec l'augmentation de la pollution.

Les critères mentionnés ont été remplis par six paramètres :

- > ammonium
- > nitrite
- > somme de l'azote inorganique ($[N-NH_4] + [N-NO_2] + [N-NO_3]$)
- > phosphore total
- > chlorure
- > **carbone organique dissous (COD)**.

Six paramètres pour déterminer la qualité de l'eau

Le **nitrate** est en principe un bon paramètre pour apprécier la qualité de l'eau. Mais, en cas de mauvaise nitrification dans une station d'épuration, de faibles valeurs en nitrate peuvent se rencontrer dans l'émissaire malgré une forte pollution, car l'azote inorganique est présent sous forme d'ammonium et de nitrite. Pour cette raison, nous avons utilisé la somme de l'azote inorganique à la place du nitrate.

Paramètres non retenus

Le **phosphate** n'a pas été pris en considération, car de très grandes différences de concentrations peuvent se rencontrer dans des émissaires nettement pollués selon l'intensité de la précipitation du phosphate dans les stations d'épuration.

Le **chlorure** est un bon indicateur de pollution totale par apport anthropique et complète ainsi l'appréciation de l'état de la pollution indiqué par les composés azotés, phosphorés et carbonés.

La caractérisation d'un site d'étude doit résulter d'une appréciation globale basée sur tous les paramètres de mesure chimiques choisis. Dans ce but, nous avons fixé des

critères de classification sur la base des paramètres chimiques (tab. 4). La détermination des limites des classes est basée sur le module Chimie (OFEFP 2004), à l'exception des chlorures. Dans ce module aucun critère de diagnostic n'est donné pour ce paramètre, si bien que les limites supérieures de classes pour les chlorures ont été fondées sur la répartition des fréquences des concentrations, de telle manière que le jugement coïncide avec les cinq autres paramètres. Etant donné que pour l'ammonium, il existe deux échelles de diagnostic chimique, dépendantes de la température, les valeurs mesurées par des températures plus élevées que 10°C ont été doublées. Avec cette correction, les critères pour des températures plus basses que 10 °C ont pu être utilisés pour toutes les valeurs.

Lors de la première calibration du module des diatomées (OFEFP 2002a), une échelle à huit échelons a été utilisée. Cette solution a de nouveau été utilisée, car elle a en principe fait ses preuves. Dans ce but, la classe de qualité d'eau *très bonne* du module de chimie a été séparée en trois sous-classes, la classe *mauvaise* en deux sous-classes (tab. 4).

Tab. 4 > Critères d'appréciation d'un site d'étude sur la base de paramètres chimiques (limites supérieures de classes).

Classes	1	2	3	4	5	6	7	8
NH ₄ -N [mg/l] T<10°C	0.02	0.04	0.08	0.4	0.6	0.8	1.2	>1.2
NO ₂ -N [mg/l]	0.005	0.01	0.02	0.05	0.075	0.1	0.15	>0.15
N-inorg. [mg/l]	0.7	1.2	2.0	6.0	9.0	12.0	18	>18
P-tot [mg/l]	0.01	0.02	0.04	0.07	0.1	0.14	0.21	>0.21
COD [mg/l]	1	1.5	2	4	6	8	12	>12
Cl ⁻ [mg/l]	3	6	13	26	39	52	78	>78
Classes selon le module chimie	très bon			bon	moyen	médiocre	mauvais	

La démarche pratique d'appréciation chimique a été la suivante :

1. Calcul de la valeur de diagnostic de chaque séries particulière de valeurs chimiques pour les six paramètres selon le tab. 5.
2. Classement de la valeur de diagnostic dans une des huit classes (tab. 4, pour chaque paramètre une appréciation partielle).
3. Calcul de la valeur globale de diagnostic par la moyenne des appréciations partielles disponibles (= évaluation chimique).
4. L'évaluation chimique n'a été utilisée pour l'étalonnage de l'indice DI-CH, que lorsqu'elle a pu être calculée à partir d'au moins quatre appréciations partielles.

Démarche pratique d'appréciation chimique

La valeur de diagnostic de chaque série chimique disponible a été retenue selon les critères présentés dans le tableau 5. Dans les eaux de très bonne ou très mauvaise qualité, le nombre d'échantillons disponibles était nettement moindre, que dans les eaux de charge moyenne. De ce fait, pour ces classes limites, les échantillons de moindre valeur de diagnostic ont dus être tout de même retenus. Cela se justifie par

ailleurs, car pour une valeur globale de diagnostic, dans ces classes limites, tous les paramètres sont sensés représenter de très bonne, respectivement de très mauvaises conditions. D'autant plus que parmi les stations de très mauvaise qualité, figure essentiellement une série de données provenant d'exutoires de STEP, qui présentent des charges relativement constantes. En outre, un nombre important de données proviennent d'échantillons mixtes, intégrés sur une journée.

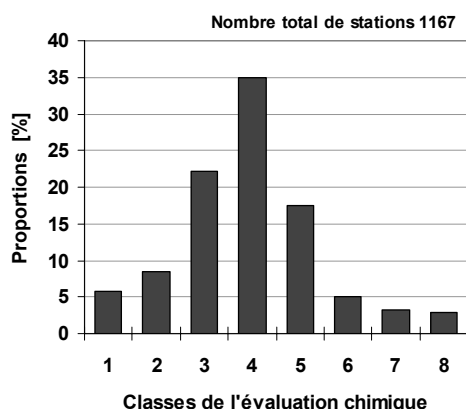
Tab. 5 > Valeurs de diagnostic utilisées, selon la classe chimique de qualité d'eau et en fonction du nombre de valeurs disponibles.

Classes de l'évaluation chimique	Nombre de valeurs disponibles	Valeurs de diagnostic
1.0 à 8.0	3 ou 4 valeurs	le 75 ^e centile
2.5 à 5.5	1 ou 2 valeurs	non retenues
1.5 à 2.5 ou 5.5 à 6.5	2 valeurs	valeur maximale
	1 valeur	non retenue
1.0 à 1.5 ou 6.5 à 8.0	1 ou 2 valeurs	valeur maximale

Sur la base des séries de données chimiques de la banque de données disponible, une évaluation chimique a pu être entreprise pour 1'167 stations. Pour réaliser la figure 4, les évaluations chimiques ont été arrondies à l'entier et réparties en 8 classes. La figure 4 montre qu'environ un tiers des sites d'étude ayant fait l'objet d'une appréciation, sont attribués à la classe 4, sur la base de l'évaluation chimique. Dans les classes extrêmes, 1 et 2 ainsi que 6 à 8, la disponibilité des données est nettement plus mauvaise que pour les classes 3 à 5.

Évaluation chimique des stations figurant dans la banque de données

Fig. 4 > Proportion de sites d'études par rapport aux classes de l'évaluation chimique.



La figure 5 montre le rapport entre les six paramètres sur lesquels repose l'évaluation chimique et les classes d'évaluation globale. Elle indique aussi les normes chimiques fixées pour les différents paramètres comme limites des niveaux de pollution 4 (bon) et 5 (moyen). Ces normes chimiques sont de 0.4 mg N- NH₄/l pour l'ammonium, de 0.05 mg N-NO₂/l pour le nitrite, de 6 mg N/l pour l'azote inorganique, de 0.07 mg P/l pour le phosphore total, de 26 mg/l pour le chlorure et de 4 mg C/l pour le COD.

Normes chimiques pour les six paramètres

Pour être exhaustif, la relation entre les classes de l'évaluation chimique globale et les paramètres non pris en considération pour l'évaluation, est donnée sur la figure 6.

La **DBO₅** différencie mal les classes 3, 4 et 5, qui sont les plus fréquentes aujourd'hui en Suisse et donc très importantes pour l'appréciation de la qualité de l'eau.

Les **concentrations d'oxygène** n'atteignent un faible niveau critique que pour les classes 7 et 8. Il est vrai qu'il faut prendre en considération le fait que les échantillons chimiques sont habituellement prélevés le matin et n'expriment donc pas le minimum d'oxygène de la fin de la nuit.

Le **sulfate** n'entre pas en ligne de compte comme indicateur d'impact humain, bien qu'on puisse penser que des teneurs élevées en sels agissent sur la composition des communautés de diatomées, étant donné que la concentration en sulfates peut dépasser 100 mg/l pour des raisons géologiques.

Fig. 5 > Relation entre les classes de l'évaluation chimique et les grandeurs statistiques des six paramètres sur lesquels repose l'évaluation.

75e et 90e centiles en partie coupés en raison de l'échelle des axes.

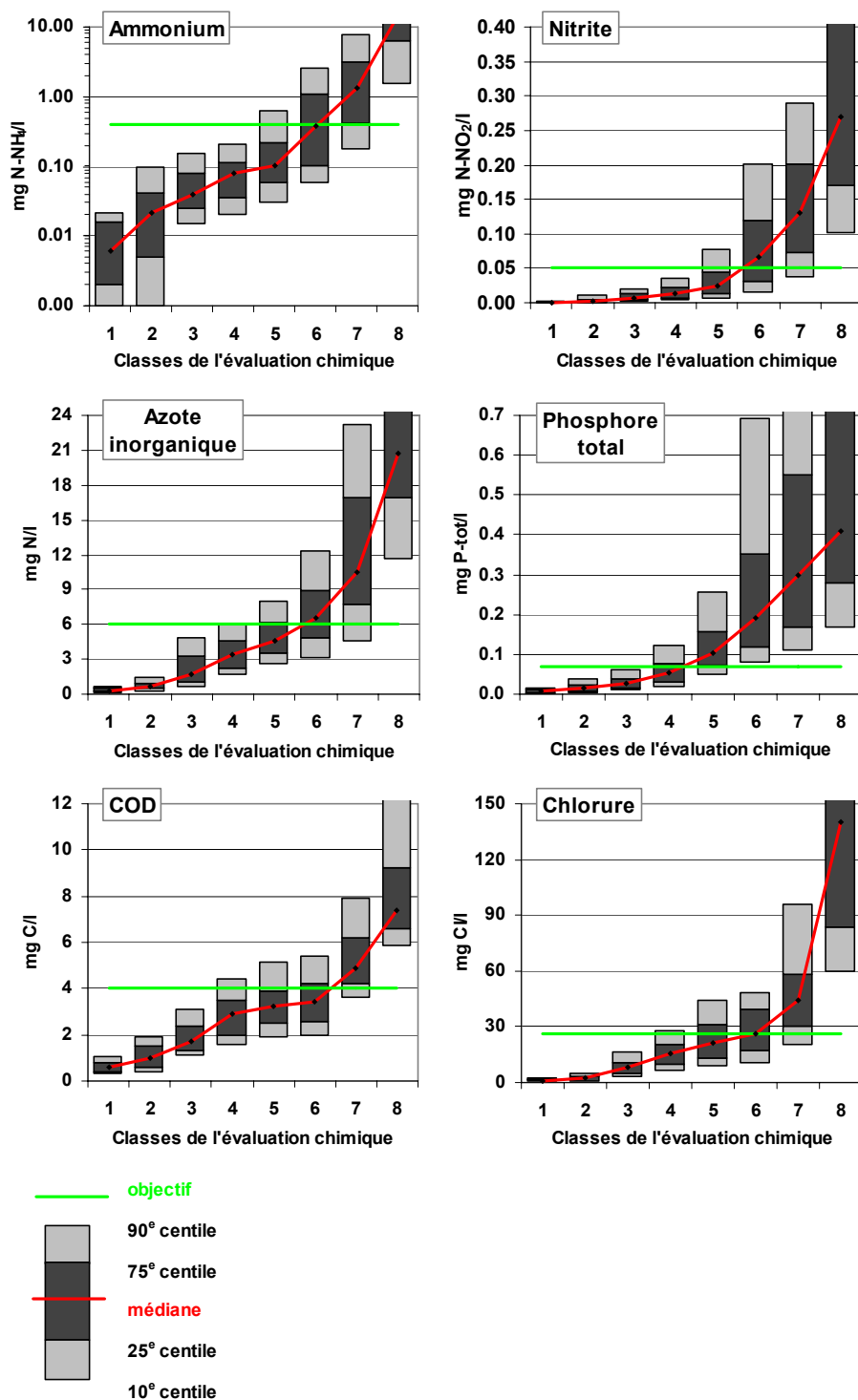
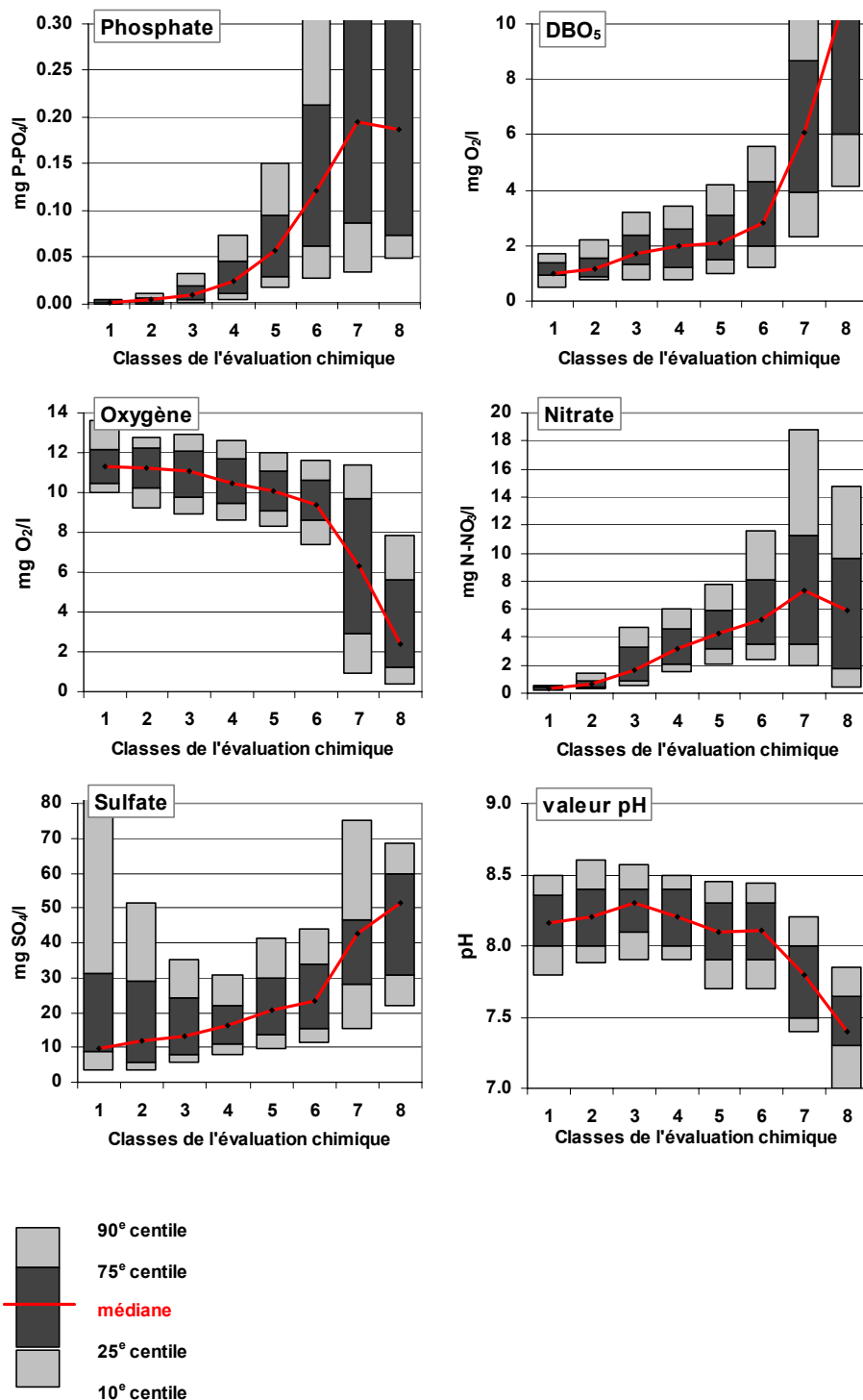


Fig. 6 > Relation entre les classes de l'évaluation chimique et les grandeurs statistiques de six paramètres non pris en compte dans l'évaluation.

75e et 90e centiles en partie coupés en raison de l'échelle des axes.



6.2

Indice des diatomées DI-CH

L'évaluation globale à partir des paramètres chimiques permet de caractériser l'état de la pollution dans un site d'étude. Le but de la présente méthode est de pouvoir entreprendre une appréciation comparable sur la base de la composition des diatomées périphytiques. Dans ce but, nous avons dû déterminer les préférences de chaque taxon sur la base de l'évaluation chimique globale. Pour l'étalonnage, seuls les dénombrements de diatomées portant au moins sur 300 valves ont été utilisés. Contrairement au premier étalonnage, les données issues de la thèse de Hürlimann (1993) n'ont pas été reprises pour deux raisons :

- celles-ci proviennent de conditions expérimentales sur substrats artificiels et
- des données provenant de rivières naturelles étaient disponibles en suffisance.

Après élimination de ces échantillons, 3'649 dénombrements restaient à disposition pour l'étalonnage, dont 1'167 avec une estimation chimique. Les préférences autoécologiques de chaque taxon présent dans au moins 10 échantillons et dont la fréquence relative dépasse 5% dans au moins un prélèvement, ont été définies. Dans ce but, les fréquences relatives de chacun de ces 188 taxons, ont été distribuées graphiquement par rapport aux valeurs des évaluations chimiques globales mesurées dans les mêmes sites. L'impression générale qui ressort de ces graphiques est fortement empreinte par les plus fortes fréquences relatives. Par ailleurs, le fait que les observations disponibles dans la banque de données ne sont pas réparties de manière uniforme le long du gradient de pollution, mais qu'elles sont plus fréquentes dans la gamme des charges moyennes autour de la classe 4 (fig. 4), influence également l'interprétation visuelle de ces graphiques. Pour cette raison, c'est également le 80^e centile des fréquences relatives des données rassemblées par classes qui a été représenté, ainsi que le nombre d'occurrences du taxon dans chaque classe de l'estimation chimique. Un exemple de ce type de graphique est donné par la figure 7 (voir aussi l'annexe A6.1).

Sur la base de ce genre de graphiques d'évaluation, de la longue expérience des auteurs quant aux préférences autoécologiques des différents taxons et partiellement de données de la littérature, une **valeur indicatrice D** a été attribuée à chaque taxon pour caractériser ses conditions de vie optimales. L'échelle de 1 à 8 a une précision de 0.5 unité ce qui donne en tout 15 niveaux possibles.

De plus, une valeur a été attribuée à chaque taxon pour caractériser sa représentativité en tant qu'organisme indicateur (**facteur de pondération G**). Les critères suivants ont été appliqués :

- | | |
|-----------------|--|
| Pondération 8 : | Très bons indicateurs. Amplitude écologique étroite dans des eaux de très bonne ou de très mauvaise qualité. Taxons très importants pour le diagnostic de qualité biologique des eaux. |
| Pondération 4 : | Très bons indicateurs. Amplitude écologique étroite (env. 80% de la présence totale limitée à env. 2 classes). |
| Pondération 2 : | Bons indicateurs. Amplitude écologique moyenne (env. 80% de la présence totale limitée à env. 3 classes). |

Détermination des préférences
des taxons sur la base de
l'évaluation chimique globale

Attribution d'une valeur
indicatrice D et d'un facteur de
pondération G à chaque taxon

Pondération 1 : Taxon à large amplitude écologique (4 classes ou plus) ou taxon dont l'attribution est incertaine, parce qu'il apparaît peu dans la base de données et que son attribution repose surtout sur les données de la littérature.

Pondération 0.5 : Formes abondantes peu représentatives et complexes d'espèces dont la différenciation taxonomique est insuffisantes ou délicate (p. ex. *Achnanthes minutissima*, *Fragilaria capucina* var. *Vaucheriae*).

Pour documenter les graphes d'évaluation autoécologiques des 188 taxons, une annexe séparée a été constituée (voir www.modul-stufen-konzept.ch et la présentation des graphes en annexe A6.1). La liste taxonomique complète avec les valeurs d'indication D et G se trouve en annexe A1. Ces données permettent maintenant de déduire l'état de la pollution d'une station sur la base de la composition d'un échantillon de diatomées (indice diatomique). Pour contrôler les valeurs indicatrices de chaque taxon, ses fréquences relatives ont été distribuées graphiquement par rapport aux valeurs de l'indice des diatomées, calculé chaque fois sans la part du taxon en question (figure 7, graphique d'en haut à droite). Cela a permis, surtout pour les taxons présents seulement de façon sporadique dans les sites d'étude avec données chimiques, de contrôler que l'attribution soit confirmée sur la base de l'ensemble des données.

Déduction de l'état de la pollution
à partir des valeurs d'indication D
et G

L'**indice des diatomées** est calculé selon la formule de Zelinka & Marvan (1961), qui a trouvé une large application en bioindication :

$$DI-CH = \frac{\sum_{i=1}^n D_i G_i H_i}{\sum_{i=1}^n G_i H_i}$$

Calcul de l'indice des diatomées

où:

DI-CH Indice suisse des diatomées

D_i Attribution du taxon i sur la base de sa préférence autoécologique (valeur indicatrice D)

G_i Pondération du taxon i

H_i Fréquence relative du taxon i en pour cent (= nombre de valves recensées du taxon i divisé par le nombre total de valves de l'échantillon étudié)

n Nombre de taxons de l'échantillon

Fig. 7 > Exemple de graphique d'évaluation autoécologique établis pour l'estimation des valeurs D et G. Les flèches montrent les conditions écologiques optimales du taxon.

Pour les autres taxons, voir l'annexe A6.1.

Navicula atomus

DVNR 6117

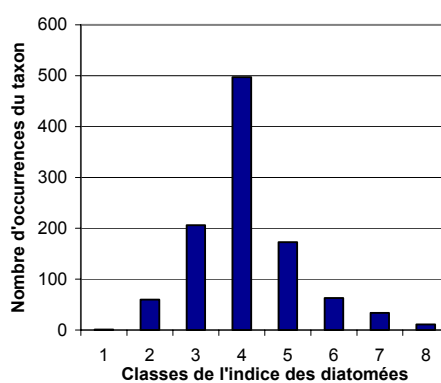
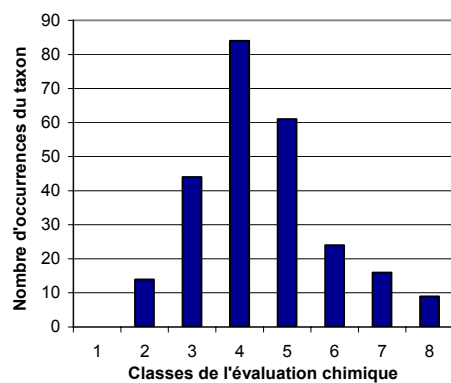
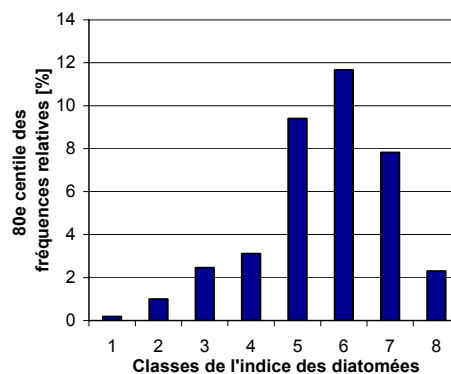
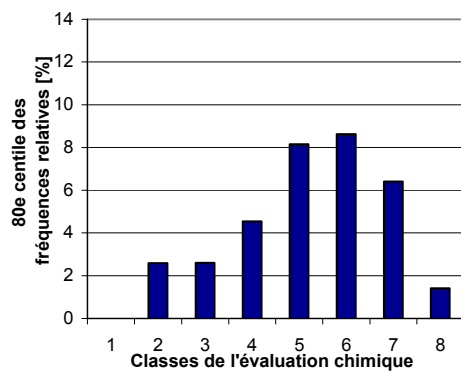
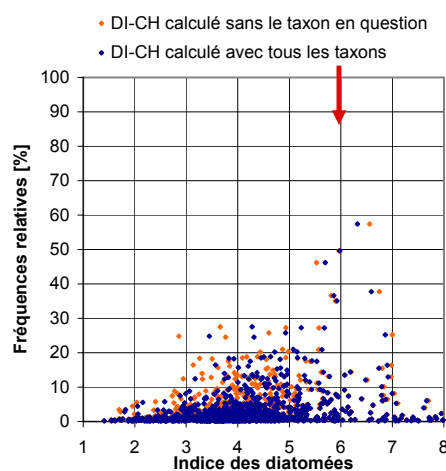
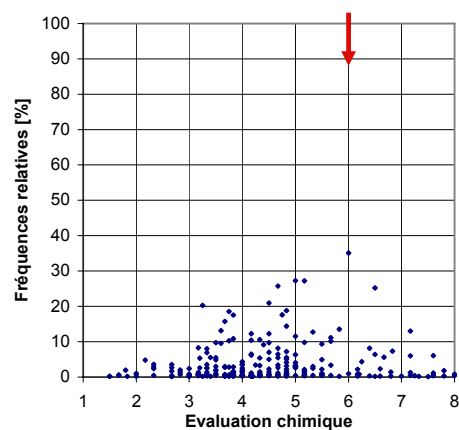
valeur D = 6

valeur G = 1

Echantillons avec données disponibles

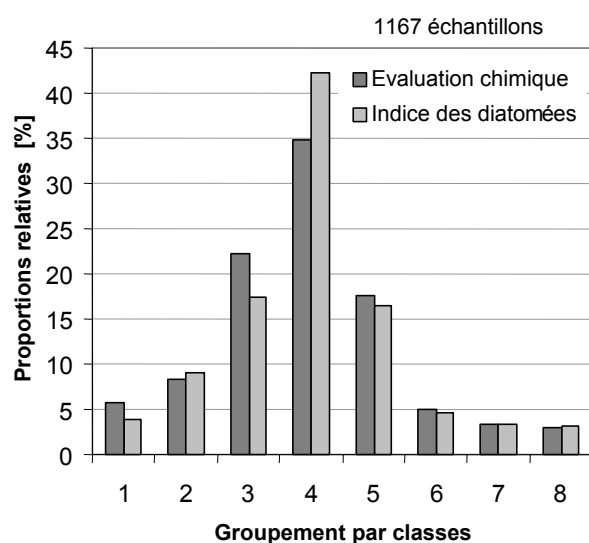
Echantillons avec données sur les diatomées

sur les diatomées et la chimie



On peut déduire de la figure 8 que 42% des sites étudiés ont un indice des diatomées de 4. Avec 35%, la part de la classe 4 dans l'évaluation chimique est un peu inférieure. L'indice des diatomées tend donc un peu plus vers la classe 4 que l'évaluation chimique.

Fig. 8 > Proportion des classes lors de l'appréciation des sites étudiés avec l'évaluation chimique et l'indice des diatomées.



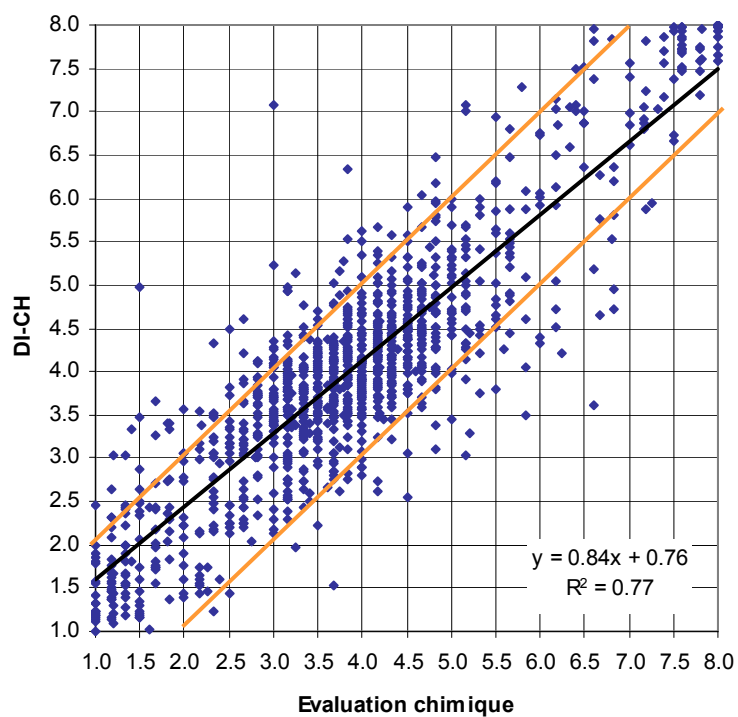
Dans l'ensemble, il existe cependant une bonne corrélation entre l'évaluation chimique des sites et l'indice des diatomées (fig. 9). Surtout si l'on tient compte des faits suivants :

Bonne corrélation entre
l'évaluation chimique et l'indice
des diatomées

- > L'exactitude taxonomique des déterminations n'a pu que partiellement être vérifiée et corrigée a posteriori. La liste des taxons les plus importants pour l'étude des cours d'eau suisses avec les planches correspondantes, ainsi que la poursuite annuelle, depuis 2002, de rencontres consacrées à la détermination des diatomées dans le cadres des études suisses, permettront d'améliorer encore la qualité globale des identifications.
- > Les mesures ponctuelles des paramètres chimiques et la concordance limitée, temporelle et en partie aussi spatiale, entre les sites d'échantillonnage chimique et biologique, ne permettent qu'une caractérisation grossière des conditions de vie qui ont marqué les populations de diatomées.
- > Des données d'études complémentaires de sites non pollués et fortement pollués pourraient permettre une classification plus sûre des espèces indicatrices de ces niveaux de pollution.

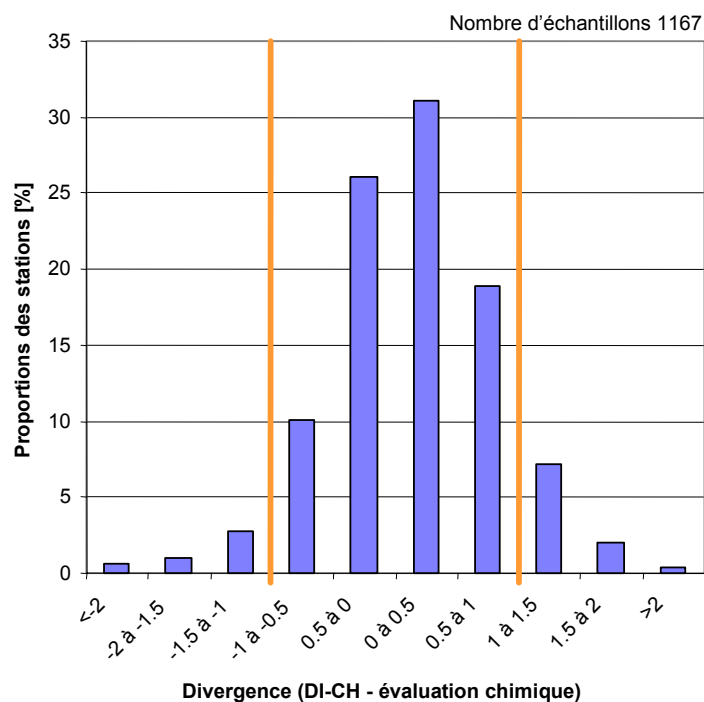
Fig. 9 > Relation entre l'évaluation chimique des sites et l'indice des diatomées DI-CH.

La ligne continue est la droite de régression. Les valeurs corrélées, qui se trouvent entre les deux droites oranges, présentent un écart inférieur à une unité.



Pour 57% de tous les échantillons, nous avons trouvé une différence inférieure à 0.5 unité entre l'appréciation chimique des sites et l'indice des diatomées, ce qui peut être qualifié de très bonne concordance (fig. 10). Seuls 14% des échantillons présentent une différence supérieure à une unité.

Fig. 10 > Répartition de la fréquence des différences entre l'indice des diatomées et l'évaluation chimique.



6.3 Classes d'état de santé et relation avec la qualité de l'eau

Lors de la détermination des limites de classes de l'évaluation chimique des stations, nous avons veillé à une interprétation simple des résultats relatifs à la qualité chimique de l'eau. Selon le système modulaire gradué, il en résulte une répartition en cinq classes d'état (tab. 6). Sur la base de notre méthode, comme les figures 5 et 9 le montrent, on peut appliquer les mêmes critères d'évaluation pour l'indice chimique et pour l'indice des diatomées afin de caractériser l'état de la pollution. La répartition de l'indice des diatomées en cinq classes d'état ainsi que leur interprétation figurent au chap. 3.4.

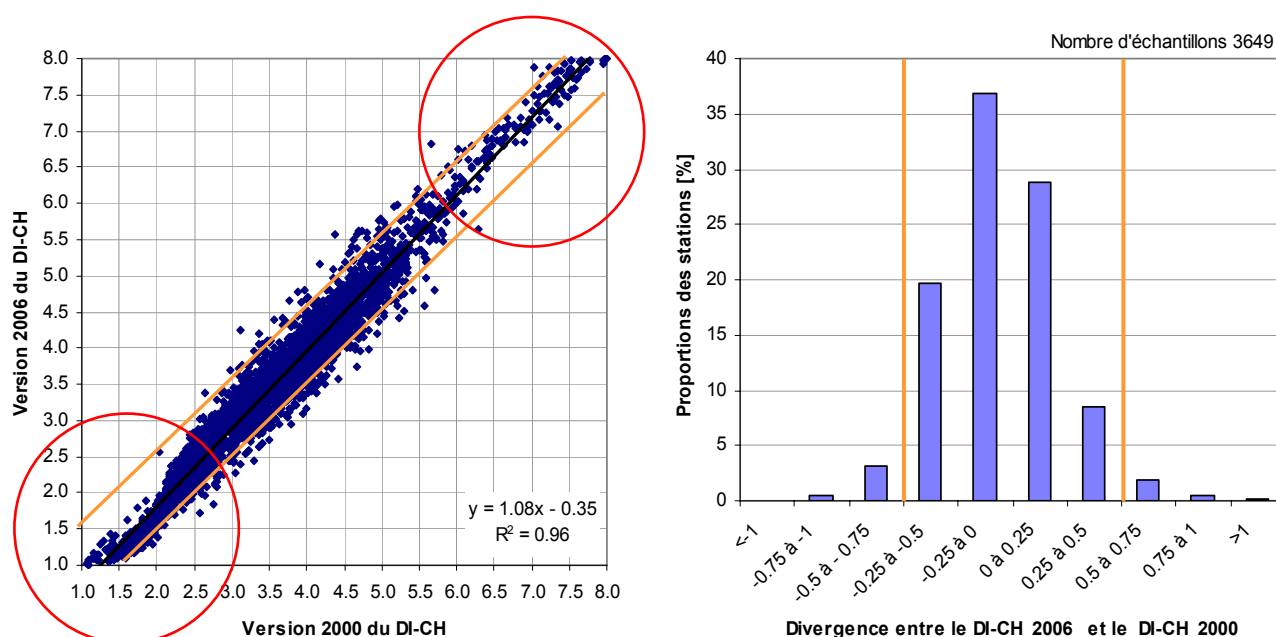
7 > Valorisation des résultats obtenus jusqu'à présent et exemples d'application

7.1 Comparaison entre l'ancien et le nouvel indice des diatomées DI-CH

La comparaison entre l'ancien (version 2000) et le nouvel indice DI-CH est réalisée sur la base de l'ensemble des 3'649 échantillons de diatomées. La confrontation entre les deux indices est présentée sur la figure 11. Dans l'ensemble, le nouvel indice se comporte comme l'ancien. Ainsi, 93.5% de toutes les comparaisons ne dévient que d'une demi-unité de l'indice et 99.9% que de moins d'une unité. Cependant, aux deux extrémités de l'échelle répartie sur 8 unités, le nouvel indice montre de légères déviations. Au bas de l'échelle (valeurs comprises entre 1 et environ 2.5) le nouvel indice donne des indications un peu meilleures, en haut de l'échelle (valeurs entre 6 et 8), en comparaison avec l'ancien indice, le nouveau est plus sévère.

Fig. 11 > Comparaison entre le premier étalonnage (version 2000) et le nouvel étalonnage de l'indice des diatomées DI-CH (version 2006).

La ligne noire représente la fonction de régression linéaire. Les couples de comparaison situés entre les deux lignes orange présentent une déviation plus petite qu'une demi-unité de l'indice. Dans les domaines entourés par les cercles rouges, les deux étalonnages ont des indications légèrement divergentes.



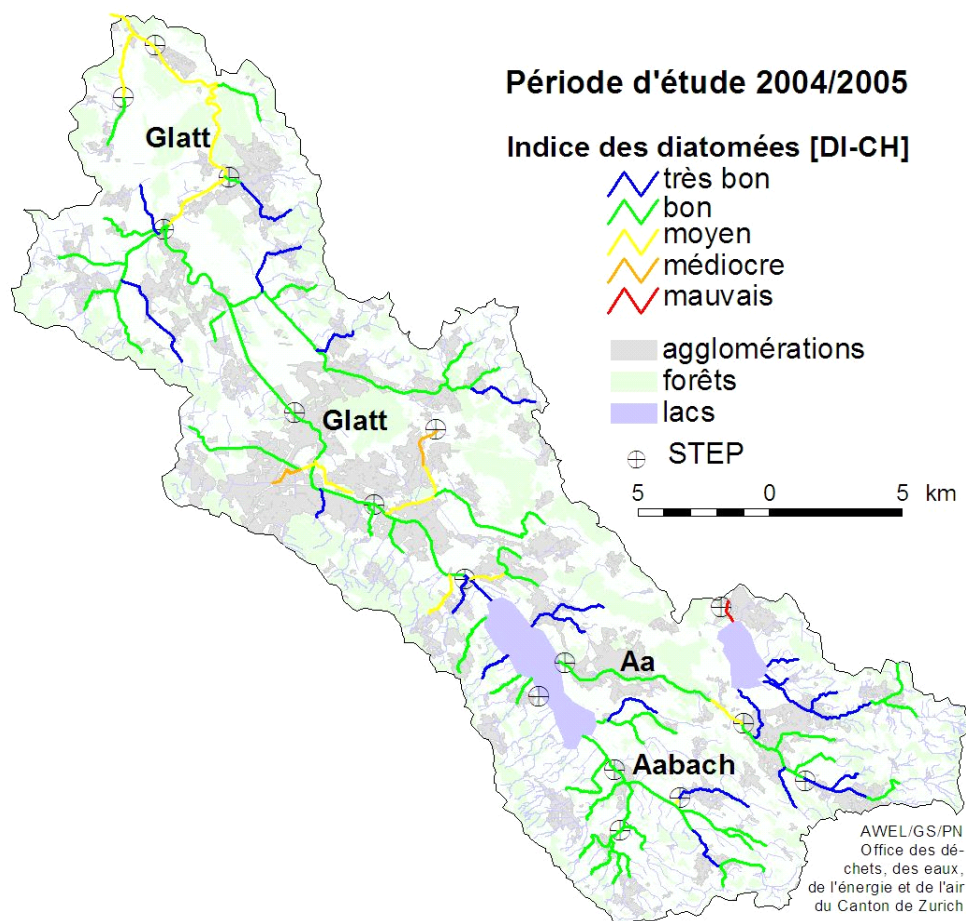
7.2

Représentations géographiques

Les représentations géographiques sont très appropriées à la valorisation et à l'expression de changements de charge le long des cours d'eau. L'interprétation des résultats est également facilitée par les représentations géographiques (par exemple, la figure 12 montre l'impact possible des STEP sur la charge des cours d'eau, ou l'effet de dilution engendré par les apports d'affluents propres).

Fig. 12 > Diagnostic des eaux courantes dans le bassin versant de la Glatt et du Greifensee au moyen des diatomées.

Les cinq classes de qualité du DI-CH sont représentées.



7.3

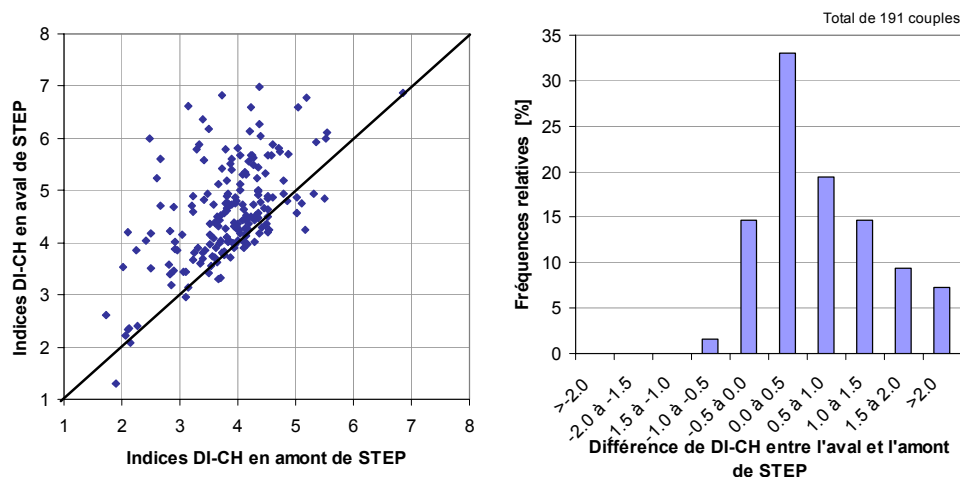
Survol des variations de charge produites par les STEP

Les communautés de diatomées réagissent sensiblement aux variations de qualité chimique des eaux. Ce fait est bien démontré, en aval des déversoirs d'eau d'épuration. Dans l'hypothèse que même des eaux usées bien épurées contiennent encore des restes de pollution, on doit s'attendre qu'en aval des exutoires, les indications de qualité tant chimique, que biologique obtenue par les diatomées, doivent être moins bonnes qu'en amont. Les variations de qualité biologique basées sur l'indice DI-CH, mesurées entre l'amont et l'aval de STEP, sont représentées sur la figure 13. On remarque, qu'en comparant ainsi 191 couples de prélèvements, 84% d'entre eux démontrent que les eaux sont plus chargées en aval qu'en amont. Des améliorations sont perceptibles dans 16% des cas, dues au moins partiellement à de la dilution, par apports d'affluents propres. Dans un peu plus de 50% des cas, la détérioration est moindre qu'une unité de l'indice DI-CH, tandis que dans environ 30% des cas, la dégradation dépasse une unité de l'indice. En conséquence, au point de vue de la qualité des eaux indiquée par les diatomées, les STEP sont des sources importantes de charge polluante. Parmi les 3'649 prélèvements de diatomées étudiés, 20% d'entre eux livrent un indice DI-CH de plus de 4,5 (classes de qualités moyenne, médiocre e et mauvaise). A ces stations, les objectifs écologiques définis par l'OEaux, annexe 1, ne sont pas respectés. Un grand nombre de ces cas provient sans doute de déversements d'eau d'épuration. Dans les eaux courantes de Suisse, d'autres sources importantes connues de charges ponctuelles ou diffuses proviennent du drainage des routes, des systèmes d'évacuation urbains (déversoirs de crues, fuites, etc.), de l'agriculture (engrais, ruissellement, pesticides, etc.) et de l'élimination des déchets (eaux usées de décharges, eaux de percolation). Les données à disposition ne permettent pas d'attribuer le poids relatif de charge à chacun de ces facteurs de nuisance. Pour réaliser cela, il serait nécessaire d'identifier pour chaque station, les causes probables d'impact.

Les STEP portent atteinte à la qualité de l'eau indiquée par les diatomées

Fig. 13 > Comparaison des charges polluantes entre l'amont et l'aval de déversements d'eau d'épuration, relevées par l'indice DI-CH.

Lorsque plusieurs stations ont été étudiées en aval de certaines STEP, celles aux charges maximales ont été retenues pour cette comparaison.



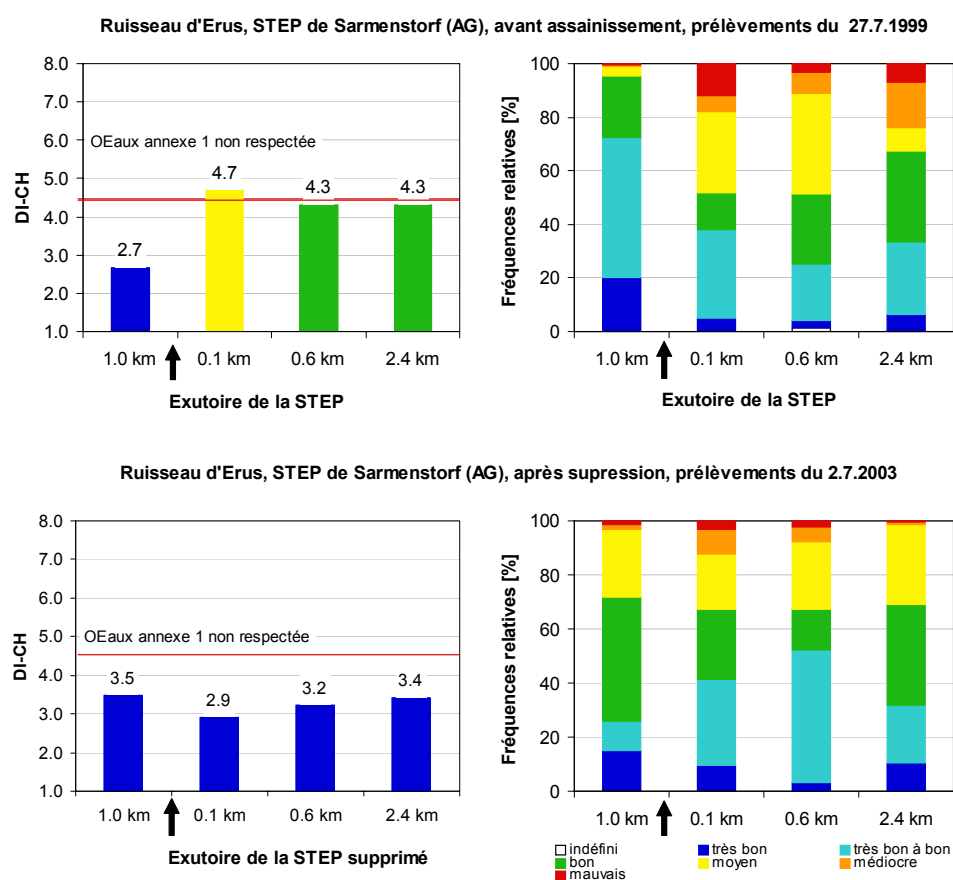
7.4

Variations de charge le long d'un cours d'eau et au fil du temps, suite à la suppression d'une station d'épuration

L'eau d'épuration de la STEP de Sarmentorf est conduite partiellement depuis le 15 décembre 2001, puis définitivement depuis le 1^{er} octobre 2003, à la STEP de Wohlen. Ainsi, le ruisseau d'Erus a été déchargé, ce qui a été démontré le 2 juillet 2003, par le diagnostic de qualité biologique des eaux, posé à l'aide des diatomées. La figure 14 présente à la fois les valeurs de l'indice DI-CH et les fréquences des groupes d'indicateurs, le long du cours d'eau. Ces groupes d'indicateurs sont basés sur les valeurs D des espèces utilisées pour le calcul du DI-CH (annexe A1). Ces groupes sont formés de la même manière que les groupes d'espèces différentielles (Krammer & Lange-Bertalot 1997) : ils représentent les sommes des fréquences relatives des taxons de même valeur indicatrice D. Ce type de représentation permet d'illustrer des différences et des changements de la composition des communautés de diatomées.

Fig. 14 > Changements de charge le long du ruisseau d'Erus avant et après la suppression de la STEP de Sarmentorf (env. 4'500 eh).

A gauche : répartition des valeurs de DI-CH. A droite : représentation des sommes des fréquences des groupes d'indicateurs.



Groupes d'indicateurs : très bon = espèces à valeur D de 1 à 2, très bon à bon = 2,5 à 3, bon = de 3,5 à 4, moyen = de 4,5 à 5, médiocre = de 5,5 à 6, mauvais = de 6,5 à 8.

7.5

Comparaison entre des relevés printaniers et automnaux

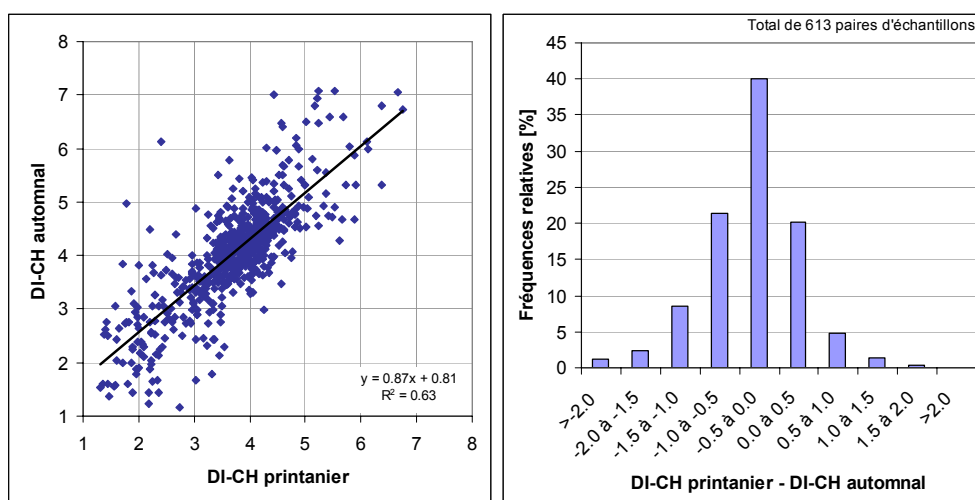
La comparaison entre des relevés printaniers et automnaux est présentée sur la figure 15. Pour cette comparaison, 613 couples de prélèvements étaient à disposition, dans lesquels les diatomées ont été étudiées au printemps et en automne de la même année. Une grande partie de ces couples proviennent du Plateau et des Préalpes. Dans les Alpes, seules quelques stations ont été étudiées deux fois la même année. D'après la figure 15, on peut voir que dans 60% des cas, les couples présentaient une différence de moins d'une demi-unité de l'indice, tandis que 86% des cas présentaient une différence de moins d'une unité. La répartition montre cependant aussi, que 75% des diagnostics sont moins bons en automne qu'au printemps. Ces moins bons résultats automnaux peuvent être liés à plusieurs causes : l'activité agricole intense à cette saison (engraisements, moissons, ruissellements, etc.) ou des débits moindres de période d'étiage (dilutions et mélanges moindres). Par opposition, on pourrait attendre que dans le domaine alpin de tourisme hivernal, la charge printanière soit plus élevée qu'en automne. Cela pour deux raisons : par basse température, les STEP tolèrent moins bien qu'en été un apport accru d'eau usée, et par faible débit, les eaux sont moins diluées.

Moins bons résultats en automne

Dans quelques cas, une différence marquée entre les deux saisons est significative par rapport aux objectifs écologiques de l'OEaux, annexe 1. Ainsi, pour 102 des 613 couples (16%), le prélèvement automnal ne satisfait pas aux objectifs légaux, alors que le prélèvement printanier est dans les normes. L'inverse a été relevé dans 10 cas sur 613 (1,6%). En conséquence, si l'on veut documenter l'état de l'eau au pire de sa charge polluante, qu'avec un seul prélèvement annuel, un programme automnal est préférable, en tout cas sur le Plateau suisse.

Rôle de la période des relevés sur les résultats écologiques obtenus

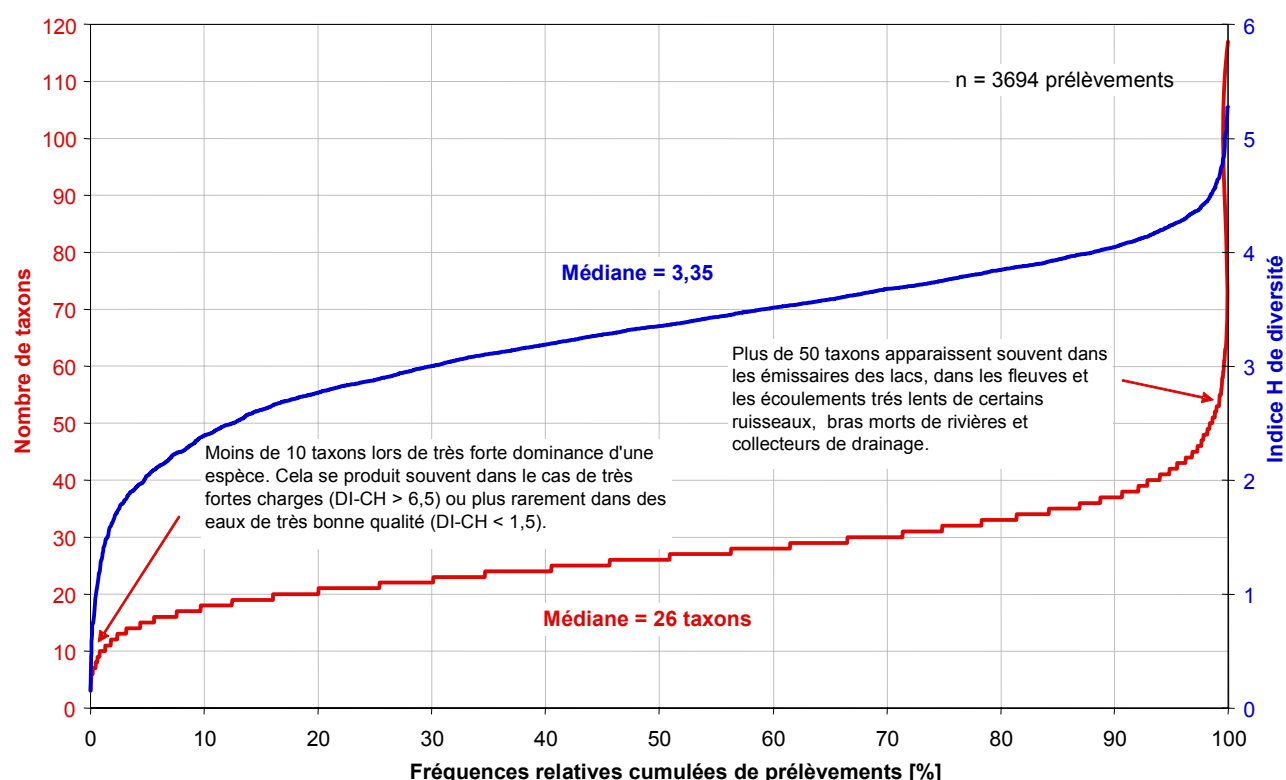
Fig. 15 > Comparaison entre les relevés printaniers (de janvier à avril compris) et automnaux (d'août à novembre y compris), basée sur les valeurs de l'indice DI-CH.



7.6 Tour d'horizon sur la flore, la diversité et l'indice DI-CH

Sur la base des données disponibles auprès d'AquaPlus, 708 taxons ont été trouvés jusqu'à présent dans les eaux courantes suisses. Le 50% des 3694 relevés de diatomées utilisés pour le nouvel étalonnage présentait des listes de 20 à 30 taxons (médiane de 26 taxons, fig. 16). Moins de 10 taxons et plus de 50 par prélèvement n'ont été trouvés que dans très peu d'échantillons. La diversité des mêmes communautés atteignait dans un grand nombre de cas des valeurs comprises entre 2,75 et 3,75 (médiane de 3,35). Des diversités plus faibles que 2,0 et plus grandes que 4,5 étaient rares (fig. 16). Une flore réduite et une diversité amoindrie apparaissaient donc, lorsqu'un taxon dominait. Ce cas a essentiellement été trouvé dans des eaux fortement chargées (DI-CH > 6,5), ou plus rarement dans des eaux très propres (DI-CH < 1,5). Des nombres élevés de taxons et par là même de fortes diversités ont été trouvés dans certains émissaires de lacs, dans des fleuves et dans les eaux très calmes de certains ruisseaux, bras morts de rivières et collecteurs de drainage.

Fig. 16 > Répartition en fréquences relatives des nombres de taxons et des indices H de diversité selon Shannon et Weaver (1949) dans l'ensemble des prélèvements de diatomées utilisés pour l'étalonnage du DI-CH.



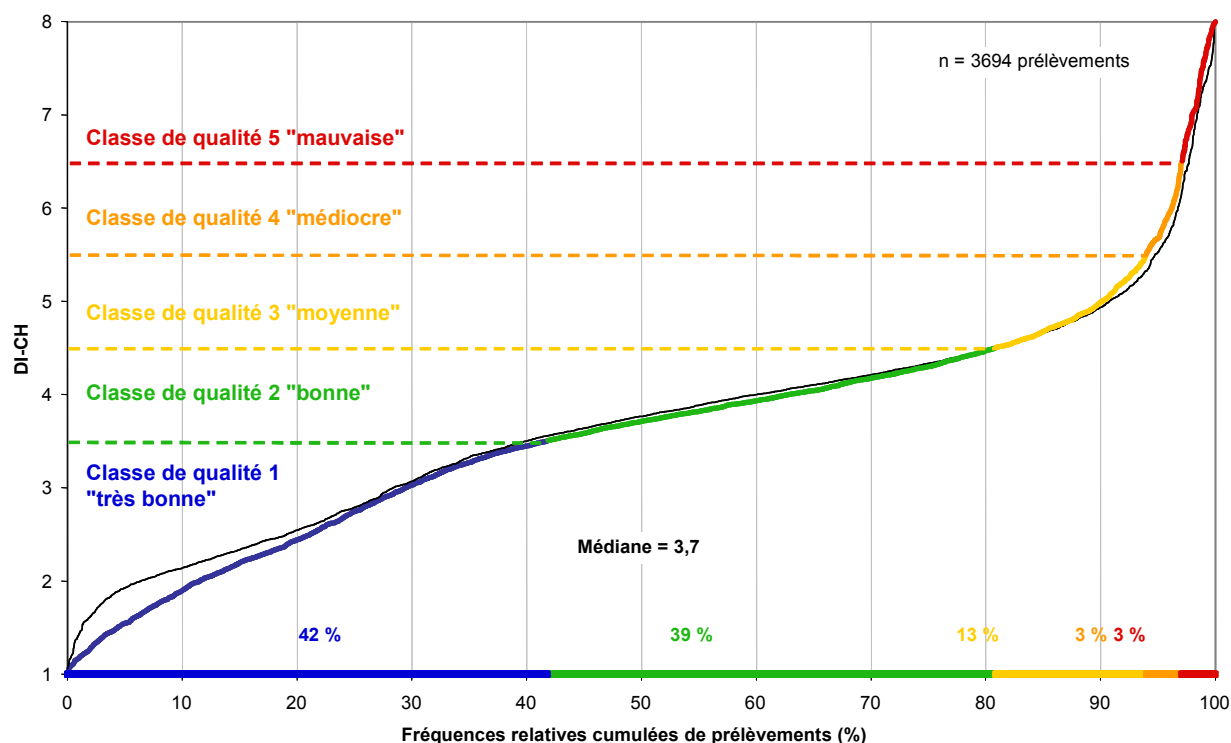
Les valeurs des indices diatomiques DI-CH (ancien et nouvel étalonnage), livrés pour l'ensemble des échantillons utilisés, sont distribuées en % sur la figure 17. Dans cette série, 81% des prélèvements ont donné des valeurs de 1,0 à 4,5 (médiane 3,7). Des valeurs de 4,5 à 8,0 ont été trouvées dans 19% d'entre eux. Cependant, les conditions illustrées par la figure 17 ne représentent pas l'état de santé actuel des eaux courantes suisses. En effet, la répartition au cours du temps des échantillons de la banque de données, couvre une période beaucoup trop longue (essentiellement entre 1995 et 2005, ainsi que 36 échantillons datés entre 1847 et 1985). Par ailleurs, le choix des eaux étudiées n'a pas été laissé au hasard. Cependant, la proportion des cinq classes de qualité est tout de même une base utilisable, au point de vue de l'interprétation et du choix des prélèvements futurs. Aussi est-il certain que les tronçons très dégradés de rivières, avec de valeurs DI-CH de 5,5 à 8,0 (classes 4 et 5 de qualité), sont rares en Suisse. Ces cas sont très probablement des endroits dans lesquels les objectifs de qualité des eaux (OEaux, annexe 2) ne sont pas respectés.

Sur la figure 17, les valeurs des deux étalonnages de l'indice DI-CH sont distribuées en parallèle (voir aussi le paragraphe 7.1). Les répartitions des valeurs des deux versions de l'indice se recouvrent presque, sauf aux deux extrémités des distributions.

Proportion des cinq classes de qualité pour interpréter et choisir les prélèvements

Fig. 17 > Répartition en % des valeurs de l'indice DI-CH livrées par l'ensemble des échantillons utilisés.

La courbe noire fine représente la répartition des valeurs selon la première version de l'indice. En outre, les limites des classes sont représentées, avec les fréquences en %, des échantillons situés dans chaque classe de qualité.



> Bibliographie

- Arndt, U., Nobel, W. & Schweizer, B., 1987. Bioindikatoren. Möglichkeiten, Grenzen und ihre Erkenntnisse. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.
- Backhaus, D., 1991. Use of periphyton as a monitor for water quality changes and as substrate for toxicity test in Germany. 111- 117. In: Whitton, B.A., Rott, E. & Friedrich, G., (Hrsg.), Use of algae for monitoring rivers. Institut für Botanik, Universität Innsbruck.
- Charles, D.F. & Whitehead, D.R., 1986. The PIRLA project: Paleoeological investigations of recent lake acidification. *Hydrobiologia* 143: 13-20.
- Coring, E., Schneider, S., Hamm, A. & Hofmann, G. 1999. Durchgehen des Trophiesystem auf der Grundlage der Trophieindikation mit Kieselalgen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK). 219 S. + Anhang.
- Douglas, B. 1958. The ecology of the attached diatoms and other algae in a small stony stream. *J. Ecol.* 46: 295-322.
- Elber, F. & Schanz, F. 1990. Algae other than diatoms affecting the density, species richness and diversity of diatom communities in rivers. *Arch. Hydrobiol.* 119 (1): 1-14.
- Erni, G. 1987. Systematische und ökologische Untersuchungen über die Algenflora in Bergbächen des Kantons Graubünden (CH). Diplomarbeit der Universität Zürich, 90 S.
- LEaux: Loi fédérale sur la protection des eaux du 24 Janvier 1991. RS 814.20.
- Hürlimann, J. 1993. Kieselalgen als Bioindikatoren aquatischer Ökosysteme zur Beurteilung von Umweltbelastungen und Umweltveränderungen. Ph.D. diss., Universität Zürich. 118 S.
- Hürlimann, J., Elber, F. & Niederberger, K. 1999a. Use of algae for monitoring rivers: an overview of the current situation and recent developments in Switzerland. In: Prygiel, J., Whitton, B.A. & Bukowska, J. 1999: Use of algae for monitoring rivers III. Agence de l'Eau Artois-Picardie, Douai Cedex, Frankreich, 39-56.
- Hürlimann, J., Keller, P., Elber, F. Niederberger, K. & Lotter, A.F. 1999b. Phosphorrekonstruktion und daraus abgeleitete Sanierungsziele für eutrophe Seen. Am Beispiel des Wilersees (Kanton Zug). *Gas Wasser Abwasser* 79 (6): 467-476.
- Hürlimann, J. & Schanz, F. 1993. The effects of artificial ammonium enhancement on riverine periphytic diatom communities. *Aquatic Sciences* 55 (1): 40-64.
- Hustedt, F., 1930. Bacillariophyta (Diatomeae). In: Pascher, A., (Hrsg.), *Süßwasserflora* 10, G. Fischer, Jena.
- Iserentant, R., Ector, L., Straub, F. & Hernandez-Becerril, D.U., 1999. Méthodes et techniques de préparation des échantillons de diatomées. In : L. Ector, A. Loncin & L. Hoffmann (eds). *Compte rendu du 17e colloque de l'Association des diatomistes de langue française, Cryptogamie : Algologie* 20(2), 143-148.
- Joy, C.M. & Balakrishnan, K.P., 1990. Effect of fluoride on axenic culture of diatoms. *Water, Air and Soil Pollution* 49: 241-250.
- Kelly, M.G., Cazaubon, A. Coring, E., Dell'Uoma, A., Ector, L., Goldsmith, B., Guasch, H., Hürlimann, J., Jarlmann, A., Kawecka, B., Kwandrans, J., Laugaste, R., Lindstrom, E.-A., Leitao, M., Marvan, M., Padisak, J., Pipp, E., Prygiel, J., Rott, E., Sabater, S., van Dam, H. & Vizinet, J. 1998. Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe. *Journal of applied Phycology* 10: 215-224.
- Kingston, B.C. & Birks, H.J.B., 1990. Dissolved organic carbon reconstructions from diatom assemblages in PIRLA project lakes, North America. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 327: 279-288.
- Krammer, K. 1997a. Die cymbelloiden Diatomeen. Eine Monographie der weltweit bekannten Taxa. Teil 1. Allgemeines und *Encyonema* Part. *Bibliotheca Diatomologica* Band 36, 390 p.
- Krammer, K. 1997b. Die cymbelloiden Diatomeen. Eine Monographie der weltweit bekannten Taxa. Teil 2. *Encyonema* part., *Encyonopsis* and *Cymbellopsis*. *Bibliotheca Diatomologica* Band 37, 469 p.
- Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 1997a. Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer, D., (eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, 2 (1), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 2e éd., 876 p.
- Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 1997b. Bacillariophyceae. 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer, D., (eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, 2 (2), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 2e éd., 611 p.
- Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 2000. Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiae. In: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. & Mollenhauer, D., (eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, 2 (3), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 2e éd., 576 p.
- Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 2004. Bacillariophyceae. 4. Teil: Achnanthaceae, kritische Ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema*. In: Ettl, H., Gärtner, G., Heynig, H. & Mollenhauer, D., (eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, 2 (4), Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2e éd., 468 p.

- Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 2000. Bacillariophyceae. 5. Teil : English and french translation of the keys. In : Büdel, B., Gärtner, G., Krienitz, L., Lokhorst, G.M. (eds.), Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2 (5), Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2 (4), Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2e éd., 599 p.
- Krammer, K. 2000. The genus *Pinnularia*. Diatoms of Europe 1, 703 p.
- Krammer, K. 2002. *Cymbella*. Diatoms of Europe 3, 584 p.
- Krammer, K. 2003. *Cymboppleura*, *Delicata*, *Navicymbula*, *Gomphocymbellopsis*, *Afrocybella*. Diatoms of Europe 4, 530 p.
- Kreeb, K.H., 1990. Methoden zur Pflanzenökologie und Bioindikation. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York.
- Kupe, L. 2005. Untersuchung von Kieselalgen der Töss oberhalb und unterhalb der Einleitstelle der Kläranlage Bauma-Saland der Jahre 1996, 1997 und 2005. Titel provisorisch, Universität Zürich.
- Lange-Bertalot, H., 1978. Diatomeen-Differentialarten anstelle von Leitformen: ein geeigneteres Kriterium der Gewässerbelastung. Arch. Hydrobiol., Suppl. 51: 393-427.
- Lange-Bertalot, H., 1979a. Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation. Nova Hedwigia, Beiheft 64: 285-304.
- Lange-Bertalot, H., 1979b. Toleranzgrenzen und Populationsdynamik benthischer Diatomeen bei unterschiedlich starker Abwasserbelastung. Arch. Hydrobiol. Suppl. 56: 184-219.
- Lange-Bertalot, H. 1993. 85 neue Taxa und über 100 weitere neu definierte Taxa ergänzend zur Süßwasserflora von Mitteleuropa Vol. 2/1-4. Bibliotheca Diatomologica Band 27, Berlin.
- Lange-Bertalot, H. & Moser, G. 1994. *Brachysira* - Monographie der Gattung. Bibliotheca Diatomologica Band 29, 212 p.
- Lange-Bertalot, H. & Metzeltin, D. 1996. Annotated Diatom Micrographs: Oligotrophie-Indikatoren. Iconographia Diatomologica. 2. 390 p.
- Lange-Bertalot, H. 2001. *Navicula sensu stricto*, 10 Genera separated from *Navicula sensu lato* Frustulia. Diatoms of Europe 2, 526 p.
- Lotter, A.F. 1998. The recent eutrophication of Baldeggersee (Switzerland) as assessed by fossil diatom assemblages. The Holocene, 8: 395-405.
- Lotter, A.F., Birks, H. J. B., Hofmann, W., & Marchetto, A., 1998. Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. II. Nutrients. Journal of Paleolimnology, 19: 443-463.
- Nagel, U., 1991. Bioindikation. Lebewesen zeigen uns den Zustand unserer Umwelt. Lehrmittelverlag des Kantons Zürich, Zürich.
- Niederhauser, P. & Schanz, F. 1993. Effect of nutrient (N, P, C) enrichment upon the littoral diatom community of an oligotrophic high-mountain lake. Hydrobiologia 269/270: 453-462.
- Niederhauser, P. 1993. Diatomeen als Bioindikatoren zur Beurteilung der Belastung elektrolytarmer Hochgebirgsseen durch Säuren und Nährstoffe. Dissertation Universität Zürich, 110 S.
- Norton, T., Melkonian, M. & Andersen, R. 1996. Algal biodiversity. Phycologia 35: 308-326.
- OEAux: Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998. RS 814.201.
- OFEFP (Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage) 1993. Koordinierte biologische Untersuchungen im Hochrhein 1990. Part III: Aufwuchs-Mikrophyten. BUWAL Schriftenreihe Umwelt Gewässerschutz, No. 196, Bern. 15 S. + Anhang.
- OFEFP, 1998. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse : Système modulaire gradué. L'environnement pratique. Informations concernant la protection des eaux no 26, 41 p.
- OFEFP, 2002a. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Diatomées niveau R (région). Version provisoire de janvier 2002, 111 pages.
- OFEFP, 2004. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Module Chimie. Analyses physico-chimiques. Niveaux R et C. L'environnement pratique. Informations concernant la protection des eaux (projet), 48 pages.
- Oehen, B., 1991. Der Einfluss von Ammonium auf periphytische Kieselalpengemeinschaften. In situ-Versuche in der Limmat. Diplomarbeit an der Universität Zürich.
- Otto, A., 1987. Entwicklung eines standardisierbaren Aufwuchstests zur gewässertoxikologischen Bewertung von Chemikalien. BMFT-Forschungsprojekt «Methoden zur ökotoxikologischen Bewertung von Chemikalien». Abschlussbericht z. Vorhaben 03 7337, Koblenz.
- OFEV, 2007. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Aspect général. L'environnement pratique n° 0701. Office fédéral de l'environnement. 43 pages.
- Prygiel, J., Whitton, B.A. & Bukowska, J. 1999: Use of algae for monitoring rivers III. Agence de l'Eau Artois-Picardie, Douai Cedex, Frankreich, 271 S.
- Reichardt, E. 1999. Zur Revision der Gattung Gomphonema. Die Arten um *G. affine/insigne*, *G. angustatum/micropus*, *G. acuminatum* sowie gomphonemoide Diatomeen aus dem Obergliozän in Böhmen. Iconographia Diatomologica 8, 203 p.
- Round, F., Crawford, R. & Mann, D. 1990. The Diatoms. Biology & Morphology of the genera. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

- Rott, E., Hofmann, G., Pall, K., Pfister, P. & Pipp, E. 1997. Indikationslisten für Aufwuchsalgen in österreichischen Fließgewässern. Teil 1: Saprobielle Indikation. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaftskataster, Wien, 73 S.
- Rott, E., van Dam, H., Pipp, E., Pall, K., Pfister, P., Binder, N. & Ortler, K. 1999. Indikationslisten für Aufwuchsalgen in österreichischen Fließgewässern. Teil 2: Trophieindikation sowie geochemische Präferenz; taxonomische und toxikologische Anmerkungen. Hrsg. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaftskataster, Wien, 248 S.
- Schiefele, S & Kohmann F. 1993. Bioindikation der Trophie in Fließgewässern. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Forschungsbericht Nr. 102 01 504, 211 pp. + appendix.
- Schmedtje, U., Bauer, A., Gutowski, A., Hofmann, G., Leukart, P., Melzer, A., Mollenhauer, D., Schneider, S. & Tremp, H. 1998. Trophiekartierung von aufwuchs- und makrophytendominierten Fließgewässern. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München. Informationsberichte Heft 4/99, 516 Seiten.
- Shannon, C. & Weaver, W. (1949): The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press. Urbana.
- Stoermer, E.F. & Smol, J.P. 1999. The diatoms: applications for the environmental and earth sciences. Cambridge University Press. 469 S.
- Straub, F., 1981. Utilisation des membranes filtrantes en téflon dans la préparation des Diatomées épilithiques. *Cryptogamie Algol.* 2: 153.
- Van den Hoek, C., Jahns, H.M. & Mann, D.G. 1993. Algen. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 3. Aufl., 411 S.
- Walsh, G.E., McLaughlin, L.L., Yoder, M.J., Moody, P.H., Lores, E.M., Forester, J. & Wessinger-Duvall, P.B., 1988. *Minutocellus polymorphus*: A new marine diatom for use in algal toxicity tests. *Environmental Toxicology and Chemistry* 7: 925-929.
- Watanabe, T., Asai, K. & Houki, A., 1988. Numerical water quality monitoring of organic pollution using diatom assemblages. In: Round, F.E., (Hrsg.), *Proceedings of the 9th Diatom Symposium 1986*, Koeltz Scientific Books, Koenigstein, 123-141.
- Werner, D., 1977. The Biology of Diatoms. Botanical Monographs 13, Blackwell, Oxford.
- Whitton, B.A., Rott, E. & Friedrich, G., 1991. Use of algae for monitoring rivers. Institut für Botanik, Universität Innsbruck.
- Zelinka, M. & Marvan, P. 1961: Zur Präzisierung der biologischen Klassifikation der Reinheit fließender Gewässer. *Arch. Hydrobiol.* 57: 389-407.
- Les diatomées dans les rivières suisses : un choix de rapports et de rivières étudiées.**
- Un suivi régional, au sens du module Diatomées de l'OFEV (niveau R), a été appliqué dans beaucoup de régions, par exemple par les cantons d'AG, AI, AR, BE GE, GL, GR, LU, NE, SH, SZ, SG, TG, UR, VD, VS, ZH.
- AquaPlus 1998. Lörze Abschnitt Zugersee - Frauental. Biologische Untersuchungen mittels Kieselalgen als Bioindikatoren. Auswirkungen der Kläranlage Schönauf auf die Kieselalgen-Biozönosen der Lörze. Untersuchungen der Jahre 1988 und 1997. Im Auftrag der Baudirektion des Kt. Zug, Amt für Umweltschutz.
- AquaPlus 2003. Kieselalgen der Aare. Biologisch indizierte Wasserqualität zwischen Bielersee und Mündung in den Rhein. Untersuchungen 2001/2002. Im Auftrag der Gewässerschutzfachstellen der Kantone Bern, Solothurn und Aargau.
- AquaPlus 2004. Kieselalgenflora und Beurteilung der biologisch indizierten Wasserqualität im A2-Kanal bei Stans (NW). Stellendokumentation mit Kurzkomentar der Stellen Dufur Nr. 410 und Nr. 411. Untersuchungen vom 10. April und 30. Oktober 2002. Im Auftrag des Amtes für Umweltschutz Nidwalden.
- Baudirektion Kanton Zürich 1998. Oberflächengewässer und Abwasserreinigungsanlagen. Zürcher Umweltpraxis Gewässerschutz. 67 S.
- Cordonier, A. 1998. Essai d'utilisation d'un indice diatomique pour le contrôle de la qualité biologique des cours d'eau genevois : application à la Versoix et comparaison avec l'IBGN et la physico-chimie. Travail de diplôme, Université de Genève et Service cantonal d'écotoxicologie, 75 p. et 15 annexes.
- ETEC, 2000. Observation de la qualité de surface, campagne 1999: La Drance de Bagnes. Rapport de synthèse. Service de la protection de l'environnement du canton du Valais, 45 p. et annexes.
- Küry, D. & Zollhöfer, J. 1993. Gewässerbiologische Erfolgskontrolle des Ausbaus ARA Ergolz I, Sissach. *Gas Wasser Abwasser* 73 (3): 205-211.
- Nirel, P., Perfetta, J. & Revaclier, R. 1999. Qualité actuelle de l'Allondon et de ses affluents. Evolution physico-chimique et biologique. Rapport Service cantonal d'écotoxicologie, Genève, 27. p.
- Straub, F. 1997. Programme rivières 1997. Examen des populations de diatomées (Bacillariophyceae) épilithiques de cinq stations situées sur cinq cours d'eau du district de Neuchâtel et diagnostic de la qualité saprobique des eaux, selon la méthode des groupes d'espèces différentielles de Lange-Bertalot. Service cantonal de la protection de l'environnement (canton de Neuchâtel), rapport de 18 p.
- Straub, F. 1998. Programme rivières 1998. Examen des populations de diatomées (Bacillariophyceae) épilithiques de quatre stations situées sur Le Seyon et La Sorge : diagnostic de la qualité saprobique des eaux, selon la méthode des groupes d'espèces différentielles de Lange-Bertalot. Rapport pour le SCPE, Laboratoire d'algologie, La Chaux-de-Fonds, 17 p.

Straub, F. et Jeannin, P.-Y. 2006. Efficacité autoépuratoire de tracés aérien et karstique d'un effluent de station d'épuration (La Ronde, Jura suisse) : valeur indicative des diatomées. Symbioses, nlle sér. 14, 35-41.