



**CAHIER DE
L'ENVIRONNEMENT
N° 219**

Pêche

**Conséquences
écologiques
des curages
dans les bassins
de retenue**



**Office fédéral de
l'environnement,
des forêts et
du paysage
OFEFP**

**CAHIER DE
L'ENVIRONNEMENT
N° 219**

Pêche

**Conséquences
écologiques
des curages
dans les bassins
de retenue**

Recommandations pour
la planification et l'exécution
des mesures d'accompagnement

**Publié par l'Office fédéral
de l'environnement, des forêts
et du paysage OFEFP
Berne, 1994**

Auteurs

Stefan Gerster, Peter Rey
HYDRA, Büros für angewandte Hydrobiologie
Berne – Constance

Téléchargement du fichier PDF

<http://www.buwalshop.ch>

Référence: SRU-219-F

Table des matières

	page
Abstracts	4
Préface	5
Résumé	6
1. Introduction	7
2. Les bases légales en Suisse	10
2.1 Généralités	10
2.2 Réglementation cantonales	11
2.3 Dispositions pénales et responsabilité civile	12
3. Nécessité des curages et méthodes alternatives	13
3.1 Les problèmes de sédimentation	13
3.2 Mesures permettant de réduire l'atterrissement	14
3.3 Techniques d'évacuation des sédiments	15
3.4 Méthodes alternatives d'évacuation des sédiments	17
4. Incidences des opérations de curages sur l'écosystème	20
4.1 Caractéristiques des eaux concernées	20
4.2 Phénomènes intervenant en cours de curage	22
4.3 Atteintes portées aux biocénoses	24
4.4 Agir demain grâce aux connaissances acquises aujourd'hui	26
5. Exemples de suivis de curage	27
5.1 Etudes françaises	27
5.1.1 Analyses écotoxicologiques	27
5.1.2 Analyses sédimentologiques	28
5.1.3 Critique	30
5.2 Curages suivis entre 1990 et 1992 (sur mandat de l'OFEFP)	30
5.2.1 Débits et régimes d'écoulement	32
5.2.2 Matières solides, nature du substrat	32
5.2.3 Chimie de l'eau	34
5.2.4 Conséquences écologiques (macro-invertébrés, poissons)	35
5.2.5 Opérations de curage et crues naturelles: comparaison	39
6. Recommandations	40
6.1 Demandes et autorisations obligatoires	40
6.2 Planification et étude de suivi	41
7. Bibliographie	45

Abstracts

La vidange et le curage des bassins de retenue entraînent souvent un impact important sur le tronçon de cours d'eau situé à l'aval du barrage ainsi que sur les communautés vivantes y résidant (macroinvertébrés, poissons). Ces tronçons sont déjà fortement dépréciés par leur régime hydraulique résiduel. Sur la base de quelques suivis de curages et d'une compilation bibliographique, nous avons tenté de pallier le déficit en connaissances relatif aux effets écologiques des curages. Par la même occasion, une série de recommandations destinées à la planification et à la réalisation des curages sont proposées afin de minimiser les dégâts.

Il s'est avéré qu'un catalogue général de mesures ne peut pas être constitué, chaque cas devant être évalué séparément. Des solutions individuelles doivent donc être trouvées prenant en compte les spécificités de chaque objet. Le cas échéant, des mesures prophylactiques permettant de minimiser les dégâts sont également à promouvoir.

Spurghi e svuotamenti di invasi rappresentano frequentemente un ulteriore carico per le già di per sé profondamente mutate condizioni presenti nei corsi d'acqua a valle delle dighe. Maggiormente colpite sono le spesso fragili comunità locali evolutesi successivamente (macroinvertibrati, pesci). In base ai risultati concernenti alcuni spurghi seguiti dagli autori ed a casi citati nella letteratura, si è cercato di limitare le lacune conoscitive riguardanti le conseguenze ecologiche degli spurghi. Parallelamente sono state elaborate delle raccomandazioni concernenti la pianificazione e la messa in atto di spurghi, grazie alle quali sarà possibile ridurre i danni durante futuri interventi.

Si è dimostrato, che non è quasi possibile suggerire imposizioni (per es. valori limite) o provvedimenti generali, dato che ogni singolo caso presenta una situazione generale diversa. Di conseguenza sarà necessario trovare soluzioni specifiche per ogni singolo caso e se mai si dovranno prendere misure preventive tali da limitare i danni durante le operazioni di spurgo.

Spülungen und Entleerungen von Stauräumen bedeuten in vielen Fällen eine grosse Belastung für die ohnehin schon stark veränderten Verhältnisse in den Fließgewässern unterhalb von Stauhaltungen. Am stärksten davon betroffen sind die dort sukzessive entstandenen und meist labilen Lebensgemeinschaften (Makroinvertebraten, Fische). Anhand der Ergebnisse von einigen begleiteten Spülungen und Literaturstudien wird versucht, das Defizit bei den Kenntnissen ökologischer Folgen von Spülungen zu verringern. Daneben wurden Empfehlungen für die Planung und Durchführung von Spülungen erarbeitet, mit deren Hilfe bei zukünftigen Massnahmen die Schäden minimiert werden können.

Es hat sich gezeigt, dass kaum generelle Auflagen (Grenzwerte u.a.) und Massnahmen empfohlen werden können, da in jedem Fall die Gesamtsituation verschieden ist. Es müssen also objektspezifisch Lösungen gefunden und allenfalls prophylaktische Massnahmen getroffen werden, um die Schäden bei Spülungen gering zu halten.

The flushing and emptying of reservoirs usually have a great impact on the delicate biotic communities of macroinvertebrates and fish, which have evolved in the bodies of flowing water below dams. By consulting subject-specific literature as well as analysing new data obtained in studies of recent flushings, more knowledge is gained on the ecological consequences of such procedures. Furthermore, guidelines on the planning and realisation of flushings were established, which should restrict the damage caused by future flushings to a minimum.

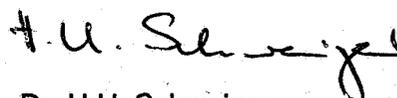
Unfortunately, there are hardly any standard conditions or measures that apply to every situation, since each case has different parameters. Therefore, specific solutions have to be found and, if necessary, prophylactic measures have to be taken, to minimise the damage caused by flushings.

Préface

Parmi les nombreux impacts écologiques provoqués par l'exploitation hydroélectrique, c'est sans doute celui lié aux débits résiduels qui apparaît le plus proéminent. Bien que d'une importance indiscutable, cette problématique masque parfois un autre impact qui peut avoir des incidences déterminantes sur les communautés aquatiques situées à l'aval du barrage; il s'agit des opérations de dévasement ou curage de la retenue. Souvent méconnues du grand public ces opérations, inhérentes à l'exploitation du barrage, apparaissent pernicieuses dans la mesure où leurs conséquences à long terme (modifications des composantes morphologiques du lit, modification de la structure des communautés faunistiques, etc.) demeurent en grande partie inconnues. Etrangement, la littérature spécialisée ne consacre que peu d'attention au problème.

Ce déficit en informations s'est longtemps traduit par un vide juridique en la matière. Ce dernier vient d'être comblé récemment par l'entrée en vigueur de la nouvelle loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux. Pour la première fois au niveau de la législation fédérale, un article consacré spécifiquement au curage et vidange des bassins de retenue est mentionné. Toutefois, le problème reste entier. Malgré ce nouvel instrument juridique, les impacts écologiques d'un curage incontournable ne peuvent être amortis que dans la mesure où chaque acteur manifeste une réelle volonté d'amélioration. Cela implique une étroite collaboration entre usiniers, administrations cantonales concernées et associations de protection de la nature. La publication suivante est sensée apporter une contribution sensible en la matière.

Division de la protection
des eaux et pêche
Le Chef:



Dr. H.U. Schweizer

Résumé

Le curage et la vidange des bassins de retenue sont réglementés par l'article 40 de la nouvelle loi sur la protection des eaux. Aux termes de cet article, l'exploitant d'une installation est tenu de prendre des mesures afin de protéger le monde animal et végétal. Les autorités chargées de délivrer les autorisations sont les services cantonaux (service de protection de l'environnement, service de la pêche) auxquels incombe également le devoir de surveillance. Les opérations de curage requièrent une attention toute particulière. Pour éviter les atteintes aux écosystèmes, il convient, notamment, de prendre des mesures préventives. Les expériences dont il est fait état dans ce rapport à la lumière de différents exemples devraient permettre de développer le savoir-faire et d'acquérir quelques certitudes.

Le déroulement de l'opération proprement dite varie beaucoup d'un objet à l'autre, de par la diversité des facteurs d'influence (données techniques, éléments de construction, topographie et hydrologie du bassin versant, etc.). De ce fait, il est impossible de fixer des règles applicables à l'ensemble des bassins de retenue. Il en est cependant une qui doit prévaloir dans tous les cas: l'évaluation des incidences liées aux différentes méthodes d'évacuation des sédiments et de prévention de leur dépôt dans les bassins, en recensant notamment les spécificités des écosystèmes abritant les différents biotopes (barrages, eaux courantes et dormantes en aval) par le biais d'enquêtes préliminaires.

Toute opération de curage est soumise à autorisation. L'exploitant d'une retenue doit donc déposer une demande, plus ou moins détaillée selon l'importance de l'intervention, sur la base de laquelle l'autorité chargée de délivrer les autorisations détermine les modalités et, au besoin, prescrit les mesures nécessaires pour éviter les dommages. En règle générale, il est recommandé d'effectuer les curages au moment de l'année où le débit naturel est fort, car les incidences écologiques sont alors bien moindres qu'en période de basses eaux. On atténuera également l'ampleur des dégâts en ouvrant et fermant lentement les vannes de fond et en prévoyant de l'eau de dilution et de rinçage en suffisance. Afin de pouvoir réagir au plus vite en cas de dépassement des valeurs limites de charge fixées pour la teneur de matières en suspension et la concentration d'O₂, des mesures de contrôle doivent être effectuées en des lieux désignés au préalable.

La protection de la faune piscicole requiert la mise en oeuvre de mesures prophylactiques: on veillera, par exemple, à capturer le plus grand nombre possible d'individus (sauvegarde du patrimoine génétique) et à coordonner les opérations d'alevinage et de curage. Ces mesures permettent le plus souvent un prompt rétablissement de la situation, mais il arrive quand même que des dépôts de sédiments fins en aval aient des incidences négatives de longue durée sur les organismes animaux et végétaux.

Lorsque le volume de matières en suspension est élevé et qu'aucun type de curage ne permet de réduire l'ampleur des atteintes aux écosystèmes à court, voire même à long terme, il faut alors recourir à des méthodes alternatives (par dragage, par exemple) pour évacuer les sédiments.

1. Introduction

La force hydraulique est, en Suisse, une des sources d'énergie les plus importantes. Les premiers bassins de retenue artificiels - dont certains sont encore en exploitation - ont été créés au début du siècle passé déjà. La Suisse compte aujourd'hui plus de 100 retenues alpines et préalpines d'une superficie supérieure à 100'000 m², dont huit ont une contenance voisine de 100 millions de m³. La région alimentant les lacs artificiels est souvent plus vaste que leur bassin versant naturel.

Outre les objets du présent rapport, à savoir les bassins de retenue alpins, qui permettent un stockage temporaire des eaux, il existe aussi des retenues au fil de l'eau qui utilisent la déclivité d'un tronçon à des fins énergétiques. Nous n'aborderons pas ici les problèmes de curage posés par ce type de retenue.

Les matériaux issus de l'érosion du bassin versant se déposent en grande partie dans la retenue, ce qui en altère l'exploitation car, d'une part, la capacité utilisable s'en trouve réduite et, d'autre part, les sédiments obstruent les installations de sécurité (la vanne de fond, notamment) ou aboutissent dans la conduite forcée. La perte volumique annuelle ainsi occasionnée est, en règle générale, supérieure à 1%. Les barrages doivent donc, à intervalles plus ou moins rapprochés (de 1 à 10 ans, selon le taux de sédimentation), être débarrassés de cette masse sédimentaire. L'opération la plus courante, la plus simple et la moins coûteuse consiste à évacuer les sédiments par la vanne de fond.

Chaque fois que l'on purge une retenue, on porte atteinte à la morphologie des eaux et au microclimat du tronçon à débit résiduel situé en aval du barrage. Ces changements varient selon le site, la nature et la taille de la retenue; leur importance, de minime selon les cas, peut être considérable en d'autres circonstances.

Les conséquences écologiques des curages n'étant, pour l'heure, guère connues, aucune directive n'a encore été édictée pour réglementer le curage des barrages. Le présent rapport comble quelque peu cette lacune, puisqu'il contient une série de recommandations destinées à planifier et effectuer les opérations de chasse d'eau tout en ménageant l'écosystème et, partant, l'environnement. Il devrait permettre de trouver la meilleure solution pour tous, les cas d'espèce.

Pendant longtemps, les problèmes liés au dévasement proprement dit et, plus encore, à ses conséquences pour les organismes vivants n'ont guère été abordés en Suisse. Un séminaire relatif à "l'accumulation des sédiments dans les retenues et les lacs artificiels du massif alpin" (VISCHER 1981) a certes été organisé en 1981 à Zurich par la VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau), mais on s'était alors limité à décrire les aspects techniques de la sédimentation et à esquisser les moyens d'évacuer les dépôts de façon optimale. L'ancienne loi sur la protection des eaux (1971) ne mentionnait pas expressément le problème des "curages et vidanges de retenues"; il a fallu attendre le 1er novembre 1992, date d'entrée en vigueur de la nouvelle loi, pour voir apparaître ce domaine dans la législation fédérale sur les eaux (cf. chapitre 2.1). Seuls les pêcheurs professionnels et sportifs, un groupe d'intérêts très actif en matière de protection des eaux, ont suscité le débat à chaque fois que des cas graves se produisaient et veillé à ce que les dégâts soient réparés. La loi fédérale sur la

pêche témoigne d'ailleurs de cette réaction des pêcheurs face à la destruction des biotopes: avant l'entrée en vigueur de la nouvelle loi sur la protection des eaux, elle était la seule à mentionner l'épineux problème des curages de barrage (art. 24, Autorisation pour les interventions techniques; cf. chapitre 2.1). Il convient toutefois de préciser que les autorités cantonales, et plus particulièrement les services de la pêche, sont débordés par le nombre de demandes de curages.

Le taux de mortalité piscicole enregistré chaque année est une preuve patente des difficultés auxquelles se heurtent les autorités cantonales chargées de délivrer les autorisations et de procéder aux contrôles. Forts de ce constat, quelques cantons (GR et TI, notamment; cf. chapitre 2.2) ont institué des groupes de travail, composés de représentants des autorités compétentes et d'exploitants de centrales, afin d'élaborer des recommandations et des directives. L'Office fédéral de l'économie des eaux s'est également employé à trouver des solutions (OFEE 1983). La mise en pratique des dispositions destinées à réduire l'ampleur des incidences négatives n'est toutefois pas toujours aisée. C'est pourquoi l'OFEFP a décidé de présenter les derniers résultats obtenus dans le domaine des opérations de dévasement. Cette publication est étayée par une étude de la littérature existante (WAHLI 1985) et par le suivi scientifique de quelques purgès (GERSTER et REY 1992a; REY et GERSTER 1991, 1992).

Etat des connaissances actuelles

A ce jour, une vingtaine de rapports seulement ont été consacrés, en Suisse, aux conséquences écologiques des curages de barrages. Ceci explique le peu de connaissances dont nous disposons en la matière, d'autant plus que la majorité d'entre eux ne traitent que du problème des matières en suspension (MES) et des effets à court terme qu'il engendre pour les poissons. Moins de 10 suivis de curage, effectués pour la plupart depuis la fin des années quatre-vingt, prennent en compte d'autres paramètres (transformations chimiques du milieu, algues, macro-invertébrés, morphologie des eaux).

Le canton des Grisons a décidé de constituer un groupe de travail au début des années quatre-vingt, à la suite de la forte mortalité piscicole provoquée par la vidange de la retenue de Zervreila en 1981 (GARTMANN 1990). Les membres de ce groupe ont, notamment, contribué à l'édiction d'une directive cantonale réglementant l'exécution de ces opérations (GARTMANN 1990). Des problèmes semblables survenus au Tessin ont conduit à l'élaboration d'une directive, adoptée par le Conseil d'Etat en 1987 (CONCA 1990).

Dans l'ensemble, la situation n'est donc pas satisfaisante en Suisse. Elle n'est toutefois pas meilleure dans les autres pays européens exploitant la force hydraulique, à l'exception de la France.

En Autriche, les prescriptions d'exploitation - d'ordre technique uniquement (coordination des opérations pour une chaîne de retenues, p. ex.; TKW/SAFE 1990) - ne touchent que les nouveaux concessionnaires ou les exploitants appelés à renouveler leur concession. En Espagne, en Italie et en Allemagne, les opérations de dévasement ne sont soumises à aucune loi ni directive.

La France, en revanche, a consenti des efforts considérables. Electricité de France (EDF) a en effet réalisé un vaste programme de recherches (18 vidanges suivies de 1983 à 1986), afin de constater, puis de minimiser les dommages écologiques (GOSSE 1991, RAMBAUD

et al. 1988). Les études ont porté avant tout sur la caractérisation des sédiments libérés au cours des vidanges ainsi que sur les interactions entre les facteurs chimiques et les risques écotoxicologiques. Les Français ont élaboré un modèle mathématique (cf. chapitre 5.1) qui permet de décrire les réactions physico-chimiques dans des tronçons déterminés et, ainsi, de conduire les vidanges de façon à minimiser les risques pour la faune piscicole (GARRIC et al. 1990, ROFES et al. 1991).

Même aux Etats-Unis, le nombre d'études sur les opérations de chasse est faible (HESSE et NEWCOMB 1982, NEWCOMBE et MACDONALD 1991, p. ex.). Elles traitent essentiellement de l'impact des concentrations de matières en suspension sur les poissons, mais abordent aussi l'influence de l'envasement sur les macro-invertébrés et sur le succès de la reproduction des espèces lithophiles. Des travaux plus récents se penchent également sur la synergie de la concentration en sédiments et du temps d'exposition (durée d'influence) afin d'établir un "stress-index" par voie mathématique (NEWCOMBE et MACDONALD 1991).

2. Les bases légales en Suisse

2.1 Généralités

Les opérations de dévasement de retenues ne sont pas réglementées de façon détaillée dans notre pays. En effet, la **loi fédérale sur la police des eaux** (RS 721.10) stipule uniquement que la sécurité de la population doit être garantie en aval des barrages. Quant au **Règlement concernant les barrages** (RS 721.102), il **oblige** les exploitants à contrôler périodiquement le **fonctionnement** des vannes de fond (et des autres dispositifs), afin d'assurer l'abaissement rapide du plan d'eau en cas de danger (crue, guerre, formation de fissures dans le barrage, etc.). La **loi sur la protection des eaux** (RS 814.20), elle, exige la **prévention des atteintes nuisibles aux eaux**; pour sa part, la **loi fédérale sur la pêche** (RS 923.0) traite, dans le chapitre consacré à la "protection des biotopes", de l'**autorisation (obligatoire) pour les interventions techniques**, délivrée par l'autorité cantonale compétente en matière de pêche.

L'ancienne loi sur la protection des eaux du 8 octobre 1971 ne contenait aucun article sur les curages. Les autorités cantonales disposaient donc d'une grande marge de manoeuvre pour évaluer les demandes et comblaient ce "vide juridique" en se référant de temps à autre à l'**ordonnance sur le déversement des eaux usées** (ODEU, RS 814.225.21) et, plus précisément, aux **exigences pour le déversement dans les eaux** qu'elle prescrit (GARTMANN 1990, notamment).

L'ODEU donne quelques indices sur d'éventuelles prescriptions en matière de purge. Celles-ci pourraient toutefois concerner uniquement l'évacuation des eaux chargées de matières en suspension. Or, les valeurs limites fixées par cette ordonnance pour les "matières insolubles totales" et pour les "matières décantables" sont largement dépassées en cas de purge, voire même le reste du temps.

Cela étant, il s'agit de faire une distinction entre le déversement des eaux usées et les opérations de dévasement et de partir du principe que l'ODEU n'est pas applicable pour ces dernières. La nouvelle loi sur la protection des eaux, en revanche, réglemente désormais le curage et la vidange des bassins de retenue.

Loi sur la protection des eaux, LEaux

Art. 40 Curage et vidange des bassins de retenue

¹ Lors du curage et de la vidange des bassins de retenue ou lors du contrôle des dispositifs de vidange de l'eau et d'évacuation des crues, l'exploitant de l'ouvrage veille, dans toute la mesure du possible, à ne pas porter atteinte à la faune et à la flore dans la partie aval du cours d'eau.

² Il ne peut effectuer un curage ou une vidange qu'avec l'autorisation du canton; l'autorité qui délivre celle-ci consulte les services intéressés. Si des curages ou des vidanges périodiques sont nécessaires à la sécurité de l'exploitation, l'autorité se borne à fixer le moment de l'opération et son mode d'exécution.

³ Si, lors d'événements extraordinaires, l'exploitant doit immédiatement abaisser le niveau des eaux de la retenue pour des motifs de sécurité, il en informe sans retard l'autorité qui délivre l'autorisation.

L'exécution de ces dispositions - qui laissent une grande marge d'appréciation - incombe aux autorités cantonales chargées de délivrer les autorisations, qui doivent veiller au bon déroulement des opérations, eu égard aux différents écosystèmes qui peuvent être touchés, à savoir: le milieu aquatique (bassin mis à sec, tronçon à débit résiduel en aval, etc.), le sol et l'air, auxquels de graves atteintes peuvent être portées selon les méthodes alternatives utilisées (cf. chapitre 3.4) pour évacuer les dépôts de sédiments (au moyen de suceuses à sédiments, recommandées dans le message relatif à la nouvelle LEaux, p. ex.), ainsi que les nuisances sonores.

2.2 Réglementations cantonales

Les autorités cantonales chargées de délivrer les autorisations de curage ou de vidange (service de la pêche, de la protection des eaux, inspectorat de la pêche, etc.) déterminent la période durant laquelle l'un ou l'autre peuvent être effectués et imposent le mode d'exécution ainsi que les valeurs limites à ne pas dépasser (en règle générale, uniquement pour la concentration de matières en suspension). Elles prescrivent également des mesures préventives afin de protéger les organismes vivants (évacuation des poissons, interruption du repeuplement, etc.) et de pallier les risques inhérents aux crues (dispositions relevant de la police des eaux). Les lois réglementant ces différents éléments varient selon les cantons (loi sur la pêche, loi sur la protection des eaux, etc.).

Seuls les Grisons et le Tessin, nous l'avons vu, ont des réglementations concrètes, édictées par les gouvernements cantonaux. Des groupes de travail ont en effet été chargés d'élaborer des directives dont la fiabilité a été contrôlée dans la pratique. Le canton des Grisons a fixé les modalités d'exécution de curage et de vidange en 1984 (décision gouvernementale no 642) et le Tessin en 1987 (directive no 760). Les deux réglementations prévoient notamment:

- a) de garantir la sécurité des hommes, des animaux et des biens;
- b) de protéger et ménager l'environnement, plus spécialement les zones aquatique et riveraine, ainsi que tous les éléments qu'elles abritent;
- c) d'empêcher les dépôts (qui réduisent la capacité aux débits de crue) ainsi que l'érosion des rives et du fond en aval des bassins de retenues.

On y trouve des indications très précises sur la période au cours de laquelle les purges peuvent être effectuées (protection de la faune piscicole), mais aussi sur les techniques à mettre en oeuvre (p. ex. vitesse d'ouverture et de fermeture des vannes et autres dispositifs d'obstruction) ou encore (au Tessin seulement, CONCA 1990) sur la concentration maximale de matières en suspension en aval du barrage.

2.3 Dispositions pénales et responsabilité civile

Les articles inscrits dans les lois fédérales sur la pêche et sur la protection des eaux stipulent que l'exploitant de l'ouvrage est responsable des dommages occasionnés par un curage et ce, même s'il a exécuté ce dernier conformément aux directives qui lui ont été imposées lors de l'octroi d'autorisation. En cas d'infraction intentionnelle ou de négligence - exécution d'un curage sans autorisation, par exemple -, l'exploitant peut être condamné à payer une amende ou à purger une peine de prison allant jusqu'à six mois.

Quant à la responsabilité civile qui, conformément aux nouvelles lois fédérales sur la pêche et sur la protection des eaux, consisterait à réparer tous les éléments endommagés (morphologie du lit de la rivière, animaux dont se nourrissent les poissons, effectif piscicole, etc.), elle se limite habituellement au remplacement de la faune piscicole. L'estimation des dommages prend plus particulièrement en compte:

- a) la diminution de rendement dans les eaux piscicoles endommagées;
- b) le coût des mesures requises pour rétablir la situation initiale;
- c) le coût des activités nécessaires pour réparer les dommages.

3. Nécessité des curages et méthodes alternatives

Le dépôt de sédiments et leur évacuation posent une série de problèmes, objets du présent chapitre. Nous n'entrerons cependant pas dans le détail des multiples aspects hydrauliques et techniques, pour lesquels nous vous renvoyons à la littérature spécialisée (VISCHER 1981, p. ex.).

3.1 Les problèmes de sédimentation

En créant un bassin de retenue, on interrompt la dynamique naturelle des particules solides dans la portion de rivière retenue. Le matériel charrié et les matières en suspension se déposent continuellement dans le bassin: les particules les plus grossières s'accumulent à la racine de la retenue où elles forment un delta et les particules plus fines à l'aval immédiat du barrage (fig. 3.1). L'atterrissement de la retenue est un problème important car, selon la capacité du bassin et le taux de déposition, la sûreté du barrage peut être compromise et sa fonction même peut être mise en question. Le risque est particulièrement important lorsque les vannes de fond, obstruées par des sédiments fins, ne peuvent plus fonctionner normalement et lorsque la sédimentation engendre une forte poussée qui s'ajoute à la pression hydrostatique. En outre, le bon fonctionnement d'une retenue est entravé par la perte de volume utilisable et par l'obstruction de la conduite d'amenée (prise d'eau menant aux conduites forcées et aux turbines).

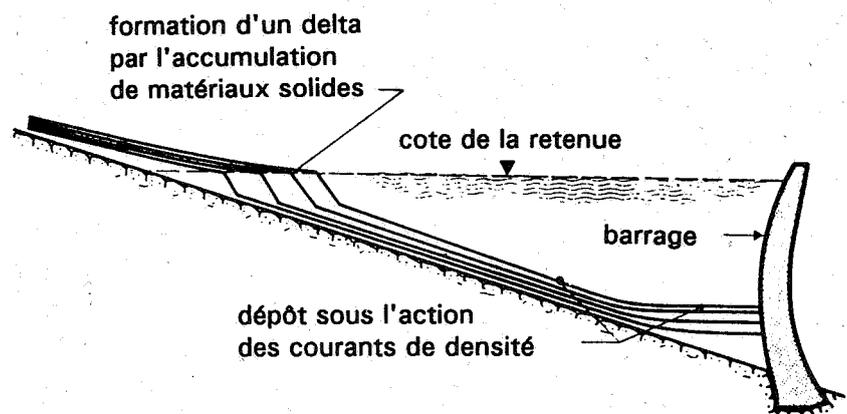


Fig. 3.1: Types d'atterrissements dans une retenue.

(Illustration tirée de VISCHER 1981)

Le volume des sédiments dans une retenue dépend principalement du taux d'érosion du bassin versant et des possibilités de rétention naturelles et techniques des particules solides charriées par le cours d'eau. Le degré d'érosion et de dénudation, fonction des conditions géologico-pédrographiques et de la végétation (AMMANN 1987), du climat (qui agit sur la décomposition), des conditions hydrologiques (précipitations, longueur du réseau fluvial, formation de glacier) et du relief, ne représente cependant pas la totalité du volume sédimentaire de la retenue, car une partie des fines matières en suspension et des substances dissoutes traversent sans arrêt les bassins (VISCHER 1981) ou s'y déposent en amont déjà. Les valeurs calculées (par le biais de mesures effectuées dans le delta ou à partir des particules solides) pour l'apport en provenance du bassin versant sont, en Suisse, de l'ordre de

0,02 à 5 mm/an au maximum (AMMANN 1987, LAMBERT 1987, VISCHER 1981). Il convient de relever que les résultats enregistrés par ces auteurs dans différents bassins versants varient fortement. LAMBERT (1987) par exemple, fait état de valeurs moyennes s'élevant à 0,25 mm/an pour la Suisse.

3.2 Mesures permettant de réduire l'atterrissement

L'atterrissement des bassins de retenue peut être ralenti par le biais de mesures préventives (choix de l'emplacement approprié, récupération des sédiments évacués). D'autre part, les sédiments accumulés peuvent être évacués de façon permanente ou périodique (VISCHER 1981).

Emplacement adéquat de la retenue

En construisant le barrage dans une vallée latérale, on peut l'alimenter avec de l'eau exempte de matériaux solides captée dans la vallée principale, voire dans d'autres vallées latérales (réseau de retenues, exploitation en parallèle). L'apport de matériaux solides est alors minime, puisque le bassin versant direct est de petite dimension. Toutefois, les petites fractions granulométriques ne peuvent, elles, pas être retenues dans les prises d'eau, si bien qu'il est impossible de réduire l'apport de matières en suspension dans la retenue.

Diminution du phénomène d'érosion et blocage des matériaux charriés

Il est possible d'atténuer l'ampleur du phénomène d'érosion dans le bassin versant par le biais de plantations (reboisement), d'ouvrages de terrassement des pentes, de corrections des torrents et des rivières, etc. Ces mesures sont cependant coûteuses et ne portent leurs fruits qu'après des années, voire des décennies.

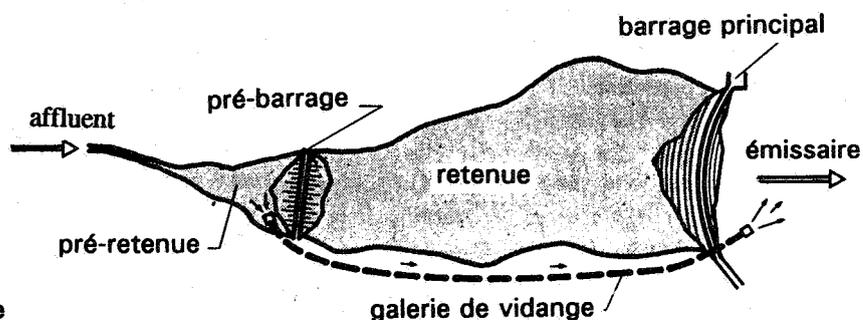


Fig. 3.2: Vue d'une retenue équipée d'un pré-barrage. Une galerie de vidange se déverse à l'aval du barrage principal.

(Illustration tirée de VISCHER 1981)

On peut également réduire le volume du charriage de fond par la construction de dépotoirs à l'amont immédiat du bassin ou dans le bassin versant. Cette méthode est particulièrement recommandée pour les torrents à fort taux d'érosion. Autre possibilité encore: installer une préretenue à la racine de la retenue; combinée avec une galerie de dérivation, elle constitue une protection efficace contre les gros apports de particules solides en cas de crues (fig. 3.2).

Création d'un réservoir dans le bassin de retenue

Ce procédé consiste à ajouter au volume utilisable de la retenue, au moment de la construction, un réservoir dimensionné (p. ex., en fonction du taux de sédimentation escompté pour la durée de la concession), sans oublier d'inclure le delta qui se formera et les autres facteurs de sédimentation possibles. Le plus souvent, on utilise à cette fin la partie de la retenue située au-dessous de la cote de captage (= espace mort), où seules les fines particules se déposent.

Evacuation régulière des sédiments

L'installation de dragues à godet ou de suceuses à sédiments - stationnaires ou mobiles - permet d'évacuer les sédiments en permanence ou à intervalles réguliers et, ce faisant, de ralentir, voire d'éviter, le processus de sédimentation. Toutefois, les matériaux dragués, qui contiennent une forte proportion de matières en suspension (boueuses), ne peuvent pas être réutilisés comme matériau de construction, au même titre que les fractions provenant du charriage de fond: ils doivent être mis en décharge. Outre les coûts ainsi occasionnés, cette méthode génère souvent plus d'inconvénients (pollution du sol et de l'air, nuisances pour la population (bruit) lors de l'évacuation et du transport à la décharge) qu'une opération de dévasement (cf. chapitre 3.4).

Curage de la retenue

Tout ou partie des sédiments peuvent être évacués par les vannes de fond, selon divers modes exposés ci-après.

3.3 Techniques d'évacuation des sédiments

Il existe plusieurs techniques de curage. Le choix en faveur de l'une ou de l'autre dépend de l'objectif visé, mais aussi des spécificités du barrage: construction proprement dite, organes d'écoulement et autres paramètres d'ordre technique (galeries de déviation, dispositifs d'apport d'eau supplémentaire, etc.). Les méthodes présentées ici ne peuvent bien évidemment pas refléter la grande variabilité de caractéristiques propres à chaque retenue.

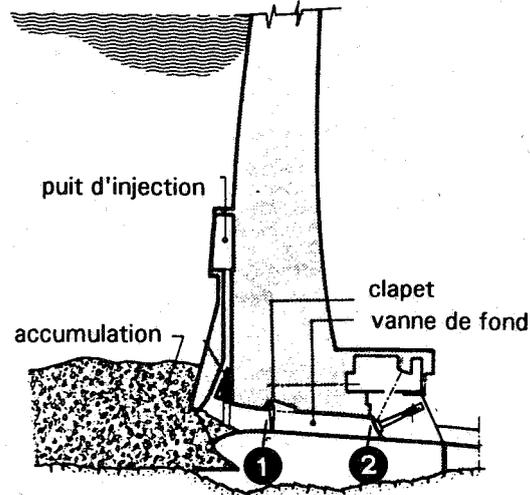
Pour ce qui est de l'objectif visé, on distingue deux cas fondamentaux, qui requièrent tous deux l'utilisation des vannes de fond et ont pour conséquence l'évacuation des sédiments fins:

- a) **la purge des sédiments accumulés à proximité des organes d'écoulement ensablés (sans abaisser le niveau d'eau), afin de garantir le bon fonctionnement de ces dispositifs (conformément au Règlement concernant les barrages);**

Remarque: les simples vérifications de fonctionnement des vannes de fond ou des vannes-clapet, auxquelles on peut procéder par essai avec écoulement, ne provoquent en principe pas l'évacuation des sédiments. Dans un premier temps, en ouvrant la vanne interne (cf. fig. 3.3, (1)), on remplit la chambre située entre les vannes interne et externe (2) d'eau; puis, dans un second temps, on referme la vanne interne et on ouvre la vanne externe, de façon que l'eau sorte de la chambre des vannes de fond.

- b) **l'abaissement du niveau ou la vidange complète de la retenue afin d'y effectuer des travaux de révision ou de redonner au bassin son volume total utilisable ("curage" proprement dit).**

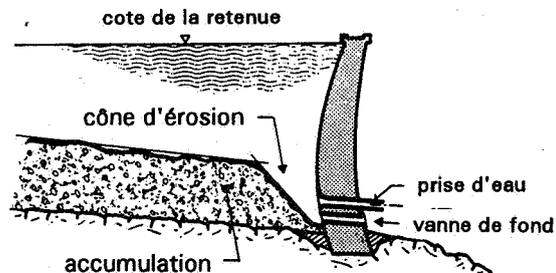
Fig. 3.3: Coupe longitudinale d'une vanne de fond équipée d'un puit d'injection permettant d'injecter suffisamment d'eau en cas d'obstruction.
(Illustration tirée de VISCHER 1981)



Purge sous pression (cas a)

Il arrive que l'on doive évacuer les sédiments situés à proximité des vannes de fond. Il convient alors de procéder à des purges de la vanne de fond, de courte durée. Le barrage étant plein et la vanne de fond, ouverte, la pression de l'eau et les remous du courant créent un entonnoir d'érosion (fig. 3.4). A l'aval immédiat de la retenue, la teneur en sédiments est généralement peu élevée et l'eau du bassin suffit à les diluer. Selon KRUMDIECK et CHAMOT (1981), il convient de munir le bassin d'un syphon ou d'un puit d'injection (fig. 3.3) afin que le volume d'eau soit suffisant pour désobstruer l'entrée de la vanne de fond des dépôts entraînés par aspiration. La vitesse d'afflux en amont de l'entrée diminuant rapidement, l'effet de la purge est la plupart du temps très limité dans le temps et dans l'espace: les sédiments réenvahissent relativement vite les lieux, et l'opération doit être répétée.

Fig. 3.4: Coupe longitudinale d'un barrage avec vanne de fond et prise d'eau au-dessus. Des petits curages effectués lorsque le lac est plein n'induisent qu'une érosion locale et n'élimine les sédiments que très localement.
(Illustration tirée de VISCHER 1981)



Purge avec abaissement du plan d'eau (cas b)

L'abaissement du niveau de la retenue est obtenu par un turbinage effectué aussi longtemps que possible. A ce stade déjà, les bancs de sédiments sont mis en mouvement. A l'ouverture de la/des vanne(s) de fond, une, quantité plus ou moins importante de sédiments fins - selon l'emplacement du cône de sédimentation (distance au barrage) - aboutit dans l'exutoire. Jusqu'à ce que la retenue soit totalement vide, il arrive qu'on enregistre des pics de matières en suspension, fonction du volume d'eau encore contenu dans le bassin. L'évacuation des sédiments de la retenue dure plusieurs jours. Elle s'effec-

tue par l'action érosive des affluents ou, lorsque cela est possible (dans les bassins de compensation en béton de plus petite dimension, par exemple), à l'aide d'excavatrices. Dans l'exutoire, la concentration de matières en suspension varie notablement, compte tenu du mode d'exécution du curage. En effet, l'eau de dilution, l'exploitation des périodes de crue ou de pluie, la vitesse d'ouverture/fermeture des vannes de fond et la mise en oeuvre d'excavatrices jouent à cet égard un rôle déterminant. En règle générale, la charge subie par le tronçon à débit résiduel en aval est grande, voire très grande, car les quantités de boues charriées sont considérables.

3.4 Méthodes alternatives d'évacuation des sédiments

L'exploitant d'une retenue doit être conscient des risques écologiques liés aux opérations de dévasement (cf. chapitre 4). Autrement dit, s'il prévoit qu'il ne lui sera pas possible de respecter totalement, ou partiellement les normes légales (LEaux, art. 40), il lui faut recourir à une autre méthode, qu'il choisira en prenant en compte non seulement tous les écosystèmes concernés (eau, sol, air, etc.), mais également les dépenses énergétiques et financières.

Il existe en effet des variantes aux opérations de dévasement proprement dites.

Le dragage à sec

- Evacuation des sédiments au moyen de dragues et de camions après mise à sec du bassin;

Remarques:

- mesures de construction supplémentaires souvent nécessaires (voies d'accès, etc.);
- procédé utilisable le plus souvent uniquement dans des bassins (de compensation) de petite dimension au fond solide et plat.

Le dragage en retenue

- Evacuation des sédiments par des dragues à godets, le bassin étant plein ou partiellement vidé;

Remarques:

- portée maximale des dragues: 20 m environ;
- procédé utilisé à ce jour essentiellement pour assainir les fossés, les étangs et les retenues en rivière, ainsi que pour redonner la profondeur d'eau nécessaire aux voies navigables et aux ports.

Le dragage par aspiration

- Evacuation des sédiments au moyen d'appareils aspirateurs stationnaires (installés, p. ex., dans la partie antérieure du bassin, à proximité de la vanne de fond et de la prise d'eau) ou mobiles
- La méthode utilisée par la société CTM Barrages à Malvilliers (anciennement: division "Hydro Vision" des Forces motrices neuchâteloises S.A.) permet de draguer jusqu'à 200 m de profondeur (PRALONG 1987). Les appareils ont une capacité moyenne de succion de

400 m³/h et aspirent ainsi près de 80% d'eau et 60 à 80 m³/h de matières solides (diamètre granulométrique jusqu'à 60 mm).

- Le **dragage des sédiments par aspiration et dépôt dans l'exutoire** permet de doser le volume que ce dernier peut recevoir (EWLE 1992a), ce qui n'est pas possible lorsqu'ils sont évacués par la vanne de fond. On peut toutefois, dans ce dernier cas, stocker la masse sédimentaire et la déposer dans l'exutoire par étapes, lorsque la situation hydrologique est favorable (période de crue).

Remarques:

- le niveau d'eau ne doit pas être abaissé, afin de ne pas entraver la production d'énergie;
- le dragage au moyen d'un aspirateur mobile a été utilisé pour la première fois en Suisse - avec succès - en 1982, dans la retenue de Lessoc (FR);
- l'évacuation du volume sédimentaire charrié lors du curage effectué en 1991 dans le bassin de compensation de Palagnedra - 170'000 m³ (OFIMA 1991b) - aurait requis, avec cette méthode, un temps considérable (100 jours environ).

Ces trois méthodes de dragage permettent de réduire considérablement la charge des eaux en aval d'une retenue. Par contre, l'évacuation et la récupération des sédiments posent problème. Certes, il existe aujourd'hui des techniques de séparation et de déshydratation des matériaux et ce, pour des volumes quasi équivalents à la capacité d'aspiration décrite ci-dessus (500 m³/h, profil eau + sédiments), mais elles sont difficilement applicables dans les régions alpines (problèmes de transport et d'exiguïté). Par ailleurs, les sédiments ne peuvent pas toujours être utilisés comme matériaux de construction, car ils contiennent souvent une forte proportion de particules fines porteuses d'impuretés organiques "indésirables"; il faut alors trouver un emplacement approprié pour les mettre en décharge. On évite également de les épandre sur les terres cultivées, parce qu'ils risquent d'envaser et de compacter les sols.

Outre les aspects techniques et les incidences écologiques (cf. chapitre 4), les facteurs suivants doivent également être pris en compte avant d'opter pour l'une ou l'autre méthode d'évacuation des sédiments:

- transport des matériaux:
 - les voies d'accès existantes ont-elles une capacité suffisante?
 - les nuisances sonores sont-elles supportables?
- utilisation ou mise en décharge des matériaux;
- bilan énergétique (consommation d'énergie requise pour l'extraction et l'évacuation).

En outre, l'exploitant de la centrale doit veiller à:

- réduire au minimum le volume de sédiments;
- prévoir dans son budget le coût supplémentaire engendré par les méthodes alternatives d'évacuation.

Le tableau 3.1 présente les différents procédés permettant d'évacuer les sédiments et d'en éviter la formation, les incidences de ces procédés au niveau financier (aspects d'exploitation) et au niveau écologique, ainsi que les coûts de ces incidences. L'ampleur de leurs variations dans bien des domaines reflète la très grande variabilité des caractéristiques propres aux différents objets et prouve bien à quel point le choix du procédé est important. Avant de se décider, il est indispensable d'établir un bilan global, à l'image de celui qu'a

dressé le bureau d'ingénieurs zurichois Basler & Hofmann (B. Trommer, communication orale) pour le bassin de compensation de Rempen (Kraftwerke Wägital AG, SZ).

Le procédé présenté dans la colonne "Curage à l'aide d'une galerie de vidange", qui consiste à opérer en situation de crue (cf. chapitre 3.2) au moyen de galeries de déviation, permet d'atténuer la tendance à la sédimentation et, ce faisant, de réduire la perte de volume utilisable. Cette méthode reproduit en quelque sorte les conditions naturelles puisque, en période de crue, les matières solides (particulièrement les fractions plus grossières déposées dans la préretenue) sont aussi mises en mouvement. Les fractions granulométriques plus fines, par contre, continuent de s'accumuler, en plus ou moins grandes quantités, dans le bassin même.

Tab. 3.1: Evaluation des effets de plusieurs procédés permettant d'éliminer et d'éviter les accumulations dans les retenues.

	Curage/ vidange par la vanne de fond	Dragage à sec	Dragage en retenue	Dragage des sédiments par aspiration et dépôt dans l'exutoire	Dragage des sédiments par aspiration sans dépôt dans l'exutoire	Curage à l'aide d'une galerie de vidange	Mesures préven- tives
Aspects liés à l'exploitation ^{a)} - adapt. constructives - besoins en personnel - besoins en matériel - besoins énergétiques -	◇ - ◆	◆◆ - ◆◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆◆◆ ¹⁾	pas quantifiable à priori → effets à long terme (cf chapitre 3.2)
Transport ^{a)} - adapt. constructives - matériel roulant - carburant -	◇	◆◆ - ◆◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆	◆◆ - ◆◆◆	◇	
Interruption de la production ^{a)}	◆ - ◆◆	◆ - ◆◆◆	◇ - ◆◆	◇	◇	◇ - ◆	
Incidences sur l'environ- nement ^{b)} - émissaire - population - bruit, air, trafic - valeur idéale ²⁾ - besoins énergétiques	◆◆ - ◆◆◆ ◆◆ - ◆◆◆ ◆ - ◆◆	◇ - ◆ ◇ - ◆◆ ◆◆ - ◆◆◆	◇ - ◆ ◇ - ◆◆ ◆◆ - ◆◆◆	◆ - ◆◆◆ ◆ - ◆◆◆ ◆◆	◇ - ◆ ◇ - ◆◆ ◆◆ - ◆◆◆	◆ - ◆◆ ◇ - ◆◆ ◆◆	
Côuts ^{a)} des effets ³⁾	◆ - ◆◆	◇ - ◆◆	◇ - ◆◆	◆ - ◆◆	◇ - ◆◆	◇ - ◆	

Implications ^{a)} / Conséquences négatives ^{b)}:

- ◇ aucune
- ◆ faibles
- ◆◆ moyennes
- ◆◆◆ importantes

¹⁾ opération unique (+ entretien)

²⁾ pêche, baignade, etc.

³⁾ prévention / remise en état

4. Incidences des opérations de curage sur l'écosystème

4.1 Caractéristiques des eaux concernées

Les retenues modifient le comportement naturel d'écoulement des eaux et provoquent des transformations morphologiques et écologiques. Elles créent en fait un système limnique artificiel. Quant aux tronçons à débit résiduel situés en aval, ils subissent également des changements, d'ordre hydrologique et morphologique, car les crues y sont très rares. La modification du régime des eaux se répercute notamment sur les conditions d'habitat et sur le microclimat de la vallée traversée par la rivière.

La biocénose du bassin de retenue est exposée essentiellement aux effets du marnage et à un taux de sédimentation le plus souvent élevé par rapport à celui des eaux dormantes naturelles. De plus, les eaux subissent en règle générale un enrichissement en nutriments qui aboutit à des conditions anoxiques dans les sédiments et dans la masse d'eau hypolimnique. Précisons cependant que - contrairement à nombre de barrages situés sur le Plateau - la majorité des bassins de retenue de l'arc alpin sont plutôt oligotrophes.

Les cours d'eau naturels

A l'état naturel, un cours d'eau alpin subit de fortes variations périodiques de son débit (chutes de pluie, fonte des neiges) et, par voie de conséquence, des modifications du courant et des forces d'entraînement. Ces deux phénomènes sont à l'origine de la structure du lit et du substrat qui le recouvre. Les organismes rhéophiles sont adaptés à ce type d'habitat. Quant aux poissons et aux macro-invertébrés, ils supportent les crues sans dommage majeur grâce à la présence de structures stables. Les pertes enregistrées ici ou là sont de toute manière compensées presque totalement en l'espace d'une génération.

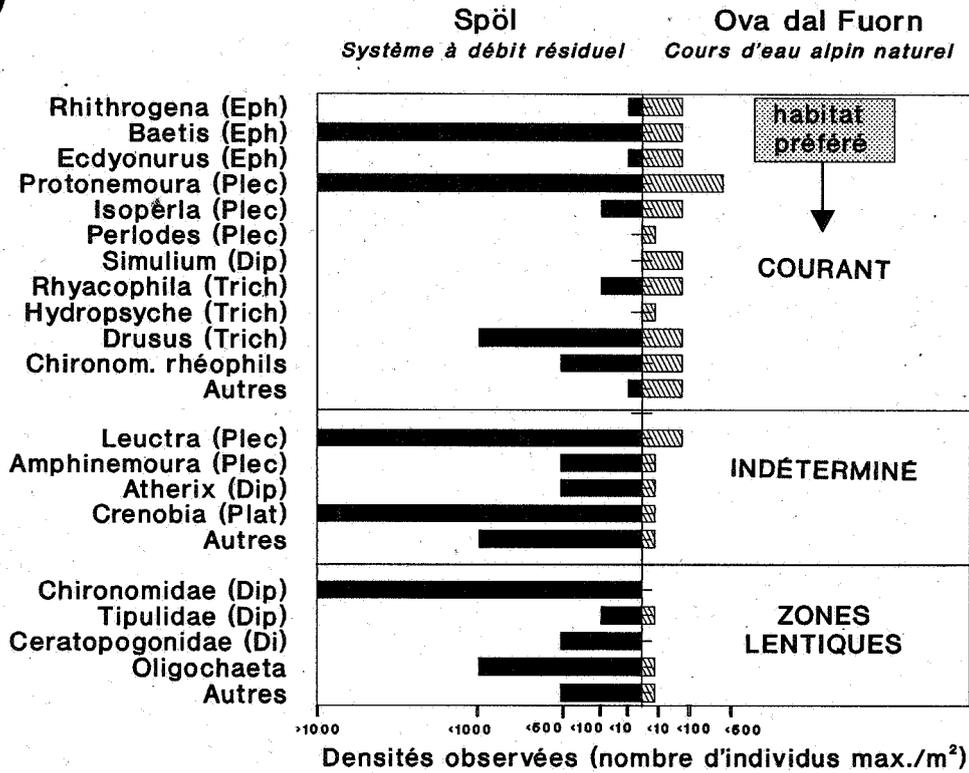
Tronçon à débit résiduel en aval des retenues

Dans le tronçon à débit résiduel à l'aval d'une retenue, l'état naturel des eaux se modifie dans des proportions diverses selon le débit et la fréquence d'éventuels débordements du bassin:

- en cas d'alimentation suffisante par les affluents latéraux ou par un débit de dotation élevé, la situation reste comparable à celle d'un cours d'eau naturel; toutefois, les caractéristiques écomorphologiques et, par conséquent, biologiques (stress hydraulique moindre, productivité plus élevée) se modifient;
- en cas d'apport d'eau fortement réduit, le système subit de profondes modifications hydrologiques: les forces d'entraînement étant minimales, les sédiments ne sont plus emportés dans leur totalité et le lit est en partie recouvert de particules solides (laves torrentielles, cônes de déjection des affluents); résultat: le débit est de plus en plus ralenti, ce qui peut aboutir à une perte considérable du caractère lotique du milieu (JÄGER

1991, REY et GERSTER 1991). Les matières en suspension (en provenance de la retenue, p. ex.) colmatent alors la couche superficielle du substrat ainsi que la zone interstitielle.

a)



b)

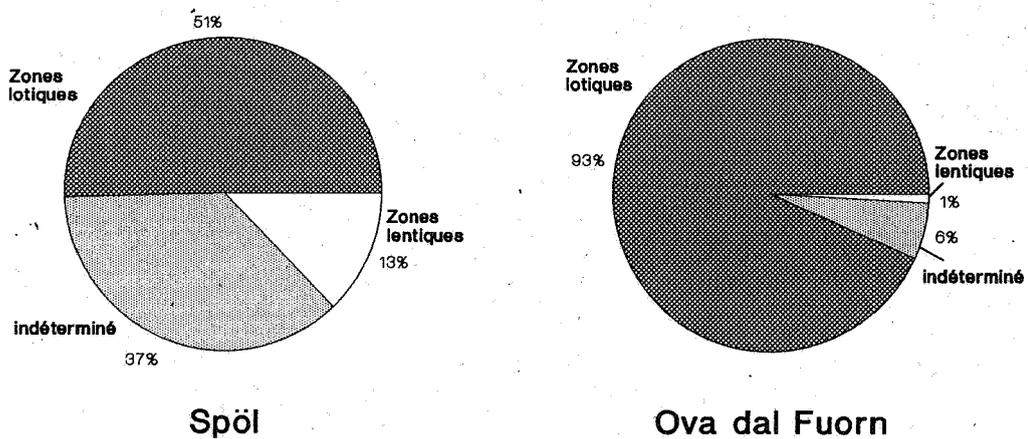


Fig. 4.1: Composition de la biocénose benthique de 2 cours d'eau alpins de même altitude situés dans le Parc National: 1. Le Spöl, à l'aval de la retenue de Livigno, à environ 1600 m d'altitude; 2. L'Ova dal Fuorn est un cours d'eau naturel et peu chargé en nutriments situé à environ 1750 m d'altitude. Le graphique présente les densités différentielles observées pour chaque groupe d'invertébrés (a) et les parts respectives des habitats préférés (en %; (b)).

Si les poissons et invertébrés rhéophiles ne se voient opposer aucune concurrence dans les cours d'eau naturels, l'absence de stress hydraulique consécutive à la construction d'un barrage modifie la situation. D'autres espèces (limniques ou amphibies) élisent domicile et se reproduisent désormais dans le tronçon à débit résiduel. Les rapports de domination s'en trouvent transformés: les espèces sensibles au courant, peu nombreuses auparavant, se multiplient (fig. 4.1) et il arrive même que l'on enregistre une augmentation de la densité totale d'individus et du nombre d'espèces (BLOESCH 1991). Dans un milieu de ce type, l'accumulation de nutriments en provenance de la retenue - plus particulièrement dans les pièges à sédiments - peut provoquer des phénomènes d'eutrophisation qui se traduisent, par exemple, par une forte croissance algale (ELBER 1991, ECOTEC 1992).

Ces biocénoses de succession sont cependant très instables. En effet, l'augmentation du colmatage, les phénomènes d'eutrophisation, les envasements et les ensablements peuvent engendrer des conditions de vie que seul un nombre infime d'espèces spécialisées peut supporter.

4.2 Phénomènes intervenant en cours de curage

Nous l'avons déjà signalé au chapitre 3: une opération de dévasement entraîne pour le système hydrologique situé en aval de la retenue (exutoire) un **accroissement du débit** doublé, le plus souvent, d'une **augmentation de la charge de matières en suspension**. Le système biologique de l'exutoire est aussi fortement influencé par la **composition chimique** de l'eau évacuée au cours de l'opération.

L'**accroissement du débit** (modification de l'hydraulique), que l'on peut quantifier au préalable, induit une élévation de la ligne d'eau; la vitesse du débit augmente, de même que la force d'entraînement sur le lit, ce qui accroît l'érosion, dans la partie supérieure de l'exutoire en tout cas.

L'**augmentation de la charge de matières en suspension** dans l'exutoire est due à la fois à l'évacuation des sédiments accumulés dans la retenue (cf. chapitre 3) et à l'action érosive de la crue artificielle dans le lit de la rivière. Selon la situation hydraulique, les sédiments évacués se déposent le long de l'exutoire ou, au plus tard, en aval de son embouchure, dans des eaux dormantes (bassin de retenue, lac, piège à sédiments). Les propriétés physiques de la masse d'eau se trouvent modifiées par l'augmentation des matières en suspension qu'elle contient. De ce fait, la viscosité de l'eau, mais également sa conductivité électrique (selon la proportion de ions libérés) augmentent.

La **composition chimique** de l'eau de vidange dépend avant tout de la situation dans le bassin de retenue. Les sédiments organiques qui y sont déposés consomment une grande quantité d'oxygène, si bien que sa concentration en eau profonde est souvent très faible; quant à la couche sédimentaire, il y règne même des conditions anaérobies.

En pareil cas, les particules organiques des sédiments subissent une réduction chimique et se transforment en composés toxiques (H_2S , méthane, NH_3 , etc.). Lorsque le bassin est profond et bien rempli, la couche sédimentaire est soumise à une forte pression hydrosta-

tique. Les éventuelles substances toxiques sont alors libérées en infimes quantités dans la masse d'eau hypolimnique. Lorsque la pression diminue (par abaissement du niveau d'eau), des dégagements de gaz et des processus de transformation chimique se manifestent, ainsi que de gros tourbillons à proximité de la vanne de fond. La masse d'eau est enrichie par les substances libérées et le largage des sédiments réduits accroît plus encore la consommation d'oxygène.

Les substances ainsi dissoutes dans le bassin sont entraînées dans l'exutoire avec l'eau de vidange. Il en va de même pour les sédiments réduits qui, à nouveau, consomment de l'oxygène. Les paramètres physico-chimiques de l'eau se modifient parallèlement aux variations de la concentration des matières en suspension (fig. 4.2). Les variables que l'on peut quantifier de façon relativement aisée sont la **température de l'eau**, sa **teneur en oxygène**, sa **conductivité électrique**, son **potentiel redox**, son **pH** et, parfois, ses **composants azotés et phosphorés**.

La variable oxygène (concentration, consommation) est incontestablement le facteur primordial. Comparativement aux situations de crue naturelle, le taux de saturation de l'oxygène dans l'eau de vidange diminue constamment, alors que sa consommation ne cesse d'augmenter.

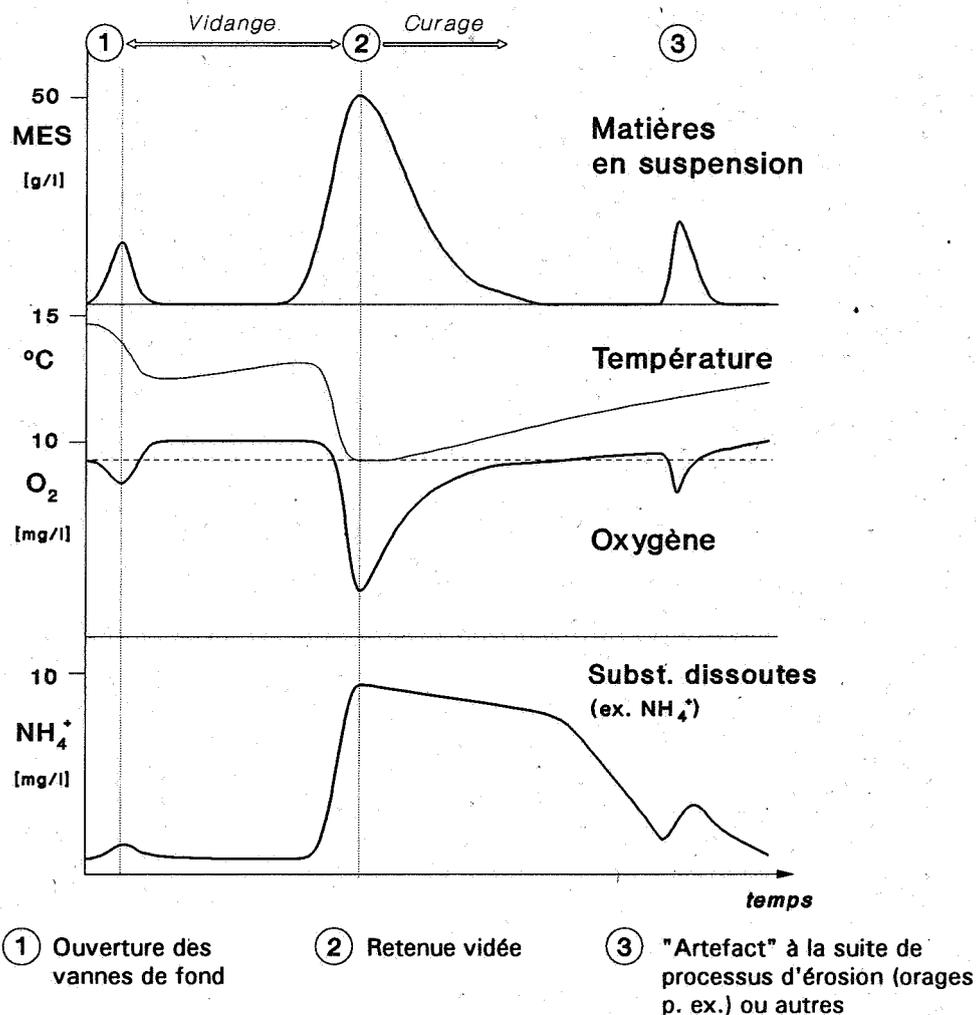


Fig. 4.2: Représentation schématique de l'évolution physico-chimique des eaux à l'aval du barrage pendant un curage. (Graphique tiré de RAMBAUD et al. 1988; modifié et complété)

La **conductivité électrique**, le **pH** et le **potentiel redox** permettent de quantifier la modification des rapports dans la masse d'eau. Ils indiquent, de diverses façons, les changements de la concentration ionique libre. La mesure de ces variables, qui peut être effectuée à peu de frais tout au long de l'opération de dévasement, constitue une alternative intéressante aux analyses chimiques, qui prennent beaucoup de temps.

Les **nutriments**, composés azotés et phosphorés par exemple, ont également leur rôle à jouer; leur présence dans les sédiments de la retenue s'explique par l'apport en nutriments en provenance du bassin versant. La transformation anaérobie des composés azotés entraîne la formation de nitrites et d'ammonium, deux éléments hautement toxiques pour la faune piscicole, dont l'action sub létale se manifeste en très faibles concentrations déjà (cf. chapitre 5.1).

4.3 Atteintes portées aux biocénoses

Les opérations de dévasement ont toujours des répercussions sur les organismes aquatiques, quelle que soit la morphologie de l'exutoire. Les dommages écologiques qu'elles peuvent engendrer dépendent de l'ampleur du stress hydraulique, du volume des matières en suspension et de l'importance de la charge physico-chimique, que les systèmes hydrologiques supportent plus ou moins bien selon leur stabilité structurelle et écologique (cf. chapitre 4.1).

Ainsi, les dommages d'ordre mécanique portés aux biocénoses sont relativement faibles dans un **tronçon à débit résiduel subissant des charges hydrauliques périodiques** (crues naturelles, p. ex.). Les organismes sont avant tout menacés par les fortes concentrations de matières en suspension (muqueuses et branchies endommagées, sédimentation du substrat réduisant les possibilités d'habitat) et le manque d'oxygène (cf. chapitre 5). Les autres cas de mortalité - tant animale que végétale - peuvent aussi être provoqués par les crues naturelles. Dans ce type de cours d'eau, l'ampleur des dégâts - mécaniques, en tout cas - enregistrés dans les tronçons stables (le plus souvent naturels) est inférieure à celle que l'on observe dans les tronçons instables ou structurellement pauvres, où les organismes n'ont aucune possibilité de refuge (REY et GERSTER 1992).

Dans un **tronçon à débit résiduel sensible aux charges hydrauliques**, par contre, de petites interventions (curages par l'utilisation des vannes de fond, p. ex.) suffisent à mettre en danger, voire à détruire, le milieu écologique. Les suivis de vidange ont montré (cf. chapitre 5.2) que l'ampleur des dommages est, en général, proportionnelle à l'éloignement morphologique et biologique des eaux de leur état (naturel) initial (cf. fig. 4.3): les modifications par à-coups des composantes hydrauliques détruisent les structures instables du lit de la rivière et, partant, les communautés d'espèces animales et végétales. Seuls les organismes originels, qui supportent le stress, survivent dans ce milieu où ils font d'ailleurs office de pionniers au moment du repeuplement.

Le stress hydraulique peut donc, à lui seul, causer des dommages importants, auxquels il convient d'ajouter les effets inhérents à l'apport de matières en suspension et au manque d'oxygène. Les pertes sont particulièrement élevées pour les organismes benthiques situés dans les tronçons de ruisseau colmatés, car ils ne peuvent pas se réfugier dans la zone interstitielle du lit.

Systeme résiduel à l'aval du barrage

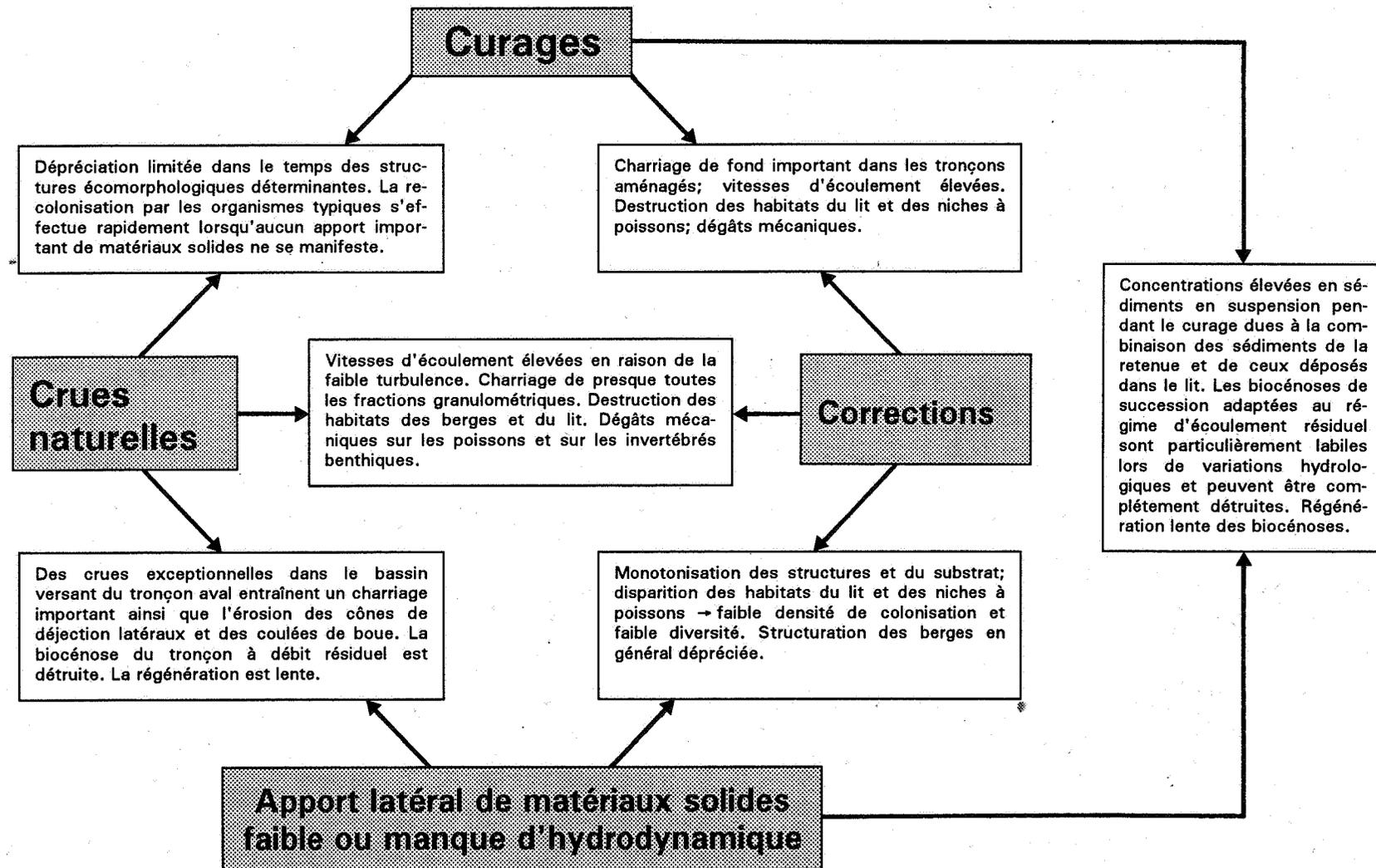


Fig. 4.3: Interactions entre les processus naturels et les nuisances anthropiques dans le tronçon à débit résiduel à l'aval du barrage (avant la restitution des eaux turbinées).

4.4 Agir demain grâce aux connaissances acquises aujourd'hui

Les études menées à ce jour ont montré qu'il est pour ainsi dire impossible de prévoir le déroulement et les conséquences écologiques des opérations de dévasement. Elles ont cependant révélé qu'il fallait dissocier les retombées directes des retombées indirectes sur la faune et la flore des cours d'eau. En résumé, les suivis de vidange ont permis de faire les constats suivants:

- a) **hydrodynamique et dynamique du charriage et des matières en suspension dans l'exutoire:** plus ces phénomènes s'approchent des crues naturelles, plus la probabilité de dommages écologiques durables est faible;
- b) **géomorphologie du lit:** les cours d'eau naturels ou quasi naturels possèdent un plus grand pouvoir tampon et offrent, du fait de la diversité de leurs structures, une protection suffisante aux organismes vivants, leur permettant de supporter des concentrations de matières en suspension élevées;
- c) **hydraulique érosive et apport de particules solides dans le tronçon à débit résiduel:** dans le cadre d'un dévasement, ces phénomènes sont régulables et leurs effets négatifs sur l'écomorphologie peuvent, le cas échéant, être contrôlés;
- d) **rinçage à l'eau claire (exempte de matières en suspension):** un rinçage à la fin de l'opération de dévasement proprement dite permet d'éliminer les sédiments accumulés dans le tronçon à débit résiduel;
- e) **conditions chimiques n'existant pas à l'état naturel:** les poissons supportent très mal une diminution abrupte d'oxygène (cas extrême), même de très courte durée;
- f) **valeurs limites à respecter:** pour ce qui est des concentrations maximales de polluants et de matières en suspension, les valeurs limites doivent être fixées de cas en cas, car le pouvoir tampon varie d'un système hydrologique à l'autre (cf. points a et b).

5. Exemples de suivis de curage

5.1 Etudes françaises

Tout comme le Règlement sur les barrages en Suisse, une loi française (Circulaire du 14 août 1970, No 70/15) prévoit que les organes d'écoulement mobiles doivent faire l'objet de travaux d'entretien, ce qui nécessite une vidange complète tous les dix ans ("visites décennales"). De plus, 15 des quelque 450 barrages exploités par Electricité de France (EDF) doivent subir une vidange complète chaque année. Les connaissances sur l'impact de ces opérations sur les écosystèmes aquatiques étant minimales, la Direction des Etudes et Recherches d'EDF a lancé, en 1982, un programme de recherches, d'entente avec le Ministère de l'industrie et le Ministère de l'environnement.

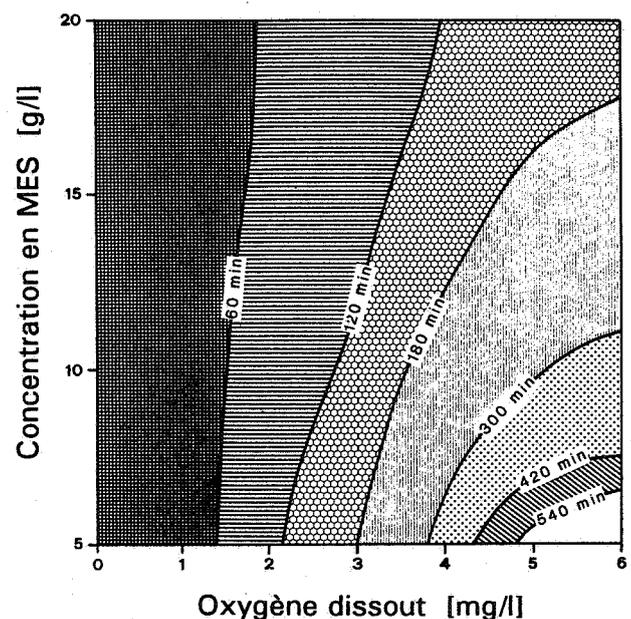
Les résultats recueillis après analyse de 18 barrages (GARRIC et al. 1990, GOSSE 1991, RAMBAUD et al. 1988, ROFES et al. 1991) sont présentés ci-après, sans insister sur les expériences valables pour un seul barrage, même s'il ressort de ces différentes publications que chaque retenue a sa spécificité propre et que les modèles élaborés (pour les matières en suspension (MES) et l'oxygène; cf. plus loin) doivent être étalonnés en conséquence.

5.1.1 Analyses écotoxicologiques

Dans une première étape, il s'est agi de déterminer les paramètres qui influent le plus sur la mortalité de la faune piscicole au cours d'un dévasement. Pour ce faire, GARRIC et al. (1990) ont exposé des truitelles (*Salmo trutta f. fario*) aux conditions physico-chimiques intervenant lors d'une purge. Les essais ont porté sur l'effet, en fonction du temps d'exposition, de différentes concentrations de MES, d'azote ammoniacal (NH_3) et d'oxygène (resp. de consommation d'oxygène), facteurs considérés comme principaux responsables de la mortalité des poissons.

Fig. 5.1: Courbes isochrones du seuil 10% de mortalité des alevins de truite fario à différents temps d'exposition. Les courbes isochrones joignent les couples O_2 , MES provoquant le même effet toxique (mortalité de 10%) pour un certain temps d'exposition (60, 120, 180, 300, 420, 540 minutes).

(Figure tirée de GARRIC et al. 1990)



Il est apparu que les concentrations en ammoniacque relevées sur le terrain - en conditions réelles de purge - atteignent très rarement des valeurs susceptibles d'entraîner la mort des poissons. Par contre, aussi bien l'augmentation de la concentration de MES qu'un abaissement de la teneur en oxygène induisent des taux de mortalité croissant avec le temps d'exposition.

Les chercheurs ont également procédé à des essais combinant des concentrations de MES et d'oxygène pour différents temps d'exposition, qui ont mis en évidence un **effet synergique** entre ces deux facteurs. Ainsi, le taux de mortalité s'est avéré beaucoup plus élevé lorsque, pour une teneur en MES donnée, l'eau était faiblement oxygénée. La transposition graphique de ce constat est représentée à la figure 5.1, par des courbes isochrones de seuil de mortalité 10% (LT₁₀) pour des truitelles.

5.1.2 Analyses sédimentologiques

Cette mise en évidence d'un effet synergique entre une baisse de concentration d'oxygène dissous et un enrichissement de MES sur les poissons soumis à un dévasement permettra, à l'avenir, de mieux contrôler le déroulement de l'opération (GARRIC et al. 1990). Cela ne veut pas dire pour autant que l'on puisse renoncer aux analyses sédimentologiques: il s'agit en effet, pour chaque retenue, de recueillir des indications sur la nature de la masse sédimentaire et, plus particulièrement, sur les réactions qu'entraîne la consommation d'oxygène.

Les analyses sédimentologiques effectuées par ROFES et al. (1991) sur deux objets représentatifs ont mis en lumière de grandes différences de caractérisation entre les matériaux (potentiels) évacués. Les échantillons prélevés en différents endroits et à différentes profondeurs à l'aide d'instruments spécifiques (ROFES et SAVARY 1981) présentaient des particularités bien distinctes, que ce soit pour la teneur en eau et la part de matériel organique ou de carbonate, pour le pH et la conductivité, ou encore pour les nutriments et les métaux. Ces différences sont dues à la nature très variable des matériaux entraînés dans les barrages et, partant, à la nature du bassin versant (géologie, végétation, climat), sans oublier que les sédiments peuvent encore se modifier dans le barrage même et que la sédimentation des particules solides (granulométrie) n'est pas un processus uniforme.

La cinétique de consommation d'oxygène par les sédiments dépend principalement de:

- la teneur en eau,
- la part de matériel organique,
- la part de composés réduits (p. ex. Mn^{2+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , H_2S , CH_4).

Le volume d'oxygène consommé a été évalué en conditions de laboratoire en analysant des échantillons de sédiments. Il en ressort que:

- la consommation d'oxygène (par unité de temps) d'un sédiment est directement proportionnelle à la concentration de MES;
- la consommation d'oxygène commence à dépendre du milieu oxygéné lorsque la concentration en oxygène est inférieure à 3 mg/l: le sédiment consomme alors moins d'O₂ ;
- la prise en compte de la variable température révèle une interaction entre ce paramètre et la consommation d'oxygène, cette dernière étant plus faible (par unité de temps) à basse température.

Les sédiments consomment donc l'oxygène en quantités très variables. En déterminant ce paramètre avant d'entreprendre un dévasement, on peut évaluer les conséquences de ce dernier sur les biocénoses. C'est dans ce but que ROFES et al. (1991), prenant en compte la saturation d'O₂ et les mécanismes de déposition des sédiments en aval des retenues, ont élaboré leurs modèles qui permettent de simuler l'évolution des rapports MES/O₂ à différentes distances du barrage. Sur la base de ces données, on peut ensuite déduire les différentes conditions écotoxicologiques et le degré de charge pour la faune piscicole.

Dans la pratique, ces modèles doivent être étalonnés pour chaque objet soumis à un dévasement, ce qui suppose d'analyser les sédiments et de déterminer par approximation différents coefficients (taux de saturation d'O₂ et taux de sédimentation en aval de la retenue).

Ces modèles prévisionnels, qui doivent encore être améliorés, ont pour but d'optimiser la gestion des vidanges. Ils permettent en effet, par le biais de quelques mesures rapides en quelques points (pendant le dévasement, en règle générale: une station à l'aval immédiat de la vanne de fond), d'évaluer en temps réel les risques encourus par les poissons à différentes distances du barrage. ROFES et al. (1991) ont représenté sous forme graphique (cf. fig. 5.2) les courbes de consommation d'oxygène (pour différentes concentrations de MES et différents temps de transit) auxquelles ils ont superposé les courbes isochrones (concentrations MES/O₂) de mortalité 10% (pour différents temps d'exposition).

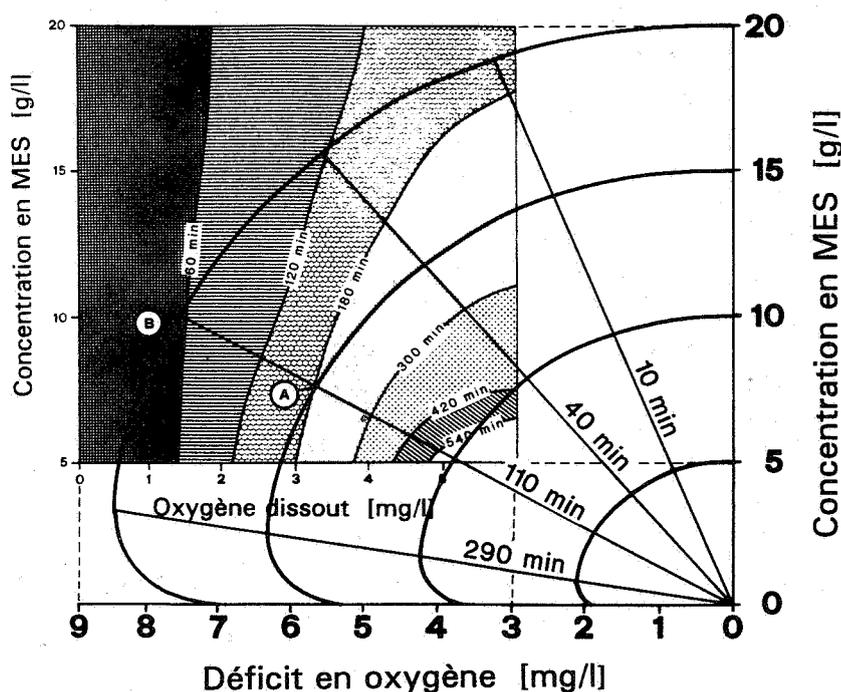


Fig. 5.2: Superposition des courbes d'évolution conjointe du déficit en oxygène dissout et du taux de matières en suspension au cours du transit vers l'aval, et des courbes isochrones du seuil 10% de mortalité des alevins de truite fario.

Exemple d'interprétation: 10% d'une population d'alevins de truite fario située à 110 minutes de temps de transit à partir du barrage mourront si 15 g/l de MES sont évacués pendant 3 heures au droit du barrage (A), ou si 20 g/l de MES sont relâchés pendant une heure (B), en supposant que la concentration d'oxygène dissout de l'eau à l'amont de la retenue soit de 9 mg/l.

(Figure tirée de ROFES et al. 1991)

5.1.3 Critique

Malgré les gros efforts consentis par les chercheurs français, les incertitudes sont encore loin d'être levées. Les modèles élaborés donnent certes une idée des incidences possibles engendrées par l'eau de vidange et permettent de prendre des mesures pour en diminuer l'ampleur. Mais, en cas de vidange complète, par exemple, qui implique l'évacuation d'un volume de sédiments élevé à très élevé, il est quasiment impossible de moduler la purge de manière à permettre une dilution contrôlée à l'aval du barrage. Par ailleurs, tous les efforts entrepris pour modéliser et optimiser les opérations de dévasement se révéleront inefficaces en situation extrême (pics de MES et conditions physico-chimiques catastrophiques), même si celle-ci est de très courte durée: les biocénoses subiront quand même de lourdes pertes. Ces modèles ne tiennent pas assez compte - pour l'instant - des données propres aux écosystèmes de l'exutoire. De même, les effets à long terme des sédiments déposés en aval d'une retenue (cf. chapitre 4.3) n'ont jusqu'ici pas été pris en considération. Il conviendrait, à l'avenir, de définir plus précisément ce système. Il est en effet fort probable que, selon les conditions régnant en temps normal (cf. fig. 4.3) et les biocénoses présentes dans le milieu à ce moment-là, on enregistrerait des différences importantes entre les coefficients utilisés pour ces modèles. Autrement dit: la détermination de ces coefficients se révélera toujours très difficile et devra le plus souvent être vérifiée par l'analyse d'échantillons.

En Suisse, les problèmes sont en général d'un autre ordre, puisque les barrages devant être curés dans l'arc alpin sont pour la plupart des lacs artificiels oligotrophes (cf. chapitre 4.1). Or, la charge organique de ces systèmes est relativement peu élevée, vu la faible densité de population des bassins versants et la production autochtone. Il arrive toutefois quand même, surtout dans les retenues situées à basse altitude et au sud des Alpes, que les sédiments présentent un caractère écotoxicologique. En cas de doute, il vaut donc toujours mieux analyser les sédiments avant de les évacuer.

5.2 Curages suivis entre 1990 et 1992 (sur mandat de l'OFEFP)

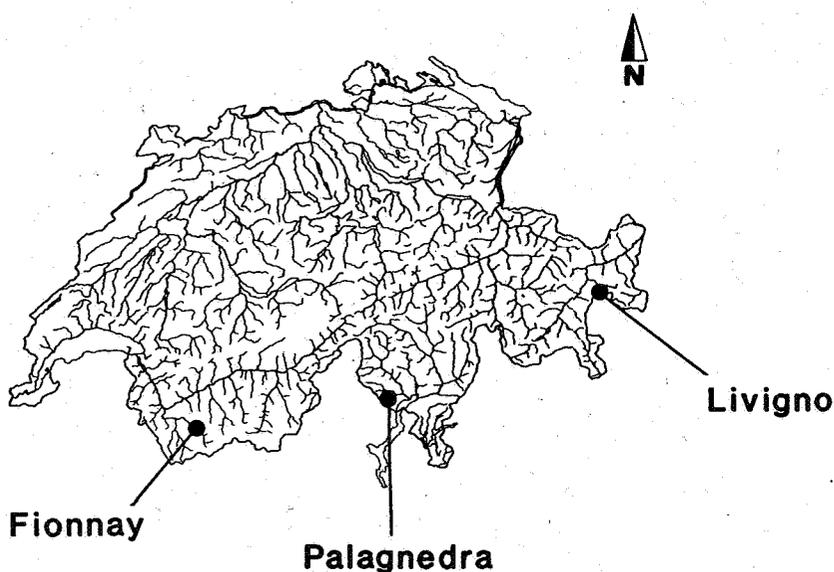


Fig. 5.3: Situation géographique des trois objets analysés.

Les études de suivi ont porté sur trois objets choisis pour leur caractère représentatif (GERSTER et REY 1992a; REY et GERSTER 1991, 1992). On a ainsi pu mettre en évidence un certain nombre de caractéristiques valables pour plusieurs objets de l'arc alpin suisse et pour différents types de curages. Le tableau 5.1 donne un aperçu et quelques données techniques relatives à ces trois objets; la figure 5.3 en donne une localisation approximative.

Tab. 5.1: Curages suivis sur mandat de l'OFEFP (GERSTER et REY 1992a; REY et GERSTER 1991, 1992); caractérisation des objets analysés.

	Livigno (GR)	Fionnay (VS)	Palagnedra (TI)
retenue	retenue de Livigno	bassins de comp. de Grande-Dixence et Mauvoisin	bassins de comp. de Palagnedra
volume utilisable à la cote maximale	164 Mio m ³	chaque 0,17 Mio m ³	4,1 Mio m ³
système fluvial en aval	Spöl	Dranse de Bagnes	Melezza
Q _{moyen naturel}	7-12 m ³ /s	11-12 m ³ /s	5-7 m ³ /s
Q _{débit résiduel}	1 m ³ /s jour: 2,4 m ³ /s nuit: 1 m ³ /s } été hiver: 0,5 m ³ /s	2,4 m ³ /s prolifération par des affluents en aval	0,5 m ³ /s prolifération par des affluents en aval
Q _{crue actuel (annuel)}	< 5m ³ /s	20-40 m ³ /s	50-1000 m ³ /s
faune piscicole	Truite fario	Truite fario	Truite fario, Chabot + Cyprinides (Barbeau, Strigione, Chevaine)
types d'intervention	purge des vannes de fond: → élimination des sédiments à proximité des vannes de fond	vidange et curage des bassin de compensation de Grande Dixence et Mauvoisin	vidange total → révision du clapet de la vanne de fond
date	7 juin 1990	29 juin 1991	3/10 sept. 1991
Q _{max} pendant le curage	30 m ³ /s	40 m ³ /s env.	40 m ³ /s
quantité de l'eau de purge totale	525'000 m ³	877'000 m ³	7-8 mio m ³
quantité de sédiments mobilisés	60 m ³ environ	?	175'000 m ³ env.
concentration en MES (maximum)	15 ml/l	150 ml/l	900 ml/l
valeur limite pour MES fixé par la législation du canton concerné	variable (10-20 ml/l)	10 ml/l	5 ml/l

5.2.1 Débits et régimes d'écoulement

Comme le montrent les données du tableau 5.1, les débits maximaux mesurés lors des trois curages étudiés sont du même ordre de grandeur. Comparativement aux crues naturelles qui ont lieu chaque année, seul le débit de crête mesuré au barrage de Livigno est relativement élevé. A Palagnedra, le volume des crues de ces dernières années était bien supérieur à la quantité d'eau utilisée pour la chasse de 1991.

C'est donc essentiellement à Livigno qu'on a pu observer des changements morphologiques du lit de la rivière, dus aux forces structurantes de régimes d'écoulement extraordinaires. En l'occurrence, des cônes de déjection latéraux, qui s'étaient formés pendant de nombreuses années, ont été emportés (ce qui a provoqué un accroissement de la concentration de matières en suspension en aval), le lit du Spöl s'est creusé localement et il a subi un "nettoyage" complet, alors qu'en temps normal il a plutôt tendance à s'ensabler et à s'embourber.

Dans la Dranse de Bagnes (bassin de compensation de Fionnay), les sections pourtant spécialement corrigées au préalable pour dévier les grands débits de purge (rectification et remblai) ont été l'objet de grandes modifications de structure en raison des forces érosives de l'eau.

5.2.2 Matières solides, nature du substrat

Les concentrations de matières solides en cours de purge étaient jusqu'à présent le seul facteur soumis à une valeur limite par les autorités cantonales compétentes et son respect était expressément signifié à l'exploitant qui présentait une demande de curage. En règle générale, ces valeurs limites cantonales oscillent entre 5 et 10 ml de dépôt (environ 5 à 10 g/l de matière sèche) par litre d'eau (temps de sédimentation dans la trémie de Imhoff: de 30 minutes à une heure). En fait, elles ont été fixées essentiellement sur la base de chiffres théoriques issus des valeurs létales déterminées par leurs auteurs en conditions de laboratoire. Certains cours d'eau, cependant, atteignent de façon naturelle, en situation de crue, des concentrations de MES similaires, voire plus élevées (à Landquart, p. ex.; cf. fig. 5.4).

Comme le montrent les résultats de l'inventaire établi pour les poissons des trois objets analysés, une concentration de matières en suspension supérieure à la valeur limite précitée n'a pas, a priori, de conséquences graves pour la faune piscicole (cf. chapitre 5.2.4).

Les dépôts de MES consécutifs aux opérations de chasse ont eu une influence beaucoup plus importante dans les lits des rivières. C'est surtout dans les tronçons à débit résiduel, où le charriage de fond est très réduit, voire absent, que le dépôt de matériaux fins dans le substrat peut avoir des effets sur les biocénoses (organismes benthiques, oeufs et larves de certaines espèces de poissons). Sur ce plan, les effets à long terme sont difficilement quantifiables et encore peu connus.

Le curage du bassin de compensation de Palagnedra (cf. fig. 5.5) illustre bien les conséquences structurelles engendrées par un volume élevé de sédiments. A Golino, par exemple (à environ 7 km en aval du barrage de Palagnedra), on a mesuré en certains endroits des dépôts de sédiments fins de plus d'un mètre d'épaisseur.

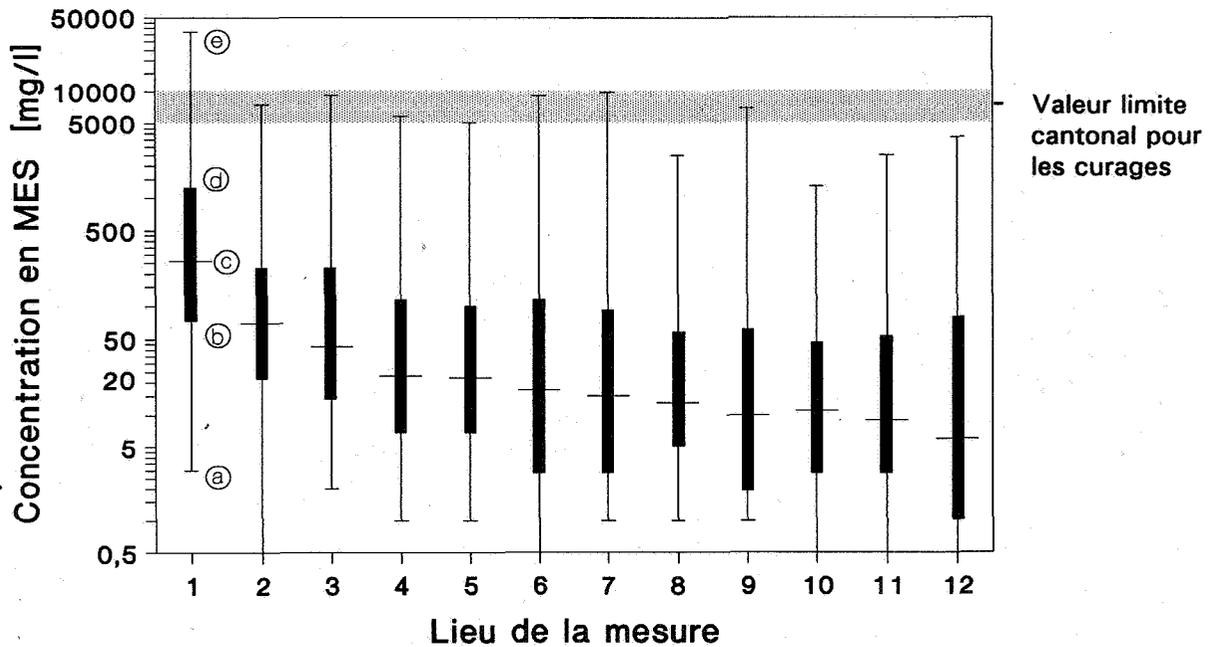


Fig. 5.4: Concentration des matières en suspension (MES; sur une échelle logarithmique) pendant la période 1980-84 mesurée à 12 points de prélèvement du service hydrologique national; les mesures englobent le poids sec des sédiments en suspension décantables et non décantables (valeurs tirées de WAHLI 1985).

a) Minimum pour la période
 b) Moyenne des débits mensuels minimo
 c) Moyenne géométrique 1980-84
 d) Moyenne des débits mensuels maximo
 e) Maximum pour la période

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 Landquart (Felsenbach) | 7 Ticino (Bellinzona) |
| 2 Rhône (Porte du Scex) | 8 Reuss (Seedorf) |
| 3 Rhein (Diepoldsau) | 9 Emme (Wiler) |
| 4 Linth (Mollis) | 10 Aare (Untersiggenthal) |
| 5 Lütchine (Gsteig) | 11 Reuss (Mühlau) |
| 6 Lonza (Blatten) | 12 Thur (Halden) |

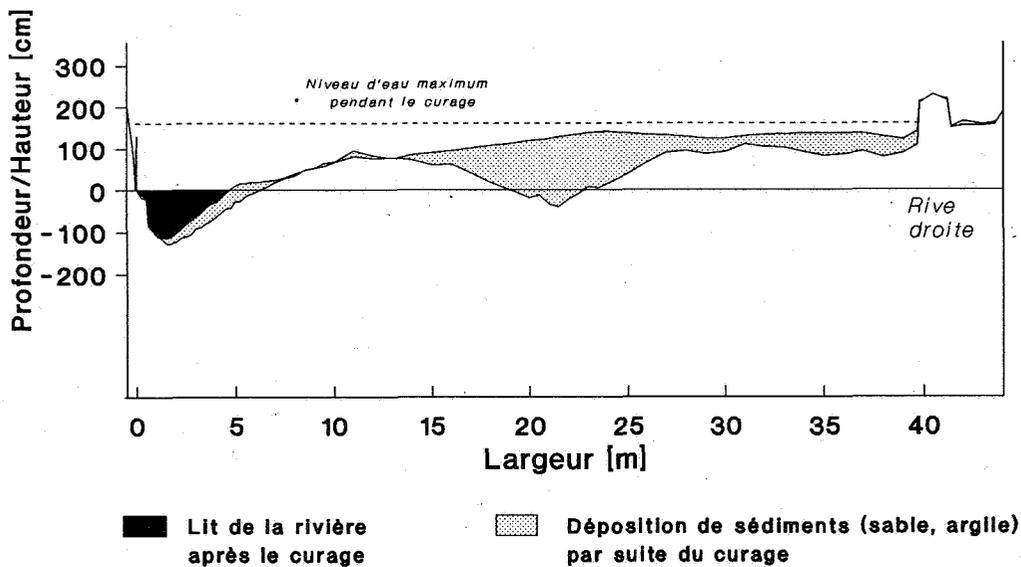


Fig. 5.5: Profil transversal à Ponte Golino (curage de Palagnedra). L'épaisse couche de sédiments a été en grande partie évacuée deux semaines après le curage en raison d'une crue extraordinaire ($Q_{\max} = 290 \text{ m}^3/\text{s}$).

L'exemple des deux autres objets l'a prouvé: l'accumulation des sédiments dans le tronçon à débit résiduel peut être évitée en procédant à un rinçage avec de l'eau exempte de MES. Cette mesure palliative peut être effectuée pour autant qu'il y ait suffisamment d'eau dans le bassin, à savoir lorsque le barrage est en liaison avec d'autres retenues situées en amont ou qu'il s'agit d'une purge de la vanne de fond. Ce nettoyage du lit de la rivière accélère en outre le processus de repeuplement, car il élimine non seulement les sédiments accumulés, mais également ceux qui s'y étaient déposés au fil des jours.

5.2.3 Chimie de l'eau

On s'attendait à ce que les conditions réductrices dues aux sédiments anoxiques évacués aient un effet négatif sur les biocénoses des cours d'eau (cf. chapitre 5.1). Cette situation ne s'est produite qu'à Palagnedra, raison pour laquelle ce barrage nous sert à nouveau d'exemple (cf. fig. 5.6).

La baisse de la température de l'eau alla de pair avec l'écoulement des eaux profondes, plus froides, par la vanne de fond. Ce n'est que le 10 septembre, au cours du curage principal, que la teneur en oxygène et la concentration d'O₂ diminuèrent pour atteindre une valeur plancher, mortelle pour toutes les espèces de poissons. A l'origine de ce phénomène: l'évacuation massive de sédiments réduits à ce moment-là (retenue presque vide, débit de plus en plus faible). Il n'a pas été possible d'effectuer un rinçage immédiat avec de l'eau claire.

Dans les deux autres objets étudiés, en revanche, on n'a pas observé de modifications sensibles des paramètres standard physico-chimiques.

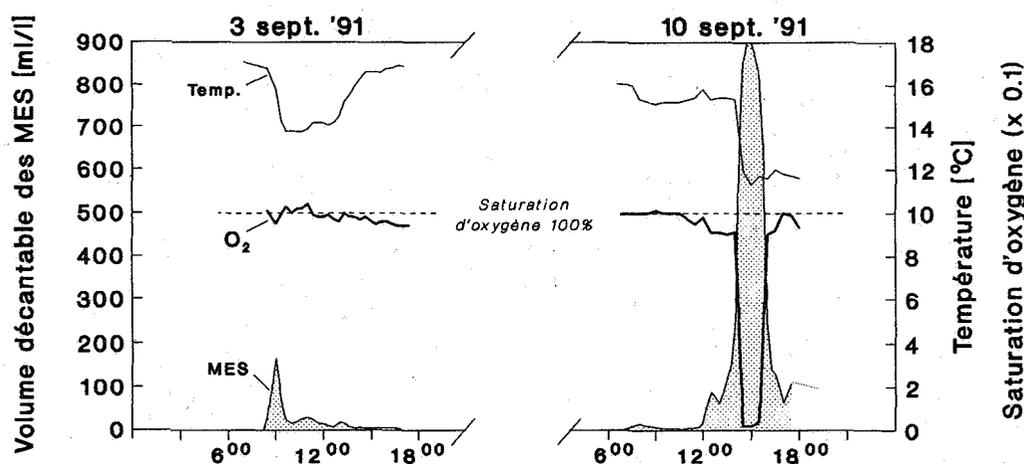


Fig. 5.6: Vidange et curage du bassin de compensation de Palagnedra en septembre 1991. Volume des dépôts de matières en suspension (MES; ml/l·½h), température de l'eau et saturation d'oxygène à la station de prélèvement "Corcapolo" pendant les phases principales du curage, les 3 et 10 septembre.

5.2.4 Conséquences écologiques

Les macro-invertébrés

La faune des macro-invertébrés reflète en général bien les conditions physico-chimiques et, plus encore, écomorphologiques (type d'écoulement, structure, substrat) qui règnent dans un cours d'eau (cf. chapitre 4.1). Ainsi, les suivis des trois objets d'études présentaient certaines analogies, après que l'on eut subdivisé en groupes fonctionnels les différents représentants de cette faune. Les espèces typiques des torrents de montagne dominaient dans la Dranse de Bagnes et dans la Melezza. Ce n'est guère étonnant car, aujourd'hui encore, des crues se produisent régulièrement dans ces deux systèmes, en dépit de leur utilisation à des fins hydro-électriques. Dans le Spöl, en revanche (cf. fig. 4.1), on a observé une densité de population inhabituellement élevée, compte tenu de l'altitude et de la forte proportion d'espèces plutôt peu rhéophiles.

Comme l'ont montré des séries de mesures de dérive effectuées à l'aide de tubes ou de filets pendant ces opérations, les curages ont tous trois entraîné une forte réduction des communautés de macro-invertébrés benthiques. La figure 5.7 montre le profil de la dérive de catastrophe à une station proche de la retenue, sur le Spöl. Cette dérive, qui a touché plus ou moins fortement tous les organismes benthiques, a provoqué des taux de dépeuplement de 70 à 95% par rapport à la population initiale.

Cependant, ce phénomène se produit également en cas de crue naturelle. Ce qui est important, c'est la vitesse de variation des débits, tant au début qu'à la fin d'une crue provoquée artificiellement. Si le débit augmente lentement, les organismes benthiques ont le temps de

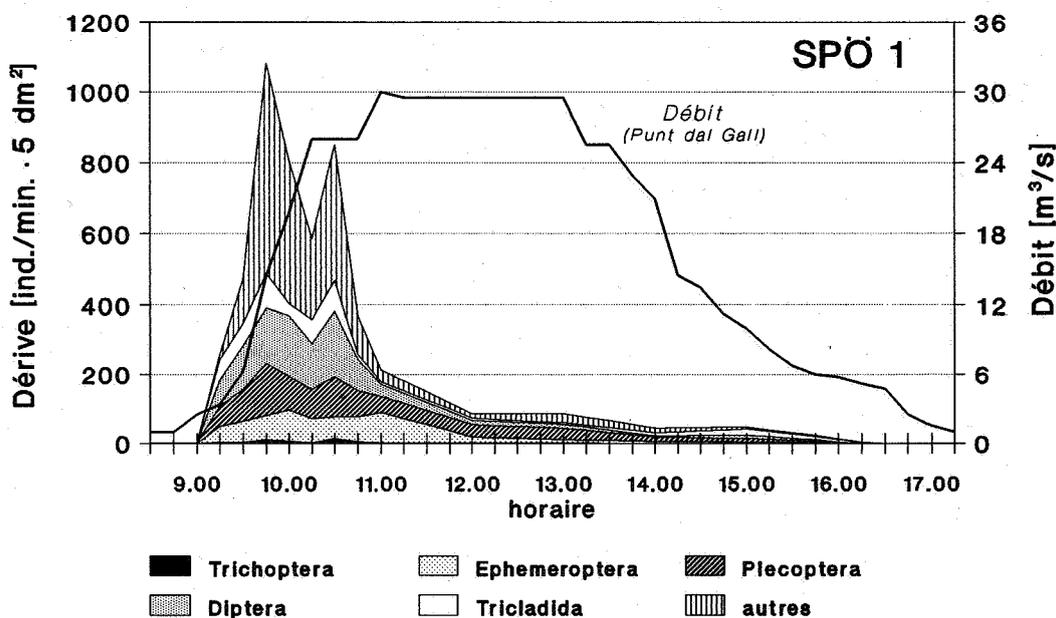


Fig. 5.7: Dérive totale (sans le zooplancton de la retenue) à la station de prélèvement "SPÖ 1" pendant le curage de Livigno le 7 juin 1990 (station de mesure de débit "Punt dal Gall" à proximité de la station de prélèvement).

fuir et de se réfugier dans les failles du lit ou dans la zone interstitielle et les poissons, de se mettre à l'abri. De même, au moment où les eaux se retirent, on peut éviter des pertes supplémentaires en refermant lentement les vannes, ce qui permet aux organismes (et aux poissons) qui s'étaient mis en sécurité sur les côtés de regagner le lit principal.

Les échantillons d'organismes benthiques de surface recueillis avant et après curage ont permis de tirer des conclusions sur le dépeuplement quantitatif et le repeuplement par les macro-invertébrés. L'objet de référence est une nouvelle fois le barrage de Palagnedra. Comme on peut le voir sur la figure 5.8, deux jours après le premier curage (interrompu), on n'a pas constaté de véritables phénomènes de dépeuplement. Par contre, après le curage principal du 10 septembre, et 15 jours plus tard (à la suite de plusieurs "purges de nettoyage"), le lit de la rivière ne comptait plus que quelques individus. Six mois plus tard cependant, après que des crues naturelles eurent nettoyé le lit de ses sédiments, la population était à nouveau dense. On a pu faire des observations semblables - repeuplement rapide après les curages - dans le Spöl et dans la Dranse.

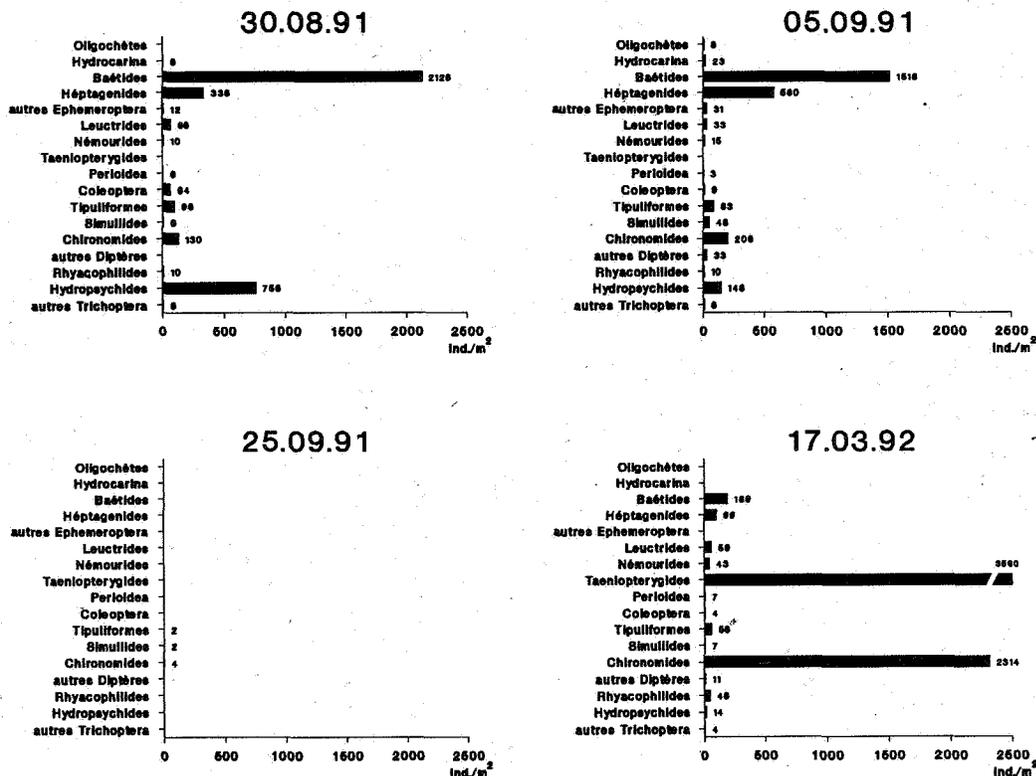


Fig. 5.8: Composition de la biocénose benthique à la station de prélèvement "Ponte Salmina" 3 jours avant le 1er curage de Palagnedra (30.8.91), 2 jours après l'interruption du curage (5.9.91), à la fin du curage principale (10.9.91) et des curages de nettoyage (25.9.91) ainsi que six mois plus tard.

Ce repeuplement en macro-organismes benthiques est dû au retour des individus qui s'étaient abrités dans les interstices (BECKER et al. 1992, BRETSCHKO et al. 1986), à l'arrivée d'individus ayant résidé dans des sections amont de la rivière ou dans des torrents latéraux, ou encore à l'apport extérieur et à la ponte provenant de systèmes hydrauliques voisins. La courte durée de génération de la majorité des espèces explique ce rapide rétablissement de la faune des macro-invertébrés.

Ces différents processus de repeuplement n'ont pas pu être tous observés pour les trois objets suivis. Ainsi, dans le cas du Spöl, la situation écomorphologique du milieu s'est tellement modifiée à la suite du curage que, dans un premier temps, seuls les organismes rhéophiles ont été favorisés. Pour ce qui est de la Melezza, le repeuplement à partir de la zone interstitielle a été entravé par la couverture du lit de la rivière par les sédiments accumulés.

Les poissons

Les effets des purges sur la faune piscicole ont été analysés par le biais de recensements effectués au moyen de pêches électriques avant et après curage, ainsi que par des observations et des inspections de terrain pendant et immédiatement après ces opérations. En outre, les poissons capturés lors des expériences préliminaires ont été marqués afin de pouvoir chiffrer une émigration éventuelle.

Tant dans les investigations ultérieures faites dans le Spöl (curage de Livigno) et dans la Dranse de Bagnes (Fionnay) que dans les études intermédiaires effectuées après le curage interrompu de la Melezza (Palagnedra), on a retrouvé une grande partie des poissons recensés et marqués (fig. 5.9). Ainsi a-t-on pu attester de façon spectaculaire la fidélité des populations de truites à un lieu et exclure l'émigration de ces dernières - tout au moins des plus âgées ($> 0^+$) - pour cause de curage.

Aucune incidence directe de l'accroissement de MES sur la faune piscicole n'a été observée au cours de la purge du Livigno.

Par contre, durant le curage du bassin de Fionnay, on a mesuré dans la Dranse de Bagnes des dépôts d'au moins 30 ml/l (avec des pointes à 150 ml/l) pendant trois heures. Les muqueuses des truites ont été endommagées par la forte **dérive sableuse** et les **particules de sédiments fins** ont non seulement obstrué leurs lamelles branchiales, mais aussi recouvert l'épithélium des branchies. Toutefois, seuls les individus résidant dans les tronçons à structure instable ou en partie endigués ont été touchés. Les autres, ayant trouvé refuge dans un tronçon naturel, n'ont subi aucun dommage.

On n'a trouvé aucun poisson blessé ou mort dans la Melezza le premier jour du curage, interrompu par la suite, alors que les concentrations de matières en suspension étaient très élevées (jusqu'à 150 ml/l de dépôts) et que les dépôts de sédiments fins étaient déjà volumineux dans les zones d'eaux calmes. Même les groupes tributaires du lit de la rivière, comme le chabot, ont été retrouvés, deux jours plus tard, en même nombre qu'avant l'intervention. Ce n'est que lors du curage principal que, malgré la diversité structurelle élevée de la Melezza, les poissons n'ont plus trouvé aucun refuge: les concentrations de MES ayant

alors atteint 900 ml/l et le taux de saturation d'O₂, moins de 5%, ils n'eurent en effet guère de chance de pouvoir survivre.

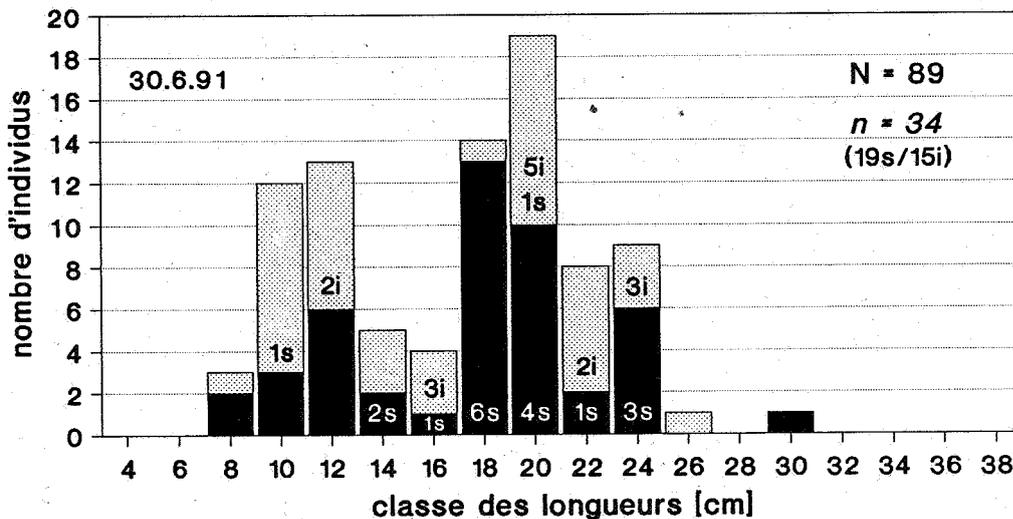
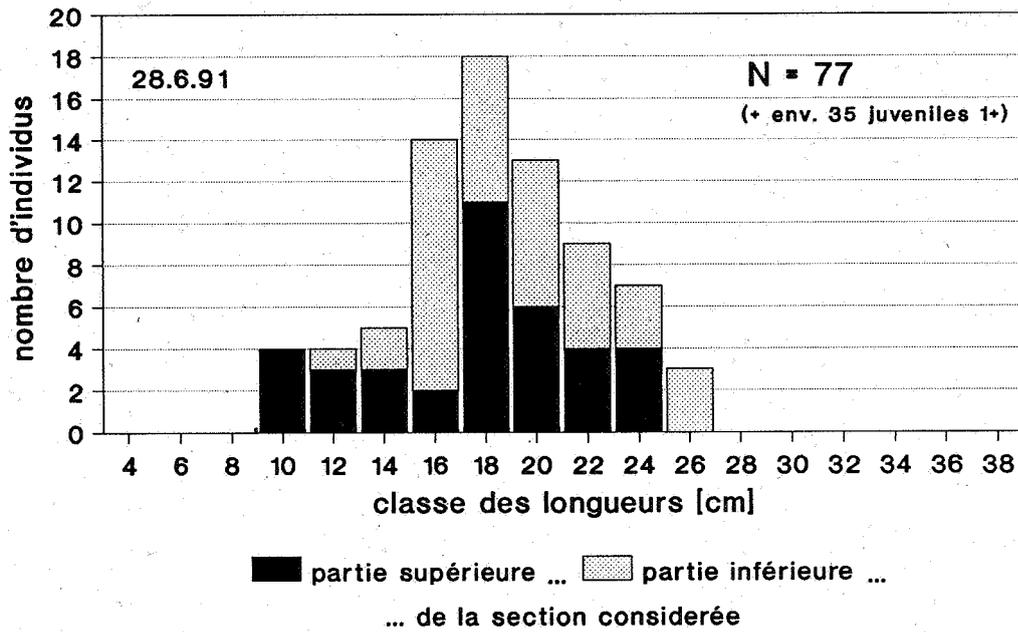


Fig. 5.9: Répartition en fonction de leurs longueurs des truites de rivière capturées au point "Lour-tier" (lit naturel) sur une distance de 300 m le jour précédant le curage (en haut) et le lendemain (en bas). Le tronçon où les poissons ont été pêchés a été subdivisé en deux parties, supérieure et inférieure.

Graphique d'en bas: indications relatives au nombre de poissons marqués repris (n = total poissons marqués capturés une seconde fois); i = poissons marqués "capturés pour la première fois dans la section inférieure du tronçon pêché", s = poissons marqués "capturés pour la première fois dans la section supérieure du tronçon pêché".

5.2.5 Opérations de curage et crues naturelles: comparaison

L'analyse des processus de repeuplement consécutifs au curage opéré sur la Melezza (GERSTER et REY 1992b) a également permis d'observer les incidences écologiques de crues décennale et centenaire, ceci afin de comparer les "catastrophes" écologiques engendrées par les curages et les "catastrophes" naturelles. Dans ce dernier cas, le débit était environ 10 fois supérieur à la quantité d'eau utilisée pendant le curage. Les concentrations de MES n'ont malheureusement pas été mesurées, mais elles étaient certainement largement en dessous des valeurs atteintes pendant l'intervention. Les pertes enregistrées ont touché presque exclusivement des poissons O⁺ et des organismes benthiques limnophiles.

Il semble donc que, pour des concentrations de MES atteintes uniquement en cours de curage, le milieu aquatique lui-même soit à l'origine de pertes biologiques qui touchent même les organismes rhéophiles. Si, en revanche, lorsque lesdites concentrations sont élevées (jusqu'à 100 ml/l), la saturation d'O₂ se situe aux environs de 80%, les pertes enregistrées concernent alors uniquement les organismes touchés par des dommages d'ordre mécanique (REY et GERSTER 1992).

6. Recommandations

A la lumière des connaissances acquises à ce jour, voici quelques **recommandations** à l'attention des autorités compétentes et des exploitants, portant sur la procédure à adopter en cas de curage, sur l'attribution des compétences et sur les études de suivi.

Rappelons, une fois encore, qu'il est quasi impossible d'établir une quelconque généralisation, étant donné la spécificité des différents objets soumis à des dévasements.

6.1 Demandes et autorisations obligatoires

Tant la loi sur la protection des eaux que la loi sur la pêche stipulent que les opérations de curage doivent être **soumises à autorisation**. Il appartient aux autorités cantonales compétentes de veiller à ce que les demandes soient déposées assez tôt. Le **délai minimum** est fixé à **un an**, mais les exploitants de centrales hydrauliques devraient même prévoir **3 à 5 ans** pour des opérations de grande envergure (vidange totale de réservoirs saisonniers) et avertir les autorités à ce moment-là déjà.

Tab. 6.1: demande de curage

<ul style="list-style-type: none"> - requérant, objet - type de mesure (curage par la vanne de fond, vidange totale) - but de la mesure - période prévue - description technique de l'objet (aussi détaillée que possible) <ul style="list-style-type: none"> · installations facilitant l'exécution du curage (galeries de vidange, etc.) - données hydrologiques et hydrauliques des systèmes aquatiques - sédiments déposés dans le bassin <ul style="list-style-type: none"> · type (caractérisation physico-chimique) et volume · quantité mobilisée probable - évaluation des possibilités permettant d'atteindre le but visé (curage ou mesures alternatives; cf. chapitre 3.4) <p>.....</p> <ul style="list-style-type: none"> - Une fois le curage programmé: - indications sur l'opération proprement dite <ul style="list-style-type: none"> · durée prévue (temps de rinçage compris) · débit (y compris en aval de la retenue) · température et chimie de l'eau · possibilités de contrôler l'évolution de la concentration de matières en suspension par un apport d'eau de dilution propre au moment voulu, p. ex. - biologie des systèmes aquatiques (espèces piscicoles, gestion et évaluation de la situation écologique) - incidences probables sur l'environnement et durée de ces incidences <ul style="list-style-type: none"> · lieu et durée de dépôt des sédiments évacués dans le lit de la rivière (et influence du phénomène sur les eaux dormantes situées en aval) · dommages directs subis par les animaux et les plantes (dans le lit de la rivière et dans la zone alluviale) · dégradation des biotopes (à court, moyen et long terme) · privation de loisirs et de détente (pêche, baignade) · autres (y.c. les incidences positives, comme le nettoyage des substrats colmatés) - mesures prophylactiques possibles et prévues pour minimiser les effets négatifs <ul style="list-style-type: none"> · évacuation des poissons vivant dans la retenue ou dans les tronçons en aval, p. ex.

Les **demandes de curage** doivent comporter des indications détaillées et fiables sur les mesures prévues ainsi que sur les incidences possibles (cf. tableau 6.1). L'exploitant doit notamment procéder à des analyses préliminaires (examens sédimentaires, évaluation des mesures prophylactiques, etc.) afin de protéger les espèces animales et végétales et en notifier les résultats dans sa demande.

Actuellement, les demandes contiennent toutes les données d'ordre technique, mais les indications portant sur le volume et le type de sédiments sont, par contre, souvent insuffisantes. De plus, les exploitants ne sont pas tenus de mentionner dans leur demande les incidences écologiques possibles, bien que l'on sache depuis longtemps que les curages sont source de dégâts, à commencer par la mort des poissons. Il importe de **prendre dorénavant en compte les aspects d'ordre écologique avant de délivrer d'autorisation**, car les exploitants, rendus conscients de leurs responsabilités, s'efforceront alors d'éviter les dommages.

Pour réaliser cet objectif, il convient de renforcer la collaboration entre les exploitants et les autorités chargées de délivrer les autorisations, afin que les deux parties veillent au bon fonctionnement des installations et à la diminution des risques écologiques liés à l'évacuation des sédiments.

Conformément au principe de causalité (pollueur-payeur), il appartient à l'exploitant d'une retenue de rassembler les informations requises pour la demande de curage. Il est en outre tenu de respecter les dispositions légales existantes (la loi sur la pêche, notamment) ainsi que les directives dictées par l'**autorité chargée de délivrer les autorisations**. Celle-ci est habilitée à **contrôler** les données inscrites dans la demande, de même que la stricte application de ses directives, en s'appuyant notamment sur les analyses préliminaires et sur les valeurs enregistrées lors de précédents suivis ou en exigeant des études complémentaires.

6.2 Planification et étude de suivi

► Caractérisation du système aquatique

Avant de prendre les mesures permettant d'éviter ou de recenser les risques écologiques, il faut procéder à la **caractérisation du système aquatique** (cf. chapitre 4.1), en prenant notamment en compte les données morphologiques et hydrologiques du lit de la rivière (et des eaux dormantes) ainsi que la spécificité des espèces animales et végétales adaptées au milieu.

► Etude préliminaire

Pour évaluer les atteintes qui pourraient survenir pendant le curage et, au cas où le risque serait élevé, prendre les mesures prophylactiques nécessaires, il convient d'effectuer un certain nombre d'analyses préliminaires, à savoir:

- a) estimer le **volume** et la composition des **sédiments** qui seront probablement mobilisés au cours du curage;

- b) prélever des échantillons de **sédiments** afin de prévoir leur **effet écotoxicologique** potentiel (cf. chapitres 5.1.1 et 5.1.2); mesurer, notamment, la température de l'eau et le volume approximatif de matériel organique réduit; tracer des courbes d'étalonnage afin d'étudier (selon la trémie d'Imhoff) l'évolution de comportement des matériaux (en règle générale, un dépôt de 10 minutes suffit, lorsqu'il s'agit de sédiments minéraux, pour en déterminer la charge); déterminer la teneur de matières en suspension (en grammes de matière sèche) pour des volumes de dépôt donnés.
- c) déterminer le volume d'eau de **dilution** ou d'eau claire disponible pour procéder au rinçage.

► **Fixation du moment propice**

Les opérations de curage doivent être fixées en tenant compte des éléments suivants:

- a) le curage doit si possible être effectué à une **période de l'année où le débit naturel est élevé**, afin de diluer les sédiments évacués en aval de la retenue et de réduire au minimum les risques écologiques, étant entendu que:
 - les organismes adaptés à un milieu aquatique en anticipent les réactions; autrement dit, confrontés à une situation de crue et, partant, à un curage, ils se mettent à l'abri ou s'enfuient;
 - les pertes qui ne manquent pas de se produire - même en cas de crue naturelle - sont relativement faibles, puisque le stress est lié uniquement à la situation hydraulique;
- b) les **périodes de frai et de développement** des espèces piscicoles, ainsi que les **périodes de reproduction des autres organismes** doivent être le moins perturbé possible.
- c) si le moment choisi n'est pas favorable et que, de plus, le bassin n'est que rarement vidangé, les pertes dues à des débits trop élevés risquent alors fort d'être importantes (biocénoses résiduelles fragiles, cf. chapitres 4.3 et 5.2.1).

► **Détermination de charges limites**

Deux paramètres doivent être considérés avec une attention toute particulière pendant une opération de curage: la concentration de matières en suspension et le degré d'oxygénation de l'eau (cf. chapitre 4.2). Il s'agit de deux paramètres modulables qui doivent être enregistrés régulièrement. Les valeurs enregistrées ne doivent pas être respectivement supérieures et inférieures aux seuils supposés ou connus tolérés par les biocénoses.

En l'état actuel des connaissances, il est impossible de fixer des **valeurs limites** applicables à tous les systèmes aquatiques, chacun ayant un seuil de tolérance qui lui est propre (cf. chapitre 4.3). Pour ce qui est de la concentration de matières en suspension, on peut toutefois continuer à utiliser, ne serait-ce que comme indice, les valeurs en vigueur (en règle générale < 10 g/l), à moins que l'on dispose de données enregistrées lors de curages précédents: en pareil cas, en effet, on sait alors déjà quel seuil ne doit pas être dépassé et à l'intérieur de quelles limites les atteintes ne se produiront pas. Il est par contre impossible de prévoir l'ampleur du dommage, car les facteurs d'influence sont trop complexes.

► Mesures prophylactiques

Il est souvent nécessaire, pour éviter de trop grosses pertes d'effectifs et pour protéger le patrimoine génétique des espèces piscicoles menacées ou isolées (pour lesquelles les possibilités de repeuplement sont limitées), de recourir à des "**opérations de sauvetage**". La taille des lacs de retenue et les difficultés d'accéder aux eaux profondes ne permettant bien évidemment pas de capturer la totalité des effectifs, il s'agit de délimiter certains tronçons et d'y récupérer le plus grand nombre possible de poissons que l'on met à l'abri jusqu'à la fin du curage. Il convient par ailleurs de dresser des inventaires avant et après curage pour pouvoir évaluer l'ampleur des dégâts, condition sine qua non pour, ensuite, exiger d'éventuels dommages-intérêts.

Il faudrait prêter une plus grande attention au sauvetage des effectifs peuplant les bassins de retenue dont on doit abaisser le plan d'eau ou que l'on doit vider. La pêche des poissons au filet dans le bassin - après avoir éventuellement abaissé le niveau d'eau - et/ou leur récupération au moyen d'installations situées à proximité de la vanne de fond (GOSSE 1991) permettrait sans aucun doute, si ce n'est de les capturer tous indemnes, du moins d'assurer la survie d'une grande partie d'entre eux (cf. chapitre 4.2).

Les opérations d'**alevinage** et de curage doivent absolument être coordonnées. Ainsi, on veillera à interrompre l'empoissonnement 1 à 2 ans avant d'entreprendre un curage important et à ne le reprendre qu'après s'être assuré que les conditions physico-chimiques (dérive sablonneuse élevée, p. ex.) et les possibilités de nourriture répondent aux besoins des alevins. Cette analyse de la situation doit également précéder le repeuplement du bassin avec les poissons qui y avaient été capturés; les exigences de qualité sont cependant moindres pour ces derniers, car ils sont en général plus âgés et se sont déjà adaptés au milieu. Dans tous les cas, il faut toujours réintroduire des alevins ayant déjà séjourné dans le bassin, ce qui suppose d'en capturer avant le curage.

► Mesures techniques

En plus des considérations statiques et topographiques du barrage (cf. chapitre 3), l'opération de curage proprement dite - la façon dont elle se déroule et le moment où elle a lieu - a une influence déterminante sur le type et l'ampleur des incidences écologiques, notamment les dommages subis par les poissons.

Il faut en particulier veiller à **ouvrir et refermer lentement les vannes**, afin de s'assurer que les poissons et les macro-invertébrés à l'aval du barrage aient suffisamment de temps pour réagir, que ce soit pour trouver un abri lorsque le débit augmente ou pour émigrer dans le lit principal (résiduel) de la rivière lorsque le débit diminue. Pour cela, il peut être nécessaire - selon la morphologie du lit - de ralentir le débit pendant plusieurs heures, de manière que les individus qui se seraient réfugiés dans les bords puissent aller s'abriter ailleurs.

La réaugmentation du débit peut - et devrait - être combinée avec une période de rinçage assez longue. Ces **rinçages**, effectués avec de l'eau claire contenant un minimum de matières en suspension, nettoient le lit de la rivière et favorisent le repeuplement.

► **Comment mener une étude de suivi**

Les études de suivi ont pour but d'acquies des données sur les objets analysés, mais également des connaissances sur les opérations de curage en général, afin d'en améliorer l'exécution à l'avenir. Elles permettent en outre d'établir la **véracité des faits**, notamment par le biais d'inventaires dressés avant et après le curage.

Le tableau ci-après donne un aperçu des principaux paramètres à recenser et du moment où ils doivent l'être.

Tab. 6.2: Programme des analyses à effectuer lors de suivis de curage; les objets (lit de la rivière en aval du bassin, éventuelles zones alluviales touchées et lacs situés en aval) doivent être désignés au préalable (cf. caractérisation du système aquatique).

Paramètres	avant	pendant	juste après le curage	après 1 à 4 semaines	après 1 année
<i>abiotique:</i>					
HYDROLOGIE					
débit	*	*	*		
régime d'écoulement	*	*	*		
STRUCTURE DU LIT					
répartition du substrat	*		*	*	
granulométrie	*		*	*	
PARTICULES SOLIDES					
concentration de MES	*	*	*	*	
déposition	*		*	*	*
profondeur de pénétration	*			*	*
CHIMIE DE L'EAU					
O ₂ , pH, conductivité	*	*	*	*	*

<i>biotiques:</i>					
PERIPHYTON					
Degré de recouvrement	*		*	*	*
PLANTES SUPERIEURES					
Degré de recouvrement	*		*	*	*
MACRO-INVERTEBRES					
dérive	*	*	*		
conditions d'habitat	*		*	*	*
POISSONS					
inventaires	*		*	*	*
dérive			*		
dégâts	*		*		

7. Bibliographie

La liste ci-dessous contient les ouvrages cités dans le texte (en gras) ainsi que d'autres sources qui ont été utilisées pour rédiger le présent rapport.

- Akeret, W. (Red.), 1982: Schlussbericht der interdepartementalen Arbeitsgruppe Restwasser. *BR, Bern*, 401 p.
- Ammann, M.A., 1987: Herkunft und Zusammensetzung von Silt in fliessenden Gewässern und Stauseen. - Geotechnische Abtragsanalyse im Alpenraum. *ETH Zürich, Dissertation Nr. 8234*, 181 p.
- Anonymus, 1993: Stauraumspülungen 1993 im Kanton Glarus. *Kant. Amt f. Umweltschutz Glarus, interner Bericht*, 8 p.
- Aquarius, 1990: Gewässerverschmutzung der Saane im Raum Gsteig - Saanen. *Schadenberechnung im Auftrag des Kts. Bern*, 18 p.
- Aquarius, 1991: Gewässerverschmutzung der Saane im Raum Gsteig - Saanen; Untersuchung der Makroinvertebratenfauna 12 Monate nach dem Vorfall zur Beurteilung der längerfristigen Schäden am Ökosystem der Saane. *Gutachten zHv Kanton Bern*, 7 p.
- Banning, M., 1990: Der Rheoindex - Eine Möglichkeit zur Berechnung der Auswirkungen des Flusstaus auf die benthische Lebensgemeinschaft. *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Limnologie, Essen*: 186-190.
- Bauer, H.J., 1990: Bewertungsverfahren für ökologische Auswirkungen der Wasserwirtschaft. *Wasserwirtschaft 80*: 129-134.
- Becker, M. et al., 1992: Restwasserproblematik Obere Isar - Analytische Behandlung und Ergebnisse. *12. Seminar Landschaftswasserbau an der Techn. Univ. Wien, Landschaftswasserbau Band 13*: 273-309.
- Bloesch, J., 1991: Die Auswirkungen technischer Eingriffe auf die Invertebratenfauna alpiner Fliessgewässer. *Mitt. der EAWAG 32, Dübendorf*: 14-17.
- Bretschko, G. und W.E. Klemens, 1986: Quantitative methods and aspects in the study of the interstitial fauna of running waters. *Stygologia 2/4*: 297-316.
- Büttiker, B. und H.R. Lehnerr, 1981: Fischsterben in der Schweiz und ihre Hauptursachen in den Jahren 1952-1980. *BUS, interner Bericht*, 24 p.
- BUWAL, 1989: Fischsterben in den Jahren 1985 - 1988 und ihre Hauptursachen. *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern*, 4 p.
- BWW, 1983: Sicherheit der Talsperren. Richtlinien zum Ablassen von Wasser aus Stauhaltungen (Entwurf). *Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern*, 7 p.
- Conca, A., 1990: Gli spurghi dei bacini di accumulazione e delle prese. *Wasser, Energie, Luft 82, 5/6*: 111-114.
- EAWAG, 1963: Bericht über die Kontrollen und Untersuchungen an der Reuss bei der Spülung des Staubeckens Pfaffensprung (Kraftwerk Amsteg) vom 1./2. Juli und 22./23. September 1962. *Zürich*, 8 p.
- EAWAG, 1971: Bericht über Betriebsversuche und Empfehlungen zur Ausräumung der Ablagerungen aus dem Staubecken Palagnedra durch das Flussbett der Melezza. *EAWAG Dübendorf, Auftrag No. 4164*, 40 p.
- EAWAG, 1987: Bericht über die fischereilichen Schäden in den Flüssen Ticino und Brenno verursacht durch die Hochwasser im Sommer 1987. *EAWAG Dübendorf, Kleinauftrag No. 26-1122*, 30 p.
- EAWAG, 1992: Verlandungsräumung Eugenisee 1990. Bericht über die Untersuchungen im Zusammenhang mit der Spülung des Eugenisees OW. *EAWAG Dübendorf, Auftrag No. 4725*, 113 p.
- ECOTEC, 1990: Données relatives à l'hydrobiologie de la Dranse de Bagnes. Expertise concernant les modalités de la dotation en aval de la prise d'eau des FMM, Annexes. *Ecotec Environnement S.A., Genève*.
- ECOTEC, 1992: Vidange de l'Aubonne en 1991; Suivi des impacts. *Expertise à l'att. de la Société Electrique des Forces de l'Aubonne (SEFA)*, 41 p.
- Elber, F., 1991: Wissenschaftliche Begleitung "Spülung Grundablass Livigno-Stausee vom 7. Juni 1990"; Teil 2: Physikalische und chemische Verhältnisse im Spöl während der Spülung und Aufwuchsuntersuchungen im Spöl und Ova dal Fuorn. *WNPk Arbeitsberichte zur Nationalparkforschung*.
- EVE, 1982: Hochwasserschutz an Fliessgewässern; Wegleitung 1982. *Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern*, 77 p.
- EWLE, 1992a: Verlandungsräumung Eugenisee 1990; Bericht über die Auswirkungen auf das Kraftwerk Obermatt der EWLE AG. *Bericht der Elektrizitätswerk Luzern-Engelberg AG*, 13 p.

- EWLE, 1992b: Verlandungsräumung Eugenisee 1990; Auswirkungen auf das Kraftwerk Obermatt. *Wasser, Energie, Luft* 84/9: 214-215.
- Fehr, R., 1987a: Einfache Bestimmung der Korngössenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 38: 1104-1109.
- Fehr, R., 1987b: Geschiebeanalyse in Gebirgsbächen; Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 92*, 139 p.
- FMM, 1976-1990: Entretien du lit de la Dranse - Rapports sur le processus technique dans le cadre des mesures de nettoyage de la Dranse de Bagnes. *Forces Motrices de Mauvoisin S.A., Sion*.
- Garric, J. et al., 1990: Lethal effects of draining on Brown trout. A predictive model based on field and laboratory studies. *Wat. Res.* 24/1: 59-65.
- Gartmann, R., 1990: Spülungen und Entleerungen von Stauseen und Ausgleichsbecken; Umweltbezogene Anforderungen. *Wasser, Energie, Luft* 82, 1/2: 33-36.
- Gerster, St., 1991: Schätzung des fischereilichen Schadens infolge der Entleerung/Spülung des Ausgleichbeckens Palagnedra. *Schadenexpertise zHv Ufficio Caccia & Pesca del Ticino*, 11 p.
- Gerster, St. und P. Rey, 1992a: Charakterisierung und Quantifizierung ökologischer Folgen von Stauseespülungen in den Schweizer Alpen: Entleerung und Spülung des Ausgleichbeckens Palagnedra im Centovalli, Kanton Tessin. *Institut f. angew. Hydrobiologie, Gutachten zHv BUWAL (Sektion Fischerei)*, 45 p.
- Gerster, St. und P. Rey, 1992b: Fischökologische Untersuchungen an der Melezza: Rekolonisierung und Entwicklung der Fischfauna im spülungsbedingt gestörten Abschnitt von Palagnedra bis zur Isorno-Mündung. *Institut f. angew. Hydrobiologie, Gutachten zHv Dipartimento del Territorio del Cantone TI, 1. Zwischenbericht*, 47 p.
- GHO, 1987: Die mengenmässige Erfassung von Schwebstoffen und Geschiebefrachten. *Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie, Mitteilung Nr. 2*, 91 p.
- Gosse, Ph., 1991: Prévision et reconstitution par modélisation numérique des concentrations de matières en suspension et d'oxygène dissous dans le Blavet à la fin de la vidange décennale du lac de Guerlédan (septembre 1985). *Hydroécol. Appl., Tome 3 Vol. 2*: 257-300.
- Heggenes, J., 1988: Effects of Short-Term Flow Fluctuations on Displacement of, and Habitat Use by, Brown Trout in a Small Stream. *Trans. Am. Fish. Soc.* 117: 336-344.
- Hesse, L.W. and B.A. Newcomb, 1982: Effects of Flushing Spencer Hydro on Water Quality, Fish, and Insect Fauna in the Niobrara River, Nebraska. *North. Am. J. Fish. Mgmt.* 2: 45-52.
- Jäger, P., 1991: Wissenschaftliche Begleitung "Spülung Grundablass Livigno-Stausee vom 7. Juni 1990"; Teil 3: Morphodynamik und Uferstabilität. *WNPK Arbeitsberichte zur Nationalparkforschung*, 16 p.
- Jungwirth, M. und H. Winkler, 1983: Die Bedeutung der Flussbettstruktur für Fischgemeinschaften. *Österreichische Wasserwirtschaft* 35: 229-234.
- Kölla, E., 1986: Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 87*, 163 p.
- Kondolf, G.M. et al., 1987: Assessing flushing-flow requirements for Brown trout spawning gravels in steep streams. *Water Resources Bulletin*, 23/5: 927-935.
- Krumdieck, A. und Ph. Chamot, 1981: Spülung von Sedimenten in kleinen und mittleren Speicherbecken. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 53*: 257-270.
- Kühne, A., 1977: Die rasche Absenkung von Stauseen - optimale Programme für Stauseesysteme. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 23*, 158 S.
- Lambert, A., 1987: Sanduhren der Erdgeschichte. *Geowissenschaften in unserer Zeit* 5/1: 10-18.
- Liepolt, R., 1961: Biologische Auswirkung der Entschlammung eines Hochgebirgstaus in einem alpinen Fliessgewässer. *Wasser und Abwasser Bd. 1961*: 110-133.
- LSA, 1990a: Studio sulle conseguenze dello spurgo del bacino di Carassina (maggio 1989) sull'ecosistema fluviale del Brenno. *Laboratorio Studi Ambientali, Dipartimento Ambiente, Bellinzona*, 52 p.
- LSA, 1990b: Valutazione del danno alla fauna ittica in seguito allo spurgo del bacino di Carassina (maggio 1989). *Laboratorio Studi Ambientali, Dipartimento Ambiente, Bellinzona*, 6 p.
- Mage, R. et H. Maier, 1991: Érosion du sol en Suisse; étude bibliographique et enquête. *OFEFP, cahier de l'environnement No 152*, 84 p.
- Müller, H.J. et al., 1984: Ökologie. *UTB* 1318, 415 p.
- Nelson, R.W. et al., 1987: Regulated Flushing in a Gravel-Bed River for Channel Habitat Maintenance: A Trinity River Fisheries Case Study. *Environmental Management* 11/4: 479-493.

- Newcombe, C.P. and D.D. MacDonald, 1991: Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *North. Am. J. Fish. Mgmt.* 11: 72-82.
- Nisbet, M., 1961: Un exemple de pollution de rivière par vidange d'une retenue hydroélectrique. *Verh. Internat. Ver. Limnol.* 14: 678-680.
- OFIMA, 1991a: Inerente alla vuotatura del bacino di Palagnedra e a quella parziale del sistema sotto carico di Verbano - settembre 1991. *Programma di lavoro n. 3/5/91, Officine Idroelettriche d. Maggia S.A., 10 p.*
- OFIMA, 1991b: Impianto Verbano - Vuotatura e spurgo del bacino di Palagnedra (settembre). *Rapporto n. 4/26/91, Officine Idroelettriche della Maggia S.A., 27 p.*
- Petran, M., 1977: Ökologische Untersuchungen an Fließgewässern über die Beziehung zwischen Makrozoobenthos, Substrat und Geschiebetrieb. *Dissertation Universität Bonn.*
- Petts, G.E., 1984: Impounded Rivers; Perspectives for Ecological Management. *John Wiley & Sons, Chichester, 326 p.*
- Polli, B., 1990: Effets écologiques de la purge de la retenue du Carassina (Val Blenio, Canton du Tessin, Suisse). *Ingénieurs et architectes suisses* 18: 416-419.
- Pralong, R., 1987: Entschlammung von Stauseen bis 200 m Tiefe. *Wasserwirtschaft* 77/6.
- Rambaud, J. et al., 1988: Expérience acquise dans les vidanges de retenues par Électricité de France et la Compagnie Nationale du Rhône. *Commission Internationale des Grands Barrages. Seizième Congrès des Grands Barrages. San Francisco: 483-514.*
- Reiser, D.W. et al., 1989: Flushing flow recommendations for maintenance of Salmonid spawning gravels in a steep, regulated stream. *Regulated Rivers: Research & Management* 3: 267-275.
- Rey, P. und St. Gerster, 1991: Wissenschaftliche Begleitung "Spülung Grundablass, Livigno-Stausee vom 7. Juni 1990"; Teil 4: Makroinvertebraten und Fische. *WNPK Arbeitsberichte zur Nationalparkforschung, 35 p.*
- Rey, P. und St. Gerster, 1992: Charakterisierung und Quantifizierung ökologischer Folgen von Stauseespülungen in den Schweizer Alpen: Spülung des Bachbettes der Dranse de Bagnes sowie der Ausgleichbecken Grande Dixence und Mauvoisin in Fionnay, Kanton Wallis. *Institut f. angew. Hydrobiologie, Gutachten zHv BUWAL (Sektion Fischerei), 63 p.*
- Rofes, G. et M. Savary, 1981: Description d'un nouveau modèle de carottier pour sédiments fins. *Bull. Fr. Pisc.* 283: 102-113.
- Rofes, G. et al., 1991: Caractérisation des sédiments des retenues pour la prévision des risques écotoxicologiques liés aux vidanges. *Rev. Sci. Eau.* 4/1: 65-82.
- Rose, U., 1990: Beurteilung von Fließgewässerstrukturen aus ökologischer Sicht - Ergebnisse und Erfahrungen mit einer einfachen Methode. *Wasserwirtschaft* 80: 236-242.
- Schröder, W. und Ch. Theune, 1984: Feststoffabtrag und Stauraumverlandung in Mitteleuropa. *Wasserwirtschaft* 74, 7/8: 374-379.
- Seitz-Handl, K. und Th. Gerber, 1992: Bericht über den Makroinvertebratenbestand des Brenno 1992. *Auftrag der Holinger AG (Baden) zHv Dipartimento del Territorio del Cantone TI, 9 p.*
- Staub, E., 1986: Fischsterben in den Jahren 1974-1984 und ihre Hauptursachen. *Gas-Wasser-Abwasser* 66/3: 141-145.
- Symader, W. et al., 1991: Die zeitliche Dynamik des Schwebstofftransportes und seine Bedeutung für die Gewässerbeschaffenheit. *Vom Wasser* 77: 159-169.
- TKW/SAFE, 1990: Mittlere Salzach; Betriebsvorschrift für koordinierte Stauraumspülungen vom Rückstauraum Högmoos bis einschliesslich Bischofshofen. *Betriebsvorschrift der Tauernkraftwerke AG.*
- Vischer, D., 1981: Verlandung von Stauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 53: 9-26.*
- Wahli, Th., 1985: Fischereiliche Schäden bei hohen Feststoffkonzentrationen in Fließgewässern. *Berichtsentwurf vom 30.11.1985 zHv Bundesamt für Umweltschutz, Sektion Fischerei, 41 p. (unveröffentl.).*
- Werth, W., 1988: Ökomorphologische Gewässerbewertungen in Oberösterreich. *Umwelt lernen* 39/40: 40-41.
- Wiegleb, G., 1989: Theoretische und praktische Überlegungen zur ökologischen Bewertung von Landschaftsteilen, diskutiert am Beispiel der Fließgewässer. *Landschaft und Stadt* 21: 15-20.
- Wiesbauer, H. et al., 1991: Fischökologische Studie - Mittlere Salzach. *Gutachten im Auftrag der Tauernkraftwerke AG, 170 p.*