

**INFORMATIONS CONCERNANT
LA PROTECTION DES EAUX**

n° 32

**Matériaux d'excavation
non pollués:
immersion dans les
lacs autorisée par
LEaux**



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

Editeur

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

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

Auteurs

Alfred Wüest, Felix Ramisch (IFAEPE)

Daniel Hefti (OFEFP)

Groupe d'experts

A. Allemann (Basler & Hofmann)

M. Boltz (Canton de Nidwald)

M. Gessner (IFAEPE)

B. Griesser (Basler & Hofmann)

R. Müller (IFAEPE)

E. Staub (OFEFP)

Téléchargement du fichier PDF

www.environnement-suisse.ch/publications

(il n'existe pas de version imprimée)

Référence: MGS-32-F

Table des matières

Préface		
1.	Introduction	1
2.	Immersion en lac et écologie lacustre	3
2.1.	Matériaux à immerger	3
2.1.1.	<i>Composition de la roche</i>	3
2.1.2.	<i>Méthodes d'excavation</i>	3
2.2.	Impacts sur le milieu lacustre	6
2.2.1.	<i>Chimie des eaux</i>	6
2.2.2.	<i>Topographie et perméabilité du substrat lacustre</i>	6
2.2.3.	<i>Turbidité de l'eau</i>	7
2.3.	Impacts sur les biocénoses lacustres	10
2.3.1.	<i>Phytoplancton</i>	10
2.3.2.	<i>Zooplancton</i>	10
2.3.3.	<i>Macrophytes</i>	11
2.3.4.	<i>Macroinvertébrés benthiques</i>	11
2.3.5.	<i>Poissons</i>	12
2.3.6.	<i>Oiseaux aquatiques et les limicoles</i>	13
2.4.	Techniques d'immersion et de protection	14
2.5.	Exemples de réalisations	17
2.5.1.	<i>Lac d'Uri (Tunnel du Seelisberg, A2)</i>	17
2.5.2.	<i>Rive nord du lac de Neuchâtel (A5)</i>	17
2.5.3.	<i>Rive sud du lac de Neuchâtel (Fanel)</i>	17
2.5.4.	<i>Lac des Quatre-Cantons (remblayage du quai des Alpes à Lucerne)</i>	18
2.5.5.	<i>Delta de la Reuss dans le lac d'Uri (contournement de Flüelen par la A4, NLFA)</i>	18
3.	Check list des éléments à prendre en compte	19
3.1.	Bases légales	19
3.2.	Conflits d'intérêts potentiels	19

3.3.	Sites potentiels d'immersion	20
3.3.1.	<i>Caractéristiques abiotiques</i>	20
3.3.2.	<i>Caractéristiques biotiques</i>	21
3.4.	Matériaux à immerger	22
3.5.	Technique d'immersion et suivi des opérations	23
3.5.1.	<i>Techniques d'immersion</i>	23
3.5.2.	<i>Surveillance et évaluation du résultat</i>	23
4.	Bibliographie	25

Préface

La législation fédérale en matière de protection des eaux vise notamment à protéger les eaux de toute influence néfaste. C'est la raison pour laquelle les prescriptions relatives aux déversements de substances solides dans un lac sont relativement restrictives:

**seules des substances solides non polluées peuvent être déversées et
uniquement dans le cadre de projets de revitalisation ou
lorsque le remblayage est lié à une construction
qui ne peut être érigée ailleurs et qui présente
un intérêt public prépondérant.**

Les dispositions relatives à la protection des eaux, de la pêche, de la protection de la nature et du paysage doivent être intégralement prises en compte.

La présente publication fournit une aide technique pour la planification et la réalisation des remblayages autorisés par la loi. Même si les matériaux d'excavation minéraux non pollués ne représentent généralement pas un danger aigu de pollution pour les eaux, leur immersion en lac entraîne toujours des perturbations du système aquatique. Ces dernières peuvent être maintenues dans certaines limites à condition que les modalités techniques du noyage soient soigneusement planifiées et que les exigences écologiques soient suffisamment prises en compte. Lorsque les objectifs sont clairement définis et que l'immersion est réalisée de manière judicieuse, il peut même en résulter une amélioration de la situation écologique après une certaine période de régénération: par exemple lors de la restauration de zones littorales peu profondes. Pour les macrophytes et la faune qui leur est associée (poissons: stades juvéniles et adultes; invertébrés, etc.), la reconstitution de ces milieux naturels constitue une compensation partielle à la destruction massive des zones littorales.

Protection des eaux
et pêche

Dr. H.U. Schweizer

1. Introduction

La réalisation des grands projets d'infrastructure (routes nationales, transversales alpines, rail 2000, etc.) génère souvent de grandes quantités de matériaux d'excavation dont le stockage et la gestion s'avèrent problématiques. Hormis les matériaux qui peuvent être recyclés, l'excédent doit être transporté, parfois sur de longues distances, et mis en décharge. Les coûts et la charge pour l'environnement qui en résultent sont parfois considérables. C'est pourquoi l'idée d'immerger en lac les matériaux excédentaires a été évoquée.

Compte tenu des impacts sur le milieu aquatique, l'introduction de substances solides dans les lacs n'est autorisée que dans un cadre juridique restreint clairement défini par la **loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux)**:

- **Selon l'article 6 LEaux, il est interdit d'introduire dans une eau des substances de nature à polluer.** Il s'agit d'une prescription qui vise à protéger les eaux contre la pollution.
- **Selon l'article 39 LEaux, il est en principe interdit d'introduire des substances solides dans les lacs, même si elles ne sont pas de nature à polluer l'eau.** Il s'agit d'une prescription quantitative: les lacs ne doivent pas être assimilés à des décharges et les processus naturels d'atterrissement ne doivent pas être accélérés artificiellement. L'intégrité de la zone littorale, qui constitue la partie du lac la plus productive au plan biologique, doit également être garantie.

Les prescriptions fédérales sont donc clairement orientées vers des objectifs de protection. Elles excluent ainsi d'emblée l'immersion de matériaux pollués ainsi que les remblayages effectués dans un but essentiellement économique (par exemple décharge, dépôt transitoire). Toutefois, la LEaux vise également à améliorer les conditions écologiques du milieu aquatique; l'autorité compétente peut ainsi autoriser le remblayage lorsqu'il permet d'améliorer le rivage (art. 39, alinéa 2, lettre b, LEaux). Une immersion de matériaux solides peut également être autorisée pour des constructions qui ne peuvent être érigées en un autre lieu et qui sont situées dans une zone bâtie, lorsque des intérêts publics prépondérants l'exigent et que l'objectif ne peut pas être atteint autrement (art. 39, alinéa 2, lettre a, LEaux).

Lorsqu'un remblayage est autorisé par la loi sur la protection des eaux, les prescriptions suivantes doivent être prises en considération:

- Des conditions spécifiques peuvent ainsi être définies dans le cadre de l'autorisation piscicole au sens de l'article 8 de la **loi fédérale du 21 juin 1991 sur la pêche (LPê)**.
- Par ailleurs, les articles 18, alinéa 1bis, et 21, alinéa 1, de la **loi fédérale du 1er juillet 1966 sur la protection de la nature et du paysage (LPN)** ainsi que ses ordonnances d'exécution doivent être prises en compte.
- Finalement et conformément au chiffre 30.3 de l'annexe de l'**ordonnance du 19 octobre 1988 relative à l'étude d'impact sur l'environnement**, l'immersion en lac de plus de 10'000 m³ de matériaux est soumise à une étude d'impact.

Les remblayages autorisés n'en restent pas moins des opérations délicates et complexes. L'impact sur l'environnement dépend de nombreux facteurs dont, notamment, les modalités d'immersion. La présente brochure s'efforce de faire le tour du problème sur la base des expériences accumulées à ce jour. Elle présente d'abord un survol des principaux problèmes écologiques liés à l'immersion des matériaux d'excavation dans un lac (chapitre 2). Finalement, elle propose une "check-list" des éléments à prendre en compte afin de planifier au mieux les opérations (chapitre 3). Ces bases d'appréciation doivent ainsi permettre de définir les conditions cadre requises dans chaque cas.

2. Immersion en lac et écologie lacustre

2.1. Matériaux à immerger

Dans le présent document, nous nous limitons aux **matériaux d'excavation minéraux non pollués** tels que les déblais de tunnels (OFEFP, 1997). L'admissibilité des sédiments provenant de dragages de ports ou de chenaux de navigation – sédiments souvent fortement pollués – peut être évaluée selon OFEFP (1995). La composition minéralogique de la roche ainsi que la méthode d'excavation jouent un rôle déterminant pour l'admissibilité des matériaux d'excavation destinés à être immergés en lac.

2.1.1. Composition de la roche

Certaines roches peuvent contenir naturellement des substances solubles de nature à polluer les eaux. Ces substances peuvent se retrouver dans les matériaux d'excavation à immerger. Certains **composés organiques** comme des hydrocarbures dans des calcaires bitumineux (p.ex. matériaux d'excavation de la A5 dans le lac de Neuchâtel) sont susceptibles d'induire dans le lac une consommation accrue d'oxygène. Des **composés inorganiques** (sel, gypse, calcaire) peuvent également altérer les propriétés chimiques d'un lac, par exemple lorsqu'ils sont immergés dans des eaux à faible capacité de neutralisation des acides (bassin versant cristallin). Il faut également tenir compte des **liaisons métalliques** facilement solubles.

2.1.2. Méthodes d'excavation

Les deux méthodes d'excavation les plus utilisées en Suisse pour le creusement de tunnels sont l'excavation conventionnelle à l'explosif et l'excavation mécanique au tunnelier.

Dans le cas de l'**excavation à l'explosif**, les matériaux sont extraits à l'aide d'un explosif placé dans des trous de mine. La forme et la granulométrie des matériaux d'excavation dépendent de la technique de minage et de la nature géologique de la roche. La proportion de fines (particules d'argile et de limon, cf. tableau 1, fig. 1) est généralement faible, pour autant que ces classes granulométriques ne soient pas naturellement présentes dans la roche.

Pour l'excavation à l'explosif, on utilise entre 0.3 et 1.5 kg d'explosif par m³ de roche (SAXER & LUKAS, 1997). Parmi les divers explosifs utilisés, les plus courants sont des gélatines à base de nitrate d'ammonium (p.ex. gamsite, dynamite). SAXER & LUKAS (1997) ont analysé les composants solubles présents dans les matériaux d'excavation. Au niveau des composés azotés, ils ont mis en évidence les concentrations suivantes par tonne de déblais:

Nitrate (NO ₃ ⁻):	6.0 à 15.0	g N / tonne
Nitrite (NO ₂ ⁻):	1.0 à 2.4	g N / tonne
Ammonium (NH ₄ ⁺):	0.2 à 3.3	g N / tonne

Souvent, la roche est mouillée de manière à limiter la formation de poussières. Les fines absorbent l'eau et „cimentent“ les éléments grossiers. L'eau excédentaire chargée de fines doit être préalablement traitée avant son rejet dans une eau superficielle. Il faut également signaler que les matières solubles contenues dans les déblais immergés sont plus facilement dissoutes à partir des fines en suspension qu'à partir d'éléments grossiers et de matériaux compacts.

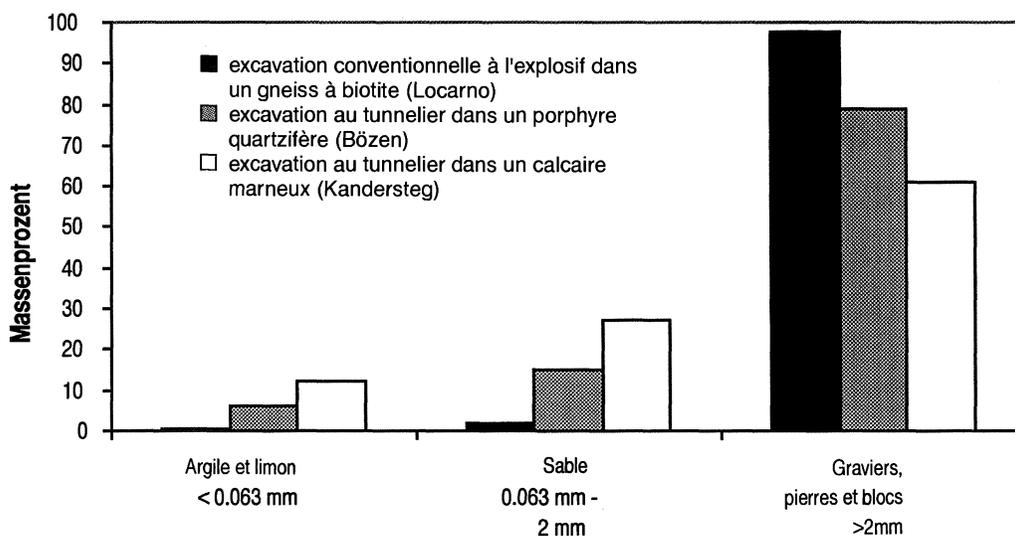


Figure 1: La répartition granulométrique des matériaux d'excavation dépend de la méthode d'excavation et de la nature géologique de la roche. La proportion d'argile et de limon moyen (< 20 µm) est importante dans les matériaux provenant d'excavations au tunnelier. Ces fines peuvent être à l'origine d'une turbidité importante en cas d'immersion en lac. Modifié d'après THALMANN (1994, 1996).

Afin d'améliorer la stabilité du massif rocheux et/ou réduire les venues d'eau, on utilise des **produits d'injection** (dans certains cas avec des accélérateurs de prise). Il faut alors s'attendre à ce qu'une partie de ces produits d'injection se retrouve également dans les déblais qui, dans ce cas, ne peuvent plus être considérés comme non pollués: leur utilisation doit donc être reconsidérée. SAXER & LUKAS (1997) donnent quelques estimations quantitatives sur les concentrations de polluants provenant de ces produits d'injection. Pour les métaux, ces auteurs publient les valeurs suivantes (par tonne de déblais):

Sodium (Na):	env. 40 à 50 g Na / tonne
Potassium (K):	env. 15 g K / tonne
Aluminium (Al):	env. 3 g Al / tonne

Finalement, toutes les méthodes d'excavation impliquent l'utilisation d'**huiles** (lubrifiants, huiles hydrauliques, etc.) susceptibles de contaminer les déblais. Cette problématique a déjà été prise en compte par le passé, notamment lors du percement du tunnel du Seelisberg: une consommation journalière d'environ 10 litres d'huile représentait une charge globale pour l'environnement de quelques grammes d'huile par tonne de matériaux, ce qui est relativement peu en comparaison avec d'autres sources

de pollution (p.ex. gaz d'échappement, routes en bord de lacs). Les effets de cette pollution ont donc pu être considérés comme très localisés (NZZ, 1974; EAWAG, 1973 a, b). Aujourd'hui, les machines modernes ne perdent pratiquement plus d'huile, hormis en cas de fuites accidentelles.

2.2. Impact sur le milieu lacustre

2.2.1. Chimie des eaux

Les matériaux d'excavation immergés sont susceptibles d'influencer la qualité des eaux du lac. Dans le cas le plus défavorable, il peut en résulter un effet écotoxique (SAXER & LUKAS, 1997). Les effets indésirables suivants peuvent se manifester:

- pollution par des substances présentes naturellement dans les déblais d'excavation;
- consommation accrue d'oxygène due à la présence de composés organiques (par exemple calcaire bitumineux);
- altération qualitative des eaux du lac en cas d'immersion de matériaux de géologie atypique (p.ex. minéraux solubles comme le gypse ou le calcaire dans un lac peu minéralisé).

2.2.2. Topographie et perméabilité du substrat lacustre

Suivant l'objectif de l'immersion (remblayages visant à créer de nouvelles zones littorales, remblayages de trous de dragage, etc.), la topographie et la structure du fond lacustre subissent des modifications plus ou moins importantes. De manière générale, on peut s'attendre à des impacts limités lorsque:

- de grandes quantités de matériaux sont apportées naturellement dans le lac (embouchure de rivière à charge solide importante);
- la nature du matériel immergé (nature géologique, degré d'arrondi, forme, courbe granulométrique) est similaire à celle des sédiments du lac.

Une modification du relief sous-lacustre peut détourner des courants de fond et réduire localement l'apport d'oxygène. Dans les zones peu profondes, la géométrie des vagues peut se trouver modifiée.

En fonction du matériel immergé, de la technique utilisée et de la structure du fond lacustre, les matériaux immergés contribuent à stabiliser ou à déstabiliser le fond lacustre et/ou les berges. Ils peuvent également provoquer des tassements du fond lacustre, des berges, voire des terrains environnants.

Finalement, l'immersion de matériaux d'excavation est susceptible d'altérer la perméabilité du substrat lacustre, notamment lors de la sédimentation des particules fines (ch. 2.2.3.). Ces dernières peuvent induire un envasement et un colmatage du substrat; exceptionnellement, le colmatage des sédiments peut être avantageux: dans l'Arendsee (lac), en Allemagne, la dissolution du phosphore à partir des sédiments a pu être limitée en les recouvrant de craies lacustres (HGF, 1997; ROENICKE *et al.*, 1997).

Cette opération a toutefois son coût écologique: la destruction de tous les organismes benthiques et des oeufs de poisson. Le recouvrement des sédiments lacustres entraîne également la perte d'une précieuse source d'informations sur le passé (p.ex. sur les climats anciens).

2.2.3. Turbidité de l'eau

La majeure partie des matériaux d'excavation étant de granulométrie grossière, elle descend rapidement au fond du lac. Lorsque le matériel immergé contient une grande proportion de fines, on assiste à la formation d'une plume de turbidité. La figure 2 et le tableau 2 illustrent la relation entre la granulométrie et la vitesse de sédimentation.

La turbidité est particulièrement indésirable dans les lacs qui contiennent naturellement peu de matière en suspension. A ce propos, il faut tenir compte de la variabilité géographique et temporelle de la turbidité naturelle des eaux (variations saisonnières, hautes eaux, stratification, etc.). Les lacs périalpins présentent généralement une turbidité maximale au début de l'été (fonte des neiges) et en hautes eaux (EAWAG, 1996). Par ailleurs, la turbidité est inégalement répartie dans la colonne d'eau: généralement, elle est la plus grande au niveau de la thermocline.

D'une manière générale, la turbidité des eaux est faible **en surface** puisque l'eau chargée en fines est plus dense et à donc tendance à couler. Ce point a été confirmé lors du minage d'un pan de rocher de l'Ölberg surplombant l'Axenstrasse (VAW, 1992). Les rochers minés en raison du danger d'éboulement qu'ils représentaient pour la route en contrebas sont tombés directement dans le lac d'Uri (Fig. 3, partie gauche). Les mesures effectuées deux heures après le minage ont montré que l'eau était restée claire en surface (Fig. 3, partie droite). Les eaux superficielles d'un lac peuvent toutefois être troublées en hiver lorsque l'eau froide provenant des profondeurs du lac est mélangée en surface. En cas d'immersion dans des zones peu profondes, il faut également s'attendre à une augmentation de la turbidité imputable à la mise en suspension des fines par l'action des vagues.

Tableau 2: Vitesse de sédimentation calculée et distance horizontale parcourue par une particule dans un lac de 50 m de profondeur. Les hypothèses sont les suivantes: densité des particules = 2'700 kg/m³ (matériel inorganique) et courant horizontal d'une vitesse de 5 cm/s.

Diamètre des particules [μm]	Vitesse de sédimentation	Durée de sédimentation dans 50 m d'eau	Distance horizontale parcourue [km] dans 50 m d'eau
0.1	0.6 mm / jour	225 ans	350'000
1	6 cm / jour	2.3 ans	3'500
10	6 m / jour	8 jours	35
100	610 m / jour	2 minutes	0.35

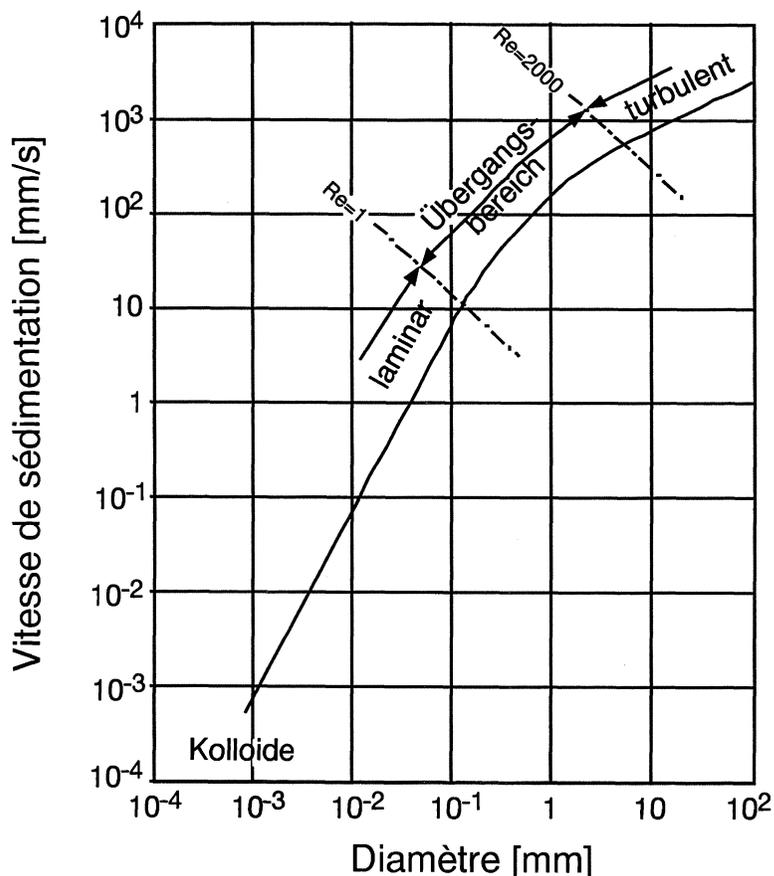


Figure 2: Vitesse de sédimentation de particules inorganiques (différence de densité entre les particules et l'eau: 1700 kg/m³) en fonction de leur diamètre. En eaux calmes, l'écoulement des particules de moins de 1 mm de diamètre est toujours laminaire (Re: nombre de Reynolds). Laminar = laminaire; Übergangsbereich = zone de transition; turbulent = turbulent; Kolloide = colloïde.

La turbidité induite **en profondeur** est plus problématique. En cas d'immersion depuis la surface, les matériaux entraînent avec eux de l'eau superficielle plus chaude alourdie par les particules en suspension. Cette eau – qui est restée chaude – a toutefois tendance à remonter dès que la sédimentation des particules qu'elle contient est suffisante pour que sa densité redevienne moindre. Un tel panache d'eau plus chaude contient toujours des fines et provoque une turbidité plus ou moins étendue. Son extension verticale dépend de sa dispersion et de la stabilité de la colonne d'eau. Dans un lac de 50 m de profondeur, une particule de 10 µm de diamètre prise dans un courant de 5cm/s (valeur parmi les plus élevées mesurées dans les lacs suisses) peut parcourir une distance horizontale de 35 km (cf. tableau 2).

Une augmentation indésirable de la turbidité est également générée par la **remise en suspension** et la **remobilisation** des sédiments naturels. Le choc des matériaux d'excavation sur le fond provoque des projections de sédiments lacustres. Ces dernières sont particulièrement importantes en cas de déversements massifs à partir d'une barge. Parfois, cette turbidité secondaire s'avère plus importante que celle directement imputable à l'immersion des matériaux; ainsi, lors du minage évoqué plus haut (Fig. 3), des concentrations de sédiments lacustres jusqu'à 50 g/m^3 ont été mesurées dans le panache d'eau trouble de 5 à 10 m d'épaisseur s'écoulant sur le fond du lac. Ce panache d'eau chargée de fines s'est étalé à cette profondeur sur l'ensemble du lac d'Uri.

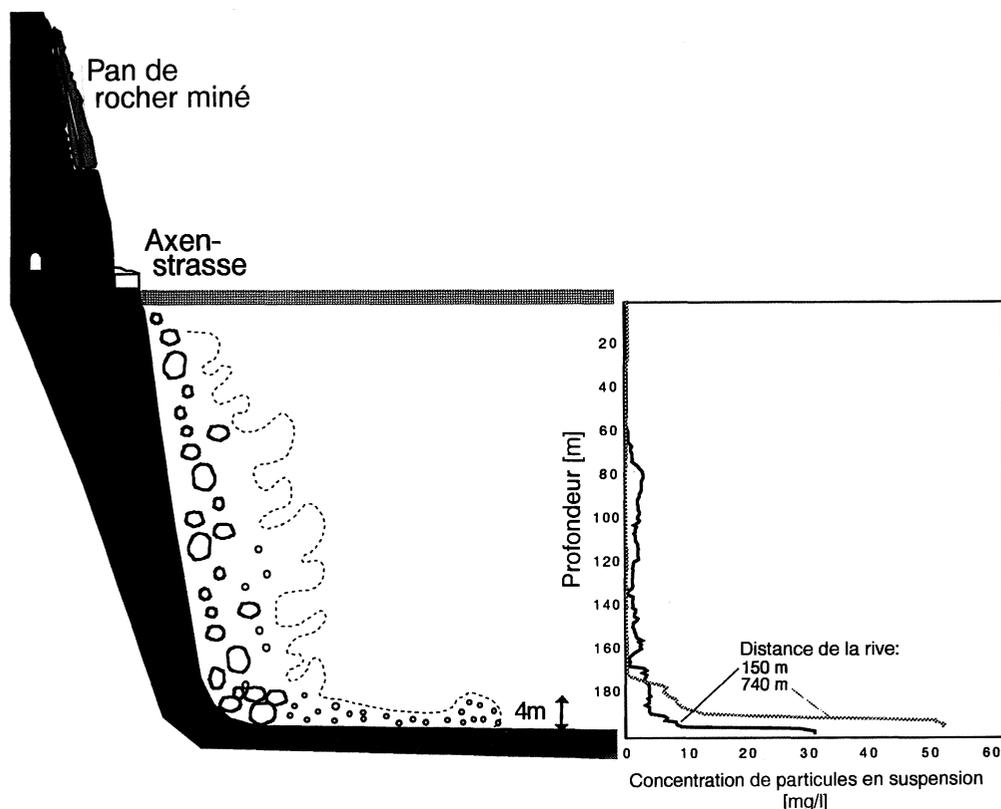


Figure 3: Minage d'un pan de rocher le 10 avril 1992 à l'Ölberg (Axenstrasse). A gauche: coupe schématique. A droite: concentration de matières en suspension quelques heures après le minage. On n'observe aucune élévation de la turbidité dans les eaux superficielles. Le panache d'eau trouble s'est étalé en restant toujours en dessous d'une profondeur de 180 m environ.

2.3. Impacts sur les biocénoses lacustres

De manière générale, toute intervention sur un écosystème lacustre est susceptible de modifier son équilibre. Comme il faut tenir compte de l'ensemble des interactions entre les échelons trophiques, il en résulte une grande complexité. Des modifications affectant les organismes appartenant à la base de la chaîne alimentaire se répercutent aux échelons supérieurs. Mais la chaîne alimentaire est également influencée par toute modification intervenant au niveau des échelons supérieurs (p.ex. prédation du zooplancton par les poissons).

L'immersion de matériaux solides dans un lac agit directement et indirectement sur les organismes et les processus biologiques; il demeure toutefois difficile d'en apprécier individuellement les effets. Bien que la destruction de la zone située dans le périmètre direct du noyage constitue l'impact le plus évident, il en résulte également des modifications subtiles de l'environnement ainsi que des relations entre organismes. Dans la pratique, l'ampleur des perturbations demeure difficile à estimer et on se limite généralement à élaborer des scénarii. Ci-après, les facteurs potentiellement critiques sont mis en évidence.

2.3.1. *Phytoplancton*

En pleine eau, ce sont principalement les algues flottantes unicellulaires (phytoplancton) qui assurent la production primaire à partir de l'énergie solaire et qui constituent la base de la chaîne alimentaire. Toute turbidité accrue influence la pénétration de la lumière solaire et, par conséquent, la photosynthèse (ELBER & SCHANZ, 1990). Une turbidité persistante et étendue des eaux superficielles peut donc induire une diminution de la productivité primaire. Dans le cas des lacs très productifs (eutrophes), une diminution de la croissance algale peut, à première vue, paraître souhaitable. Toutefois, une turbidité persistante et étendue ne correspond en rien aux conditions naturelles et doit, par conséquent, être évitée. Dans les lacs peu productifs (oligotrophes), une turbidité accrue entraîne une réduction supplémentaire de la croissance algale, avec les conséquences négatives qui en découlent pour les autres maillons de la chaîne alimentaire.

2.3.2. *Zooplancton*

Le zooplancton (invertébrés en suspension dans l'eau) se nourrit principalement du phytoplancton; il est donc indirectement affecté par les modifications touchant le phytoplancton. Mais le zooplancton peut également subir des préjudices directs: une augmentation de la turbidité suppose la capacité de différencier les particules organiques digérables des particules minérales. Chez les espèces non sélectives comme les puces d'eau (daphnies), une forte concentration de substances en suspension peut conduire à un bilan énergétique négatif. Les effets sur l'ensemble de la population peuvent être considérés comme marginaux aussi longtemps que la turbidité reste limitée géographiquement.

2.3.3. *Macrophytes*

Dans les zones peu profondes, ce sont les plantes aquatiques supérieures et les algues macroscopiques (regroupées sous le terme de macrophytes) qui constituent la base de la chaîne alimentaire. L'importance des macrophytes pour les biocénoses aquatiques est double: d'une part, ils constituent une source de nourriture importante (sous forme de tissus vivants ou morts); d'autre part, les herbiers de macrophytes abritent une grande diversité d'espèces aquatiques et constituent un lieu de ponte privilégié pour de nombreuses espèces piscicoles (JEPPESEN *et al.*, 1998). Les macrophytes jouent également un rôle indispensable pour toute une série d'oiseaux aquatiques (p.ex. grèbe, râle).

Sur le lieu d'immersion, les herbiers de macrophytes ainsi que les biocénoses qui leur sont associées (organismes de toutes tailles, depuis les bactéries, les champignons microscopiques et les algues unicellulaires jusqu'aux macroinvertébrés) sont détruits par enfouissement. Les macrophytes situés hors du périmètre direct du site d'immersion sont également menacés par la plume de turbidité générée. Les macrophytes totalement immergés sont particulièrement sensibles à une augmentation de la turbidité car l'activité photosynthétique est doublement entravée: d'une part, les matières en suspension réduisent la pénétration lumineuse et, d'autre part, les végétaux sont recouverts d'une fine pellicule de sédiments. La turbulence réduite au sein des herbiers favorise encore la sédimentation des fines. Ces effets combinés peuvent aboutir à la mort des herbiers.

En raison de leur besoin en lumière et d'autres contraintes abiotiques (p.ex. pression hydrostatique), les macrophytes sont concentrés le long des rives, là où la pression humaine s'est exercée de manière sensible au cours des derniers siècles. Les rives des lacs suisses ont été systématiquement détériorées par des remblayages (notamment pour gagner du terrain), des constructions, des dragages, etc. La restauration de la zone littorale par immersions ciblées peut, dans certains cas, compenser la perte de ces milieux naturels. Il est alors impératif de respecter certaines conditions écologiques permettant la régénération rapide des herbiers. La recolonisation du fond lacustre peut être favorisée en choisissant une granulométrie adéquate (AQUAPLUS, 1991). Les plantes vasculaires et les characées (Characeae) nécessitent une couche de sédiments fins pour s'ancrer dans le substrat lacustre (racines pour les plantes vasculaires; rhizoïdes pour les characées). Les characées colonisent de préférence les sols minéraux avec une granulométrie fine et une part importante de substances organiques (KRAUSE, 1997). Les plantes vasculaires affectionnent les sédiments fins avec une proportion de matériaux organiques de 20 % de poids sec (SMART & BARKO, 1985). Le relief du fond lacustre joue également un rôle important: les trous sont relativement défavorables pour les macrophytes (Niederberger, comm. pers.).

2.3.4. *Macroinvertébrés benthiques*

Les communautés de macroinvertébrés benthiques (invertébrés visibles à l'oeil nu qui vivent sur le fond lacustre) des zones profondes et des zones littorales sont fort différentes. Il convient donc d'évaluer les impacts d'une immersion de solides de manière différenciée. Dans les deux cas cependant, la faune benthique est détruite par recouvrement dans la zone d'immersion proprement dite. La dispersion des fines peut également menacer les organismes benthiques à plus ou moins grande distance en

dehors du périmètre d'immersion.

Les macroinvertébrés benthiques non prédateurs des **zones profondes** se nourrissent de matières organiques sédimentées (plancton et matières organiques apportées par les rivières). Dans la mesure où ces nutriments sont produits ou apportés en permanence, les risques d'une perturbation durable de leur base alimentaire sont relativement faibles. Par ailleurs, les communautés benthiques requièrent un apport d'oxygène suffisant et une structure appropriée du fond lacustre (p.ex. granulométrie et teneur en matières organiques). On veillera donc à ne pas trop modifier la situation existante par l'immersion de matériaux solides. A partir de 20 m de profondeur environ, la diversité des espèces est réduite. Parmi les espèces principales, on trouve surtout des vers (oligochètes) et des larves de diptères (chironomides). Bien que ces organismes soient peu considérés sur le plan de la protection des espèces, cela ne doit pas conduire à les négliger a priori. En cas d'immersion, la recolonisation par ce type d'organismes est relativement rapide à condition que leur espace vital ne soit pas trop fortement perturbé (nature et chimisme des matériaux) et que la zone d'immersion demeure relativement limitée (STÖSSEL, 1992). En revanche, une recolonisation peut s'avérer plus lente en cas de faible apport de matières organiques et de perturbations étendues.

Dans les **zones littorales**, les macroinvertébrés benthiques vivent en étroite association avec les macrophytes. La production et la diversité des espèces y sont élevées ainsi que la structure des biocénoses. De nombreuses espèces sont considérées comme rares ou menacées. En raison de la complexité des interactions écologiques ainsi que des modifications humaines importantes qu'elles ont déjà subies, l'immersion de solides dans une zone littorale entraîne toujours des impacts considérables.

2.3.5. Poissons

En raison de leur mobilité et de leurs exigences écologiques différenciées en fonction du type d'habitat (liées aux stades de développement, aux saisons, aux fonctions vitales telles que recherche de nourriture et reproduction), l'impact d'une immersion de matériaux solides sur les poissons est distinct de celui des autres organismes aquatiques.

Les populations piscicoles sont surtout affectées par la destruction ou la modification de leur milieu (MARRER, 1987-1990; EAWAG, 1976). L'ampleur de l'impact varie naturellement d'une espèce à l'autre en fonction de leurs exigences écologiques. L'immersion de matériaux solides entraîne une restructuration du fond lacustre. Ces modifications peuvent aller dans le sens d'une destruction du milieu naturel, mais aussi de la création de nouveaux espaces vitaux. Ceci est notamment le cas lors de la reconstitution de nouvelles zones de faible profondeur qui favorisent le développement des macrophytes. Les irrégularités topographiques du fond lacustre provoquées par l'immersion peuvent également offrir de nouveaux espaces vitaux pour certaines espèces (p.ex. la lotte, *Lota lota*). Si les matériaux présentent une granulométrie grossière, ils peuvent constituer de nouvelles frayères pour des espèces lithophiles comme les corégones (*Coregonus* sp.) ou l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*). La création de tels bancs de gravier n'est toutefois judicieuse que s'ils présentent un caractère durable et ne sont pas rapidement colmatés par la sédimentation naturelle. Ces conditions ne sont réunies qu'à proximité des embouchures de rivières apportant des éléments grossiers, aux emplacements exposés à des courants suffisants et dans les lacs où la production d'algues est réduite (MÜLLER, 1992). En revanche, une immersion de

matériaux solides peut s'avérer préjudiciable si elle touche une zone qui abrite des espaces vitaux pour la faune piscicole. A ce propos, les remblayages dans les zones peu profondes doivent être appréhendés de manière critique puisqu'il s'agit des zones les plus productives du lac et qu'elles servent de lieu de reproduction pour les espèces phytophiles comme le brochet (*Esox lucius*), la perche (*Perca fluviatilis*) et divers cyprinidés. L'immersion de solides sur des fonds lacustres graveleux est également problématique dans la mesure où ces zones sont généralement utilisées comme frayères par les espèces lithophiles. Dans ce cas, la probabilité d'améliorer la situation écologique est plus faible que celle de détruire irrémédiablement le milieu.

La turbidité engendrée a une influence directe (développement embryonnaire, comportement de la nage, blessures, croissance, résistance aux maladies) et indirecte (migration, abondance de nourriture) sur les populations piscicoles (ALABASTER & LLOYD, 1982). Pour provoquer des lésions aux branchies, comme cela s'observe parfois dans certains cours d'eau, il faudrait une turbidité extrême (ALABASTER & LLOYD, 1982). Pour des concentrations de fines relativement élevées, c'est surtout la durée de l'exposition qui est déterminante (BÜSSER, 1992). NEWCOMBE & MACDONALD (1991) ont développé un indice de stress tenant compte de la concentration de fines et de la durée d'exposition pour les poissons nobles et certains invertébrés.

Finalement, la sédimentation des fines peut détruire les oeufs par enfouissement ou colmater les frayères. Ces impacts sont à craindre notamment lorsque le taux de sédimentation artificiel dépasse fortement le taux naturel. Ces phénomènes ont été observés dans certains lacs eutrophes, caractérisés par une sédimentation anormalement élevée de matières organiques (WEHRLI & WÜEST, 1996).

2.3.6. Oiseaux aquatiques et limicoles

L'impact sur l'avifaune est lié à la disparition des zones peu profondes de macrophytes qui jouent un rôle écologique déterminant pour toute une série d'oiseaux aquatiques et limicoles.

2.4. Techniques d'immersion et de protection

La formation d'une plume de turbidité et les problèmes écologiques qui en résultent sont étroitement liés à la technique d'immersion. Cette dernière joue donc un rôle clé permettant d'atténuer l'impact écologique des opérations de remblayage. Les techniques décrites ci-après intègrent plus ou moins les aspects de protection:

- **Déversement en surface:** cette technique consiste à déverser les matériaux en grande quantité et par à-coups depuis la surface du lac (p.ex. depuis une barge). Le délavage des fines est important, et il faut s'attendre à la formation d'une turbidité primaire sur toute la hauteur de la colonne d'eau. De plus, le contact des matériaux d'excavation avec le fond lacustre provoque des projections de sédiments et la formation d'une turbidité secondaire. Cette technique permet de déverser de grandes quantités en peu de temps, mais entraîne toujours un impact écologique considérable.
- **Rinçage:** cette méthode, couramment employée sur les côtes maritimes, consiste à entraîner les fines au moyen de débits plus ou moins importants d'eau de rinçage. Elle ne convient que pour des matériaux pouvant être mis en suspension par le débit donné et demeure donc limitée aux granulométries relativement fines. Comme cette méthode provoque une turbidité importante et ne permet pas une immersion ciblée, son utilisation en milieu lacustre reste limitée à des cas très particuliers.
- **Déversement depuis la rive:** avec cette technique peu onéreuse, les matériaux sont déversés dans le lac de manière ciblée depuis la rive. En cas de déversement depuis des camions, la formation de turbidité est négligeable. En cas de déversement en pleine eau (depuis des bandes transporteuses), on observe un certain délavage des fines. Dans les deux cas, la turbidité secondaire est liée principalement à l'action des vagues (variable en fonction de la direction et de l'intensité du vent) et moins au choc sur le fond lacustre peu profond. On accordera une attention particulière au risque de déstabilisation des pentes sous-lacustres. Cette technique a été utilisée notamment pour la réalisation de l'île et réserve ornithologique de Flüelen, ainsi que pour l'embouchure près de Sisikon (KATZ, 1997).
- **Dragage inverse:** les matériaux d'excavation sont mis en place de manière précise au fond du lac au moyen d'une drague. Cette technique est lente et onéreuse. En revanche, il n'y a guère de remise en suspension de sédiments lacustres. L'importance du délavage de fines dépend de la construction de la drague.
- **Déversement à travers un tube plongeur court:** les matériaux d'excavation sont versés dans un tube descendant juste au-dessous de la thermocline. A partir de là, les matériaux sédimentent librement. Cette technique permet d'éviter dans une grande mesure la formation d'une plume de turbidité en surface. En revanche, pour les eaux profondes, cette technique n'apporte pas d'amélioration sensible par rapport à un déversement en surface.

- **Déversement à travers un tube plongeur long télescopique:** dans ce cas, le tube télescopique descend jusqu'à proximité du fond lacustre et permet d'éviter dans une grande mesure la formation de turbidité. La figure 4 illustre cette technique, telle qu'elle a été utilisée dans le lac de Neuchâtel (A5) (AQUARIUS, 1994). On veillera à dimensionner le tube plongeur avec un diamètre suffisant, afin de limiter les différences de pression (positives et négatives) et d'éviter qu'elles n'endommagent le tube. Il s'agit par conséquent d'une installation relativement massive et difficile à manoeuvrer. Si le tube est parfaitement étanche et que son ouverture supérieure est toujours au-dessus de la surface du lac, cette technique présente les avantages suivants:
 - on ne crée aucun phénomène de convection en dehors du tube; les fines en particulier n'ont pas tendance à remonter. Le panache d'eau trouble reste sur le fond du lac, à proximité du point de déversement;
 - les matériaux d'excavation traversent toute la colonne d'eau sans interaction;
 - la faible dilution et les turbulences favorisent la formation d'agrégats de particules. Ces agrégats sédimentent plus rapidement;
 - les courants de densité à l'intérieur du tube accélèrent la sédimentation des fines et limitent l'extension verticale du panache d'eau trouble.

Un système similaire a été utilisé en Allemagne afin de recouvrir de sable des matériaux pollués immergés. A l'extrémité inférieure du tube plongeur, on peut installer un diffuseur servant à répartir le sable sur les matériaux à confiner (BFG, 1994).

A côté de cela, il existe également des techniques de protection et de confinement visant à limiter spatialement la turbidité:

- **Digue sous-lacustre:** afin d'éviter la propagation des fines en dehors de la zone d'immersion, on commence par construire une digue sous-lacustre. On peut ensuite remblayer la zone en amont de la digue sans provoquer de turbidité dans le reste du lac (Fig. 5). A la fin du remblayage, la partie de la digue dépassant le niveau du remblayage doit être décapée. Comme la construction de la digue provoque la mise en suspension de fines, cette technique est surtout avantageuse lorsque le volume de la digue n'est pas trop important par rapport à l'ensemble des matériaux à immerger. Par ailleurs, la stabilité de la digue exige l'utilisation de matériaux adéquats (SNV, 1993).
- **Rideau de bulles:** dans ce procédé, de l'air comprimé est pulsé à travers des tuyaux perforés disposés sur le fond du lac. Les bulles montantes forment un rideau qui limite l'extension de la plume de turbidité. En cas de différence de densité trop importante entre l'eau chargée de particules d'un côté du rideau et l'eau claire de l'autre côté du rideau, la mise en place d'un second rideau de bulles peut s'avérer nécessaire. Un fond lacustre irrégulier exige la mise en place d'une installation de diffusion onéreuse. La nécessité d'un dimensionnement prudent (distance de sécurité) et l'énergie nécessaire à la compression de l'air renchérissent encore le procédé (AQUARIUS, 1994).

- **Rideau en textile synthétique:** par analogie à un rideau de bulles, on peut mettre en place une enceinte en textile synthétique suspendu à des flotteurs (EPFZ, 1975). Les différences de pression dues aux déversements, aux courants, aux vagues, aux manoeuvres des barges, à la topographie sous-lacustre irrégulière, etc. rendent la mise en oeuvre du procédé complexe. Par ailleurs, l'enceinte requiert une très haute résistance à la déchirure. Un débit d'immersion élevé exige une enceinte textile largement dimensionnée, sans quoi même des textiles très résistants risquent d'être endommagés (AQUARIUS, 1994). Dans des zones peu profondes, pour de petites quantités de matériaux à immerger et avec un dimensionnement adéquat, cette technique peut toutefois être utilisée avec succès (Projekta, comm. pers.).

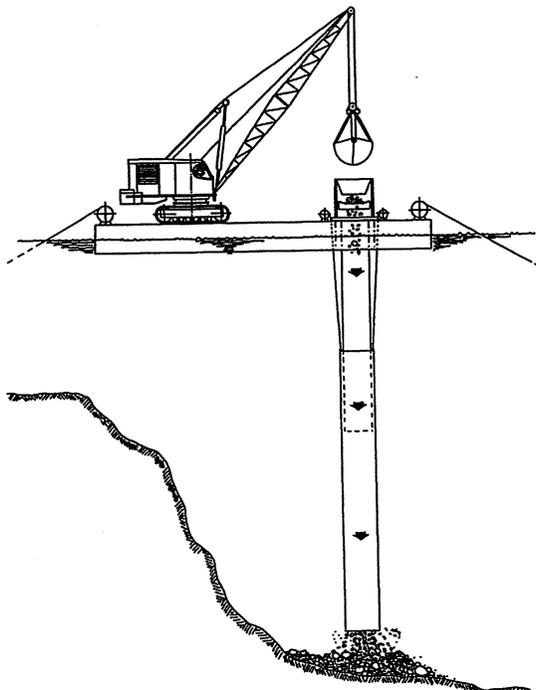


Figure 4: Tube plongeur long télescopique utilisé pour l'immersion des matériaux d'excavation de la A5. Son extrémité inférieure est maintenue à proximité du fond lacustre (d'après AQUARIUS, 1994).

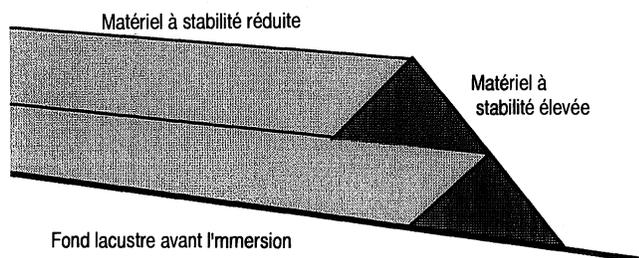


Figure 5: Les matériaux d'excavation permettant des talus pentus (granulométrie élevée, rugosité élevée, angle de frottement interne élevé; SNV, 1993) sont utilisés pour la construction de digues sous-lacustres. Celles-ci retiennent les matériaux à stabilité réduite déversés à l'amont.

2.5. Exemples de réalisations

2.5.1. *Lac d'Uri (tunnel du Seelisberg, A2)*

Dans le cadre du creusement du tunnel du Seelisberg (1970-1980), 1.5 millions de m³ de déblais ont été déversés dans le lac d'Uri à travers un **tube plongeur court** fixe (NZZ, 1974). Les matériaux, amenés par bandes transporteuses, ont été introduits dans un tube en caoutchouc plongeant à 4 m de profondeur (Katz, comm. pers.). De cette manière, on a pu éviter efficacement la formation de turbidité superficielle.

2.5.2. *Rive nord du lac de Neuchâtel (A5)*

Dans le canton de Neuchâtel, la construction de la A5 a dégagé quelque 5 millions de m³ de matériaux d'excavation. La moitié environ a pu être recyclée. Une partie des matériaux restants est utilisée pour remblayer d'anciens trous de dragage dans le lac de Neuchâtel. Ces trous, de forme conique, constituent des milieux à faibles courants et pauvres en oxygène peu favorables pour les poissons. Leur comblement permet de restaurer la zone littorale, ce qui représente une mesure de revitalisation.

Plusieurs essais réalisés avec des marno-calcaires ont montré que leur déversement en surface donnait lieu à une forte dispersion des fines. Des valeurs élevées de turbidité ont été mesurées jusqu'à 4 km du point de déversement. Ces observations ont conduit à l'utilisation d'un **tube plongeur télescopique** permettant de descendre les matériaux d'excavation jusqu'à 50 cm environ au-dessus du fond du lac, ce qui évite presque complètement la dispersion des fines (Fig. 4).

Afin de recréer des zones peu profondes (maximum 10 m) les plus étendues possibles, les talus des digues doivent présenter des pentes importantes qui ne peuvent être réalisés avec n'importe quel matériel. C'est pourquoi les matériaux à stabilité élevée (SNV, 1993) sont utilisés prioritairement pour la construction des digues (Fig. 5). Les matériaux à stabilité réduite sont déversés en amont des digues. Cette technique exige un relevé précis de la topographie sous-lacustre. Durant la phase de mise en place, les paramètres principaux (position, profondeur d'eau, turbidité, etc.) sont mesurés à fréquence quotidienne, la topographie sous-lacustre est relevée régulièrement et les matériaux à immerger sont constamment analysés (granulométrie et chimie). En plus des appareils de mesure usuels, cette technique requiert l'engagement de plongeurs et l'utilisation de sondes robotisées, de sonar et d'appareils de positionnement.

2.5.3. *Rive sud du lac de Neuchâtel (Fanel)*

Dans cette région, on a réalisé plusieurs îlots offrant un espace vital aux oiseaux aquatiques ainsi qu'une aire de repos destinées aux limicoles. Ces îlots font aujourd'hui partie d'une réserve naturelle d'importance internationale. Ces remblayages constituaient également une mesure de compensation écologique pour la deuxième correction des eaux du pied du Jura (STATION ORNITHOLOGIQUE SUISSE, 1987). La technique d'immersion **n'est pas connue**.

2.5.4. Lac des Quatre-Cantons (remblayage du quai des Alpes à Lucerne)

Contrairement aux déversements réalisés en pleine eau, ceux effectués **depuis la rive** sont relativement courants. Ainsi, en 1979, les matériaux d'excavation du tunnel du Sonnenberg (A2) ont été entièrement utilisés pour créer un parking avec zones de baignade et espaces naturels sur le quai des Alpes.

2.5.5. Delta de la Reuss dans le lac d'Uri (contournement de Flüelen par la A4, NLFA)

Depuis la correction de la Reuss en 1851, les éléments grossiers que la rivière charrie se déposent de manière concentrée à l'extrémité du canal (à env. 300 m de la rive). Le dragage systématique de sable et de gravier débuté en 1905, de même que la correction elle-même, ont entraîné la destruction de la zone littorale ainsi qu'une érosion des rives. Sur une grande partie de la zone littorale, des cavités imputables à l'exploitation du gravier se sont formées. Afin de résoudre le conflit d'intérêts entre l'exploitation de gravier et la protection des rives – conflit qui s'est étendu sur plusieurs décennies –, on élaborera un plan d'aménagement du territoire (LANG, 1983). Comme l'évolution naturelle du delta de la Reuss se limitera également à long terme aux environs immédiats de son embouchure, un nouvel îlot réservé aux oiseaux a été aménagé et plusieurs zones littorales ont été revitalisées à la fin des années 1980 (ELBER *et al.*, 1979).

Dans une seconde étape, on élaborera un projet visant à favoriser le développement du delta et à créer des groupes d'îlots (ILU, 1991; LANG, 1995; ILU, 1996). Les matériaux de remblayage nécessaires pourraient provenir du creusement du tunnel de contournement de Flüelen par la A4 et, plus tard, des NLFA (nouvelles lignes ferroviaires alpines). Le concept de gestion des matériaux des transversales alpines prévoit environ 2 millions de m³ de matériaux excédentaires se prêtant à une immersion en lac. Une partie de ces matériaux, à savoir 0.5 million de m³, pourrait être utilisée pour le projet d'assainissement des rives du lac. Ces déversements dans le delta de la Reuss visent les objectifs suivants:

- protection des rives;
- amélioration et agrandissement des zones peu profondes, notamment pour favoriser la croissance des macrophytes (AQUAPLUS, 1991, 1996);
- agrandissement des aires de repos pour les limicoles et des espaces vitaux des oiseaux aquatiques;
- évolution du delta et du paysage proche des conditions naturelles.

3. Check-list des éléments à prendre en compte

Le présent chapitre constitue une "check-list" des principaux éléments à prendre en compte lors d'une immersion de matériaux d'excavation dans un lac. Comme mentionné dans l'introduction, il ne s'agit pas d'une liste exhaustive dans la mesure où chaque cas doit être apprécié individuellement en fonction de ses spécificités.

3.1. Bases légales

Les articles 6 et 39 de la **loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux** (LEaux) énumèrent les conditions cadre requises pour autoriser une immersion en lac:

- pas d'immersion de substances de nature à polluer les eaux;
- immersion possible lorsqu'elle permet une amélioration de la zone littorale;
- immersion possible pour des constructions qui ne peuvent pas être érigées en un autre lieu et qui sont situées en zone bâtie, lorsque des intérêts publics prépondérants l'exigent et que l'objectif ne peut pas être atteint autrement.

Les opérations de remblayage en lac doivent également satisfaire les exigences de la **loi fédérale sur la pêche** (LPê; articles 8 et 9), celles de la **loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage** (LPN, article 18, alinéa 1bis, et article 21, alinéa 1) et celles de l'**ordonnance sur l'étude d'impact**.

3.2. Conflits d'intérêts potentiels

Une immersion en lac de matériaux solides est susceptible de restreindre ou d'influencer négativement des intérêts multiples. Les conflits potentiels suivants doivent être examinés dans l'optique d'une pesée des intérêts:

- L'exploitation de l'eau potable est-elle compromise ?
- L'exploitation de gravier est-elle entravée ?
- Doit-on s'attendre à des restrictions, des entraves ou des nuisances pour la navigation publique ou privée ?
- D'éventuelles installations techniques sur/dans le lac sont-elles de nature à entraver l'exercice de la pêche professionnelle ou sportive ?
- La vocation de zone de détente ou de région touristique du lac subit-elle des préjudices ?
- La protection du paysage est-elle prise en compte ?

L'exercice de la pêche peut subir des préjudices directs (entrave de la pêche par la présence des infrastructures) ou indirects (turbidité). En ce qui concerne l'effet des substances inertes en suspension, ALABASTER & LLOYD (1982) indiquent des valeurs limites d'exploitation de 25 mg/l (début des influences négatives) et de 25 mg/l à 80 mg/l (exploitation encore possible). La valeur limite au-delà de laquelle on observe des influences négatives par rapport à un état proche de l'état naturel est nettement plus basse.

Une immersion en lac de matériaux solides doit en principe être évitée dans les cas suivants:

- lorsqu'elle touche des lacs de petites dimensions et des étangs;
- lorsque le site abrite des spécificités faunistiques et floristiques (p.ex. des communautés typiques de la station de grande valeur; espèces menacées);
- lorsqu'elle risque de détériorer des objets archéologiques;
- lorsqu'elle s'effectue sur des sédiments lacustres de grande valeur scientifique.

3.3. Sites potentiels d'immersion

Afin d'être en mesure d'évaluer l'impact d'une immersion de matériaux solides sur un site potentiel, il est nécessaire de disposer d'informations aussi complètes que possible sur la situation initiale.

3.3.1. *Caractéristiques abiotiques*

Les caractéristiques suivantes du lac doivent être documentées:

- Les caractéristiques **physico-chimiques** principales des eaux (p.ex. teneur en oxygène, alcalinité).
- La **nature**, la **composition** et la **granulométrie** des **sédiments lacustres**: ces caractéristiques doivent être connues avec précision afin de pouvoir être mises en relation avec celles du matériel immergé.
- La **sédimentation naturelle** dans le lac: les sédiments déversés doivent être comparés avec le taux de sédimentation naturel qui se compose, d'une part, des apports autochtones (production algale et précipitation de calcite) et, d'autre part, des apports allochtones (charge solide éolienne et fluviale). Concrètement, il s'agit d'évaluer si l'apport artificiel des sédiments représente une part importante de l'apport naturel ou si, comparé à ses variations naturelles, il s'avère négligeable. Les immersions peuvent être comparées à un événement exceptionnel (éboulement, crue centennale).
- **Relief et stabilité sous-lacustre**: la topographie et la stabilité des talus doivent être connues afin d'évaluer dans quelle mesure la pente du talus peut être augmentée. Les sédiments accumulés dans les zones d'embouchures d'affluents se trouvent souvent dans un état labile.
- Les **courants** et les **vagues**: les courants sub-aquatiques jouent un rôle déterminant pour la dispersion de la plume de turbidité (orientation par rapport aux vagues dues aux vents dominants). Il en va de même pour l'action sur la remise en suspension des fines dans les zones peu profondes.

3.3.2. *Caractéristiques biotiques*

Il y a lieu de faire une distinction claire entre les différentes **zones lacustres** (zone profonde et zone littorale) et les principaux **groupes trophiques** (phytoplancton, zooplancton, macrophytes y compris le periphyton, macroinvertébrés benthiques, poissons, amphibiens, ainsi que l'avifaune et autres vertébrés des zones littorales):

- La **composition** en espèces, la **biomasse** et la **structure** des communautés présentes doivent être documentées. La valeur des biocénoses sera appréciée en fonction de leur spécificité par rapport à la station et à leur type d'habitat. Il s'agit d'évaluer l'importance du milieu pour les différentes espèces et pour les communautés animales et végétales dans leur ensemble, y compris lorsque ces dernières utilisent le milieu en question de manière limitée dans le temps (zones de reproduction, couloir de migration, etc.). Concrètement, il s'agit de répondre aux deux questions suivantes:
 - L'emplacement prévu pour l'immersion abrite-t-il une communauté d'espèces typiques de la station ?
 - Existe-t-il des espèces ou des communautés menacées dignes de protection ?

En ce qui concerne la **faune piscicole**, on répondra aux questions suivantes:

- L'emplacement prévu pour l'immersion assure-t-il un rôle particulier pour la faune piscicole (p.ex. frayères, espace vital pour les jeunes poissons, routes de migration importantes) ?
- L'emplacement prévu abrite-t-il des espèces de poissons menacées (KIRCHHOFER *et al.*, 1990) ?
- A quelle période de l'année ces espaces vitaux sont-ils utilisés par le poisson ?
- Quelle est la proportion d'individus touchés par rapport à l'ensemble de la population ?
- Des restrictions géographiques ou saisonnières pendant les opérations de remblayage sont-elles nécessaires ?
- La situation écologique peut-elle être améliorée, p.ex. en agrandissant les zones de faible profondeur ou en recouvrant les sédiments d'une couche à granulométrie grossière ? Dans l'affirmative, quelles sont les mesures particulières et les volumes de matériaux nécessaires ?
- Les matériaux immergés doivent-ils être préalablement triés (taille et forme des éléments) afin d'améliorer la situation ?

En cas d'immersion dans la **zone littorale**, il faut se demander si le milieu abrite des macrophytes. Dans l'affirmative, il est déterminant de s'assurer qu'une recolonisation ultérieure demeure possible. Il est généralement nécessaire de renoncer à une immersion si cette dernière entraîne une destruction massive et irréversible des herbiers sans aucune possibilité de recolonisation ultérieure.

La description de l'état initial ne doit pas se limiter uniquement au domaine aquatique mais doit également inclure les **rives**. Il est important de savoir si la zone présente une valeur particulière du point de vue ornithologique et, le cas échéant, dans quelle mesure les oiseaux seront dérangés par les interventions techniques. Par ailleurs, il faut également avoir une attention particulière pour la végétation riveraine. À côté des influences directes, une modification du régime des vagues et des courants peut avoir des répercussions sur la végétation riveraine.

3.4. Matériaux à immerger

Les caractéristiques suivantes du matériel à immerger doivent être connues:

- La **composition chimique**: en cas d'immersion dans un lac, les matériaux ne doivent en aucun cas induire une pollution des eaux. À ce propos, la nature géologique de la roche ainsi que les produits chimiques utilisés lors de l'extraction jouent un rôle important. Une quantification précise des composés qui peuvent se retrouver en trace dans le matériel à immerger est nécessaire afin d'évaluer si un lavage préalable s'avère nécessaire. L'élimination des eaux issues du lavage doit respecter les prescriptions en matière de déversement des eaux usées.
- La **grandeur** et la **forme**: la distribution granulométrique des matériaux à immerger joue un rôle déterminant dans la formation de la **turbidité**. La caractérisation ne doit pas se limiter aux techniques de tamisage, dans la mesure où ces dernières ne permettent pas de quantifier les éléments les plus fins (Fig. 1), qui sont précisément responsables de la turbidité. La question centrale est celle de savoir si l'on doit s'attendre à la formation d'une plume importante de turbidité. En plus, le choc sur le fond lacustre provoque une turbidité secondaire. L'extension et la progression des panaches d'eau trouble doivent être évalués dans l'espace et dans le temps. On tiendra également compte du fait que de l'eau plus chaude et moins dense entraînée au fond par sa charge solide peut provoquer des panaches d'eau trouble lors de sa remontée.

Une fois déterminée l'extension spatio-temporelle des panaches d'eau trouble, leur impact écologique doit être apprécié:

- La réduction de la pénétration de la lumière provoque-t-elle une diminution sensible de la productivité (photosynthèse) ?
- Peut-on exclure un impact direct des fines en suspension sur les poissons et les invertébrés (p.ex. sur les mollusques et les daphnies) ?
- Doit-on s'attendre à un dépôt de fines sur les macrophytes, sur les fonds graveleux ou sur les frayères ?
- Un dépôt de fines aurait-il des conséquences sur certaines espèces présentes dans le lac, y compris à certains stades seulement de leur développement (p.ex. sur les oeufs de corégones) ?
- Y-a-t-il un risque de colmatage du fond lacustre ?
- En cas de colmatage, y-a-t-il un risque de réduire les échanges entre l'eau et les sédiments lacustres ?
- Des fonds graveleux existants ou à créer sont-ils altérés ou détruits par la sédimentation des fines ?

En cas d'impact négatif significatif, il y a lieu d'adapter ou d'améliorer la technique d'immersion et/ou de protection.

- **Propriétés géotechniques:** l'immersion de matériaux solides a des conséquences sur la stabilité du fond lacustre. Le risque de glissement de terrain peut être réduit en répartissant au mieux les matériaux immergés. Il faut également connaître la pente maximale admissible pour les matériaux solides. Ces derniers peuvent être concassés et triés, afin de les utiliser de manière spécifique en fonction de leurs caractéristiques géotechniques (granulats, remblai pour digues, immersion en lac, etc., cf. fig. 5).

3.5. Technique d'immersion et suivi des opérations

3.5.1. *Technique d'immersion*

En plus de la qualité des matériaux à immerger, les modalités du remblayage jouent un rôle décisif quant à l'impact sur l'environnement. Les points suivants doivent être examinés:

- Comment les matériaux sont-ils stockés ?
- Comment les matériaux arrivent-ils sur le lieu de l'immersion ?
- Comment parviennent-ils jusque sur le fond lacustre ?
- Quelle est la quantité de matériaux à immerger, et dans quel laps de temps ?
- Quelles mesures particulières sont mises en oeuvre pour éviter la formation de nuages de turbidité ?
- Quelles mesures particulières sont mises en oeuvre pour obtenir la topographie souhaitée ?
- Des essais préliminaires sur modèle sont-ils nécessaires pour identifier les impacts ?
- Les matériaux immergés doivent-ils être recouverts d'une couche de gravier et, si oui, quelle doit être l'épaisseur de cette couche de gravier ?

3.5.2. *Surveillance et suivi des mesures*

L'immersion en lac de matériaux solides est une entreprise de longue haleine. Par ailleurs, les caractéristiques physico-chimiques du lac et la qualité des matériaux immergés varient dans le temps. Un programme de **suivi** et de **surveillance** – ne serait-ce qu'au moyen d'échantillonnages ponctuels – s'avère donc indispensable. Dans ce cadre, les exigences de qualité imposées aux matériaux immergés ainsi que les valeurs limites déterminantes pour le lac sont prioritaires. Pour chaque mesure, le programme doit préciser:

- le paramètre,
- la méthode analytique,
- les emplacements de mesure,
- le moment des mesures et leur fréquence.

Immersion de matériaux d'excavation

Le programme de suivi et de surveillance doit permettre d'intervenir rapidement et efficacement en cas de problèmes ainsi que de cibler les mesures judicieuses qui s'imposent.

Finalement, il y a lieu d'effectuer un **suivi des mesures** à la fin des travaux. Ces contrôles doivent permettre de se rendre compte si les buts initialement fixés ont été atteints (végétation, structure du fond lacustre, aspects paysagers, etc.).

4. Bibliographie

- Alabaster, J. S. & R. Lloyd**, 1982. Water quality criteria for freshwater fish. Butterworth, London, 2nd Edition.
- AquaPlus**, 1991. Inselgruppe im Urner Reussdelta - Bereich Limnologie und Pflanzenökologie. *AquaPlus, Unterägeri*.
- AquaPlus**, 1996. Regenerierung des Reussdeltas mit Ausbruchmaterial - UV Voruntersuchung. *AquaPlus, Unterägeri*.
- Aquarius**, 1994. EIE-N5: Restauration de la zone littorale par le noyage de matériaux. *Aquarius, Neuchâtel*.
- BfG**, 1994. Unterbringung von belastetem Baggergut im aquatischen Milieu. *Mitteilung Nr. 6, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz*.
- Büsser, P.**, 1992. Trübung Brienersee. Teilbericht Fischereibiologie. *Unveröffentlichter Bericht, z. Hd. Gewässerschutzamt Bern*.
- EAWAG**, 1973a. (Ed: J. Zobrist). Gutachten über die Auswirkungen der Ablagerung von Aushubmaterial des Seelisbergtunnels im Vierwaldstättersee. *Rapport N° 4415*.
- EAWAG**, 1973b. (Ed: J. Zobrist). Gutachten über die Auswirkungen der Ablagerung von Ausbruchmaterial des Seelisbergtunnels im Vierwaldstättersee. 2. Teil, Auswirkungen der Ablagerung von Ausbruchmaterial der Baulose Büel und Hutteg im Urnersee. *Rapport N° 4435*.
- EAWAG**, 1976. Gutachten über die Beeinflussung des Trophiegrades und der Fischerei durch den Baggerbetrieb im Seegebiet von Stansstad. *Rapport N° 4551*.
- EAWAG**, 1996. (Ed: M. Sturm, C. Siegenthaler, H. Suter, A. Wüest). Das Verhalten von Schwebstoffen im Brienersee - Untersuchungsergebnisse der Jahre 1994-95. *Rapport N° 84109*.
- Elber F. & F. Schanz**, 1990. The influence of a flood event on the phytoplankton succession. *Aquatic Sciences* 52: 330-344.
- Elber F., K. Niederberger & J. Hürlimann**, 1997. Nach der Seesänierung die Revitalisierung der Seeufer. *Gas Eaux Eaux usées* 77: 3-16.
- EPFZ**, 1975. Etude concernant le remblayage des rives du lac à effectuer pour le passage de la route nationale N5 et en particulier son influence sur la prise d'eau de Champ-Bougin. *Laboratoire de recherches hydrauliques et glaciologiques de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich*.

- HGF**, 1997. Belastung der Gewässer: Trends, Prognosen, Sanierungskonzepte. Vierjahresbericht 1992 bis 1995. pp 96-101. *Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren* (HGF, Bonn/Bad Godesberg). Thenée Druck. Bonn.
- ILU**, 1991. Inselgruppen Reussdelta. Allgemeines Bauprojekt und Umweltverträglichkeitsbericht. Im Auftrag der Volkswirtschaftsdirektion und der Kommission für das Reussdelta. *Institut für Landschaftspflege und Umweltschutz, Uster*.
- ILU**, 1996. Regenerierung des Reussdeltas mit Ausbruchmaterial: Vorprojekt und UV – Voruntersuchung. *Institut für Landschaftspflege und Umweltschutz, Uster*.
- Jeppesen E., M. Søndergaard & Christoffersen K.** (eds), 1998. The structuring role of submerged macrophytes in lakes. *Ecological studies 131*, Springer, Berlin, p. 423.
- Katz, W.**, 1997. Seetrübung durch Schwebstoffe aus dem Tunnelausbruch der Nationalstrasse N4. *Tiefbauamt Kt. Uri, mémoire interne*.
- Kirchhofer, A., B. Zaugg. & J.-C. Pedroli**, 1990. Rote Liste der Fische und Rundmäuler der Schweiz. *Documenta Faunistica Helvetiae 9*.
- Krause, W.** 1997. Carales (Charophyceae). Süßwasserflora von Mitteleuropa, 18. Fischer Verlag, 202 S.
- Lang, O.**, 1983, Landschaftsentwicklungsplan Reussdelta / Kanton Uri, Rohstoffsicherung und Landschaftspflege. Im Auftrag der Firma F. Arnold und Co., Flüelen. *Institut für Landschaftspflege und Umweltschutz, Uster*.
- Lang, O.**, 1995. Landschaftsentwicklungsplan Reussdelta 1983 (z.H. Kt. Uri). *Institut für Landschaftspflege und Umweltschutz, Uster*.
- Marrer, H.**, 1987. Baggergebiet Risleiten, Beckenried. Gutachten. Fischereibiologische und limnologische Beurteilung (Beurteilung der Umweltverträglichkeit).
- Marrer, H.**, 1988. Sanierung des Seebades Stansstad. UVB zur Frage der Wiedereinbringung der gebaggerten Sedimente in den See. Soleure.
- Marrer, H.**, 1989. Materialverschiebungen aus Deltas und Verlandungen im Vierwaldstättersee. Gutachten über die einzuhaltenden gewässerökologischen Randbedingungen. Marrer, H. Soleure.
- Marrer, H.**, 1990. Baggergebiet Aawasseregg, Buochs. Gutachten zu den gewässerökologischen Auswirkungen (mit Empfehlungen).
- Müller, G.**, 1964. Methoden der Sediment-Untersuchung. Sediment-Petrologie, Teil 1. *Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Bâle*.
- Müller, R.**, 1992. Trophic state and its implications for natural reproduction of salmonid fish. *Hydrobiologia 243/244*: 261-268.

- Newcombe, C. P. & D. D. MacDonald**, 1991. Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *N. Am. J. Fish. Manage.* 11: 72-82.
- NZZ** (Neue Zürcher Zeitung), 24. März 1974. Wohin mit dem Aushub aus dem Seelisbergtunnel? *NZZ Nr. 139, Seite 35.*
- OFEFP**, 1995. Le dragage de sédiments lacustres dans les ports et voies navigables. *Informations concernant la protection des eaux No 19.*
- OFEFP**, 1997. Projet mis en consultation: Richtlinie für die Verwertung und Ablagerung von mineralischem Aushub-, Abraum- und Ausbruchmaterial (Aushubrichtlinie), état décembre 1997.
- Roenicke, H., H. Klapper, J. Tittel, M. Beyer & B. Zippel**, 1997. Control of phosphorus and plankton by calcite flushing in Lake Arendsee: Enclosure experiments. *Verh. intern. Verein. Limnol.* 26: 768-771.
- Saxer A. & W. Lukas**, 1997. Untersuchung des umweltrelevanten Gefährdungspotentials von Tunnelausbruchmaterial. *Felsbau* 15(2): 111-118.
- Smar, R. & Barko, J.** 1985. Laboratory culture of submersed freshwater macrophytes on natural sediments. *Aquatic Botany* 21, 251-263.
- SNV** (Association suisse de normalisation) 1993. Identification des sols (méthode de terrain et méthode de laboratoire avec classification selon l'USCS). Normes SNV 670'005a et 670'008a.
- Station ornithologique suisse**, 1987. Inventar der Schweizer Wasservogelgebiete von Internationaler Bedeutung. Kap. 3.5, Sempach.
- Stössel, F.**, 1992. Die Bodenfauna im Hallwilersee dringt vor. *EAWAG-News* 34D: 23-26.
- Thalmann, C.**, 1993. Verantwortungsvolle Nutzung der Geobiosphäre. Nachdiplomkurs, Teil 1: Mineralische Rohstoffe.
- Thalmann, C.**, 1994. Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem konventionellen und maschinellen Tunnelvortrieb zu Kiesersatzprodukten – eine Herausforderung an die Kieswerke. *Die Schweizer Baustoff-Industrie*, Heft 6/94.
- Thalmann, C.**, 1996. Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagsstoffen. *Thèse N° 11721* à l'EPF de Zurich.

VAW, 1992. Felssturz Ölberg an der Axenstrasse. Untersuchung der Schwallgefahr im Urnersee. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidg. Tech. Hochschule Zürich, *Rapport N° 4059*.

Wehrli, B. & A. Wüest, 1996. Zehn Jahre Seenbelüftung: Erfahrungen und Optionen. *EAWAG-Schriftenreihe 9*, p. 127 et annexes.