# Approche méthodologique pour l'établissement d'un projet de protection de rives lacustres

Autor(en): **Boillat, Jean-Louis / Sayah, Selim / Schleiss, Anton**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **98 (2006)**

Heft 4

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-939364

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Approche méthodologique pour l'établissement d'un projet de protection de rives lacustres

■ Jean-Louis Boillat, Selim Sayah et Anton Schleiss

**Résumé**

*L'érosion des rives lacustres dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels la variation du niveau d'eau, la sollicitation des vagues et la végétation riveraine tiennent un rôle déterminant. Dans ces conditions, l'établissement d'un projet de protection de rives avec des mesures adéquates constitue un problème d'une grande complexité dont l'approche requiert une certaine méthode. Pour les rives lacustres, les aménagements inspirés du génie biologique offrent un potentiel intéressant dont la mise en pratique n'a pourtant été que faiblement exploitée jusqu'ici, en raison de lacunes scientifiques pour leur dimensionnement. Afin d'inverser cette tendance, des interventions pionnières ont été entreprises en particulier sur le lac de Bienne en Suisse. Plus récemment, un projet de recherche, baptisé Erosee, a été initié pour combler le vide scientifique en matière de dimensionnement des méthodes inspirées du génie biologique. Fort de ces développements récents, le présent article propose une démarche permettant de définir les sollicitations du site, le choix de la mesure de protection adéquate et la validation du concept réalisé.*

**Zusammenfassung**

*Die Erosion von Seeufern ist ein vielschichtiges Problem. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren zählen die Schwankung des Seewasserspiegels, Wellenschlag und der Uferbewuchs. Unter diesen Gesichtspunkten stellt die Entwicklung eines Uferschutzkonzeptes sowie dazugehöriger geeigneter Massnahmen ein sehr komplexes Problem dar und erfordert eine hierfür angepasste Methodik. Ingenieurbiologische Bauweisen bieten in diesem Zusammenhang ein noch wenig genutztes Entwicklungspotenzial, welches aber aufgrund fehlender wissenschaftlicher Bemessungsgrundlagen bisher kaum in die Praxis umgesetzt wurde. Aus diesem Grund ist vor einiger Zeit das Forschungsprojekt Erosee mit dem Ziel ins Leben gerufen worden, die fehlenden wissenschaftlichen Bemessungsgrundlagen zu erarbeiten und das Potenzial ingenieurbiologischer Ansätze auszuschöpfen. Am Bielersee in der Schweiz sind einige dieser innovativen Lösungsansätze umgesetzt worden. Im vorliegenden Beitrag werden die zur Bemessung erforderlichen hydraulischen Uferbeanspruchungen, geeignete Schutzmassnahmen sowie eine Validierung des realisierten Konzeptes vorgestellt.*

## 1. Introduction

L'érosion des rives (*Fig. 1a*) et le choix de mesures de protection adaptées constituent un problème récurrent qui concerne l'ensemble des zones côtières. Les aménagements de protection habituellement réalisés sur les côtes maritimes ne sont malheureusement pas transposables simplement à petite échelle. Dans le contexte particulier des rives lacustres, les aménagements inspirés du génie biologique offrent un potentiel intéressant dont la mise en pratique n'est pourtant que faiblement exploitée (Iseli et Wehrli 1995). La raison de cette hésitation à recourir à des méthodes douces tient essentiellement au fait que les bases de dimensionnement requises sont quasi-inexistantes. Les aménagements réalisés ont de ce fait un caractère généralement dur qui va à l'encontre du maintien de berges naturelles. Pour inverser cette tendance, des interventions pionnières ont été entreprises en particulier sur le lac de Bienne en Suisse (*Fig. 1*).

L'approche méthodologique présentée ici a pour objectif de donner aux concepteurs les moyens d'établir un projet adapté aux conditions locales, considérant non seulement l'efficacité sécuritaire mais aussi l'intégration paysagère et la préservation environnementale. Cette approche, permettant de déterminer et de dimensionner l'aménagement adéquat, nécessite l'analyse des contraintes locales, l'acquisition des données caractéristiques du site et le calcul des sollicitations auxquelles il est soumis. Elle repose également sur la connaissance des phénomènes et du comportement des ouvrages destinés à les maîtriser.

La démarche proposée pour atteindre ces objectifs s'articule en quatre étapes:

- la définition d'un projet respectueux des bases juridiques en vigueur et des intérêts des diverses institutions et personnes concernées;
- la connaissance des conditions de bords auxquelles l'aménagement sera soumis et des particularités locales du site;
- le dimensionnement et l'implantation du dispositif de protection, tenant compte non seulement de l'action des vagues mais aussi des phénomènes qu'elles subissent tels que réflexion et diffraction,
- le contrôle de réussite destiné à valider et, le cas échéant, corriger le projet.

## 2. Contexte juridique et socio-économique

Les aménagements de protection de rives concernent différentes problématiques relatives en particulier au paysage, à l'environnement, aux loisirs, aux aspects techniques et à la législation. Ce dernier point mérite d'être parcouru brièvement car il fixe le cadre et les limites d'un projet (Hugonin et Boillat 2005).

Sur le plan international, le tribunal fédéral estime que les lois suisses sont pour l'instant suffisamment sévères et astreignantes pour que l'art. 8 de la Cour européenne des droits de l'homme (CEDH) ne soit pas violé. En 1971, la Suisse a ratifié la Convention Ramsar qui concerne un millier de sites répartis à travers le monde, dont 7 dans notre pays, en particulier la rive sud du lac de Neuchâtel. Cette convention, relative aux zones humides d'importance internationale met en évidence la nécessité de préserver leurs richesses écologiques par une utilisation rationnelle des ressources. Les lacs sont inclus dans la convention en particulier comme habitat des oiseaux d'eau.

En Suisse, la constitution fédérale (CF), traite de l'environnement et de l'aménagement

*Figure 1. À gauche, érosion linéaire sur la rive nord du Léman; à droite, Protection de rive par des barrages à claire-voie sur le lac de Bienne.*

du territoire dans sa section 4. Au chapitre «les eaux», la CF aborde l'utilisation des ressources en eaux au sens large, sans toutefois mentionner précisément les lacs. Les lois fédérales sur l'environnement (LPE) et sur la protection des eaux (Leaux) assurent surtout la protection qualitative des eaux mais les lacs n'y sont que rarement mentionnés, ce qui peut paraître étonnant dans un pays où ils recouvrent plus de 1300 km$^2$. Il existe une Ordonnance sur la protection des bas-marais d'importance nationale, une autre sur la protection des sites marécageux mais aucune sur les lacs en tant que tels.

Il faut descendre au niveau cantonal pour trouver des lois mentionnant les lacs, ce qui est étonnant du fait qu'un plan d'eau n'est que rarement propriété d'un seul canton. Ainsi la loi bernoise du 6 juin 1982 sur les rives des lacs et des rivières (LRLR) mentionne à son art.1 que le canton et les communes protègent la physionomie des rives et veillent à ce que les rives des lacs et les rivières soient accessibles au public. L'art.3 définit le contenu des plans de protection des rives et surtout son al.d «des mesures visant au maintien des rives dans un état proche de l'état naturel et à leur rétablissement». Cette loi fixe aussi les montants alloués à l'application de la LRLR.

Cette loi est assortie d'une Ordonnance (ORLR) qui mentionne (art.1 al.3) que «Tous les terrains situées le long des rives, y compris les zones à bâtir, la zone agricole et les autres zones d'affectation sont soumis à la législation sur les rives des lacs et des rivières». Cet alinéa est important puisqu'il permet de lever le droit privé sur le droit public. En effet, les personnes sont tenues d'appliquer la LRLR et l'ORLR au détriment de leur propre zone d'affectation.

L'intérêt de cette Ordonnance réside dans le fait qu'elle institue le Plan de protection des rives (art. 6) dont le contenu et les formes sont définis (Chp. 3, art. 7). Elle prévoit en outre le financement de l'élaboration du Plan de protection des rives, dont la responsabilité est dévolue aux communes (art. 6 al. 1).

Ce petit parcours largement non exhaustif, dans le domaine juridique relatif à la protection des eaux met bien en évidence la complexité apparente associée à l'élaboration d'un projet de rives lacustres. Il montre aussi la nécessité d'intégrer dès l'origine toutes les composantes du projet ; les aspects sociaux, économiques, politiques et environnementaux et d'associer tous les acteurs concernés au processus de décision.

## 3. Conditions de bords

Les conditions de bords relatives à un projet de protection lacustre sont identifiées par des paramètres cruciaux décrivant les conditions de vent, responsables des vagues sur le site à protéger. Ces données de base, nécessaires au dimensionnement des ouvrages, sont obtenues par des mesures et une analyse statistique adéquates.

### 3.1 Les conditions anémométriques

La direction du vent et sa force appliquée sur un plan d'eau ne restent constants que sur des durées très limitées. Il convient ainsi de considérer le forçage du vent comme une suite d'événements pendant lesquels sa vitesse et sa direction restent quasi constantes.

La structure et la variabilité des cellules de pression atmosphérique induisent un caractère a priori aléatoire à la vitesse et à la direction du vent. Pourtant, l'analyse du vent sur de longues périodes, typiquement sur plusieurs années, fait apparaître certaines lois de comportement qui s'expliquent par l'influence orographique du site et par les variations météorologiques saisonnières. La topographie a en particulier comme effet de canaliser les courants principaux, rendant certaines orientations plus fréquentes que d'autres.

Il s'agit ainsi en premier lieu de choisir les stations anémométriques représentatives (*Fig. 2*) des conditions de vent soufflant sur le lac, sur la base des critères suivants:

- proximité du plan d'eau du lac et du site de projet, en considérant non seulement l'éloignement mais aussi l'altitude;
- situation dans une même ouverture topographique de canalisation du vent

Ainsi, les roses des vents dans la région du plateau central, montrent la prédominance systématique de courants de même orientation mais de sens opposé, connus localement sous le nom de «Bise»

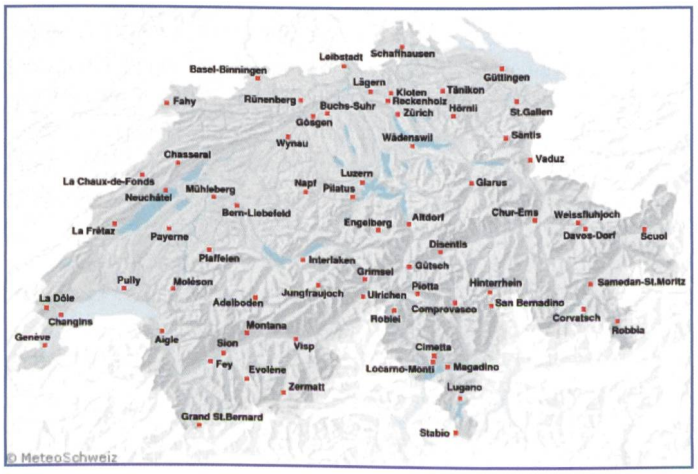


*Figure 2. Stations anémométriques des réseaux ANETZ et ENET réparties sur le territoire suisse (source: Météosuisse).*

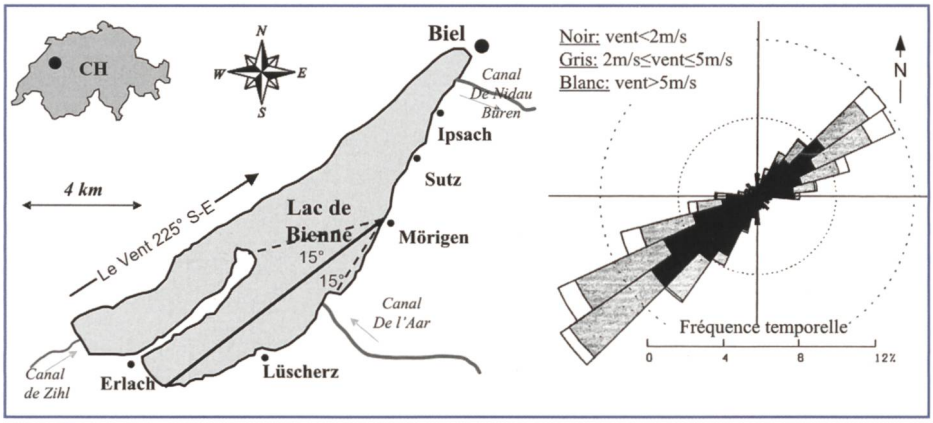


*Figure 3. à gauche, lac de Bienne sur le plateau suisse et à droite, rose des vents de la station de Payerne située à 30 km au sud (Sayah et al. 2005).*

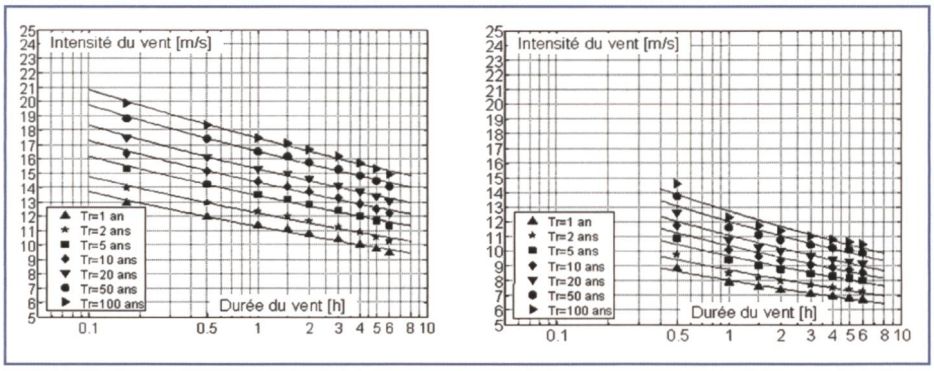


*Figure 4. Courbes IDF à la station de Payerne. A gauche: régime de Vent sur le secteur [210°–240°]. A droite: régime de Bise sur le secteur [30°-60°] (Sayah 2006).*

et de «Vent», provenant respectivement du nord-est et du sud-ouest. Cette orientation particulière correspond au relief formé par les Alpes au sud et le Jura au nord.

À titre d'exemple, les caractéristiques de vent dans la région de Bienne (*Fig. 3*) sont basées sur les données anémométriques de la station météorologique de Payerne, dont la situation est plus appropriée que celle d'autres stations proches, comme Neuchâtel et Wynau. Il apparaît très clairement que la rose des vents est dominée par la Bise et le Vent dont l'orientation coïncide avec celle du lac. Les vents transversaux, comme le Joran d'orientation nord-ouest, ne jouent ainsi qu'un rôle secondaire sur la création des champs de vagues incidentes sur la rive.

Les roses des vents des stations ANETZ peuvent être calculées à partir des mesures ou acquises directement sur le site Internet de MétéoSuisse à l'adresse suivante:

(http://www.meteosuisse.ch/web/fr/climat/normes_climatologiques/tableaux_des_normes/direction_vent.html).

L'analyse fréquentielle des données de vent acquises sur plusieurs années permet de décrire le comportement statistique de son intensité et de sa durée, exprimées en termes de période de retour. La probabilité d'occurrence d'un évènement rare peut être définie par l'ajustement d'une loi de distribution à un échantillon de mesures. La loi double exponentielle de Gumbel est couramment utilisée en hydrologie pour établir les relations Intensité-Durée-Fréquence (IDF). Elle s'applique avec le même succès aux données de vent, où la fréquence d'apparition est exprimée par le temps de retour Tr (*Fig. 4*).

Diverses corrections peuvent être apportées à ces valeurs pour tenir compte d'une part de l'éloignement et de l'altitude de la station de mesure par rapport au site du projet. Ces corrections peuvent être faites par interpolation des résultats obtenus à plusieurs stations voisines ou sur la base de mesures effectuées sur le site pendant une période de référence. Une analyse comparative de mesures de vent acquises sur le plan d'eau du lac avec celles d'une station ANETZ ou ENET permet de définir exactement ces facteurs correctifs. Ceux-ci ne sont généralement pas négligeables. Ainsi, sur le lac de Bienne, pour les vitesses moyennes de vent variant entre 6 et 8 m/s, le facteur de majoration varie entre 20 et 35% (Sayah et al. 2005). Des formulations théoriques permettent également de calculer des facteurs correcteurs tenant compte du profil de vitesse qui se développe à la surface du lac, dont la rugosité diffère de celle du relief des zones riveraines.

Il est à noter que le but principal de ces corrections de la vitesse du vent est destiné à une évaluation plus juste des conditions hydrodynamiques (vagues et courants) sur le site de projet.

### 3.2 Les vagues de vent

Le fetch du projet est la distance sur laquelle le vent peut souffler sur le plan d'eau sans rencontrer d'obstacles, pour générer des vagues à l'endroit considéré. Dans les océans, le fetch exprime la distance à partir de l'endroit où se forme la tempête. Dans le cas d'une surface confinée comme celle d'un lac, cette distance correspond au segment de droite reliant le site considéré et la rive opposée dans le sens du vent.

Comme le transfert d'énergie vent-vague ne se fait pas exclusivement le long de la ligne «idéale» du fetch mais peut se développer avec des écarts allant jusqu'à 90° de part et d'autre de la direction principale du vent, le fetch efficace peut être assimilé à une longueur représentative d'un champ de transfert. Il devient alors la moyenne des produits scalaires entre les rayons et la direction du vent, les rayons étant obtenus en faisant varier le fetch autour de la direction principale du vent dans une fourchette de +/- 15°. Cette décomposition du fetch en rayons est illustrée à la figure 3 pour l'emplacement de Mörigen sur le lac de Bienne en régime de Vent.

La longueur de chaque rayon doit encore être corrigée pour intégrer l'influence de la topographie des rives et du fond: une falaise abrite le plan d'eau, quelle soit au vent ou sous le vent. On admet que le vent suit le terrain jusqu'à une pente maximum d'environ 10° et décolle pour les pentes plus raides. De même, la bathymétrie influence la formation des vagues dans les zones de faible profondeur (inférieure à 2 m), qui ne sont comptées que pour moitié de leur longueur dans le calcul du fetch efficace.

Finalement le fetch efficace s'écrit (Kamphuis 2000):

$$F_e = \frac{\sum_{1}^{n} r_{ei} \cos \alpha_i}{n} \qquad (1)$$

Avec: $r_{ei}$ = rayon efficace

$\alpha_i$ = angle du rayon $r_{ei}$ par rapport à la direction principale du vent

La vague de projet qui se développe sous l'effet du vent, pour le fetch considéré, correspond à l'onde incidente (hauteur et période) pour laquelle le dimensionnement des mesures de protection ainsi que l'analyse de leur efficacité seront effectués. Elle peut être calculée par deux méthodes distinctes:

- par modélisation numérique de l'ensemble

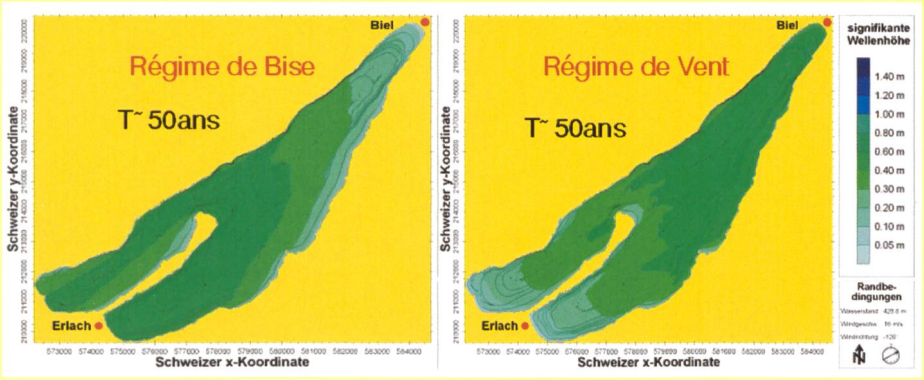


***Figure 5. Modélisation numérique de champs des vagues sur le lac de Bienne à l'aide du modèle SWAN (Booij et al. 1996) pour les régimes de Bise (à gauche) et de Vent (à droite), pour une période de retour T=50ans.***

ou d'une partie du lac (*Fig. 5*);

- par une analyse semi-empirique basée sur des diagrammes de calcul des vagues ou sur la méthode JONSWAP (Hasselmann et al. 1973).

Ces deux méthodes reposent sur les caractéristiques de vent décrites sous 3.1. Ainsi, la période de retour des vagues sera la même que celle du vent utilisé dans le calcul.

Il est à préciser que la modélisation numérique donne de très bons résultats à condition que le modèle numérique de terrain (MNT) restituant la bathymétrie du lac soit de bonne qualité et que le frottement sur le fond soit bien calé. Le modèle restitue les différents processus relatifs à la propagation des vagues, notamment la réfraction (modifications d'orientation et de hauteur dus au changement de profondeur d'eau) et le déferlement.

L'analyse semi-empirique est basée sur les vitesses de vent, la variation de la profondeur d'eau et la connaissance du fetch de projet. Un aperçu théorique de la méthode JONSWAP est donné ci-après. D'autres méthodes plus directes, basées sur des abaques de vagues, se révèlent cependant moins précises et moins pratiques lorsqu'il s'agit de considérer plusieurs périodes de retour, vitesses de vents et fetchs.

La méthode paramétrique de JONSWAP permet de déterminer la hauteur et la période des vagues à partir du fetch, de l'intensité et de la durée de l'événement de vent ainsi que de la profondeur du plan d'eau à l'endroit où sont générées les vagues.

Les relations de JONSWAP s'écrivent sous forme adimensionnelle:

$$H^*_{m0} = 0{,}0016(F^*)^{0{,}5} \qquad (2)$$

$$T^*_p = 0{,}286(F^*)^{0{,}33} \qquad (3)$$

$$t^* = 68{,}8(F^*)^{0{,}66} \qquad (4)$$

$$F^* = \frac{gF}{U^2}, \quad H^*_{m0} = \frac{gF_{mo}}{U^2}, \quad T^*_p = \frac{gT_p}{U}$$

$$t^* = \frac{gt}{U}, \quad d^* = \frac{gd}{U^2}$$

avec:

où g (m/s$^2$): accélération de la pesanteur
F (m): fetch
$T_p$ (s): période des vagues au large
$H_{m0}$ (m): hauteur de vague
$L_{m0}$ (m): longueur d'onde de la vague en zone de grande profondeur
U (m/s): vitesse du vent
d (m): tirant d'eau à l'endroit du projet
*: pour grandeurs adimensionnalisées

Les vagues générées en eau profonde peuvent être limitées dans leur développement complet, soit par le fetch, soit par la durée de l'événement de vent. Sur une surface d'eau réduite comme celle d'un lac, les vagues sont généralement limitées par le fetch. Sur un grand plan d'eau, il faut vérifier si la durée du vent est l'élément limitant de la hauteur des vagues. Dans ce cas, un «fetch effectif» ($F_{eff}$) est défini comme celui produisant la même hauteur de vague pour une durée de vent infinie.

Si $F^* < F^*_{eff}$, les vagues sont limitée par le fetch. Par contre, si $F^* > F^*_{eff}$, les vagues sont limitées par la durée du vent et il faut utiliser $F^*_{eff}$ à la place de $F^*$ dans les équations de JONSWAP. Finalement, le calcul doit être contrôlé avec les valeurs supérieures suivantes:

$$H^*_{m0} = 0{,}243 \quad T^*_p = 8{,}13 \quad t^* = 71500$$

La valeur finale de $H_{m0}$ et de $T_p$ sera la plus faible des résultats obtenus à partir des valeurs supérieures et du calcul complet.

A titre d'exemple le *tableau 1* donne les hauteurs et les périodes des vagues de Vent, calculées par JONSWAP à Mörigen sur le lac de Bienne, avec un fetch de 7 km.

Il est important de remarquer que la méthode JONSWAP calcule les caractéristiques des vagues en grande profondeur ($H_0$ et $T_0$). Pour des ouvrages de protection détachés de la rive, il importe de calculer la profondeur moyenne du plan d'eau à l'endroit du projet, d, afin de tenir compte de l'influence du fond sur le champ des vagues incidentes et particulièrement sur leur amplitude. La période de la vague reste quant à elle constante. Ainsi, la hauteur de la vague de projet H est obtenue à l'aide de l'équation suivante (Bonnefille 1992):

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot n \cdot \tanh kd}} = K_s \qquad (5)$$

Avec

$$k = \frac{2\pi}{L_0} \quad et \quad n = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2 \cdot kd}{\sinh 2kd}\right)$$

$K_s$ est le coefficient de «shoaling»; il vaut 1,0 en zone profonde et diminue avec la profondeur jusqu'à 0,91 pour ensuite augmenter jusqu'à l'infini lorsque la profondeur tend vers zéro. A l'approche de la plage, la longueur d'onde de la houle diminue progressivement sous l'effet de la réduction de profondeur. Les lignes de crêtes se resserrent et les vagues se creusent. Avec l'augmentation de la cambrure de la houle, définie par le rapport H/L, la vague se déforme, devient instable et déferle. Trois zones sont définies pour décrire les caractéristiques de la houle pendant sa propagation dans une région de profondeur d (Bonnefille 1992):

Zone de grande profondeur:

$$\frac{d}{L_0} > \frac{1}{2} \Rightarrow L_0 = \frac{gT_0^2}{2\pi} \qquad (6)$$

Zone de transition:

$$\frac{1}{25} < \frac{d}{L_t} < \frac{1}{2} \Rightarrow L_t = L_0 \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_t}\right) \qquad (7)$$

Zone de faible profondeur:

$$\frac{d}{L_f} < \frac{1}{25} \Rightarrow L_f = T_0\sqrt{gd} \qquad (8)$$

Pour une houle progressive irrotationnelle, le déferlement est lié à une valeur maximale de la cambrure. Les formules suivantes définissent cette limite en fonction de la nature de la zone:

Zone de grande profondeur:

$$\frac{H_0}{L_0} < 0.142 \qquad (9)$$

Zone de transition:

$$\frac{H_0}{L_t} < \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_t}\right) \qquad (10)$$

Zone de faible profondeur:

$$\frac{H_0}{d} < 0.78 \qquad (11)$$

Le calcul de la profondeur de déferlement est très important pour un projet de protection de rive. En effet, lorsque les vagues incidentes déferlent au large des ouvrages de protection, elles perdent une part importante de leur énergie avant de les atteindre et ne sont plus déterminantes pour le projet.

### 3.3 Niveau du plan d'eau

La variation du niveau du lac est un paramètre très important pour le dimensionnement du projet. Outre le fait que la profondeur d'eau exerce une influence directe sur le déferlement des vagues, elle affecte également l'efficacité des mesures de protection. A titre d'exemple, l'amortissement des vagues incidentes par des barrages à claire-voie est au moins 50% plus élevé lorsque ceux-ci sont émergents. Lorsque ces ouvrages de protection sont entièrement submergés, par niveau haut, ils perdent significativement en efficacité et les vagues sont presque intégralement transmises vers la rive.

La majorité des grands lacs suisses, à l'exception du lac de Constance, sont des lacs régulés sur lesquels le niveau d'eau atteint son maximum durant la période d'été et son minimum en hiver (*Fig. 6*). Ainsi, pour des mesures de protection détachées de la rive comme les barrages à claire-voie, il est nécessaire de considérer le niveau moyen du lac pendant la saison d'été. Afin de limiter le lessivage éventuel des sédiments par déferlement précoce des vagues incidentes sur les fondations des ouvrages, une couverture d'eau minimale doit être garantie pendant la saison d'hiver.

## 4. Conditions locales particulières

Les conditions locales du site à protéger peuvent introduire des contraintes indépendantes des sollicitations hydrodynamiques. Elles peuvent être liées à la morphologie, à l'écologie ou à l'histoire du lieu. Un aperçu général de ces contraintes est présenté dans les paragraphes suivants, dans le seul but de rendre attentif aux éléments parfois imprévisible qui peuvent influencer un projet lacustre.

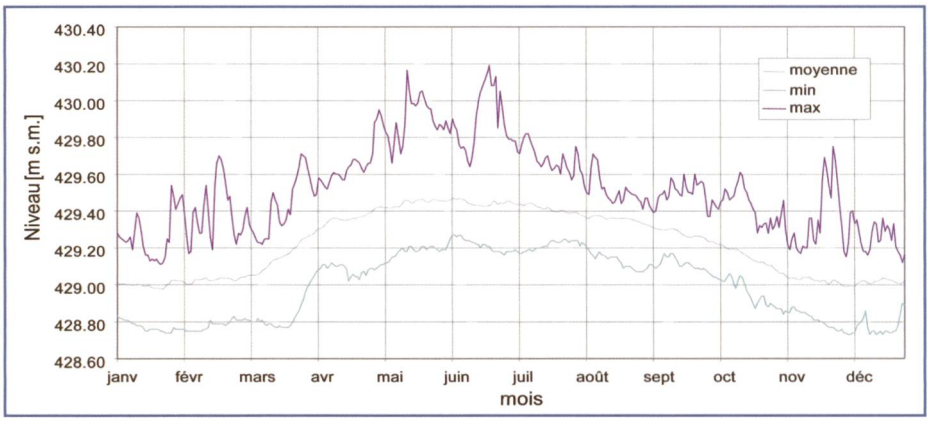


*Figure 6. Variation annuelle du plan d'eau du lac de Bienne (période 1973–1999).*

### 4.1 Evolution historique et valeur archéologique

Une recherche de documents d'archives permet de reconstituer l'évolution historique de la morphologie et de la bathymétrie du site. L'analyse de ces documents en regard de la situation actuelle, permet souvent d'expliquer les principales causes des problèmes rencontrés. Ces documents peuvent être de différentes natures (*Fig. 7*):

- Photos aériennes ancienne et actuelles de l'Office fédéral de topographie;
- Anciens plans (cadastraux ou autres) montrant la situation du site
- Anciennes photos ou cartes postales récoltées auprès des habitants riverains.

Il est également important de considérer les éventuels travaux réalisés sur le site, tels que remblayage, pose de conduites, plantations riveraines. Finalement la valeur archéologique du site, liée à la présence de vestiges à préserver, peut avoir une influence déterminante sur le choix des mesures de protection.

### 4.2 Bathymétrie, granulométrie et formes de lit

La bathymétrie du fond lacustre est la base de tout projet de protection. Elle est définie grossièrement sur les cartes topographiques au 1: 20000 et peut être complétée par des levés bathymétriques réalisés in situ. Ces données permettent d'établir le profil en long caractéristique de la beine, nécessaire au calcul de la vague de projet. Elles décrivent également la morphologie de la ligne de rive, particulièrement importante lorsque le projet inclut une modélisation numérique bidimensionnelle.

Lors d'une campagne in situ de mesures bathymétriques, il est important de respecter les points suivants:

- établir des profils perpendiculaires à la ligne de rive, avec un semis de points intermédiaires;
- poursuivre le levé au-delà du «mont» marquant la limite de la «beine» (partie à faible pente) au large;
- relever la ligne de rive et les particularités du site (embouchure d'affluent, digues,...)

L'analyse des levés bathymétriques peut mettre en évidence les zones de dépôt ou d'érosion. Elle permet également de caractériser le régime de transport solide,

*Figure 7. Exemples de documents historiques de la plage de Préverenges sur la rive nord du Léman. A gauche: plan cadastrale du début du 20ème siècle) montrant une largeur significative de la plage actuellement disparue. A droite: photo aérienne récente (1997) montrant le régime de transport solide à proximité de la rive.*

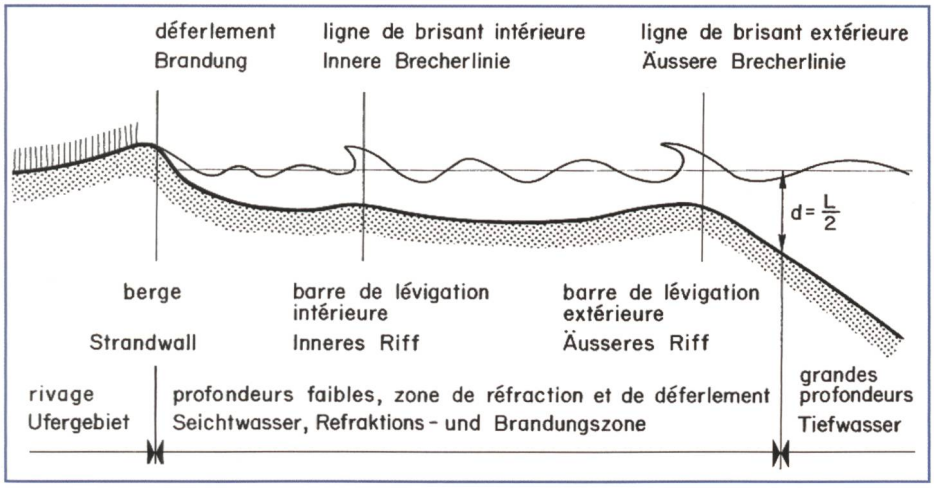


*Figure 8. Déformation des vagues et différentes zones de transport solide.*

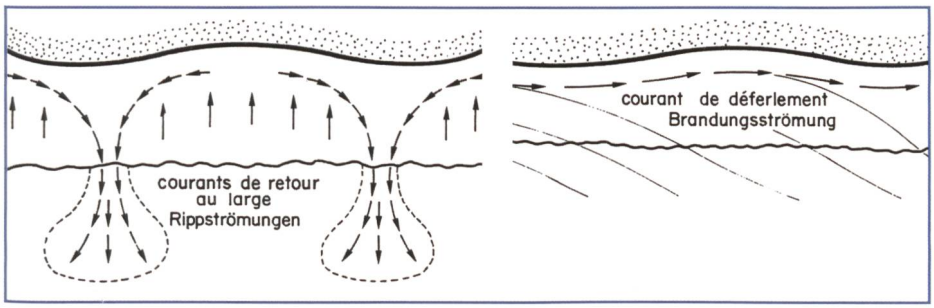


*Figure 9. Différents régimes de transport solide littoral; à gauche, vagues perpendiculaires à la rive induisant un transport solide perpendiculaire à la rive ; à droite, vagues incidentes obliques à la rive, induisant un transport en dents de scie.*

par la présence de formes de fond (dunes, tombolos,).

L'analyse du transport sédimentaire met en relation les caractéristiques des courants et des alluvions. Il est de ce fait nécessaire de procéder au prélèvement d'échantillons sédimentaires en différents points de la rive et de définir leur distribution granulométrique. L'analyse sédimentaire est destinée à définir les points suivants:

- le débit solide sur le fond du lac;
- l'origine des sédiments (par ex. embouchure d'un affluent)
- les tensions de frottement, responsables du tri granulométrique et des trajectoires des courants dominants le long de la côte;
- la rugosité de fond, nécessaire à la modélisation numérique.

Généralement, les pentes des plages sont de l'ordre de 1 à 5%, elles sont d'autant plus douces que la houle est creuse et le sable fin. Le gravier et les galets se déposent dans les parties les moins abritées, où la turbulence est maximale.

Les plus gros déplacements de matériaux se produisent sur les barres de légivation ou beines et dans la zone de déferlement (*Fig. 8*). C'est à cet endroit que les vagues perdent le plus d'énergie en se brisant et déferlant. Cette dissipation d'énergie remet en mouvement les sédiments, qui sont ensuite transportés par charriage ou en suspension.

Sur une plage où les vagues atteignent la rive perpendiculairement, le transport solide peut être associé à des courants de retour au large (*Fig. 9 gauche*) qui entraînent les matériaux vers la zone plus tranquille en eaux profondes. Si les vagues approchent la rive de biais, elles induisent des courants longitudinaux de déferlement (*Fig. 9 droite*) qui sont à l'origine du transport sédimentaire.

Quand la vitesse des courants est faible, le transport solide se fait par saltation et il y a formation de rides sur le fond. Avec une augmentation significative de la vitesse, les particules n'ont plus le temps de se déposer et le fond se couvre d'une fine couche de sédiments qui restent en mouvement Les grandes vitesses de transport conduisent finalement à la formation de dunes. La nature du régime de transport solide peut être définie à l'aide des relations suivantes (Bonnefille 1992):

- formation de rides si $D_* < 15$
- formation de dunes si $D_* \geq 15$

Avec: $D_*$: diamètre adimensionnel donné par la relation:

$$D_* = \left[\frac{(s-1)\cdot g}{\nu^2}\right]^{1/3} \cdot D \qquad (12)$$

où s: densité relative des sédiments égale à $s = \frac{\rho_s}{\rho}$

$\rho$ kg/m³): masse volumique du fluide
$\rho_s$ kg/m³): masse volumique des sédiments
D (m): diamètre moyen des grains
g (m/s²): accélération de la pesanteur
$\nu$ (m²/s): viscosité cinématique

La condition limite marquant le début d'entraînement des particules de sable non-cohésif dépend de la relation $D_*$ (*Fig. 10*) où $R_*$ est le nombre de Reynolds des particules:

$$R_* = \frac{u_* D}{\upsilon} \qquad (13)$$

et $u_*$ (m/s): vitesse de frottement due aux courants orbitaux générés par les vagues, qui peut se calculer par l'équation (Bonnefille 1992):

$$u_* = 2.2 \cdot \left[\frac{\upsilon H^2}{T^3 \sinh^2 2\pi \frac{d}{L}}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (14)$$

où H (m): hauteur de la vague
T (s): période de la vague
L (m): longueur d'onde de la vague
d (m): profondeur à l'endroit où $u_*$ est calculé

## 5. Mesures de protection et critères de choix

### 5.1 Choix de la mesure de protection

Le choix de la mesure adéquate pour un site particulier repose généralement sur une réflexion qualitative sans recours immédiat à des critères objectifs et scientifiques. La définition de la mesure de protection optimale et son dimensionnement doivent toutefois pouvoir s'appuyer sur des bases scientifiques

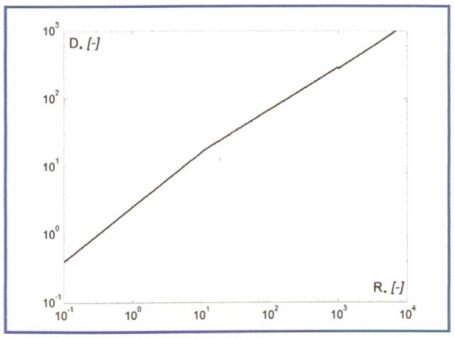


*Figure 10. Relation entre le diamètre adimensionnel du sable et le nombre de Reynolds des grains décrivant le début d'entraînement (Bonnefille 1992).*

| | | Mesure intégrée ou liée à la rive | | | | | Mesure détachée de la rive | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Stabilisation végétale | Revêtement dur | Enrochement | Protection par remblayage | Epis | Palissade | Barrage à claire-voie | Brise-lame en enrochements |
| Nature du sol | Sable cohésif | + | + – | – | – | + | + | + | + |
| | Sable pulvérulent | + + | + – | + | + + | + + | + + | + + | + + |
| Ecologie | Faune et flore lacustres | + + | – – | – | + | + | + + | + + | + |
| | Paysage | + + | – – | – | + + | + | + + | + + | – |
| Incidence des vagues | Perpendiculaire | + – | + – | + – | + + | 0 | + + | + + | + + |
| | Oblique | + – | + – | + – | 0 | + + | + | + | 0 |
| Mise en oeuvre | Facilité de construction | + + | – | + | + | – | + + | + | – |
| | Longévité | + + | + + | + | – | + + | + | – | ++ |

Echelle
+ + Très adapté
+ Adapté
0 Non adapté
+ – Neutre
– Effet négatif
– – Effet très négatif

***Tableau 1 : Matrice préliminaire d'aide à la décision pour l'établissement un projet de protection de rive.***

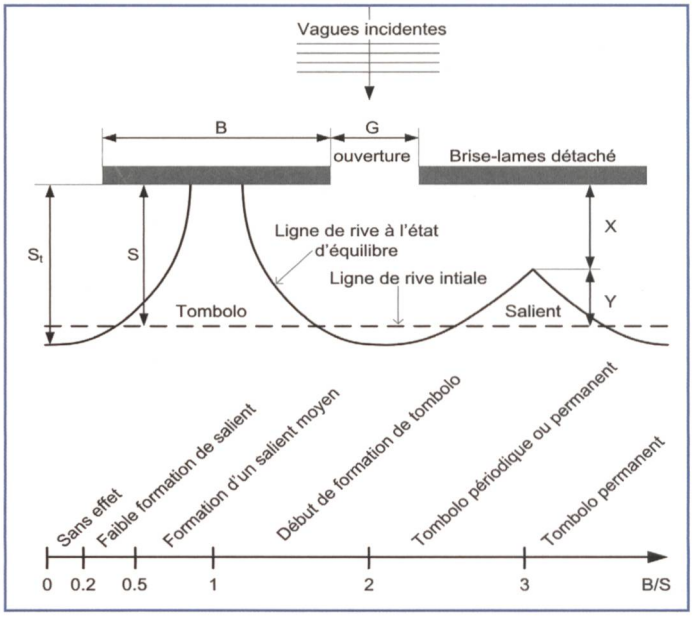


***Figure 11. Comportement d'un brise-lames non poreux (Sayah 2006).***

prenant en compte la nature du sol, l'impact environnemental, la sollicitation des vagues et des courants côtiers ainsi que les difficultés de mise en œuvre.

Une matrice d'aide à la décision faisant intervenir ces différents critères (*Tab. 1*) est destinée à orienter le choix du projeteur vers les solutions les mieux adaptées a priori. Le choix final de la mesure appropriée peut être effectué sur la base d'une analyse de variantes et d'une consultation faisant intervenir les différents acteurs concernés. Le succès de la réalisation et de l'acceptation d'un projet passe ainsi par une analyse multicritères à laquelle tous les acteurs potentiels sont associés.

Une sélection de quelques mesures de protection est discutée ci-après sans toutefois aborder les bases de dimensionnement.

## 5.2 Remblayage avec des matériaux fins et grossiers

La protection d'une plage par des matériaux fins et grossiers est souvent conçue comme une mesure à double but. Le premier est d'assurer la protection de la plage contre l'érosion due à l'impact des vagues incidentes lors de forts événements de vent, le deuxième est de restaurer la plage dans son état initial avant érosion. Les projets de remblayage sont souvent accompagnés de mesures d'accompagnement consistant à délimiter la région protégée par des épis perpendiculaires à la rive. Ces ouvrages servent surtout à limiter la quantité de sable nécessaire au remblayage périodique. Des bases générales pour le choix des matériaux de remblayage sont proposés par Sayah et al. (2006).

## 5.3 Mesures détachées de la rive

### Brise-lames en enrochements

Cette structure immergée, détachée de la rive, protège des vagues incidentes perpendiculaires. Son fonctionnement dépend essentiellement de sa largeur *B* et de sa distance *S* par rapport à la ligne de rive.

Le rapport *B/S* est la variable principale définissant la quantité de sable qui peut être «piégée» derrière l'ouvrage (*Fig. 11*). Pour *B/S*<1, un salient se forme derrière l'ostacle. Quand ce rapport est supérieur à 1, le salient se transforme en tombolo. Un projet de briselame doit encore prendre en considération les points suivants:

- la nature de la rive et la quantité de sable existant. L'échec des brise-lames est souvent dû à l'insuffisance de sable pour la formation de dépôts derrière l'ouvrage;
- lorsque le niveau du lac est variable, il est nécessaire d'étudier l'effet de la transmission des vagues quand le plan d'eau dépasse la crête du brise-lames, tendant à ralentir la formation de dépôts solides.

## 5.4 Barrage à claire-voie et palissade

Les barrages à claire-voie (*Fig. 12 gauche*) sont construits avec des rouleaux de fascines déposés entre deux rangées de pilotis en bois, généralement parallèles à la rive, destinés à dissiper l'énergie des vagues incidentes. Les palissades (*Fig. 12 droite*) sont principalement utilisées dans des régions peu profondes, où les forces hydrodynamiques générées par le vent et les courants ne sont pas trop élevées. Elles sont constituées d'une où plusieurs rangées de pieux en bois alignés de façon quasi jointive.

Le dimensionnement des ces deux mesures peut être effectué sur la base des résultats et recommandations proposés par Sayah et al. (2006), qui permettent d'évaluer leur efficacité à amortir les vagues incidentes et à favoriser le dépôt de sédiments dans la partie protégée entre la rive et l'ouvrage.

***Figure 12. À gauche, détail constructif de barrage à claire-voie sur le lac de Bienne; à droite, exemple de palissade à deux rangées de pieux.***

## 6. Optimisation du projet et contrôle de réussite

La dernière étape du projet est consacrée à son optimisation puis au suivi de son évolution. Elle est destinée en particulier à corriger les défauts prévisibles et surtout à permettre des interventions opportunes pour l'entretien des ouvrages endommagés.

### 6.1 Vérification et optimisation numérique

Lorsque les sollicitations ont été définies et que les choix constructifs et d'implantation ont été opérés, il s'agit de vérifier le comportement du projet. La modélisation numérique offre des moyens intéressants à cet égard. L'exemple présenté à la *Fig. 13* met en évidence certains phénomènes rotationnels générés par une géométrie locale particulière. Cet exemple montre également que l'orientation des vagues conduit à des configurations dynamiques locales particulières. Les résultats issus de la modélisation numérique peuvent ainsi être utilisés pour l'optimisation du projet. Il est important de remarquer que la modélisation numérique nécessite la connaissance des conditions hydrodynamiques aux limites du modèle, c'est-à-dire les caractéristiques des vagues aux bords d'entrée. Il requiert également la connaissance de la géométrie et en particulier de la bathymétrie locale.

De manière générale, la modélisation numérique peut être utilisée pour l'analyse quantitative des variables suivantes:

- champs de vagues;
- courants littoraux;
- transport solide;
- influence de la géométrie des ouvrages de protection (implantation, hauteur);
- influence de la porosité des structures;
- influence du niveau du lac.

Les prévisions d'évolution du site sont toutefois plus difficiles à définir, surtout en ce qui concerne son évolution temporelle. Cette dernière remarque plaide en faveur de l'introduction d'une phase de suivi du projet.

### 6.2 Suivi et contrôle de réussite

Les ouvrages de protections de rives et en particulier ceux inspirés du génie biologique nécessitent la mise en place d'un programme de suivi dont le but et d'évaluer le taux de réussite du projet et de contrôler son évolution au cours du temps. Il n'existe pas actuellement de méthodologie reconnue incluant tous les paramètres inhérents aux impacts écologiques et paysagers d'un projet. Une proposition intéressante est présentée par Hugonin et Boillat (2005) sous la forme de fiches d'évaluation et de monitoring qui décrivent l'établissement de l'état actuel de la rive, l'élaboration d'un diagnostic de l'état futur et le suivi du projet. Cette méthode pourra être développée et améliorée au travers d'applications futures et inclure les mesures d'entretien nécessaires à la pérennité du projet.

## 7. Conclusions

Des aménagements inspirés du génie biologique n'ont que rarement été utilisés jusqu'ici pour la protection des rives. La raison tient essentiellement au fait que les bases de dimensionnement requises faisaient cruellement défaut. Les derniers développements réalisés dans ce domaine renforcent les possibilités de recours à ces techniques constructives. Leur dimensionnement passe toutefois par une démarche systématique dont le contenu a été décrit ci-dessus. Des progrès doivent encore être réalisés dans ce domaine, ils s'appuieront notamment sur les résultats issus d'un suivi programmé des nouvelles réalisations. La poursuite des travaux de recherche entrepris contribuera également à renforcer la science naissante de l'ingénierie eco-morphologique.

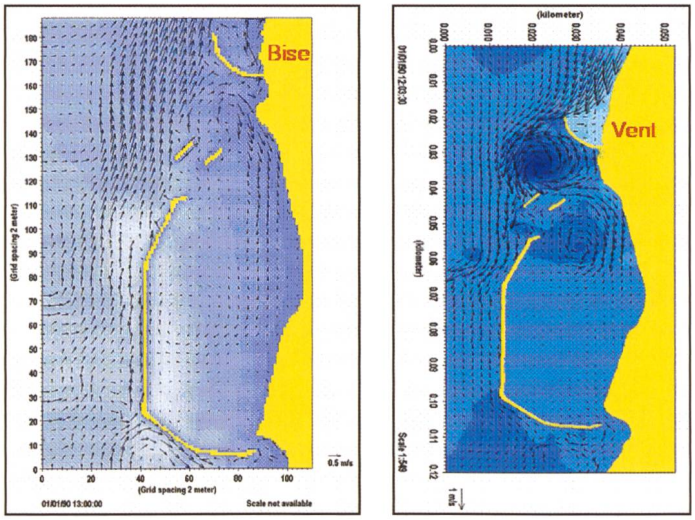


***Figure 13. Modélisation numérique d'une digue de protection par régimes de Bise (à gauche) et de Vent (à droite).***

Références

*Bonnefille, R.* (1992). Cours d'hydraulique maritime, Masson.

*Booij, N., Holthuijsen, L. H.,* and *Ris, R. C.* «The SWAN Wave Model for Shallow Water.» 15th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, Florida, USA, 668–676.

*Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., D. E. Cartwright, Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W.,* and *Walden, H.* (1973). «Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project.» A(8°)–12, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.

*Hugonin, P., and Boillat, J.-L.* (2005). «Diagnostic éco-morphologique des rives lacustres.» Genie biologique, 3–4, 40–41.

*Iseli, C.,* and *Wehrli, M.* (1995). «Zehn Jahre Schilf- und Uferschutzmassnahmen am Bielersee.» VBS Schriftenreihe, 4.

*Kamphuis, J. W.* (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management, World Scientific.

*Sayah, S.* (2006). «Efficiency of brushwood fences in shore protection against wind-wave induced erosion,» Swiss federal institute of technology, Lausanne.

*Sayah, S., Boillat, J.-L., et Schleiss, A.* «Mesures de protection détachées et intégrées à la rive.» Symposium Erosion et protection des rives lacustres, Sutz-Lattrigen, Bern.

*Sayah, S. M., Mai, S., Boillat, J.-L.,* and *Schleiss, A. J.* «Field measurements and numerical modelling of wind-waves in Lake Biel: a basic tool for shore protection projetcs.» XXXIth International Association for Hydraulic Research IAHR Congress, Seoul, Korea, 4332–4343.

Remerciement

Le projet de recherche Erosee a été financièrement soutenu par l'Agence pour la promotion de l'innovation (CTI-KTI) sous contrat No. 5760.1, ainsi que par l'Office des ponts et chaussées du canton de Berne, Office fédérale des eaux et géologie (OFEG), Association pour la protection des rives du lac de Bienne, Fondation suisse pour la protection et l'aménagement du paysage et l'Association pour le génie biologique.

Adresse des auteurs

*Jean-Louis Boillat, Selim Sayah et Anton Schleiss*

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse

+41 21 693 23 85

http://lchwww.epfl.ch

jean-louis.boillat@epfl.ch

selim.sayah@epfl.ch

anton.schleiss@epfl.ch

www.grimselstrom.ch

KWO
GRIMSELSTROM

■ Ihre fachlichen und persönlichen Qualitäten tragen dazu bei, unsere Position als führendes Wasserkraftunternehmen auszubauen. Beherzter Einsatz und Teamgeist kennzeichnen unsere Arbeitskultur. Verstärken Sie unsere Projektabteilung als

**Bauingenieur/in ETH/FH**
**Sachbearbeiter/in / Projektleiter/in im Ressort Bau**

**Ihre Tätigkeit bei uns ist spannend!**

■ Unser Unternehmen befindet sich in einer dynamischen Entwicklung. Im Mittelpunkt steht unser Investitionsprogramm KWO plus mit seinen verschiedenen Projekten. In diesem Rahmen werden äusserst interessante Bauwerke wie Kraftwerke, Kavernen, Stollen, Schächte, Talsperren, Brücken, Ausgleichsbecken und Deponien geplant und realisiert. Im Ressort Bau laufen die Fäden dieser Tätigkeiten zusammen. Weiter liegen aber auch die Sicherheit der Talsperren, Infrastrukturbauten, Liegenschaften, Bahnanlagen sowie Aktivitäten in der Landschaftspflege im Verantwortungsbereich des Ressorts Bau. Sie haben die Chance, Ihren beruflichen Werdegang und die Lebensqualität durch Wohnsitznahme in der eindrücklichen Bergwelt des Berner Oberlandes zu vereinen.

**Setzen Sie Ihre Fähigkeiten für uns ein!**

■ Dank Ihren Kenntnissen und Erfahrungen im Wasserbau, Untertagebau und Tiefbau leisten Sie einen entscheidenden Beitrag in der Konzeption, Planung und Ausführung der zahlreichen und anspruchsvollen Bauprojekte. Als dynamischer und kompetenter Bauingenieur sind Sie von den Herausforderungen und der Vielfalt der Wasserkraft fasziniert und freuen sich, in einem engagierten Planer- und Bauleitungsteam Ihre Fähigkeiten zu entfalten. Sie arbeiten selbständig, haben Durchsetzungsvermögen und sind begeistert davon, an einem der faszinierendsten Ausbauvorhaben der Wasserkraft mitzuwirken.

- Grimselstrom
- Grimsel Hydro
- Besucherdienst
- Grimselhotels
- Bergbahnen
- Meiringen-Innertkirchen-Bahn

**Wir zählen auf Ihre Bewerbung!**

Andres Fankhauser, Leiter Ressort Bau, Tel. 033 982 20 70, beantwortet Ihnen gerne Ihre Fragen. Ihre Bewerbungsunterlagen senden Sie bitte an die KWO, Kraftwerke Oberhasli AG, Direktion, Postfach 63, 3862 Innertkirchen.

Für Informationsfluss in geordneten Bahnen.

buag-Kommunikations-Full-Service

Für die Konzeption und Realisation von Dokumentationen, Publikationen, Berichten und Broschüren steht Ihnen ein Team von Fachleuten mit einer nahtlosen Netzwerkstruktur zur Verfügung, die sich flexibel auf Umfang und Art Ihres Informationsprojektes einstellen können. Sie halten so Ihren Informationsfluss, aber auch Ihre Budgets in geordneten Bahnen. Informieren Sie sich unter www.buag.ch und verlangen Sie die Broschüre «Die Kommunikation der Information» oder rufen Sie einfach Tel. 056 484 54 54 an.

# Die Zukunft am Bau beginnt mit einem Messebesuch der Swissbau

■ *Christoph Herzog*

Vom 23. bis 27. Januar 2007 richtet sich das Augenmerk der Schweizer Bauwirtschaft auf Basel. Rund 1400 Aussteller präsentieren an der Swissbau 07 auf über 140 000 m² Ausstellungsfläche alles, was es heute zum Bauen und Renovieren braucht. An der bedeutendsten Branchen-Leistungsschau können sich Architekten, Ingenieure, Planer, institutionelle, professionelle und private Bauherren, Ausführende des Bauhaupt- und Nebengewerbes sowie Haustechnikspezialisten umfassend, schnell und zielorientiert über Neuheiten und Trends informieren. Als «Messe in der Messe» wird an der Swissbau zudem wiederum die «Metallbau 07» durchgeführt.

Auch das Begleitprogramm und herausragende Sonderschauen sowie spannende Veranstaltungen lohnen den Gang nach Basel. Themen wie Energieeffizienz, Fassadentechnologien, Haustechnik, hybride Bauweisen, Massivbau sowie das erstmals durchgeführte Swissbau Symposium «Future Forum» zeigen nicht nur den Stand der Technik, sondern erlauben auch einen Blick in die Zukunft des Bauens.

Anschrift des Verfassers
*Christoph Herzog*
Swissbau 07
MCH Messe Schweiz (Basel) AG
Postfach, CH-4005 Basel
Tel. +41 58 206 22 57
christoph.herzog@messe.ch
www.swissbau.ch