Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 99 (2007)
Heft: 1

Artikel: Mesures de protection détachées et intégrées à la rive
Autor: Sayah, Selim / Boillat, Jean-Louis / Schleiss, Anton
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940105

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Mesures de protection détachées et intégrées à la rive

■ Selim Sayah, Jean-Louis Boillat, Anton Schleiss

Résumé

Dans le cadre du projet de recherche Erosee, qui concerne l'analyse de l'érosion des rives lacustres et l'optimisation des mesures de protection inspirées du génie biologique, quatre différents types de protection ont été analysés par une approche physique et/ou analytique. L'article présente des bases de dimensionnement simples, facilement utilisables par un praticien pour les barrages à claire-voie et les palissades, considérées comme mesures détachées de la rive, le remblayage par des matériaux fins et grossiers, considéré comme mesure intégrée à la rive. L'analyse des deux premières mesures concerne notamment leur efficacité dans l'initiation du dépôt solide entre la berge et la structure et leur influence sur l'accrétion de la ligne de rive. Pour les mesures de protection intégrées à la rive, l'analyse donne les bases techniques à considérer pour un choix optimal des matériaux de remblayage.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes Erosee ist das Erosionsverhalten von Seeufern analysiert worden. Zur Optimierung von Erosionsschutzmassnahmen sind basierend auf physikalisch-analytischen Untersuchungen vier verschiedene Verbaumethoden aus dem Bereich der Ingenieurbiologie betrachtet worden. Im vorliegenden Beitrag werden einfache und leicht in die Praxis umsetzbare Bemessungsgrundlagen für Lahnungen und Palisaden vorgestellt. Beiden Verbauelementen ist gemeinsam, dass sie vom Ufer losgelöste Varianten darstellen. Dem gegenüber stehen zwei Aufschüttungsvarianten aus feinem und grobem Material, welche das anstehende Ufer unmittelbar einbeziehen und folglich als uferintegrierende Massnahmen angesehen werden können. Bei der Analyse der beiden ersten Massnahmen geht es insbesondere um deren Wirksamkeit hinsichtlich der Schaffung eines Auflandungsbereiches zwischen dem Ufer und dem Bauwerk sowie deren Einfluss auf die Gestalt der Uferlinie. Für die uferintegrierenden Schutzmassnahmen werden die technischen Bemessungsgrundlagen vorgestellt, insbesondere die Auswahl eines geeigneten Korndurchmessers des Schüttmaterials.

1. Introduction

Le choix optimal et le dimensionnement adapté de mesures de protection contre l'érosion des zones côtières sont d'une importance majeure dans la problématique de l'aménagement de rives. Malheureusement, quand il s'agit des rives lacustres, où l'aspect écologique est un critère important dans l'approche de protection, les règles de dimensionnement sont quasi-inexistantes. Dans ce contexte, des aménagements inspirés du génie biologique offrent un potentiel qui n'est que rarement utilisé dans la pratique pour la protection des rives (Iseli et Wehrli 1995).

L'objectif de cet article est de combler cette lacune en donnant un aperçu général des différentes variables qu'il faut prendre en considération lors du dimensionnement de deux types d'ouvrages de protection contre l'érosion des rives lacustres:

Mesures de protection détachées de la rive (brise-lames, barrage à claire-voie, palissade, etc.): ces mesures constructives ont comme but de dissiper les vagues incidentes lors d'événements de fort vent. Elles favorisent ainsi la protection de la rive en la protégeant contre une éventuelle érosion et/ou elles initient le dépôt de sable et l'accrétion de la ligne de rive (cf. *Fig. 1a*).

Mesures de protection intégrées à la rive (remblayage, mur de protection, couverture en enrochements/moellons, etc.): ces techniques de protection construites ou installées sur la rive même ont pour but de stopper son érosion et de restaurer son état antérieur (cf. *Fig. 1b*).

Les bases générales de dimensionnement de quatre types de protection sont présentées ci-après. Les barrages à claire-voie et les palissades comme éléments détachés de la rive, le remblayage par des matériaux fins et grossiers comme mesure intégrée à la rive.

2. Barrages à claire-voie

Les barrages à claire-voie *(Fig. 2)* sont des protections souples construites avec des rouleaux de fascines entreposés entre deux rangées de pilotis en bois, généralement parallèles à la rive, destinés à

Figure 1. Protection des rives par des mesures souples: (a) protection des roselières par des barrages à claire-voie sur le lac de Bienne; (b) stabilisation par matériaux fins et épis à Bellerive sur la rive nord du Léman.

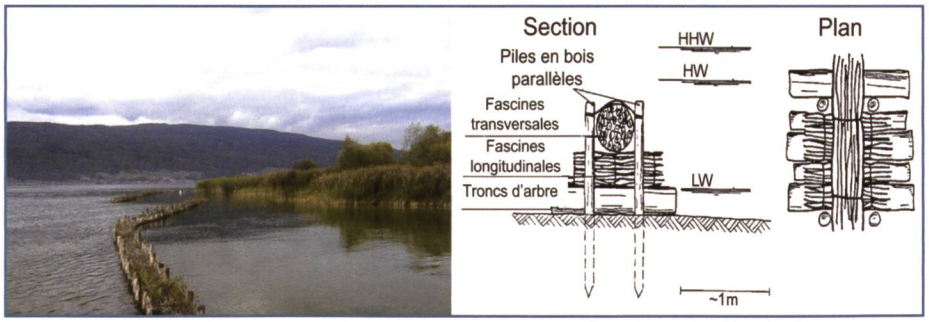

Figure 2. Implantation et construction de barrages à claire-voie sur le lac de Bienne.

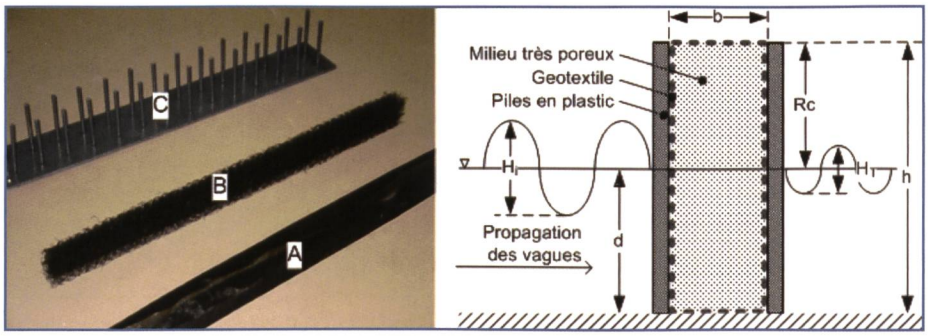

Figure 3. Maquette du barrage à claire-voie avec la description des variables principales.

dissiper l'énergie des vagues incidentes. Ils sont fréquemment utilisés sur le lac de Bienne, eg. Ipsach, Sutz, Mörigen, Täuffelen, Lüscherz, Erlach.

En l'état actuel, leur dimensionnement repose généralement sur une approche qualitative sans recours à des critères objectifs. La définition de la mesure de protection optimale et son dimensionnement doivent pouvoir toutefois s'appuyer sur des bases scientifiques 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. Ainsi, le dimensionnement de barrages à claire-voie nécessite de considérer les points suivants:

- La pente du fond où la protection est projetée
- La granulométrie du sable
- Les conditions hydrodynamiques (courants + vagues)
- La variation du niveau du lac

Sur la base de ces informations il sera possible d'évaluer l'efficacité de cette protection, en particulier:

- Sa capacité à amortir les vagues incidentes
- Son efficacité à favoriser le dépôt du sable dans la partie protégée (entre la rive et l'ouvrage)

Afin de quantifier l'efficacité de ce type d'ouvrage, une étude expérimentale a été réalisée au Laboratoire de constructions hydrauliques de l'EPFL. La *Fig. 3* montre la maquette du barrage à claire-voie (échelle environ 1:10) et le schéma des différentes variables testées. Les essais ont été effectués dans un bassin à houle de 10 m de longueur et 6 m de largeur. Différentes caractéristiques de vagues ont été générées pour plusieurs profondeurs d'eau *d*, plusieurs hauteurs de la structure *h* et plusieurs porosités *p*. Pour chaque essai le coefficient de transmission de la structure K_T a été mesuré. Ce dernier est défini par l'équation:

$$K_T = \frac{H_i}{H_T} \tag{1}$$

où H_i est la hauteur de la vague incidente (ou vague de projet) et H_T est la hauteur de la vague transmise. Les points suivants ont été notés (Sayah et al. 2004) et (Sayah 2006):

- La hauteur de la structure n'a pas une influence directe sur son efficacité (décrite par le coefficient de transmission).
- La structure perd rapidement son efficacité quand elle est entièrement submergée.
- La revanche (R_C) possède une influence directe sur K_T.
- La porosité *p* joue un rôle primordial dans l'amortissement des vagues. Son effet devient par contre minime quand la structure est submergée.
- Aucune formation de tombolo (défini comme accrétion de la rive atteignant la structure de protection) n'est possible vu le mouvement de vague à travers la structure qui ralentit le dépôt des sédiments dans la partie protégée.

Une relation empirique est proposée pour quantifier l'efficacité des barrages à claire-voie par leur coefficient de transmission K_T:

$$K_T = 0.01\left(\frac{R_c}{H_i}\right)^2 - 0.11\frac{R_c}{H_i} + 0.69\,p^{-0.04} - 12.40\frac{H_i}{gT^2}; \quad (\pm 0.24) \tag{2}$$

Cette équation est utilisable pour les conditions de bord suivantes:

$$p > 0; \quad 2 \le \frac{R_c}{H_i} \le 2; \quad 0.001 \le \frac{H_i}{gT^2} \le 0.008 \tag{3}$$

L'effet d'un barrage à claire-voie sur l'évolution de la ligne de rive est fonction de *B/S* et *X/B* (où B est la longueur de la structure, *S* sa distance à la ligne de rive et *X* la largeur du dépôt solide) comme montré à la *Fig. 4*.

La relation empirique décrivant l'évolution de la ligne de rive est donnée par:

$$\frac{X}{B} = 0.85\left[\frac{B}{S}\right]^{-1.21}; \quad (\pm 0.22) \tag{4}$$

Le volume de sable déposé derrière la structure V_d peut être calculé par:

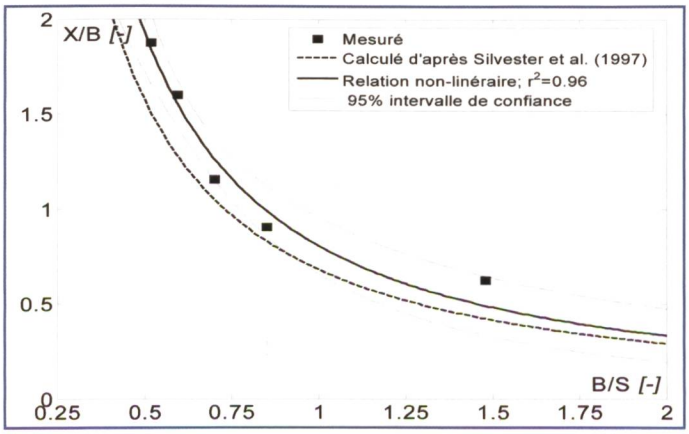

Figure 4. Evolution de la ligne de rive derrière un barrage à claire-voie (entièrement détaché de la rive).

$$V_{d,*} = \frac{6.54 Y_*^2}{2}; \quad (\pm 0.0003) \qquad (5)$$

où

$$V_{d,*} = \frac{V_d}{V_s}; \quad V_s = \frac{SBd}{2} \text{ et } Y_* = \frac{Y}{S} \qquad (6)$$

sachant que V^d est le volume de sable déposé derrière la structure, *d* la profondeur de l'eau au niveau de la structure et *Y* la longueur de l'accrétion.

Les différentes zones de dépôt et d'érosion derrière un barrage à claire-voie entièrement détaché de la ligne de rive sont décrites schématiquement sur la *Fig. 5*. Les essais réalisés sur un barrage à claire-voie simple *(Fig. 5a)* ont montré que la région de dépôt, située entre la structure et la ligne de rive, n'est pas reliée à cette dernière contrairement au cas des brise-lames où la liaison est établie par la formation d'un tombolo.

Les essais réalisés sur un barrage à claire-voie discontinu, avec des ouvertures de largeur *G (Fig. 5b)*, ont montré que la plus grande zone de dépôt est située entre la structure et la ligne de rive parallèle à l'ouverture. Il est recommandé que *G/B* soit inférieur à 0,5 pour favoriser le dépôt.

Pour un projet de protection avec des barrages à claire-voie, il est ainsi nécessaire de prendre en compte les points suivants:

- *Distance par rapport à la ligne de rive:* Cette distance varie au cours de l'année en fonction du niveau d'eau du lac. La variation suivant la saison et la profondeur du lac peut être significative, comme par exemple à Mörigen sur le lac de Bienne où un déplacement d'une vingtaine de mètres est facilement atteint. Afin de positionner l'ouvrage, il faut évaluer la variation périodique de la revanche R_c qui dépend du niveau du lac et de la pente de fond. Il est recommandé de dimensionner la hauteur de la structure de façon que la revanche soit toujours positive (structure émergeante). Cependant une hauteur maximale garantissant la stabilité de la structure peut varier entre 1,2 et 1,5 m.
- *Porosité:* la porosité d'un barrage à claire-voie change au fil du temps. Les fascines deviennent moins compactes, et leur coefficient de transmission tend à augmenter. En général, une porosité moyenne de dimensionnement tenant compte de cette perte d'efficacité peut varier entre p = 0,2 et p = 0,5.

3. Palissades

Les palissades *(Fig. 6)* sont principalement utilisées dans des régions peu profondes du lac, où les forces hydrodynamiques générées par le vent et les courants ne sont pas significatives. Dans le cas du lac de Bienne, les palissades sont constituées d'une ou plusieurs rangées de pieux de bois alignés. Ces pieux sont plantés de façon quasi jointive, l'espacement entre deux pieux successifs d'une même rangée n'excédant pas 2 centimètres. L'espacement entre deux rangées de pieux est variable et atteint jusqu'à deux fois le diamètre des pieux soit environ 20 centimètres.

Le principal objectif des essais réalisés en bassin à houle consistait à déterminer les valeurs optimales de ces deux espacements. En effet, c'est la porosité de la structure, dépendant de la configuration géométrique des pieux au sein de la palissade, qui exerce le principal effet de dissipation de la vague incidente.

Le mécanisme par lequel une partie de l'énergie de la vague est dissipée à travers la palissade est basé sur le fait que le mouvement elliptique des particules, au sein du mouvement sinusoïdal global de propagation des vagues, est interféré par la structure formée par les pieux. Les turbulences induites sont responsables de la perte d'énergie, elles peuvent être augmentées artificiellement par une configuration géométrique optimale des pieux au sein de la palissade.

Les résultats expérimentaux ont permis d'évaluer le coefficient de transmission K_T (rapport des amplitudes des vagues transmises à travers la structure et des vagues incidentes) pour différents

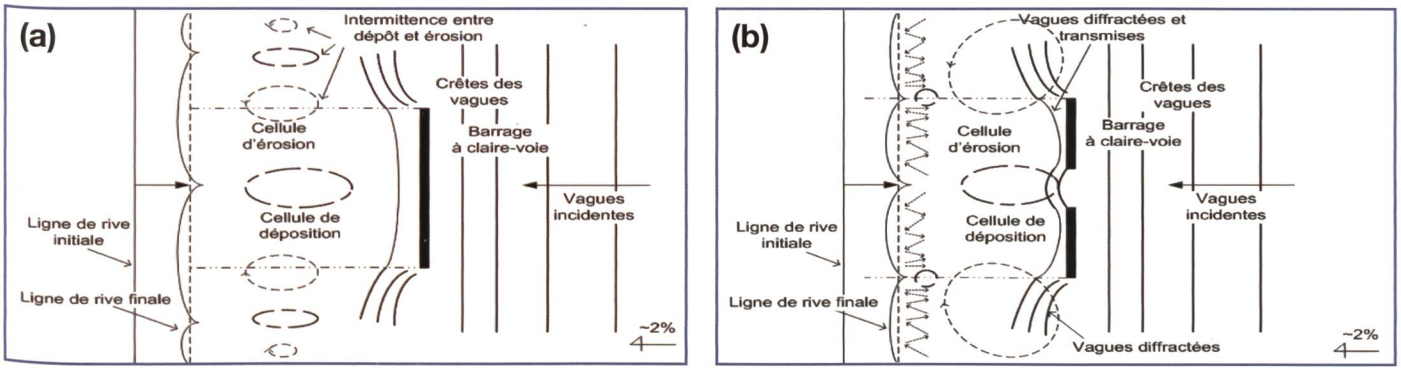

Figure 5. Zones de dépôt et d'érosion derrière un barrage à claire-voie: (a) structure simple; (b) structure double.

Figure 6. Photo d'une palissade utilisée sur le Lac de Bienne pour la protection du rivage contre l'érosion.

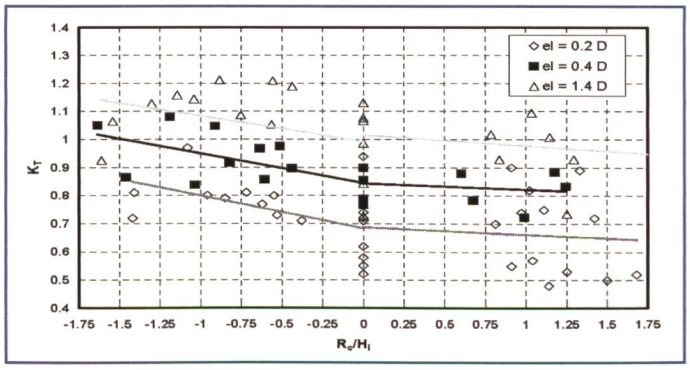

Figure 7. Coefficient de transmission K_T d'une palissade en fonction de la revanche relative R_c/H_i, pour différentes valeurs d'espacement latéral e_l.

R_c	K_T moyen			
	e_c = 2 mm	e_c = 4 mm	e_c = 10 mm	e_c = 34 mm
0.5 h	0.66	0.79	0.69	0.99
0.3 h	1.05	1.00		0.95
0	0.77	0.87	0.86	0.96
-0.25 h	1.13	1.02	1.01	1.03

Tableau 1. Influence de l'espacement e_c de deux rangées de palissades pour différentes valeurs de revanche R_c.

D (mm)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.10	0.0630	0.0672	0.0714	0.0756	0.0798	0.0840	0.0872	0.0904	0.0936	0.0968
0.20	0.1000	0.1030	0.1060	0.1090	0.1120	0.1150	0.1170	0.1190	0.1210	0.1230
0.30	0.1250	0.1270	0.1290	0.1310	0.1330	0.1350	0.1370	0.1390	0.1410	0.1430
0.40	0.1450	0.1466	0.1482	0.1498	0.1514	0.1530	0.1546	0.1562	0.1578	0.1594
0.50	0.1610	0.1622	0.1634	0.1646	0.1658	0.1670	0.1682	0.1694	0.1706	0.1718
0.60	0.1730	0.1742	0.1754	0.1766	0.1778	0.1790	0.1802	0.1814	0.1826	0.1838
0.70	0.1850	0.1859	0.1868	0.1877	0.1886	0.1895	0.1904	0.1913	0.1922	0.1931
0.80	0.1940	0.1948	0.1956	0.1964	0.1972	0.1980	0.1988	0.1996	0.2004	0.2012
0.90	0.2020	0.2028	0.2036	0.2044	0.2052	0.2060	0.2068	0.2076	0.2084	0.2092
1.00	0.2100	0.2108	0.2116	0.2124	0.2132	0.2140	0.2148	0.2156	0.2164	0.2172

Tableau 2. Calcul du «sediment scale parameter» (A) (Dean 2002).

espacements latéraux entre deux pieux successifs et en fonction de la revanche relative de la structure R_c/H_i *(Fig. 7)*.

Les résultats obtenus permettent de définir deux domaines de fonctionnement de la protection en palissade. Le premier domaine correspond à un comportement immergé ($R_c < 0$) et le second à un comportement émergeant ($R_c > 0$).

Il apparaît que le fonctionnement émergeant de la palissade assure une meilleure atténuation de l'énergie de la vague incidente. En effet, la pente des courbes de tendance des régimes immergé et émergeant indique que pour une même diminution du rapport R_c/H_i, la perte d'efficacité en régime immergé est d'environ 1,5 fois supérieure à celle observée en régime émergeant. En régime émergeant, l'influence de e_l sur K_T n'est pas linéaire. En effet, lorsque l'espacement latéral entre les pieux el double, la valeur moyenne de K_T est multipliée par 1,2 alors que ce coefficient est égal à 1,5 quand la valeur de el est multipliée par 7. De plus, il semble que seule la valeur e_l = 0,2 D permet d'assurer une réduction significative de l'énergie de la vague incidente avec un K_T moyen de l'ordre de 0,79 en régime immergé et 0,67 en régime émergeant (Sayah et al. 2005).

Il ressort clairement des résultats expérimentaux que même pour un espacement relatif faible de 2 mm (égal au cinquième du diamètres des pieux), la transmission des vagues est importante (valeur minimale de K_T égale à 0,66). Ainsi, pour avoir une grande efficacité il est nécessaire que les pieux soient entièrement jointifs. En réalité, les pieux jointifs peuvent s'écarter au fil du temps et la transmission des vagues à travers les palissades augmente significativement. Il est ainsi recommandé de bien attacher les pieux pour limiter cet effet. La construction de plusieurs rangées de palissades en quinconce peut compenser l'impact négatif de cet écartement.

Afin d'étudier en première approche le comportement du coefficient de transmission en fonction de la valeur de l'espacement latéral e_c entre deux rangées de pieux, la configuration en quinconce est considérée, les pieux d'une même rangée étant espacés de e_l = 14 mm. La variation de K_T en fonction de e_c et de R_c est donnée dans le *tableau 1*. Il apparaît que les résultats les plus satisfaisants en terme de dissipation d'énergie des vagues incidentes, correspondent aux configurations pour lesquelles e_c varie entre 2 et 10 mm, et ce pour une revanche nulle ou égale à 0,5 h, cette dernière présentant les meilleurs résultats. L'influence de e_c sur la valeur de K_T dans la gamme de valeurs $2 \leq e_c \leq 10$mm n'apparaît pas comme significative. Le comportement de la palissade immergée s'avère encore une fois médiocre (K_T>1).

Les résultats montrent que, pour un même nombre de pieux utilisés, les deux types de configuration donnent des résultats similaires en terme de dissipation d'énergie (K_T = 0,67 pour une seule rangée de pieux et K_T = 0,66 pour deux rangées en quinconce). Il est toutefois conseillé d'adopter la configuration à deux rangées car la modification naturelle de l'espacement entre les pieux sous l'effet des vagues au cours du temps aura moins d'influence sur l'efficacité de la palissade que dans la cas où celle-ci est composée d'une seule rangée. De plus, il est recommandé de limiter la valeur de l'espacement entre deux rangées de pieux à une fois le diamètre des pieux pour optimiser l'efficacité de la palissade. En conclusion, les palissades peuvent constituer une mesure efficace de protection des rives contre l'érosion produite par les vagues dans les régions peu profondes des lacs.

4. Mesures intégrées à la rive

4.1 Remblayage avec des matériaux fins

La protection d'une rive lacustre par remblayage à l'aide de matériaux adéquats est une opération très sensible qui offre de nombreux avantages mais présente aussi des inconvénients. Parmi les avantages de ce type de solution, les points suivants sont à mentionner:

- Création d'une plage favorable à la baignade, avec une granulométrie légèrement plus grossière que celle de la lage initiale érodée.
- Intervention intégrée à la rive facilitant l'accès au large pour les sports aquatiques (voile, planche à voile, etc.).
- Respect de l'environnement par une mesure douce, sans impact négatif lorsque le fond de la partie remblayée n'est pas riche en faune ou flore aquatique.

La protection par remblayage peut aussi présenter quelques inconvénients:

- Le dépôt de sable est soumis à des sollicitations hydrodynamiques susceptibles d'engendrer une érosion partielle ou complète de la «couche» de protection lors d'une tempête. Il est ainsi nécessaire de recharger périodiquement (en moyenne tous les 3 à 5 ans) la grève remblayée par un nouvel apport de sable érodé. Ceci implique que la protection de la plage par remblayage n'est pas une opération unique et définitive mais qu'elle nécessite n suivi régulier engendrant des coûts d'entretien.
- En raison à sa granulométrie plus grossière, la protection par remblayage engendre une pente d'équilibre de la plage plus raide que la pente initiale. Cela implique un changement significatif de la morphologie de la région protégée. Suivant son importance, l'augmentation de la pente d'équilibre de la plage peut avoir un impact négatif pour la baignade.

Dans le but de prolonger la vie du remblayage, des protections en enrochements peuvent être envisagées pour délimiter le site de remblayage et empêcher le transport sédimentaire parallèlement à la rive. Le choix des matériaux de remblayage passe par le calcul du facteur RA ('Overfill Ratio' en anglais). Il est déterminé par la comparaison de la granulométrie des sédiments natifs et de remblayage. Il

est calculé en utilisant le graphique de la *Fig. 8* avec, (USACE 2001):

$$\frac{\sigma_{\varphi b}}{\sigma_{\varphi n}} = \frac{\left[\frac{(\varphi_{84}-\varphi_{16})}{4}+\frac{(\varphi_{94}-\varphi_{5})}{6}\right]_b}{\left[\frac{(\varphi_{84}-\varphi_{16})}{4}+\frac{(\varphi_{94}-\varphi_{5})}{6}\right]_n} \quad (7)$$

et

$$\frac{\mu_{\varphi b}-\mu_{\varphi n}}{\sigma_{\varphi n}} = \frac{\left[\frac{(\varphi_{84}+\varphi_{16}+\phi_{50})}{3}\right]_b-\left[\frac{(\varphi_{84}+\varphi_{16}+\varphi_{50})}{3}\right]_n}{\left[\frac{(\varphi_{84}-\varphi_{16})}{4}+\frac{(\varphi_{94}-\varphi_{5})}{6}\right]_n} \quad (8)$$

où:

φ_χ: Diamètre logarithmique du sable correspondant à la limite pondérale x %.

Indice *'n'*: sédiments natifs (native sediment).Indice *'b'*: sédiments de remblayage (borrow sediment).

Il est à noter que des matériaux de remblayage de diamètre moyen nettement supérieur à celui des sédiments de la plage induisent une instabilité vis-à-vis des sollicitations hydrodynamiques, qui modifient la morphologie actuelle. Ainsi, pour le choix des matériaux de remblayage adéquats une valeur de RA variant entre 1,02 et 1,05 est généralement recommandée.

Concernant le calcul du volume de remblayage, deux méthodes sont considérées. La première tient compte du relevé du profil actuel de la plage, combiné avec le profil hypothétique d'équilibre des sédiments de remblayage. Cette méthode dépend donc essentiellement du profil de la plage, qui varie spatialement d'un endroit à un autre, faisant varier en conséquence le volume de remblayage (calculé par mètre linéaire). Le volume approximatif (en m^3/ml) est calculé comme suit:

$$V = WB + \frac{(3/5)W^{5/3}A_nA_b}{(A_b^{3/2}-A_n^{3/2})^{2/3}} \quad (9)$$

où «*A*» est le «sediment scale parameter» *(Tableau 2)*, *W*, et *B* sont respectivement la largeur et la hauteur du remblayage.

4.2 Remblayage avec des matériaux grossiers

Les matériaux grossiers utilisés pour protéger une plage de sable fin sont définis par un diamètre moyen qui dépasse d'au moins 2 à 3 fois le diamètre moyen du sable. Ainsi leur comportement face aux sollicitations des vagues s'approche plutôt de celui du gravier. La réponse des matériaux grossiers est considérée quasi identique pour la gamme de diamètres d_{50} compris entre 1,8 et 16,5 mm. Le type d'érosion d'une plage constituée de matériaux grossiers est exprimé sous la forme du profil final de la plage. La configuration atteinte se définit comme suit:

$H_0/(wT) < 1$: profil en escalier («step profile») résultant d'une plage non érosive.

$H_0/(wT) > 1{,}4$ à 1,5: profil en dune («bar profile») résultant d'une plage érosive.

Où H_0 et T sont respectivement la hauteur et la période de la vague incidente en zone de grande profondeur et w la vitesse de sédimentation des matériaux grossiers. Cette vitesse est calculée en référence à la vitesse de sédimentation V_{SS} d'une sphère en eau calme:

$$V_{ss} = \frac{4}{3}\left(\frac{\rho_s-\rho}{\rho}\right)g\frac{d_{50}}{C_T} \quad (10)$$

où:

ρ_s: masse volumique des grains,

ρ: masse volumique de l'eau,

g: accélération de la pesanteur,

d_{50}: diamètre d'un grain sphérique,

C_T: coefficient de traînée qui vaut environ 0,4 pour des nombres de Reynolds compris entre 10^3 et 10^4.

La vitesse de sédimentation d'un grain de diamètre équivalent vaut $w = 0{,}55\ V_{SS}$.

La *Fig. 9* montre à titre d'exemple la réponse de la plage de Préverenges Lac Léman pour un remblayage de matériaux grossiers en fonction des vagues incidentes. Ainsi, pour des vagues de période de retour annuelle (Tr = 2,33 ans), l'accrétion de la plage nécessite un diamètre minimal d_{50} d'environ 2 mm. Pour la période de retour la plus élevée (Tr = 50 ans), le diamètre minimal est d'environ 3 mm. L'accrétion de la plage signifie que les matériaux grossiers auront tendance à être transportés vers la rive. Ainsi, ils constitueront à long terme une grève déformée où les matériaux grossiers s'accumulent vers le bord.

5. Conclusions

Suivant les conditions hydrodynamiques et la configuration de la rive, les mesures de protection contre l'érosion peuvent être approchées par deux méthodes: protections détachées de la rive et protection intégrées à la rive. Dans cet article deux types de protections détachées ont été évalués, les barrages à claire-voie et les palissades. En ce qui concerne les barrages à claire-voie, il a été démontré que leur efficacité, définie par leur capacité d'atténuer les vagues incidentes, est optimale en mode émergeant. Des relations empiriques pour calculer leurs coefficients de transmission et leur capacité à favoriser l'accrétion de la rive ont été données. Pour les palissades, il a été démontré qu'une configuration de pieux à double rangée construite en quinconce est optimale pour l'atténuation des vagues incidentes. Dans l'optique d'une protection intégrée à la rive, deux méthodes ont été exposées, le remblayage par des matériaux fins et grossiers. Pour les matériaux fins, le choix du diamètre moyen des matériaux de remblayage doit prendre en considération les caractéristiques des matériaux natifs de la plage. Par contre, pour le remblayage avec des matériaux grossiers, le choix du diamètre moyen dépend essentiellement de la forme

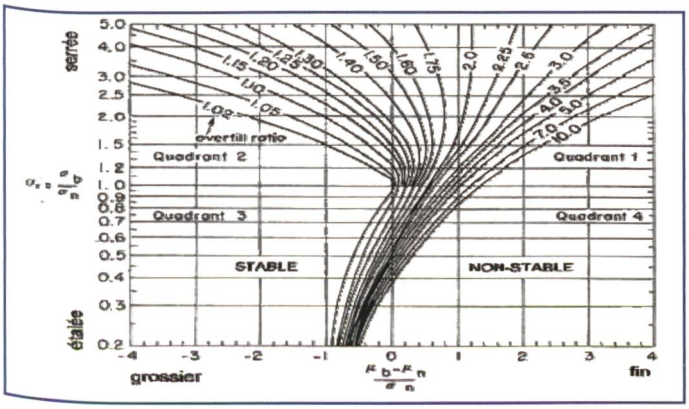

Figure 8. Facteur de remblayage pour un projet de protection d'une plage (Delft-Hydraulics 1987).

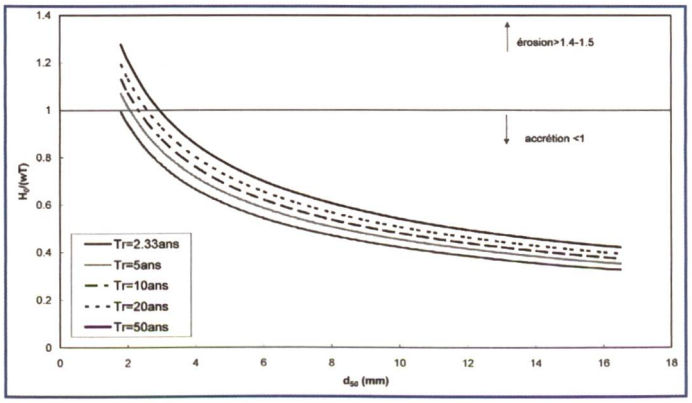

Figure 9. Erosion et accrétion d'un remblayage en matériaux grossiers en fonction du diamètre de remblayage et de la période de retour des vagues incidentes pour la plage de Préverenges (lac Léman).

souhaitée de la plage finale. Un mauvais choix du diamètre pourrait conduire à une plage très déformée et inutilisable.

Bibliographie

Dean, R. G. (2002). Beach Nourishment – Theory and Practice, World Scientific, Singapore.

Delft-Hydraulics. (1987). Manual on Artificial Beach Nourishment, The Netherlands.

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

Sayah, S. (2006). «Efficiency of brushwood fences in shore protection against wind-wave induced erosion,» Communication 24 du Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique féderale de Lausanne.

Sayah, S. M., Boillat, J.-L., and *Schleiss, A. J.* «Effect of Porosity of Brushwood Fences on Wave Transmission.» 4th International Symposium on Environmental Hydraulics & 14th Congress of Asia and Pacific Division 2004, Hong Kong, China, 1057–1062.

Sayah, S. M., Metral, M., Boillat, J.-L., and *Schleiss, A. J.* (2005). «Effet de la répartition géométrique des pieux de palissades sur la transmission des vagues.» Génie biologique, 3–4, 8–11.

USACE. (2001). Coastal Engineering Manual, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

Remerciements

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, l'Office fédéral des eaux et de la 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

Dr. *Selim Sayah*
Lombardi SA Ingegneri Consulenti
Via R. Simen 19, CH-6648 Minusio, Suisse
+41 91 744 60 30, http://www.lombardi.ch
selim.sayah@lombardi.ch;
selim.sayah@bluewin.ch;

Dr. *Jean-Louis Boillat* et Prof. Dr. *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
anton.schleiss@epfl.ch.

Protection de rive contre l'érosion: étude de cas à Mörigen sur le lac de Bienne et à Préverenges sur le Léman

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

Résumé

Dans l'optique d'une sélection optimale de mesures de protection souples contre l'érosion des rives lacustres, deux études de cas sont présentées dans cet article. A Mörigen sur le lac de Bienne, une protection de rive par des barrages à claire-voie a été réalisée au siècle dernier. Il s'est avéré au fil du temps que cette protection n'était pas optimale. Une modélisation numérique basée sur des mesures in situ de vents et de vagues à permis d'analyser la situation actuelle et de mettre en évidence l'effet de trois régimes de vents dominants, le Vent, la Bise et le Joran pour plusieurs niveaux du lac. Les résultats montrent que la configuration actuelle des barrages à claire-voie n'est optimale qu'en régime de Vent du sud-ouest et pour des niveaux du lac moyens et bas. Pour le cas de Préverenges sur le Léman, l'étude présentée concerne l'analyse de la situation actuelle de la rive et une description détaillée de la méthode de protection choisie pour restaurer la plage de sable fortement érodée. Une investigation historique permet d'expliquer les causes de l'érosion. Elle est suivie d'une investigation technique basée sur une analyse numérique de la situation hydrodynamique actuelle de la plage. Différentes mesures de protection sont proposées et adaptées aux différents secteurs de la plage. Une analyse détaillée de la protection par remblayage permet de définir la quantité de sable à remblayer ainsi que la longévité de cette solution qui dépend surtout des caractéristiques des vagues incidentes déferlant par régimes de vents du sud-ouest et du nord-est.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden zwei Fallstudien hinsichtlich optimierter Erosionsmassnahmen zum Schutz von Seeufern mittels weicher Verbauungsmethoden vorgestellt. Am Bielersee bei Mörigen ist im letzten Jahrhundert eine Uferschutzmassnahme mittels Lahnungen realisiert worden. Im Laufe der Zeit hat sich diese Lösung als nicht optimal herausgestellt. Mit Hilfe numerischer Simulationen, basierend auf in-situ Untersuchungen der Windverhältnisse und des Wellengangs, ist die derzeitige Situation analysiert worden. Hierdurch konnte der Einfluss der drei dominierenden Windregime, «Vent», «Bise» und «Joran», für unterschiedlichste Seewasserstände bestimmt werden. Es zeigt sich, dass die derzeitige Konfiguration der Lahnungen nur für südwestliche Winde und für ein mittleres bis tiefes Seewasserniveau optimal ist. Im Falle des Seeufers in Préverenges am Genfersee geht es um die Analyse der Ist-Situation sowie eine detaillierte Beschreibung der gewählten Schutzmethode. Diese hat zum Ziel, die Erosion des bereits stark abgetragenen Sandstrandes zu reduzieren und einen stabilen Zustand wiederherzustellen. Anhand historischer Nachforschungen und technisch-numerischer Untersuchungen konnten die Ursachen der Ufererosion identifiziert und die heutigen hydrodynamischen Verhältnisse bestimmt werden. Basierend auf diesen Untersuchungen sind unterschiedliche Schutzmassnahmen für die jeweiligen Standortbedingungen entwickelt und angepasst worden. Als beste Lösung erwies sich hier eine Aufschüttung. Die zu verbauenden Sandmengen werden abgeschätzt und die Lebensdauer bestimmt. Diese hängt vornehmlich von den Eigenschaften der auflaufenden Wellen sowie der Brandung bei einem Windregime aus Südwest und Nordost ab.