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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 99 (2007)

Heft: 1

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

Autor: Sayah, Selim / Boillat, Jean-Louis / Schleiss, Anton

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940106

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: 02.07.2025

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

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.

1. Introduction

Les développements scientifiques réalisés au Laboratoire de constructions hydrauliques de l'EPFL dans le cadre du projet Erosee ont été appliqués à deux études de cas, l'une à Mörigen sur le lac de Bienne, l'autre à Préverenges sur le Léman. Le but étant de mettre en évidence une méthode d'application pratique des bases théoriques acquises.

L'étude de cas à Mörigen est basée sur des campagnes de mesures in situ de vagues et de bathymétrie dans la région nearshore de Mörigen réalisées par les Hautes Ecoles techniques de Berne (BFH). Les résultats ont été utilisés pour caler le modèle numérique basé sur l'équation «elliptic mild slope» implémentée dans le module Mike 21 EMS. Cette équation permet, dans le cas de Mörigen, de modéliser des parois poreuses (i.e. barrages à claire-voie) utilisées comme agent de protection contre l'énergie des vagues incidentes. Le but de la modélisation numérique est de vérifier l'efficacité des mesures de protection déjà construites dans l'amortissement des vagues incidentes générées pour plusieurs régimes de vents dominants et différents niveaux du lac. Cette efficacité est calculée en comparant les champs des vagues entre les barrages à claire-voie et la ligne de rive.

En ce qui concerne la protection de la plage de Préverenges, le but de l'étude réalisée est de fournir les bases pratiques d'un projet de restauration. Cette plage fortement érodée pendant les dernières décennies, est d'un grand intérêt pour les habitants de la région. Sa restauration vise à rétablir son état antérieur comme espace de loisirs aquatiques. L'approche du problème est basée sur une analyse historique et technique. Ainsi, des campagnes de mesures in situ des vagues et de la bathymétrie ont été réalisées. Un modèle numérique de vagues et de transport solide a été adopté pour quantifier l'impact des vagues incidentes. Le projet de remblayage est basé sur une approche théorique destinée à fournir les bases de dimensionnement nécessaires et à définir les variables importantes à considérer pour les travaux de restauration. Dans les paragraphes qui suivent, une description résumée de ces deux études de cas sera présentée. Pour plus de détail concernant de calage des modèle numériques, les analyses statistiques des mesures de vent et la modélisation numérique des vagues, il faut se référer à (Sayah 2006). L'étude détaillée du projet de remblayage de Préverenges est consignée dans (LCH 2004) et (Sayah et al. 2005).

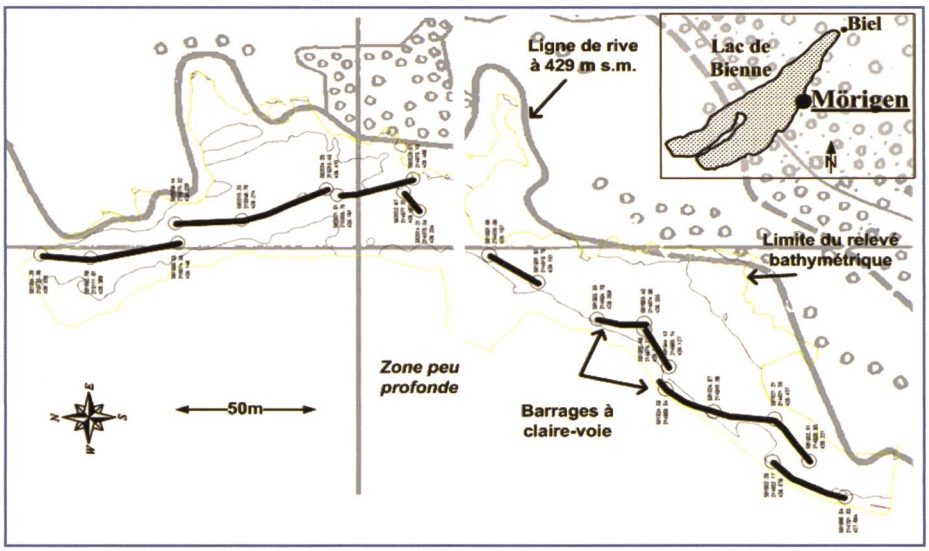


Figure 1. Le site de Mörigen sur le lac de Bienne avec ses mesures de protection.

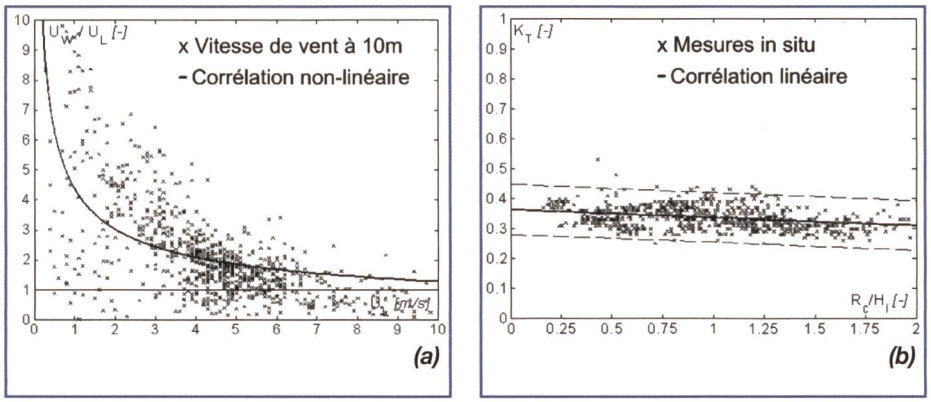


Figure 2. Mesures réalisées in situ: (a) vitesses de vents à Neuchâtel (U_L) comparées a celles mesurées à Mörigen (U_W); (b) coefficient de transmission K_T des barrages à claire-voie à Mörigen sur le lac de Bienne en fonction de la revanche relative R_c/H_i (BFH 2005).

2. Mörigen: protection par des barrages à claire-voie

2.1 Situation actuelle

La configuration du site de Mörigen sur le lac de Bienne avec les mesures de protection des rives existantes est montrée à la *Fig. 1*. Malgré la présence de ces ouvrages destinés à amortir les vagues incidentes, il est apparu que pour certains régimes de vent et niveaux du lac, la configuration des barrages à claire-voie n'était pas optimale. Ainsi, à plusieurs endroits, la rive et les champs de roselières ont subi et continuent à subir une érosion accrue. Le but de l'étude proposée est défini comme suit:

- Calcul des vagues incidentes au large de Mörigen. Ces vagues seront utilisées comme conditions de bord pour le modèle numérique.
- Calcul du champ de vagues entre les barrages à claire-voie et la rive pour trois niveaux du lac, 429,6 m s.m., 429,2 m s.m. et 428,8 m s.m. Ceci permettra d'évaluer l'effet de la variation saisonnière du niveau du lac sur l'efficacité des mesures de protection existantes.
- Calcul du champ de vagues entre les barrages à claire-voie et la rive pour trois régimes de vent dominants choisis sur la base de l'analyse statistique des mesures de vitesse et de direction du vent à la station ANETZ de Neuchâtel. Ceci permettra de calculer et comparer l'efficacité des mesures de protection pour chacun des régimes choisis.

2.2 Mesures in situ du vent et des vagues

Avant de procéder à la génération de vagues de vent sur la surface confinée d'un lac, il est important d'établir la comparaison des vitesses de vent mesurées sur la terre ferme et des vitesses correspondantes mesurées à la surface de l'eau. L'analyse des vitesses et des directions de vent mesurées à la station de Neuchâtel, choisie pour cette étude, met en évidence trois régimes de vent dominants:

- Le Vent: soufflant du sud-ouest avec des vitesses comprises entre 8,77 et 13,25 m/s (période de retour *Tr* = 1 et 50 ans)
- Le Joran: soufflant de l'ouest avec des vitesses comprises entre 9,64 et 13,82 m/s (période de retour *Tr* = 1 et 50 ans)
- La Bise: soufflant du nord-est avec des vitesses comprises entre 8,35 et 11,54 m/s (période de retour *Tr* = 1 et 50 ans)

La comparaison des vitesses de vent mesurées à Neuchâtel *(U_L)* et sur le site de Mörigen *(U_W)* à l'emplacement des barrages à claire-voie est présentée à la *Fig. 2a*. Il apparaît que pour une vitesse moyenne de 10 m/s, les vitesses de vent à la surface sont environ 35 % supérieures à celle mesurées sur la terre ferme. Ce rapport moyen sera utilisé pour majorer les vitesses de vent mesurées à Neuchâtel, qui seront utilisées pour le calcul des vagues de vent.

Le coefficient de transmission (rapport des hauteurs des vagues transmises à travers la structure et des vagues incidentes) des barrages à claire-voie à Mörigen a été calculé sur une période de plusieurs mois. La *Fig. 2b* montre que la valeur moyenne de ce coefficient est de 0,35 environ. Cette valeur sera utilisée pour le coefficient de transmission du modèle numérique des barrages à claire-voie quand le niveau du lac est à 429,2 m s.m. Il est à noter que cette valeur change en fonction du niveau du lac, de la période de retour des vagues et du régime de vent. Ainsi, il est proposé d'utiliser les résultas des essais sur modèle physique d'un barrage à claire-voie réalisés au LCH (Sayah 2006) pour calculer le coefficient de transmission des autres valeurs sur la base de la valeur moyenne mesurée in situ.

2.3 Conditions de bord

Les conditions de bord sont des informations de base (mesurées et/ou calculées) utilisées comme entrée pour le modèle numérique. Dans le cas présent, ces conditions sont résumées comme suit:

- Bathymétrie: mesurée in situ par (Müller et al. 2005). Les mesures ont été utilisées pour générer un modèle numérique de la bathymétrie à Mörigen avec une maille quadratique de 50 cm de côté *(cf. Fig. 3)*.
- Conditions hydrodynamiques: Les caractéristiques (hauteur et période) des vagues incidentes. Ces vagues ont été calculées en se basant sur deux approches: numérique, à l'aide du modèle Swan (Booij et al. 1996), et analytique avec la méthode Jonswap (Hasselmann et al. 1973). Seuls les résultats de cette dernière méthode sont présentés ici.

Un exemple des caractéristiques de vagues en grande profondeur générées pour un régime de Vent est donné à la *Fig. 4*. Ces vagues sont calculées pour différentes durées de vent et périodes de retour. Il est important de considérer des durées de vent représentatives du lac. Ceci dépend du fetch de la région de Mörigen pour les régimes de vent concernés. Pour le Vent soufflant du sud-ouest, la durée minimale pour une période de retour *Tr* = 20 ans s'élève à 90 min et pour une période *Tr* = 1 an la durée minimale s'élève à 120 min. Cette durée correspond au temps nécessaire pour qu'un régime de vent constant puisse générer un régime de vagues d'équilibre et quasi constant (Kamphuis 2000). Les vagues calculées seront par la suite introduites comme condition de bord dans le modèle numérique de Mörigen. Ces vagues de grande profondeur seront ainsi transformées numériquement en appliquant les équations de réfraction due au changement de profondeur d'eau et de diffraction due à la présence des structures de protection.

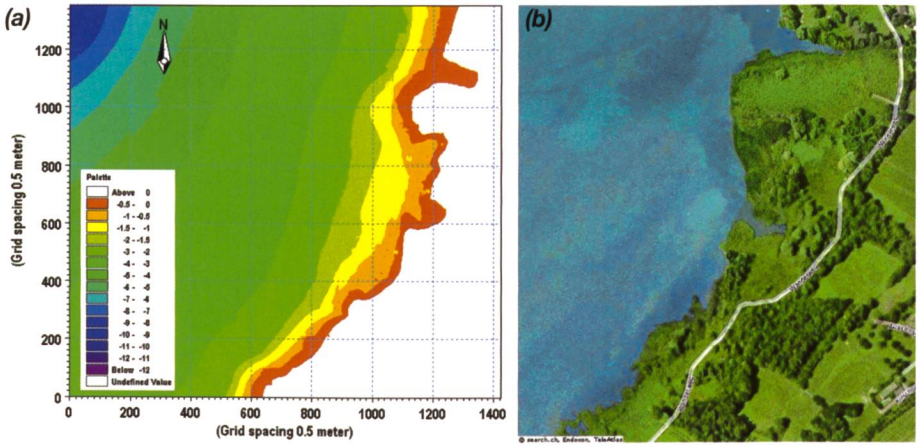


Figure 3. (a) Profondeurs en mètres du modèle numérique de la bathymétrie à Mörigen; (b) vue aérienne de la même région montrant la ligne de rive.

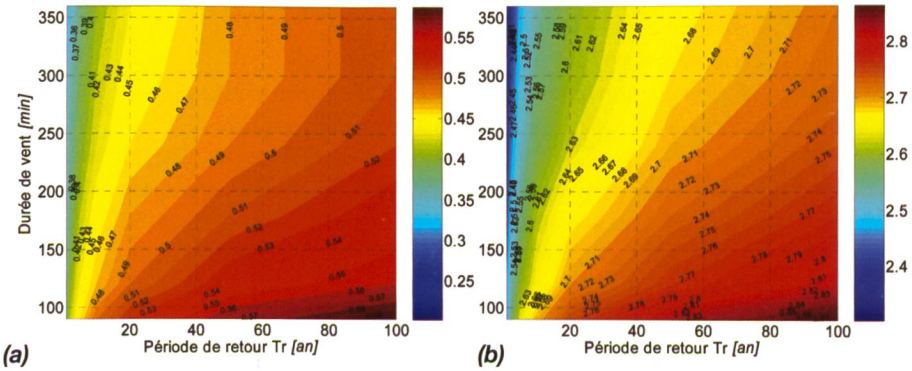


Figure 4. Caractéristiques de vagues en régime de Vent pour différentes périodes de retour: (a) hauteurs en mètres; (b) périodes en secondes.

2.4 Modélisation numérique

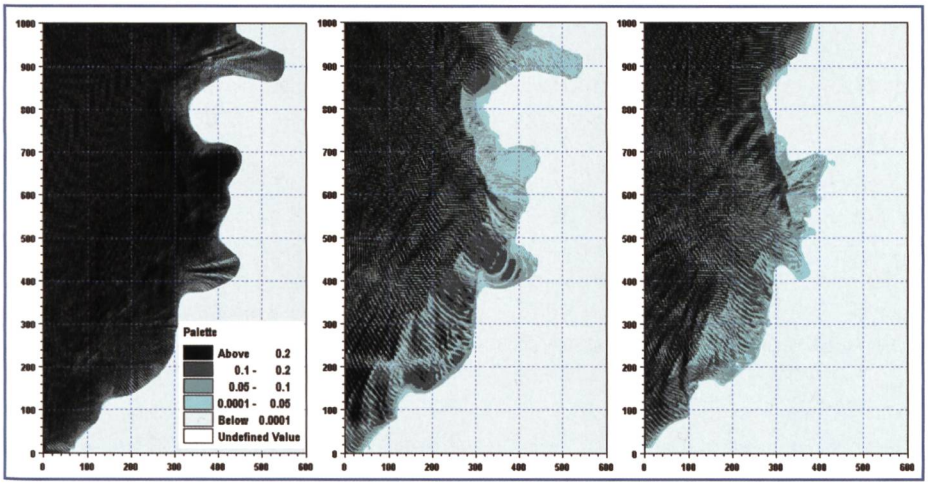
La modélisation numérique de la région de Mörigen est effectuée pour les scénarios suivants:

- Trois régimes de vent dominants: le Vent, la Bise et le Joran
- Pour chaque régime de vent, trois périodes de retour sont considérées: *Tr* = 1, 5 et 20 ans
- Pour chaque période de retour, trois niveaux de lac sont considérés: MHWL = 429,6 m s.m, MWL = 429,2 ms.m. et MLWL = 428,8 m s.m.
- Pour chaque niveau du lac, deux cas sont modélisés: la région de Mörigen sans et avec les structures de protection.

Le quatrième point vise à comprendre l'effet direct des mesures de protection. Dans le présent article, seuls les résultats des champs de vagues avec les mesures de protection sont présentés. Pour plus de détails, il faut se référer à (Sayah 2006).

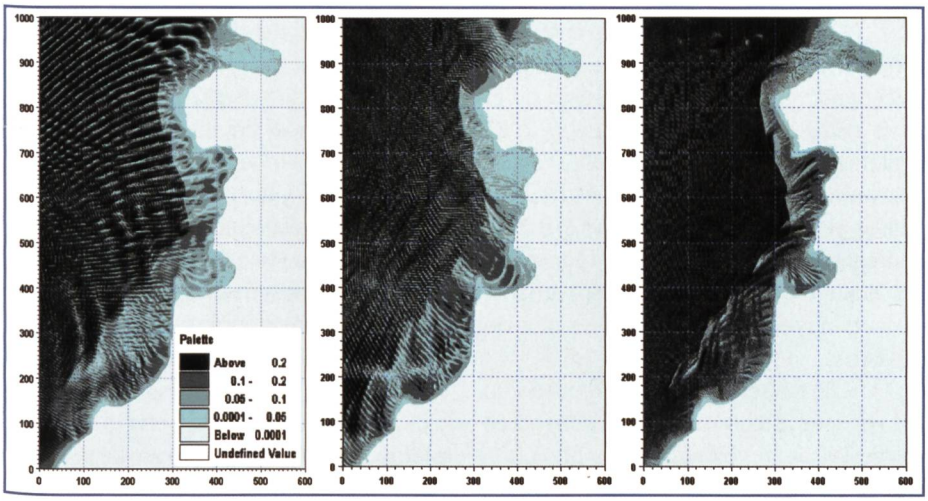
2.5 Effet de la variation du niveau d'eau du lac

Un exemple représentatif de l'effet de la variation du niveau du lac sur l'efficacité des mesures de protection est montré à la *Fig. 5* pour le régime de Joran et la période



(a) (b) (c)

Figure 5. Hauteur des vagues en mètres montrant l'effet de la variation du niveau du lac de Bienne sur l'efficacité des mesures de protection dans l'amortissement des vagues incidentes pour un régime de Joran et une période de retour Tr = 5 ans: (a) Hautes eaux MHWL; (b) Niveau moyen MWL; (c) Basses eaux MLWL.



(a) (b) (c)

Figure 6. Hauteur des vagues en mètres montrant l'effet du régime de vent au lac de Bienne sur l'efficacité des mesures de protection dans l'amortissement des vagues incidentes pour le niveau du lac MWL et une période de retour Tr = 5 ans: (a) Vent; (b) Joran; (c) Bise.

de retour de 5 ans. La variation du niveau d'eau influence de manière significative la position de la ligne de rive. Par conséquent, pour MHWL cette dernière se déplace vers l'intérieur des terres et pour MLWL, elle se déplace en direction du large. A quelques endroits peu profonds, pour une variation du niveau d'eau de 0,80 m, le déplacement de la ligne de rive peut atteindre 25 m. Pour des régions à très faible tirant d'eau, ce déplacement atteint même 75 m. De telles valeurs mettent en évidence l'importance de l'effet de la distance entre les barrages à claire-voie et la ligne de rive. Cette distance devrait être suffisante pour permettre une bonne efficacité de la structure en basses eaux. Les résultats prouvent que ce critère est pratiquement satisfait dans tous les cas.

Même pour le niveau le plus bas MLWL, toutes les structures sont dans leau et capables d'atténuer efficacement les vagues incidentes *(Figs. 5b* et *5c)*. Par contre, l'effet atténuant diminue d'une manière significative quand le niveau d'eau est élevé. Pour le MHWL, les vagues transmises sont environ semblables devant et derrière les structures de protection, la transmission des vagues étant quasi-totale. Il est à noter que pour ce niveau d'eau, les structures sont totalement submergées. Pour le niveau moyen MWL *(Fig. 5b)*, les vagues dans le secteur protégé par les barrages à claire-voie sont très faibles en comparaison de celle à MHWL *(Fig. 5a)*. Cependant, en les comparant à celles à MLWL *(Fig. 5c)*, elles ne semblent pas être beaucoup plus hautes, bien que la variation de niveau d'eau soit identique. Ceci est dû au fait que pour les deux niveaux MWL et MLWL, les structures de protection émergent complètement. Dans cette condition, leur efficacité est quasi-constante.

2.6 Effet du régime de vent

Le régime de vent a un grand effet sur le champ de vagues proche de la rive à Mörigen. En se référant au calcul des vagues en grande profondeur pour les trois régimes de vent considérés, il s'avère que les vagues les plus hautes correspondent au Vent du sud-ouest. Ces vagues de haute amplitude sont essentiellement dues au fait que le fetch du Vent est environ le double de ceux des deux autres régimes. En outre, les vitesses de Vent sont aussi les plus élevées. Avec la présence des barrages à claire-voie, l'influence des structures par régime de Vent sur le champ des vagues est significative *(Fig. 6)*. En comparant les différents champs de vagues, il apparaît clairement que pour les régimes de Bise et de Joran, les vagues incidentes atteignent plus facilement la ligne de rive, par diffraction dans les espaces séparant les différentes structures *(Figs. 6d* et *6c* comparées à la *Fig. 6a)*. Par régime de Vent, bien que les vagues soient plus hautes, la disposition géométrique actuelle des structures protège efficacement la rive *(Fig. 6a)*. Le grand espace existant au milieu des barrages à claire-voie (X~350; Y~350) est la région la moins protégée en régime de Joran et de Bise. Par contre, par régime de Vent, les vagues semblent atténuées plus efficacement à cet endroit. La disposition géométrique actuelle des barrages à claire-voie est donc plus efficace par un régime de Vent. Elle se révèle par contre moins efficace pour régime de Bise, comme montré à la *Fig. 6c* où les vagues peuvent atteindre la ligne de rive sur la quasi-totalité de la région de Mörigen.

3. Préverenges: projet de protection par remblayage

Dès la fin des années 1980, la Municipalité de Préverenges s'est préoccupée de l'érosion qui ronge son territoire sur la rive nord du Léman *(cf. Fig. 7)*. Après une large consultation, des épis ont été réalisés en 1990 dans le but d'enrayer cette progression. Il s'avère aujourd'hui que cette solution n'est pas satisfaisante et que le problème reste entier.

La démarche suivie pour trouver des solutions applicables aux conditions de la plage de Préverenges et pour analyser leur capacité à contrecarrer l'érosion de rive est divisée en deux parties. La première, basée sur des investigations in situ, est consacrée à une description détaillée

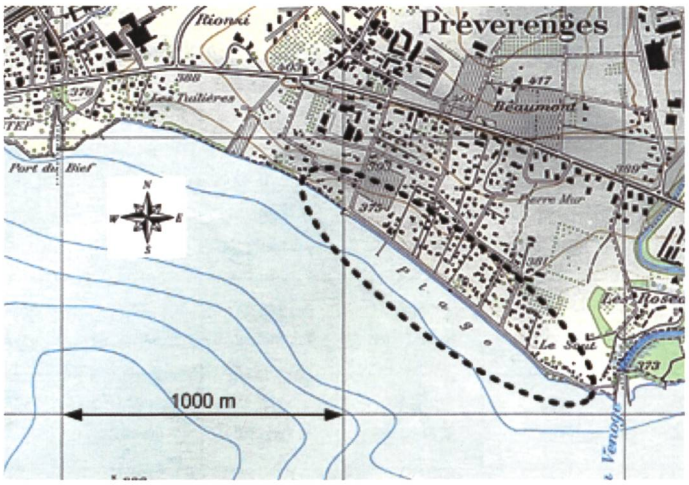


Figure 7. Situation de la plage de Préverenges (Swiss Topo). En traitillé la zone concernée par l'étude.

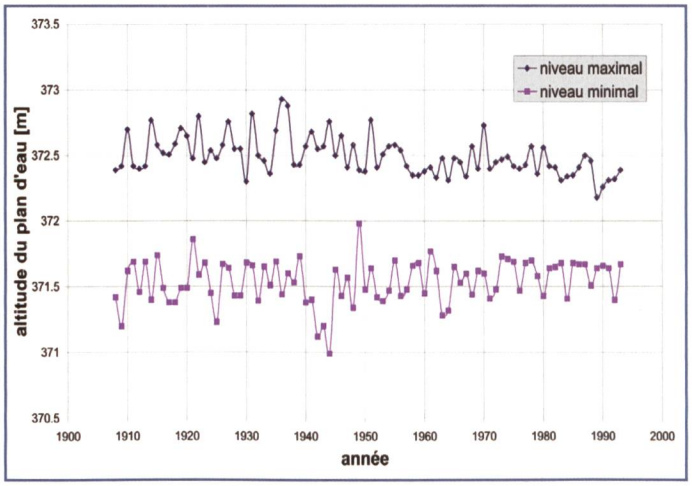


Figure 8. Altitudes maximales et minimales du plan d'eau du Léman au cours du 20ème siècle.

de la plage, de sa morphologie, de la granulométrie des sédiments, de la bathymétrie, etc. Elle contribue à générer des solutions adaptées aux besoins de la région. La deuxième partie de l'étude propose une analyse détaillée des variantes. Elle établit les bases générales de dimensionnement des protections adoptées.

3.1 L'érosion de la plage

La variation du niveau du plan d'eau, appelée marnage, est un facteur primordial pour la stabilité des rives lacustres. En effet, le marnage peut influencer la dynamique sédimentaire littorale en modifiant les caractéristiques et la nature des déformations des vagues incidentes sur les rives ainsi que les courants associés. Ce changement hydrodynamique peut ainsi provoquer une modification de l'état d'équilibre lié au transport sédimentaire lacustre.

Le niveau du plan d'eau du Léman n'a pas subi de grandes variations au cours du siècle dernier, comme illustré par la *Fig. 8*. Il est par contre intéressant de mentionner que, d'après le témoignage des habitants de la région de Préverenges, il y a environ trente à quarante ans la ligne de rive était située plus loin vers le large que la ligne actuelle. A l'évidence, ce changement ne peut être associé à une augmentation du niveau du lac car l'évolution du niveau maximum, visible sur la *Fig. 8*, met plutôt en évidence un trend vers des valeurs plus basses. Le déplacement de la ligne de rive ne s'exprime par conséquent que par une modification du profil d'équilibre consécutif à un dégraissement de la rive.

Au cours du siècle passé, la plage de Préverenges a subi un recul accentué de sa grève, dû probablement à des phénomènes d'érosion causés essentiellement pas les vagues incidentes et les courants littoraux. Ce recul est évalué, sur la base de témoignages des habitants et des pêcheurs de la région, à quelques dizaines de mètres.

Afin d'évaluer plus exactement l'importance de cette érosion plusieurs investigations ont été entreprises à différents niveaux. L'idée sous-jacente était également de parvenir à «caler» un modèle numérique d'érosion sur une période définie, de manière à obtenir des résultats comparables à la réalité. Le modèle devait ensuite permettre d'évaluer l'érosion à court, moyen et long terme avec plus de certitude.

L'investigation a été organisée en trois phases. La première a été consacrée au recueil de témoignages des habitants de la région, notamment du pêcheur André Martin qui vit à Préverenges et qui possède une grande expérience du lac de par la nature de son travail. Il a ainsi été possible d'obtenir des photos et cartes postales anciennes de la plage de Préverenges, la plus vieille date de l'année 1935.

La photo de la *Fig. 9* met bien en évidence l'importante largeur de la grève qui s'étend sur une largeur de 6 à 10 mètres environ, sur toute la longueur de la plage. Il est important de noter également que le niveau de la rangée des arbres longeant la rive s'inscrit dans le prolongement de la grève sans discontinuité.

La deuxième phase d'investigation s'est concentrée sur l'analyse d'anciennes cartes et photos tirées des archives cantonales. Il a ainsi été possible de trouver de très anciens plans cadastraux, parfois non datés, montrant la commune de Préverenges avec son bord de lac. L'analyse montre ainsi une grande étendue de sable sur la plage de Préverenges. Cette grève dont la largeur est estimée à 30 m environ à la fin du 19ème siècle, révèle qu'à cette époque il n'y avait pas de route qui longeait la plage (actuellement avenue de la Plage), ni de rangée d'arbres, qui a vraisemblablement été plantée au début du 20ème siècle.

Cette large grève a totalement disparu et il est vraisemblable que ce recul soit lié aux forces hydrodynamiques,

Figure 9. Photo de la Plage de Préverenges, datée de 1935, prise depuis le parking actuel situé au sud de l'avenue de la Plage.

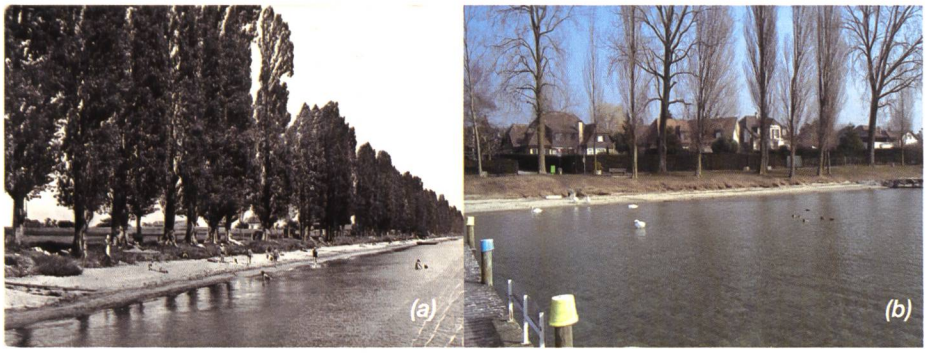


Figure 10. Photos de la plage de Préverenges; (a) plage dans son état pendant l'été 1935; (b) la même partie de la plage en février 2003.

source d'érosion de la plage. Mais il faut noter surtout que cette largeur de grève a été utilisée pour la construction de la route et la plantation d'une rangée d'arbres. Il est ainsi très probable que ce changement morphologique conséquent de la plage, a modifié sa pente d'équilibre.

3.2 Evaluation actuelle du site

Il ressort de l'analyse historique de la plage de Préverenges que celle-ci présentait par le passé une grève plus large que dans l'état actuel. La *Fig. 10a* montre une grève en été 1935, d'une largeur d'environ 10 mètres alors que la *Fig. 10b* montre cette même grève 68 ans plus tard, pendant une période de basses eaux avec une largeur d'environ 2 mètres alors qu'elle devait être d'au moins 15 mètres à la même période en 1935. L'autre fait à mentionner est l'important rehaussement du niveau de la chaussée. Ceci a certainement eu un impact négatif sur la stabilité de plage.

En réalité, chaque plage possède sa «pente d'équilibre» qui dépend de la granulométrie du site et des caractéristiques des vagues incidentes (Trenhaile 1997). Cette pente d'équilibre caractérise un «point neutre» à partir duquel l'engraissement et le dégraissement périodiques sont équilibrés. De fait, il est fort probable qu'un changement de cette pente a abouti à une augmentation du pouvoir érosif des vagues incidentes et des courants littoraux qui ont contribué à une disparition progressive de la plage.

Afin de mieux comprendre la réponse de la plage aux sollicitations hydrauliques, il s'est avéré important de procéder à deux analyses distinctes, l'une en régime de Vent, vent dominant soufflant du sud-ouest et l'autre en régime de Bise, vent dominant du nord-est. Ces deux régimes présentent un intérêt particulier en raison de l'orientation de la plage, quasi perpendiculaire à la direction de propagation des vagues sur l'axe sud-ouest/nord-est.

3.3 Modélisation numérique

Il a été recouru à la modélisation numérique pour quantifier les effets des vagues et des courants côtiers dans la région de la plage de Préverenges et pour évaluer le transport solide sur le fond lacustre dû à ces différentes sollicitations. Pour ce faire, le modèle numérique, MIKE 21, a été utilisé. Il s'agit d'un modèle 2D, développé par l'Institut Danois d'Hydraulique (DHI). Les résultats fournis par ce modèle, peuvent être subdivisés en deux volets:

- Hydrodynamique: à partir des caractéristiques de vagues au large, le module MIKE 21 NSW est capable de calculer la réfraction et le déferlement des vagues incidentes sur la plage de Préverenges *(Fig. 11)*. Une fois le plan des vagues connu, grâce au module MIKE 21 HD, il est possible de calculer le courants moyens générés par les vagues selon les deux directions X et Y.
- Dynamique sédimentaire: après introduction des caractéristiques sédimentaires dans le modèle et en utilisant les résultats des courants moyen calculés par MIKE 21 HD, il est possible d'évaluer, suivant une loi de transport solide adéquate, les débits solides sur le fond lacustre dans les deux directions X et Y.

La force de cisaillement appliquée par le vent sur le plan d'eau du lac engendre des courants appelés «courants de dérive» qui se propagent selon la direction et dans le sens du vent. L'effet de ce cisaillement conduit à la formation d'un profil de vitesse verticale dans la colonne d'eau. Loin des rives, les composantes verticales de ces vitesses sont en général négligeables.

La vitesse d'entraînement superficielle u_s engendrée par le vent, peut être exprimée par différentes formules, parmi lesquelles celle de Keulegan (1951), donnée en fonction de la vitesse de vent mesurée 10 m au dessus du plan d'eau (u_{10}):

$$u_s = 0.03 u_{10} \qquad (1)$$

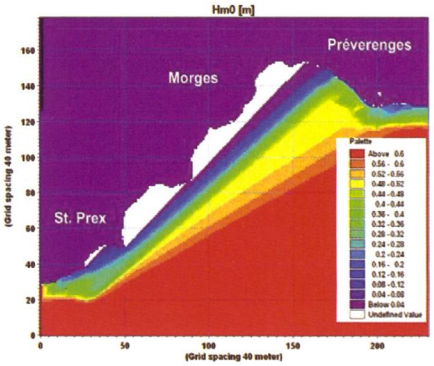


Figure 11. Début de la réfraction des vagues incidentes sur la plage de Préverenges au niveau de St-Prex (modélisation numérique en utilisant MIKE 21 pour Tr = 50 ans). La Palette des valeurs indique la hauteur des vagues en mètres.

Afin d'évaluer l'effet du forçage du vent (Vent et Bise) dans la région de Préverenges, une vitesse de 7,5 m/s a été choisie. Elle correspond à une vitesse de vent soufflant sur une durée de 6 heures, pour une période de retour Tr = 2,33 ans.

Suivant l'Equ. 1, la vitesse d'entraînement superficielle est de 0,225 m/s. Par régime de Vent, les écoulements sont orientés vers l'est quasi parallèlement à la plage *(Fig. 12a)* avec des vitesses de l'ordre de 0,2 m/s. Il en résulte qu'en régime de Vent, l'effet des vagues produit des sollicitations érosives sous l'effet des courants littoraux.

A l'opposé, un régime de Bise *(Fig. 12b)* engendre des courants à proximité de la plage de Préverenges, qui sont orientés selon la même direction que ceux du régime de Vent mais qui progressent dans le sens opposé avec une vitesse d'environ 0,2 m/s. Il est à noter qu'en régime de Bise, de faibles courants de retour se forment en face de la plage (X =7 km, Y=5,5 km) suggérant un effet érosif vers le large perpendiculairement à la rive.

Sur la base de l'analyse numérique de l'effet du régime de vent et du transport solide qu'il entraîne dans la région de la plage, il apparaît que les courants de retour vers le large, générés par les vagues incidentes perpendiculaires à la rive, entraînent des sédiments fins depuis la plage vers une zone plus profonde moins sollicitée. Cet entraînement est caractérisé par un régime de rides à proximité de la rive et/ou un régime de dunes généré par des vagues à période de retour élevée. La plage qui tend à retourner à un profil d'équilibre, n'est alimentée par aucune source de sédiments. En effet, la charge sédimentaire en suspension provenant de la Venoge est orientée vers l'est par régime de Vent. Les

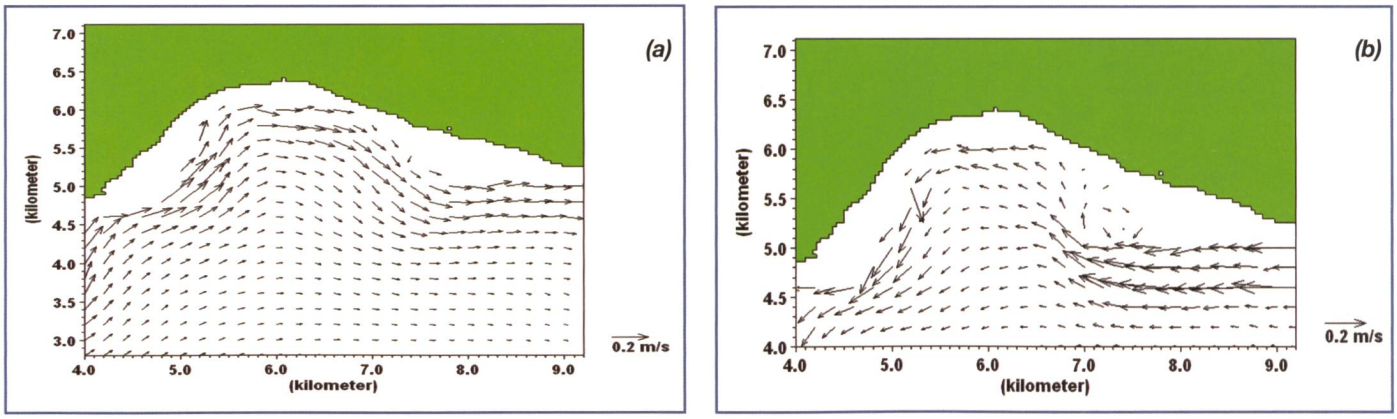


Figure 12. Courants littoraux générés dans des conditions de vents dominants: (a) Vent du sud-ouest; (b) Bise du nord-est.

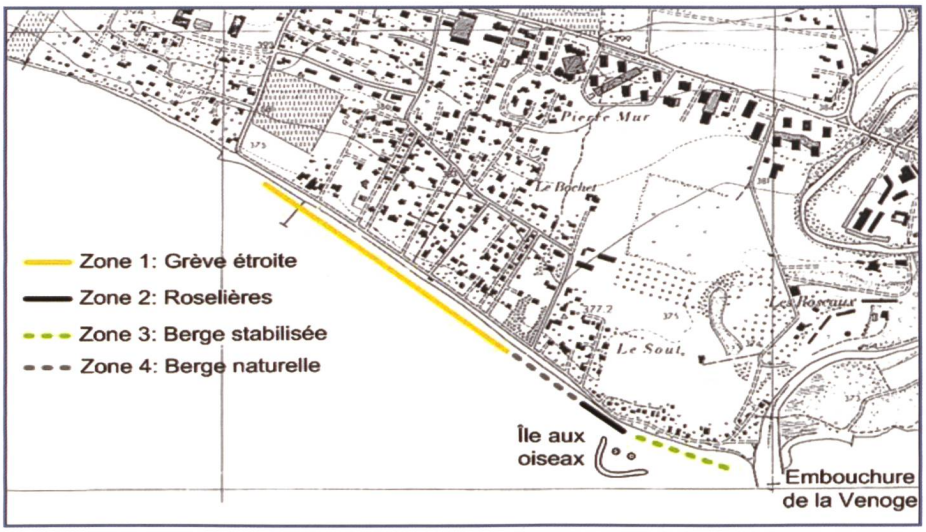


Figure 13. Plan d'implantation indicatif des mesures de protection suivant les classes choisies (le traitillé indique une mesure non appliquée uniformément).

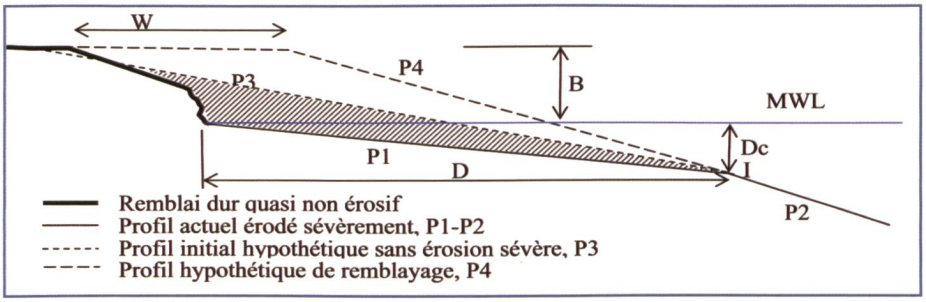


Figure 14. Profils réel (P1-P2), initial hypothétique (P3) et de remblayage (P4) de la plage.

sédiments seront ainsi plutôt déposés sur la plage de St.-Sulpice. En régime de Bise, cet apport tend à se déposer au large à quelques centaines de mètres de la plage de Préverenges. De ce fait, si les vagues incidentes contribuent à éroder la plage, les sédiments évacués ne sont pas remplacés par une autre source.

Sur la base de cette analyse, les paragraphes suivants proposent différents types de protection et analysent en détail la protection de la plage par remblayage en vue de sa restauration.

3.4 Projet de protection

Dans l'étape de recherche de solutions pour la protection de la plage de Préverenges, les critères de choix reposent essentiellement sur l'efficacité à court, moyen et long terme. Il est toutefois évident que l'intégration environnementale et le coût de réalisation des mesures de protection interviendront au stade d'établissement du projet. Les mesures de protection contre l'érosion adaptées à la plage de Préverenges peuvent être différenciées selon les zones concernées:

a) Zone 1: Le fait que la plage est réputée pour la pratique de la planche à voile implique que d'éventuelles structures rigides construites au large et parallèles à la rive constitueraient un inconvénient majeur à la pratique de ce sport. Si la construction de brise-lames devait toutefois être retenue, il faudrait qu'ils soient noyés à une profondeur suffisante pour éviter tout accident. Il reste donc possible de combiner cette solution avec une mesure de protection intégrée à la plage comme le remblayage. Ce type de mesure peut être considéré comme solution de protection pour la Zone 1 *(Fig. 13)*.

b) Zone 2: Une mesure de protection de la Zone 2 *(Fig. 13)* doit permettre de conserver l'aspect naturel de la végétation de rive. Elle a pour but de réduire l'effet des vagues déferlantes en brisant leur énergie avant qu'elles n'atteignent la plage. Dans ce cas, des structures détachées de la rive, mais pas trop éloignées vu la faible longueur à protéger, peuvent être envisagées. Ainsi des brise-lames ou des mesures du génie biologique, telles que palissades ou barrages à claire-voie, sont envisageables.

c) Zone 3: Les mesures adaptées à la Zone 3 *(Fig 13)* visent essentiellement à protéger la rive avec des structures intégrées. Un remblayage ne serait ici pas très efficace vu la pente très raide de la rive et son altitude élevée par rapport au niveau moyen du lac. La protection de la rive peut se faire par des enrochements, des pieux ou des caissons en bois.

d) Zone 4: La Zone 4 *(Fig 13)* de la plage de Préverenges ne nécessite pas de protection particulière si ce n'est un éventuel renforcement des radiers inclinés. Il est possible par ailleurs de séparer les Zones 1 et 4 par un long épi transversal en enrochements ou en troncs d'arbres afin d'éviter la migration de matériaux de la zone remblayée vers la zone non aménagée.

Le *tableau 1* résume les mesures de protection adaptées à chaque Zone.

3.5 Protection par remblayage: volume et longévité

Concernant le calcul du volume de remblayage, deux méthodes sont considérées. La première tient compte du relevé

Classes	Mesures de protection adaptées
Zone 1	Mesures de protection intégrées à la plage ou détachées mais parallèles à la ligne de rive : brise-lames noyé ; remblayage de sable ; combinaison brise-lames noyé et remblayage de sable.
Zone 2	Mesures de protection détachées, parallèles et proches de la plage : palissade, barrage à claire-voie.
Zone 3	Mesures de protection intégrées à la plage : revêtement ou mur de protection.
Zone 4	Pas de mesures de protection particulières : renforcement des radiers inclinés.

Tableau 1. Choix des mesures de protection adaptées à chaque zone de la plage.

Diamètre d_{50} (mm)	Volumes pratiques (m^3/ml)	Volumes théoriques (m^3/ml)
0.20	80	46
0.25	72	45
0.65	53	44

Tableau 2. Comparaison des volumes de remblayage calculés par la méthode pratique et par la méthode théorique.

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).

La deuxième méthode se base sur le diamètre moyen des sédiments natifs et de remblayage. Elle suppose que le profil existant a atteint son état d'équilibre. Dans la présente étude, les deux méthodes sont appliquées afin d'avoir une estimation volumétrique comparative.

La *Fig. 14* schématise l'érosion sévère de la plage actuelle. En fait, la partie consolidée de la grève, quasi non érosive car fixée par les racines des arbres et des enrochements, contribue négativement à la protection de la plage. La pente P1 de la plage actuelle (environ 1,5 %) est le résultat d'une érosion sévère due au déferlement et à la réflexion des vagues sur la grève dure de la plage. Cette dernière avait à l'origine une pente comprise entre 2,5 et 3,5 %, suivant le calcul des profils d'équilibre. La hauteur *Dc (Fig. 14)* indique la profondeur à partir de laquelle le profil de la plage en direction du large reste stable. Cette profondeur se situe exactement à l'endroit de la cassure de pente (entre P1 et P2). Cette cassure indique que la pente P3 a été modifiée par un processus d'érosion sévère qui a conduit à son aplatissement pour atteindre la valeur P1, d'environ 25 % plus faible.

Une synthèse des volumes de remblayage est présentée dans le *tableau 2*. Elle met en évidence une grande différence entre la méthode pratique qui tend a surestimer les quantités de matériaux de remblayage et la méthode théorique qui conduit à des valeurs nettement inférieures.

Pour les matériaux à granulométrie fine (0,20 et 0,25 mm) la méthode pratique donne des volumes qui sont environ 2 fois supérieurs à ceux calculés par la méthode théorique. Cependant, pour le diamètre 0,62 mm, l'estimation des volumes est très proche avec les deux méthodes. Ceci peut être interprété comme suit:

- La méthode pratique est principalement basée sur l'intersection des deux pentes P1 et P4 (pente actuelle de la plage et pente de remblayage). Géométriquement, lès distances calculées pour les points d'intersection de ces deux pentes sont très grandes. Ceci conduit par la suite à des volumes élevés. Il est cependant évident que la distance d'intersection des deux pentes est relativement petite (53 m pour un d_{50} = 0,62 mm) et le volume de remblayage est faible.
- La méthode théorique est basée principalement sur la théorie de pente d'équilibre finale de la plage. Elle prend aussi en compte la hauteur Dc. Cette hauteur se situe actuellement, pour un niveau du lac moyen, à une distance d'environ 80 m de la ligne de rive. Ainsi, pour cette distance de remblayage, le volume calculé théoriquement décroît significativement.

Il est difficile par la suite d'avoir une estimation exacte des volumes de remblayage pour différents matériaux. Ainsi, il est à considérer que le volume de remblayage sera situé entre les valeurs issues des deux méthodes. Pratiquement, les projets de remblayage se réfèrent principalement aux volumes calculés par la méthode théorique.

La période de demi-vie, t_{50} % *(Fig. 15)* d'un remblayage linéaire sur une demi-longueur de rive «a», comme c'est le cas pour Préverenges, est donnée par l'Equ. 2:

$$p(t) = 1 - \frac{\sqrt{\varepsilon . t_{50\%}}}{a\sqrt{\pi}} \qquad (2)$$

Où: *p(t)* (-): variable dépendant de la quantité de remblayage restant après érosion. Basée sur plusieurs études comparatives d'érosion de plage, elle exprime une relation approximative entre la longueur de la plage, les conditions hydrodynamiques et la période de demi-vie; p(t) est normalement considérée égale à 0,5.

ε (m^2/s): capacité érosive de la plage donnée par la formule simplifiée

$$\varepsilon = \frac{0.77 H_b^{\,2}\sqrt{9.81.H_b}}{8} . \frac{1}{(2.65-1)} . \frac{1}{(1-0.4)} . \frac{1}{(B+h_l)} \qquad (3)$$

Où: H_b (m): hauteur de la vague au déferlement dans la surfzone.

a (m): longueur du remblayage (en moyenne égale à 300 m dans le cas de Préverenges).

h_l (m): profondeur équivalente à la profondeur D_c dans la zone de transition. Elle est donnée par la formule

$$h_l = H_s T_s (9.81/5000 d_{50})^{0.5} \qquad (4)$$

Il est important dans ce type d'étude de définir une hauteur de vague au déferlement H_b à partir de mesures in situ sur de courtes périodes (variant généralement de 1 à 2 mois). Ce traitement, différent du traitement statistique réalisé dans l'étape 1 du projet, passe par une analyse statistique à court terme. Par manque de données in situ, la valeur de H_b est admise égale à la hauteur en eau profonde H_0 (0,59 m pour un *Tr* = 2,33 ans).

Il apparaît que la longueur de remblayage de rive concernée par le remblayage et la hauteur H_b sont les deux variables qui influencent le plus la période de demi-vie de la plage après réalisation. Par contre, il est très difficile d'évaluer exactement la durée de vie du remblayage. Un suivi du projet après réalisation est primordial pour déterminer la période optimale d'alimentation périodique en sédiments. Dans l'hypothèse la plus défavorable, il faut s'attendre à une période d'alimentation d'environ 3 ans *(Fig. 15)* pour garder la plage telle qu'elle a été reconstituée avec le remblayage.

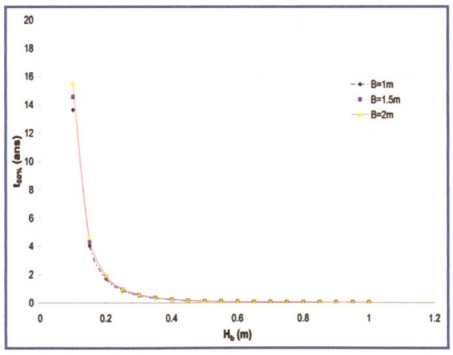


Figure 15. Période de demi-vie du projet de remblayage de la plage de Préverenges en fonction de la hauteur de vague H_b pour une longueur de remblayage de 300 m et pour h_l = 6,41m.

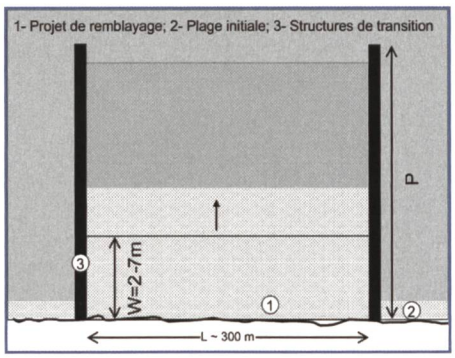


Figure 16. Projet de remblayage de la plage avec les structures de transition.

D'après ce qui précède, la durée de demi-vie de la plage est faible (2 à 3 ans au maximum). Ceci est dû essentiellement à la longueur très faible (environ 300 m) de l'éventuel remblayage. Il est recommandé dans de pareils cas de construire des structures d'accompagnement dont le but principal est de limiter l'érosion due aux courants littoraux et prolonger ainsi la durée de vie du remblayage. Les conséquences directes seront essentiellement perçues au niveau du remblayage périodique futur de la plage. En construisant ces structures, la période de remblayage sera significativement augmentée contribuant à la réduction des coûts d'entretien périodique de la plage.

Plusieurs types de structures de transition entre la partie remblayée de la plage et la partie non remblayée peuvent être réalisés pour renforcer le projet de remblayage. Dans le cas de Préverenges, du fait que la partie sujette à remblayage est relativement étroite, des épis perpendiculaires à la rive délimitant le remblayage s'imposent.

Concernant la Venoge, il est probable que les courants littoraux, en régime de Vent, transportent les sédiments du lieu de remblayage pour les déposer plus à l'est dans les environs de son embouchure. Ce flux sédimentaire devrait être intercepté par la zone alluvionnaire qui de développe entre la rive et l'île aux oiseaux *(Fig. 13)*. Lors d'événements exceptionnels, des sédiments pourraient atteindre au maximum l'embouchure de la Venoge. Ainsi, l'épi à l'est du projet de remblayage (comme esquissé à la *Fig. 16*) jouera un double rôle dans la protection de la plage contre le flux migratoire vers l'est.

Dans le projet final de réalisation, la longueur des épis devra couvrir la totalité de la distance de remblayage. Une terminaison des épis en forme de L ou T peut être envisagée afin d'empêcher l'érosion due aux courants de retour.

4. Conclusions

L'étude de cas à Mörigen a montré la nécessité d'une post-analyse technique et détaillée lorsque les mesures ne sont pas nécessairement construites d'une façon optimale. Il apparaît dans ce cas d'étude qu'une amélioration de la configuration géométrique actuelle du champ des barrages à claire-voie existant est nécessaire pour optimiser leur effet de protection contre les vagues incidentes lors d'événements de Bise et de Joran. L'analyse a également montré la nécessité de construire les barrages à claire-voie de façon qu'ils restent émergeants quand le lac atteint son plus haut niveau.

Pour le cas de Préverenges, l'analyse historique a montré que les interventions d'origine anthropique ont eu un effet négatif sur la stabilité de la plage. Un projet de restauration doit prendre en compte la particularité de chaque région de la plage et adapter en conséquence la mesure de protection. En outre, une protection par remblayage dans le cas de Préverenges ne sera efficace qu'à condition qu'elle soit délimitée pas des épis perpendiculaires à la rive qui prolongeront la durée de vie du projet de remblayage et réduiront ainsi les apports périodiques supplémentaires.

Bibliographie

BFH (2005). «Basic principles and methods of field measurements, analysis of wind, wave, bathymetry and sediment data.», Berner Fachhochschule, Burgdorf.

Booij, N., Holthuijsen, L. H., and *Ris, R. C.* (1996) «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.

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

LCH (2004). «Erosion de la plage de Préverenges (VD) sur la rive Nord du Léman; Concepts de protection – Recherche et analyse de solutions.» 10–04 (non-publié), Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH) – Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

Müller, B., Sayah, S. M., Wyler, E., and *Schmoker, P.* (2005) «Shore protection in Swiss Lakes: Physical modelling and in-situ measurements.» Waves 2005, Madrid, Spain, 34–45.

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.* (2005) «Analysis and rehabilitation of a severely eroded sand beach at Lake Geneva in Switzerland.» 3rd International Conference on Asian and Pacific Coasts, Jeju, Korea, 713–728.

Trenhaile, A. S. (1997). Coastal Dynamics and Landforms, Clarendon Press-Oxford.

Remerciements

Le projet de recherche Erosee a été financièrement soutenu par l'Agence pour la promotion de l'innovation (CTI) 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), l'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.