

Expertise **hydraulique** d'un projet lacustre

PAYSAGE

Dans la phase d'étude de la création de plages et de l'agrandissement de l'adjacent Port de la Nautique sur le Léman à Genève, la complémentarité des modèles numérique et physique a permis de converger vers une solution optimale pour cet aménagement complexe.

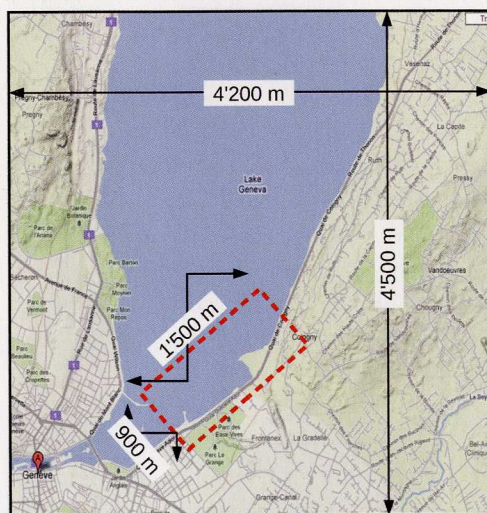
La création d'une plage sur le tronçon du quai Gustave-Ador compris entre la jetée des Eaux-Vives et le Port de la Nautique est l'élément central d'un aménagement à buts multiples, qui inclut l'agrandissement du port et de Genève-Plage au nord. Les problématiques hydrauliques du projet sont de nature sécuritaire et environnementale. Elles concernent en particulier le taux de renouvellement de l'eau des plages en été, l'aménagement durable des plages sous l'effet des vagues et des courants ainsi que la circulation de l'eau dans l'enceinte du port. L'étude hydraulique comprend la simulation de situations critiques en s'appuyant sur les données météorologiques (vitesse et direction du vent) ainsi que sur le débit du Rhône à la sortie du lac et les variations de niveau du plan d'eau.

Régulation du lac et sollicitations atmosphériques

La régularisation du niveau du Léman à Genève est opérée au barrage du Seujet, en vertu d'un règlement international datant de 1997. De janvier à avril, le niveau est abaissé progressivement jusqu'à 371,70 ms.m. En mai, il remonte à son niveau normal (372,30 ms.m.) qui est maintenu de juin à décembre. Les années bissextiles, le lac est abaissé à 371,50 ms.m. du 15 mars au 15 avril, pour permettre des travaux d'entretien des rives. Le débit minimum restitué dans le Rhône en aval du barrage du Seujet ne doit pas être inférieur à 50 m³/s pour autant qu'il n'interfère pas avec la régularisation du niveau du Léman ou avec l'évacuation des crues de l'Arve, affluent du Rhône en aval. Le débit maximum évacué par le barrage est fixé à 550 m³/s, sauf durant les périodes exceptionnelles de hautes eaux.

La vitesse et la direction du vent dans la rade de Genève ont été définies en corrélation avec les données mesurées

- ¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.
- ² Distance sur laquelle l'action du vent s'exerce sur un plan d'eau, depuis la terre jusqu'au point d'impact. En régime de bise à Genève, le fetch s'étend sur 30 km environ entre Allaman et Genève.



— Limites du petit modèle
- - - Limites du grand modèle

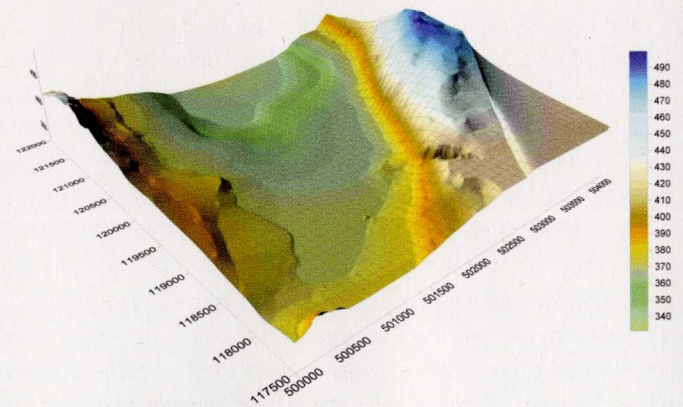


Fig. 1 : Zone d'étude. A gauche : limites des modèles à grande et petite échelle.
A droite : bathymétrie 3D du modèle à grande échelle

Tab. A : Vagues caractéristiques de bise utilisées pour les simulations

Tab. B : Diamètres critiques moyens des sédiments de plages, pour des sollicitations de périodes de retour de bise T=1, 20 et 100 ans

toutes les dix minutes à la station météorologique de Genève-Cointrin [1]¹. La rose des vents, établie sur une période de 25 ans (de 1979 à 2005) souligne les deux régimes dominants de la région genevoise, à savoir le vent provenant du sud-ouest et la bise du nord-ouest. Toutefois, les directions du vent mesurées sur le lac diffèrent de 30° environ de celles mesurées à Cointrin [2]. De plus, l'intensité du vent dans la rade est inférieure de 5 à 12%. Ainsi, la direction de la bise déterminante pour la zone de projet a été admise à 30° nord, celle du vent à 250° nord. L'orientation de la bise est parfois plus proche du nord, raison pour laquelle une condition à 5° nord a également été examinée.

L'action du vent à la surface du lac génère des vagues dont les caractéristiques en grande profondeur ont été calculées par la méthode de Jonswap [3][4]. C'est sous l'action de la bise que les courants et vagues sont les plus importants en raison du fetch² disponible à la surface du lac (tab. A).

Modèles numériques

La simulation numérique a été réalisée avec le logiciel Mike 21 [5], qui dispose de plusieurs modules hydrodynamiques pour la génération des vagues ainsi que de modules spécifiques pour le transport de sédiments et l'érosion du fond. Il est parfaitement adapté à la simulation des phénomènes associés aux constructions côtières. La modélisation a été effectuée sur deux modèles emboîtés, à grande et à petite échelle (fig. 1). Le grand modèle couvre une surface de 4,2x4,5 km² et fournit les conditions d'entrée au petit modèle dont l'objectif se focalise sur la circulation de l'eau et l'évaluation des mécanismes sédimentaires dans le port et sur les plages. La topographie est issue du modèle numérique de terrain MNT25 de SwissTopo. Des levés bathymétriques plus détaillés de la zone riveraine ont été introduits dans le modèle à petite échelle qui couvre une superficie de 0,9x1,5 km².

Courantologie et renouvellement de l'eau

Différentes sollicitations de la zone d'étude ont été examinées afin de considérer les deux régimes de vent dominants et une gamme de débits du Rhône. Le champ de courants simulé pour une bise de récurrence centennale sans soutirage du Rhône met bien en évidence les zones de circulation le long des rives et autour du port (fig. 2 à gauche). L'orientation des courants, indiquée par les flèches, montre que la bise génère un important déplacement de masses d'eau qui se développe sur les deux rives pour arriver en cul de sac à Genève, où elles n'ont d'autre alternative que de s'en retourner par la zone centrale du lac. Les couleurs rouge, jaune et vert, représentatives des gammes de vitesse les plus élevées, mettent bien

| Période de retour de bise T (années) | Vitesse de bise V (m/s) | Persistance de bise t (heures) | Hauteur de vague H (m) | Période de vague T (sec) |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | 10,0 | 5 | 0,88 | 4,2 |
| 20 | 14,3 | 4 | 1,27 | 4,7 |
| 100 | 16,8 | 4 | 1,49 | 5,0 |

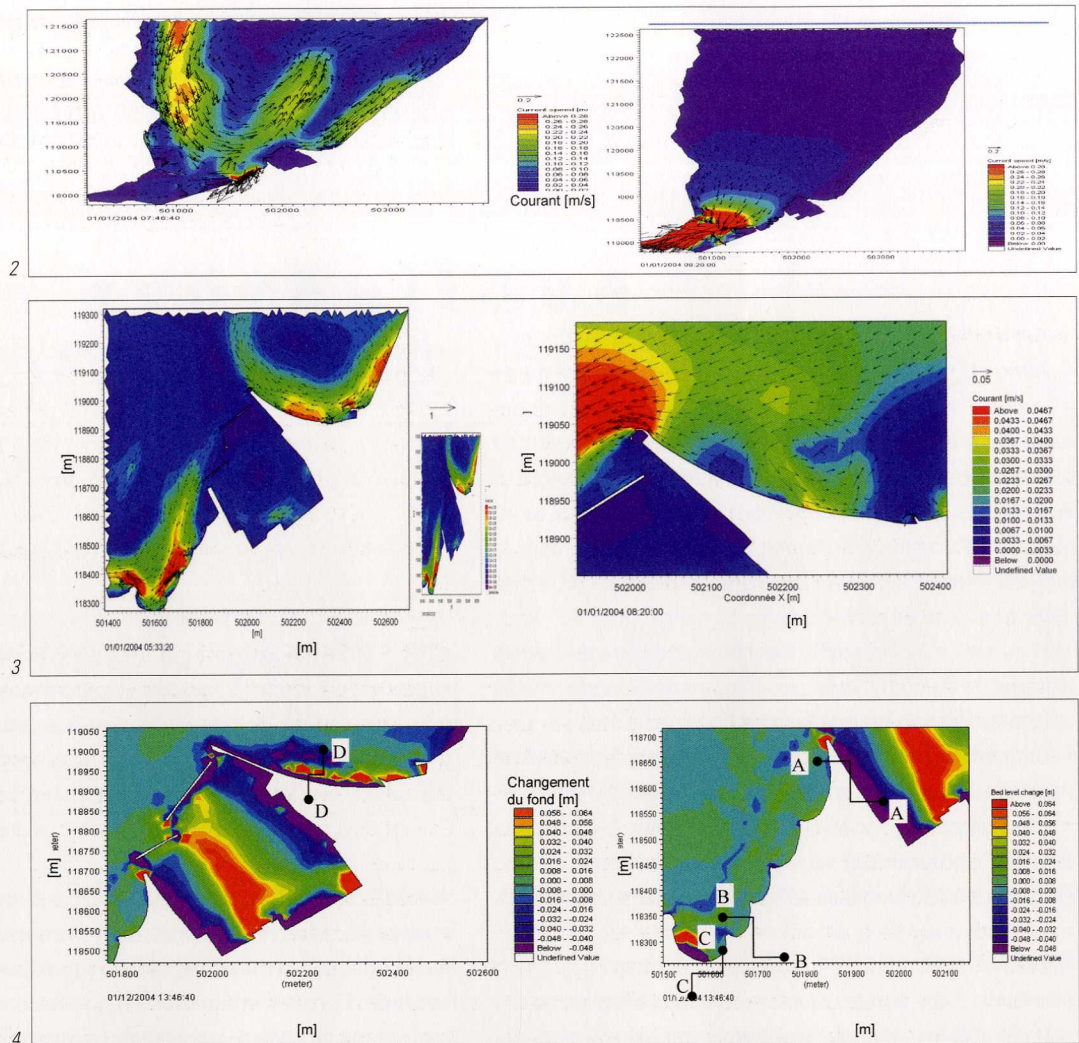
| Période de retour de bise T (années) | Diamètre critique des sédiments [mm] | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | Plage sud (A-A) | Plage sud (B-B) | Plage sud (C-C) | Plage nord (D-D) |
| 1 | 8,3 | 6,5 | 11,5 | 11,6 |
| 20 | 6,1 | 8,9 | 14,5 | 17,6 |
| 100 | 6,8 | 8,1 | 14,8 | 20,2 |

en évidence les couloirs de circulation. Sous régime de bise, la zone de la future plage des Eaux-Vives est particulièrement exposée aux courants, qui atteignent des vitesses de l'ordre de 35 cm/s à cet endroit. Cette situation particulière justifie l'implantation d'épis pour lutter contre l'érosion de la berge. Lorsqu'un débit du Rhône est soutiré au barrage du Seujet, il exerce une influence significative à l'extrémité aval du lac, la rade de Genève fonctionnant comme un entonnoir. Cet impact s'atténue rapidement au-delà du goulet d'étranglement formé par les jetées des quais Gustave Ador et des Pâquis (fig. 2 à droite). La progression des couleurs, du bleu au rouge, indique clairement la répartition du flux qui n'a que peu d'influence sur la zone de projet.

L'agrandissement du port influence l'intensité des courants dans la zone de Genève-Plage, sur la plage des Eaux-Vives et à l'intérieur même du port (fig. 3 à gauche). A ce dernier endroit, la circulation de l'eau se maintient dans toute la zone protégée, avec des vitesses maximales de 22 cm/s en régime de bise, respectivement 19 cm/s en situation de vent, pour la période de retour de 100 ans. Devant Genève-Plage, le renouvellement de l'eau de baignade est le plus critique en période estivale, lorsqu'il n'y a pas de vent. Dans ce cas, c'est le soutirage du Rhône qui est déterminant, garantissant une période de renouvellement de l'ordre de trois heures pour un soutirage du Rhône de 250 m³/s. Les vitesses de circulation, mises en évidence par les flèches et couleurs de la figure 4 (à droite), sont alors de 2 cm/s en moyenne, soit le double de la situation actuelle.

Propagation et atténuation des vagues

A l'approche de la région côtière, la propagation des vagues générées en zones profondes est soumise à des défor-



mations. Il y a tout d'abord la réfraction, qui tend à rendre les vagues parallèles aux courbes de niveaux sous l'influence de la proximité du fond. Il y a ensuite la diffraction, qui provoque une rotation des crêtes et une réduction de l'amplitude de la houle autour des obstacles tels que les musoirs de digues.

Ces processus caractéristiques de la propagation des vagues ont été simulés pour différentes conditions de vent sur le modèle à petite échelle, aussi bien pour l'état actuel que dans la situation de projet. Les résultats obtenus pour des régimes de bise et de vent de période de retour de 100 ans donnent une vue instantanée du champ de vagues et de la diffraction aux entrées du port (fig. 5 en haut) ainsi que les hauteurs d'ondes atteintes localement à l'intérieur (fig. 5 en bas). Pour ces simulations, des facteurs d'absorption différenciés ont été attribués aux digues en enrochements, aux murs en béton et aux parois macro-rugueuses. Les résultats obtenus avec ces différents types de texture confirment l'importance de ce paramètre pour les choix constructifs des éléments d'enceinte.

Parmi les configurations testées, c'est la solution de fermeture nord avec trois digues qui offre la meilleure protection du port en situation de bise. La digue nord et son musoir empêchent efficacement les vagues diffractées d'entrer dans le port. Par régime de vent centennal, l'extrémité nord des pontons d'amarrage est exposée à des vagues n'excédant

pas 16 cm dans la configuration optimisée. La légende des couleurs de la figure 5 (en bas) permet de quantifier la transition brusque des hauteurs de vagues entre l'extérieur et l'intérieur du port. Cette solution améliore significativement la situation actuelle où l'entrée ouest du port est ouverte aux sollicitations du vent, avec une agitation importante dans la partie nord du port.

Le transport sédimentaire

La simulation du mouvement sédimentaire a été effectuée avec des grains uniformes non cohésifs de 0,1 mm de diamètre à l'intérieur du port et de 0,8 mm le long des plages. Les résultats obtenus pour une Bise de période de retour $T=5$ ans sur une durée de douze jours sont présentés sur la figure 4. Ils mettent en évidence les zones d'érosion et d'accrétion, en particulier un dépôt d'environ 6 cm au milieu du port et une érosion de 5 cm au pied des digues.

A partir des résultats numériques, la vitesse maximale générée sur le fond a été calculée selon la théorie des vagues de faible amplitude [5][6]. Le diamètre critique de mise en mouvement des sédiments associé à ces vitesses a ensuite été défini dans quatre coupes représentatives (A-A à D-D, fig. 4), selon une approche empirique [7][8]. Les résultats obtenus pour trois différentes périodes de retour figurent dans le tableau B.

Modélisation physique

La modélisation physique a été réalisée dans un bassin à houle couvrant la même superficie, de 0,9x1,5 km², que le modèle numérique à petite échelle (fig. 1 à gauche). Le modèle physique devait notamment confirmer les résultats numériques concernant l'agitation dans le port et les processus de transport sédimentaire le long des plages. Il a aussi et surtout servi à optimiser les éléments sensibles du projet tels que digues, jetées et épis.

Installation expérimentale

Le modèle physique de la zone de projet a été réalisé au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL. Les zones de plages et le port ont été reproduits dans la configuration projetée, à une échelle géométrique de 1/150 pour les distances horizontales et 1/75 pour les hauteurs (fig. 7 à gauche). La distorsion d'échelle était nécessaire pour pouvoir générer des vagues d'amplitude mesurable sur le modèle. Cette astuce expérimentale, courante en hydraulique côtière, est tout à fait acceptable compte tenu du fait que les particules d'eau ont des accélérations verticales faibles dans le cas des vagues à grande longueur d'onde [3] [8].

Le bassin à houle (10 m de longueur, 6 m de largeur et 1,3 m de profondeur) est équipé d'un générateur pneumatique pour la production de vagues unidirectionnelles et uniformes. La crête des vagues générées est toujours parallèle à la largeur du bassin, raison pour laquelle le modèle a été orienté à 30° nord-est pour être soumis aux vagues de bise. La hauteur et la fréquence des vagues correspondent à celles des situations simulées numériquement, dans le respect des lois de similitude hydraulique. Une pompe immergée a été installée à l'extrémité aval du bassin pour reproduire les conditions de soutirage du débit du Rhône et les courants associés.

Le fond du lac était constitué de sable de quartz à granulométrie comprise entre 0,1 et 0,3 mm, dont la taille moyenne de 0,27 mm correspond au diamètre critique de mise en mouvement des sables [3].

Agitation à l'intérieur du port

Les vagues générées sur le modèle physique sont de forme sinusoïdale et de hauteur, période et directions constantes. A l'intérieur du port, les vagues subissent des variations irrégulières dont la description ne peut être que statistique. La méthode d'analyse spectrale des niveaux d'eau, mesurés par des sondes à ultrasons en plusieurs points représentatifs, a de ce fait été utilisée pour évaluer l'agitation significative dans le port [6].

Fig. 2 : Champ de courants sur le modèle à grande échelle. A gauche : régime de période de retour de bise T=100 ans. A droite : débit du Rhône de 550 m³/s

Fig. 3 : Champ de courants sur le modèle à petite échelle. A gauche : régime de période de retour de bise T=100 ans. A droite : débit du Rhône de 250 m³/s

Fig. 4 : Modifications du fond du lac sous l'effet d'une bise quinquennale de douze jours. A gauche : zone de Genève-Plage et du port. A droite : zone de plage des Eaux-Vives

Fig. 5 : Champs de vagues sur le modèle à petite échelle. En haut : vue instantanée. En bas : hauteurs d'ondes. A gauche : régime de bise T=100 ans. A droite : régime de vent T=100 ans

Différentes configurations de digues et d'aménagement des plages ont été testées faisant intervenir des enrochements, des parois en béton sur pieux et différentes textures de parois. Les hauteurs de vagues mesurées montrent une bonne cohérence avec la simulation numérique, en particulier pour T=100 ans. Les écarts les plus importants, relevés pour la période de retour T=20 ans, ne dépassent pas 5 à 6 cm.

Erosion des plages et mesures de stabilisation

L'évolution morphologique des plages a été examinée pour des vagues de bise de période de retour T=20 ans d'une durée de trois heures. Le fond initial des plages présentait une pente constante et les mouvements sédimentaires étaient documentés à la fin de chaque essai par le relevé des lignes de niveaux et des photos.

Les résultats montrent que la zone de Genève-Plage est soumise à de fortes sollicitations de courants et de vagues, qui induisent un transport sédimentaire le long de la digue nord. Ces contraintes imposent le choix d'une granulométrie de remblayage adéquate ainsi que l'aménagement d'un brise-lame immergé et d'un épi transversal pour s'opposer au transit sédimentaire. Sur la plage des Eaux-Vives, les mesures de stabilisation consistent également en un brise-lame immergé, parallèle à la ligne de rive, complété par des épis transversaux partiellement immergés. Plusieurs configurations d'épis ont été testées sur le modèle physique (fig. 6).

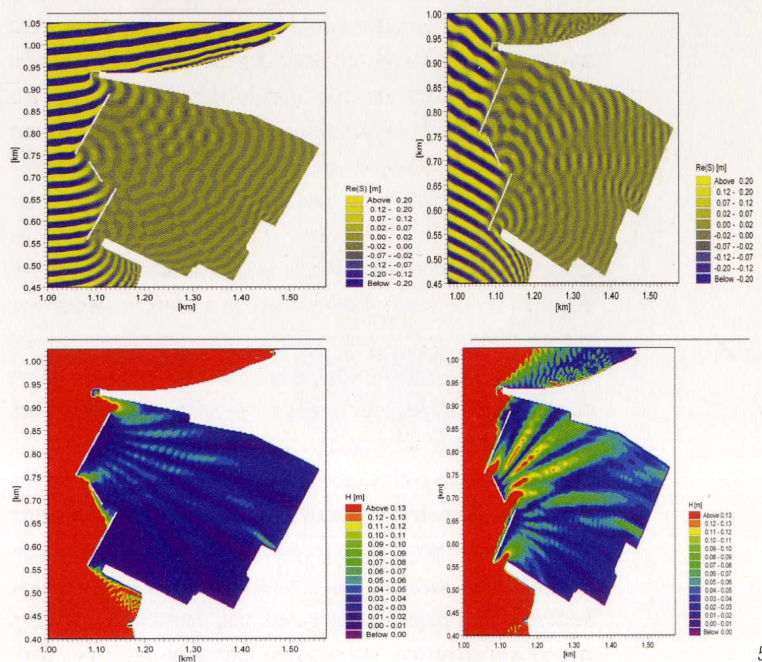


Fig. 6 : Cinq différentes configurations d'épis testées sur le modèle physique, pour la stabilisation de la plage des Eaux-Vives

Fig. 7 : Modèle physique. A gauche : vue de la zone du projet depuis l'aval. A droite : morphologie de la plage des Eaux-Vives avec quatre épis à 30 degrés sud, produite par des vagues bise de période de retour $T=20$ ans

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)



C'est finalement une variante avec quatre épis uniformément espacés, inclinés de 30° en direction sud, qui s'est révélée la plus intéressante, tant pour sa stabilité que son intégration paysagère (fig. 7 à droite, fig. 6 tout à droite). A l'extrémité sud de la plage des Eaux-Vives, la petite anse de Baby-Plage se trouve dans une situation comparable à Genève-Plage, avec une érosion forte requérant une granulométrie grossière ou une recharge périodique de sable, comme c'est actuellement le cas.

Un projet fonctionnel, séduisant et réaliste

A l'extrémité sud-ouest du Léman, la zone moins profonde du Petit Lac est soumise à de nombreuses contraintes sous les actions conjuguées du vent, des vagues et des débits du Rhône contrôlés au barrage de régulation du Seujet. L'aménagement à buts multiples projeté à cet endroit répond aux besoins des usagers, promeneurs, navigateurs et baigneurs. Il est adapté aussi bien aux fortes qu'aux faibles sollicitations.

Face à la complexité de la situation, la complémentarité des modélisations physique et numérique s'est révélée d'une grande efficacité pour converger vers la solution retenue. La modélisation numérique a été mise à profit pour orienter l'évolution interactive du projet. Ainsi la digue nord du port a été modifiée de manière à améliorer le renouvellement de l'eau en période calme devant Genève-Plage tout en protégeant le port contre les vagues de bise. Les simulations ont également permis d'ajuster progressivement les trois ouvertures d'entrée ouest de manière à obtenir une bonne protection contre les vagues de vent, réduisant leur amplitude d'un tiers en comparaison de la situation actuelle.

Après validation de la cohérence des simulations numériques et des mesures et observations effectuées sur le modèle physique, ce dernier a été utilisé pour tester les mesures d'aménagement des rives. Différents appareillages de briselames immergés et d'épis ont été soumis à des tests comparatifs jusqu'à obtenir la configuration optimale pour la stabilité des plages. De même, des essais avec caissons sur pieux à l'entrée ouest du port ont permis de suppléer aux limites de la modélisation numérique 2D sur ce point.

Malgré la finesse des modèles, ceux-ci reposent toutefois sur certaines simplifications. Les résultats quantitatifs obtenus doivent de ce fait être interprétés au travers d'une analyse comparative et qualitative. Différents aspects doivent ainsi encore être affinés au stade du projet d'exécution, en particulier la composition granulométrique des plages, la texture des parois du port ou encore l'ouverture de golérons dans les jetées ou dans les digues du port. Ces singularités ne remettent pas en cause le plan masse du projet, elles auront cependant des influences positives sur son fonctionnement opérationnel.

Jean-Louis Boillat, ing. civil EPFL
Fadi Hachem, ing. civil (Liban), MAS in Engineering and Water Resources Management EPFL
Azin Amini, ing. civil (Iran), dr EPFL
Robin Amacher, ing. science et génie des matériaux EPFL, architecte naval
Laboratoire de Constructions Hydrauliques EPFL-ENAC-IIC-LCH
Bâtiment GC, Station 18, CH - 1015 Lausanne

Références bibliographiques

- [1] Météo Suisse : Office fédéral de météorologie et de climatologie
- [2] BRUSCHIN, J., SCHNEITER, L. (1978), « Caractéristiques des vagues dans les lacs profonds, vagues de bise sur le Léman (Petit Lac), campagne de mesures 1974-1978 », in *Bulletin technique de la Suisse romande* n° 19/1978
- [3] KAMPHUIS, J. W. (2000), *Introduction to Coastal Engineering and Management. Advanced Series on Ocean Engineering*, volume 16, World Scientific
- [4] BOILLAT J.-L., SAYAH S., SCHLEISS A. (2006), « Approche méthodologique pour l'établissement d'un projet de protection de rives lacustres », in *Wasser Energie Luft*, Heft n° 4, décembre, 304-312
- [5] U.S. Army, Coastal Engineering Research Center (1973), *Shore Protection Manual*, volume I, second edition, <www.archive.org/details/shoreprotectionm01coas>
- [6] BONNEVILLE, R. (1992), *Cours d'hydraulique maritime*, Masson, 1992
- [7] HANSON, H., CAMENEN, B. (2007), « Closed form solution for threshold velocity for initiation of sediment motion under waves », *Coastal Sediments Conf.*, New Orleans, Louisiana, USA, 15-28
- [8] HACHEM, F., AMINI, A., BOILLAT, J.-L. (2010), « Physical and numerical modeling of harbors and shore protection measures », *SimHydro 2010 Conference*, Sophia-Antipolis, Nice, France