

Projet de Master

Evaluation de l'énergie induite par les vagues et des contraintes à considérer pour le dimensionnement d'un débarcadère dédié à l'amarrage de la galère de La Liberté (Rolle/lac Léman)



ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

FACULTE DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

SECTION DE SCIENCE ET INGENIERIE DE L'ENVIRONNEMENT

LABORATOIRE DE CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES

Candidat : OTT Lucas
Professeur : DE CESARE Giovanni
Encadrant : AMINI Azin
Encadrant externe : LAVANCHY Jean-Marc

EPFL

Lausanne
Janvier 2021

LCH
PLATEFORME DE CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES

Résumé

La galère La Liberté, navire construit à Morges entre 1996 et 2001, s'est vu retirer son permis de navigation en 2017. Pour cause, l'absence notamment d'une installation à quai permettant l'embarquement et le débarquement de passagers. Initialement prévu à Rolle, l'accueil d'un débarcadère a finalement été rejeté par la commune, laissant la galère et son association seules sur le Léman. L'objectif de cette étude est donc de trouver un nouveau lieu susceptible d'accueillir un débarcadère, tout en proposant un prédimensionnement de celui-ci. Par le biais d'une comparaison multicritère, huit sites situés autour du Léman sont comparés, notés puis départagés. Parmi eux, un site en particulier est retenu pour une analyse des vagues et de la courantologie locales. A l'aide des vents d'une station météorologique à proximité et du logiciel MIKE, les vagues induites par les vents et la courantologie qui en découle pour différents temps de retour sont modélisées. Les résultats obtenus sur MIKE 21 montrent les hauteurs significatives, les périodes et les directions de vague modélisées pour un régime de vent particulier. Ils sont comparés à un projet étudiant les vagues sur différents lacs suisses. La vitesse et les directions des courants sur le fond du lac induisent une mise en mouvement des sédiments vaseux. À partir de ces résultats, un débarcadère est prédimensionné sans chenal d'accès et les forces exercées par la houle sont calculées. Son impact environnemental est finalement évalué. Cette étude permet d'établir une méthodologie pour le choix d'un site et l'évaluation des contraintes qu'un débarcadère subit.

Abstract

The galley La Liberté, built in Morges between 1996 and 2001 has seen its navigation license removed in 2017. The main reason was the lack of an installation allowing the passengers to move safely in and out the boat. Initially, a landing stage was considered in Rolle, but the municipality decided to give up the project, leaving the galley and its association alone on Lake Geneva. The main goal of this study is to find a new location that might welcome a landing stage and to provide a pre-sizing of it. Through a multicriteria analysis, eight locations are compared, and one is selected for further investigation. Using winds of a nearby meteorological station and the MIKE software, wind-induced waves and the resulting flows are computed for different return periods. Results computed under MIKE 21 show the significant wave heights, their periods and directions for a particular wind regime, such as flow velocities and directions at the bottom of the lake. They are compared with a study evaluating the waves on different swiss lakes, and the flow results show that the lake sediments are set in motion. From those results, a landing stage is pre-sized without an access channel and the wave stresses are calculated. Its environmental impact is finally evaluated. This study establishes a methodology for the choice of a location and the evaluation of different constraints on a landing stage

Remerciements

Par ces lignes, je remercie chaleureusement tous les collaborateurs du Laboratoire de Construction Hydraulique (LCH) de l'EPFL, ainsi que les personnes m'ayant accordé leur temps et leur soutien.

En particulier, le professeur Giovanni DE CESARE et Jean-Marc LAVANCHY de CSD Ingénieurs sans qui ce projet n'aurait pas vu le jour. Je tiens également à remercier Azin AMINI pour son encadrement et ses nombreux conseils. Je remercie également Bernard GRET, Patrick BUJARD et Alex BEAUVAL pour l'intérêt porté au projet et les précieuses informations partagées.

Finalement, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à ce projet d'une quelconque manière, ma famille, Charlotte et mes amis.

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract	ii
Remerciements	iii
1. Introduction.....	1
1.1. Problématique.....	1
1.2. Objectifs.....	1
1.3. Méthodologie	1
1.4. Liste des logiciels utilisés	2
2. Contexte théorique et revue littéraire.....	3
2.1. La galère La Liberté.....	3
2.2. Le lac Léman	3
2.3. Les vents sur le Léman.....	4
2.4. Les vagues.....	6
2.4.1. Théorie des vagues	6
2.4.2. Les vagues sur le Léman	8
2.5. Les courants et sédiments dans le Léman.....	10
2.6. Les berges du Léman	12
2.7. Etudes préliminaires.....	13
2.7.1. Etude de l'Association Lémanique galère La Liberté.....	13
2.7.2. Etude de CSD	13
2.7.3. Audit	13
2.7.4. Plan d'affaires	14
3. Comparaison multicritère	15
3.1. Inventaire des sollicitations du Léman.....	15
3.2. Détermination de solutions d'amarrage	16
3.3. Choix des lieux d'implantation	18
3.4. Analyse multicritère	27
4. Modélisation.....	30
4.1. Méthodologie.....	30
4.1.1. Données à disposition	30
4.1.2. Modélisation des vents	31
a. Transposition des vents.....	31
b. Courbes IDF	32
c. Méthode de JONSWAP	32

4.1.3.	Modélisation des vagues	33
a.	Génération de la bathymétrie	33
b.	Simulation.....	33
c.	Résultats	35
4.1.4.	Validation	35
4.1.5.	Courantologie.....	35
4.2.	Présentation et analyse des résultats	35
4.2.1.	Modélisation des vents	35
a.	Courbes IDF	36
b.	Méthode JONSWAP	37
4.2.2.	Modélisation des vagues	38
a.	Génération de la bathymétrie	38
b.	Simulation.....	40
c.	Résultats	40
4.2.3.	Validation	42
4.2.4.	Courantologie.....	44
5.	Prédimensionnement du débarcadère et notice d'impact.....	45
5.1.	Procédure	45
5.2.	Plans	46
5.3.	Calcul de la force exercée par la houle.....	49
5.4.	Notice d'impact environnemental	50
6.	Discussion.....	54
6.1.	Résultats	54
6.2.	Propositions d'amélioration	55
7.	Conclusion	56
	Liste des illustrations	57
	Bibliographie	59
	Annexes	62
A.	Inventaire des sollicitations – remarques	62
B.	Informations sur les barques naviguant sur le Léman	63
C.	Etude des lieux	64
D.	Courantologie.....	88
E.	Calcul de la comparaison multicritère.....	98
F.	Résultats modélisation pour T2 et T50	99
G.	Méthode de Goda	103

1. Introduction

1.1. Problématique

La galère La Liberté est une réplique de galère méditerranéenne du XVIIème siècle. Gérée par une association à but non lucratif composée de bénévoles (Association Lémanique Galère La Liberté), elle s'est vu retirer son permis de navigation avec passagers sur les eaux du Léman en 2017. Une des conditions pour que La Liberté puisse à nouveau naviguer est la création d'un ponton lui permettant de stationner à quai à l'année. Initialement, un débarcadère avait été prévu à Rolle et une étude des contraintes du lac sur ce ponton était envisagée. Cependant, la commune ayant refusé l'amarrage de la galère sur son territoire, il faut aujourd'hui lui trouver un nouvel emplacement.

Ce projet de master est co-encadré par le laboratoire de constructions hydrauliques (LCH) de l'EPFL et le bureau CSD Ingénieurs SA en la personne de Jean-Marc Lavanchy, président de l'association de la galère.

1.2. Objectifs

L'objectif de ce projet de master est de trouver un nouvel emplacement destiné à l'accueil d'un débarcadère et de proposer un prédimensionnement pour ce dernier. Pour donner suite à une première phase de recherche de sites, un lieu en particulier sera sélectionné. Les vagues et la courantologie locales seront ensuite modélisées. Un débarcadère sera alors prédimensionné et la force exercée par la houle calculée. Enfin, l'impact environnemental induit par le débarcadère sera étudié.

1.3. Méthodologie

La première partie du projet consistera à recenser les connaissances sur la galère La Liberté ainsi que sur les phénomènes physiques du Léman. Cette partie se basera essentiellement sur la littérature. Elle permettra également d'établir des bases utiles pour la modélisation effectuée lors de l'analyse approfondie du lieu défini. Ensuite, un passage en revue des études déjà menées sur la galère amènera une meilleure compréhension du contexte dans lequel elle s'inscrit, des enjeux auxquels elle doit faire face et des sollicitations qu'elle subit. Ces études examinaient par ailleurs la faisabilité de la construction d'un débarcadère sur différents sites. Dans ce projet, le choix des lieux susceptibles d'accueillir la galère repose en partie sur ces recherches. Dans un deuxième temps, un inventaire des sollicitations les plus importantes pour la création d'un ponton sera effectué, et des lieux pouvant accueillir la galère seront présélectionnés. Les différents sites sélectionnés seront comparés lors d'une analyse multicritère qui amènera au choix du lieu le plus adapté pour accueillir La Liberté. Celui-ci fera l'objet d'investigations supplémentaires dans la troisième partie du projet. Dans cette dernière, une première étape de modélisation des vents et des vagues à l'aide du produit MIKE 21 permettra d'évaluer le comportement local du lac pour plusieurs temps de retour. La courantologie sur site sera aussi modélisée. Une méthodologie plus détaillée sera introduite à ce moment-là. Une fois les paramètres modélisés, le débarcadère sera prédimensionné, et la force exercée par la houle déterminée. Une notice d'impact environnemental sera finalement établie. Chaque partie susmentionnée sera reprise dans une dernière section discussion avant la conclusion du rapport.

1.4. Liste des logiciels utilisés

Durant ce projet, plusieurs logiciels ont aidé à l'élaboration de résultats. Le Tableau 1 liste ces logiciels, leur utilisation et leur référence.

Tableau 1: Liste des logiciels utilisés tout au long du projet.

Logiciel	Utilisation	Référence
Matlab	Traitement des données anémométriques et bathymétriques. Calculs méthode de Goda et JONSWAP	Matlab. version 9.9.0.1524771 (R2020b) Update 2. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
TeREsA	Courbes Intensité-durée-fréquence (IDF)	TeREsA, 2016. <i>Version 1.0.1.0</i> . Centre de recherche sur l'environnement alpin
MIKE Zero	Maillage, bathymétrie, résultats	MIKE Powered by DHI. Copyright 2009
MIKE 21	Modélisation vagues et courantologie	
Inkscape	Plans débarcadère	Inkscape, 2020. Version 1.0.1. Projet Inkscape
QGIS	Cartes non référencées, plans de situation	QGIS.org (2021). QGIS Geographic Information System. QGIS Association

Le logiciel choisi pour la partie consacrée à la modélisation est MIKE. Sur la base de la comparaison entre plusieurs logiciels de calculs établie par Oriez (2011), MIKE présente plusieurs avantages, dont celui d'être accessible partout et en tout temps via une machine virtuelle installée sur un ordinateur du LCH. MIKE est un logiciel composé de plusieurs produits développés par des professionnels de l'eau au Danish Hydraulic Institute (DHI) permettant de gérer des problèmes liés à l'eau.

2. Contexte théorique et revue littéraire

2.1. La galère La Liberté

Aujourd'hui ancrée au large de Morges, la galère La Liberté attend patiemment son retour à la navigation. Basée sur les plans de plusieurs galères retrouvés dans les archives du musée de la Marine à Paris, La Liberté ne prétend pas reproduire de navire en particulier, mais représente l'histoire du Léman. En effet, des galères de ce type naviguaient sur le lac dès le XIII^{ème} siècle, et ce jusqu'au XV^{ème} siècle marqué par l'apparition de barques plus larges et plus pratiques pour le transport (Lavanchy, J.-M., interview, 2020). A titre de comparaison, la galère mesure 57 m de long, alors que les plus grands navires de la flotte de la compagnie générale de navigation (CGN) mesurent entre 70 et 80 m (CGN, 2020).

Construite dans les années 1990, la galère La Liberté a permis à environ 650 demandeurs d'emploi de « retrouver du job, leur dignité » (Lavanchy J.-M., couleurs locales, 2020). En 2001, l'aboutissement de 5 années de travail prend forme avec la mise à l'eau de la galère devant 40'000 personnes réunies à Morges. Dès 2002, l'exploitation de la galère démarre. Lors de croisières publiques avec restauration, affrètements ou croisières privées, ce sont environ 120'000 personnes qui vont se succéder à bord de La Liberté jusqu'en 2017. En effet, par manque de fond la galère n'a pas pu se présenter à l'expertise requise par le service de la navigation et s'est vu retirer son permis de naviguer avec des passagers autres qu'un équipage expérimenté. Faisant suite à un audit en 2017, l'association en charge de la galère a depuis vécu beaucoup de changements, et une prise en main plus professionnelle a permis au navire de pouvoir à nouveau envisager un avenir sur le Léman. C'est dans cette optique qu'a eu lieu une opération de grande envergure en août 2020, où la galère a pu être mise en cale sèche à l'aide de ballons gonflables, afin de réviser la partie immergée de la coque. Dès lors, de nouveaux travaux ont été envisagés, dont notamment la construction d'un nouveau pont et la révision du grand mât. Toutefois, si la galère veut continuer à écrire son histoire, il faut absolument lui trouver une attache. Selon un plan d'affaire établi en février 2020, l'établissement d'un point d'accès permanent permettrait à la galère de développer et de démultiplier ses activités à moindre coûts (CEVADE, 2020).

La galère suscite aujourd'hui encore l'engouement populaire et a pour projet de s'intégrer dans un programme de tourisme vert en permettant aux gens de porter un regard nouveau sur la région lémanique. Des croisières didactiques sur la géologie du Jura sont envisagées, et en août et septembre 2020, des tournages ont eu lieu sur la galère, avec un clip musical (artiste du nom de *Selenn*) et une vidéo d'adeptes du parkour (groupe du nom de *from a2u*).

Toutefois, il faut se méfier d'un projet d'une telle envergure. Bien qu'elle attire le soutien du plus grand nombre, La Liberté a aussi ses détracteurs qui lui reprochent surtout son côté non traditionnel, notamment à cause des voiles qu'elle utilise. Heureusement, ces puristes sont une minorité et il faut rappeler que la galère apportera une plus-value touristique à la région de la Côte non négligeable qui satisfera le plus grand nombre (Lavanchy J.-M., interview, 2020 ; CEVADE, 2020). En décembre 2020 paraissait un article dans le journal de Morges rappelant à quel point la galère est chère au cœur des Morgiens et à quel point ces derniers aimeraient la revoir naviguer (Hofmann, 2020).

2.2. Le lac Léman

Le Léman, avec ses 582 km² de surface, est la plus grande étendue d'eau douce d'Europe. Situé à l'Ouest de la Suisse à cheval sur la frontière française, le lac présente la caractéristique d'être séparé en deux bassins : le Grand lac et le Petit lac (Figure 1). La ligne de séparation entre les deux est située sur l'axe Yvoire / Nyon, avec le Grand lac à l'Est, et le Petit lac à l'Ouest (OFEFP, 1994). La profondeur maximale est de 309 m, et le niveau d'eau varie de 60 à 80 cm autour de l'altitude 372.05 m (Girardclos, 2001).

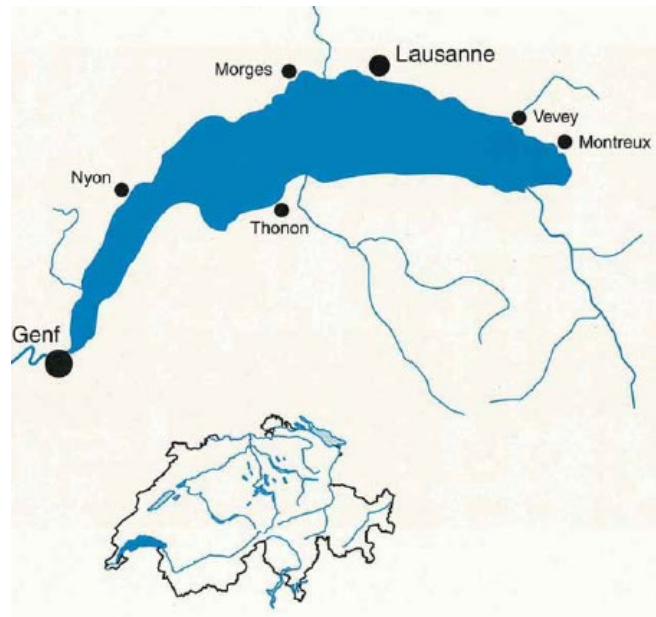


Figure 1: Situation du lac Léman (source : OFEFP, 1994)

Comme la galère La Liberté doit trouver un point d’ancrage sur les rives du Léman, il est primordial de connaître le comportement du lac dans sa zone littorale pour déterminer quelles sollicitations le lac soumettra à ce point d’ancrage. Or, comme le résume Razmi (2014) les mouvements d’eau près de la côte sont majoritairement influencés par la morphologie du rivage, les courants, la force des vents et les affluents locaux. Ainsi, peu importe le lieu qui sera déterminé, il faudra au moins considérer ces facteurs comme sollicitations physiques venant du lac.

Cependant, il est important de noter que ces facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres, ils s’influencent. Le lac Léman est un système dynamique. Par exemple, un vent fort créant des vagues sur un plan d’eau verra ces dernières augmenter la rugosité de la surface, ce qui en retour ralentira l’intensité du vent (Diebold & Heller, 2017).

2.3. Les vents sur le Léman

Le Léman est entouré de montagnes, et cette topographie particulière influence grandement le champ de vent, qui peut varier considérablement d’un endroit à l’autre autour du lac (Amini et al., 2017). C’est en se basant sur ces considérations qu’a été développé un atlas de vagues accessible gratuitement en ligne, dans lequel on trouve notamment les informations sur la rose des vents des stations de mesure du réseau SWISSMETNET (Amini et al., 2017). Le champ de vent utilisé pour cette étude est dérivé du modèle COSMO-2, fourni par Meteosuisse avec une faible résolution permettant de prendre en compte cette topographie particulière.

Sur la base des roses des vents des stations de Pully et Nyon (Figure 2), trois régimes de vents dominants peuvent être déterminés sur la côte Nord du Léman : La Bise (vent du NE), le Joran (vent du NO) et le Vent (vent du SO).

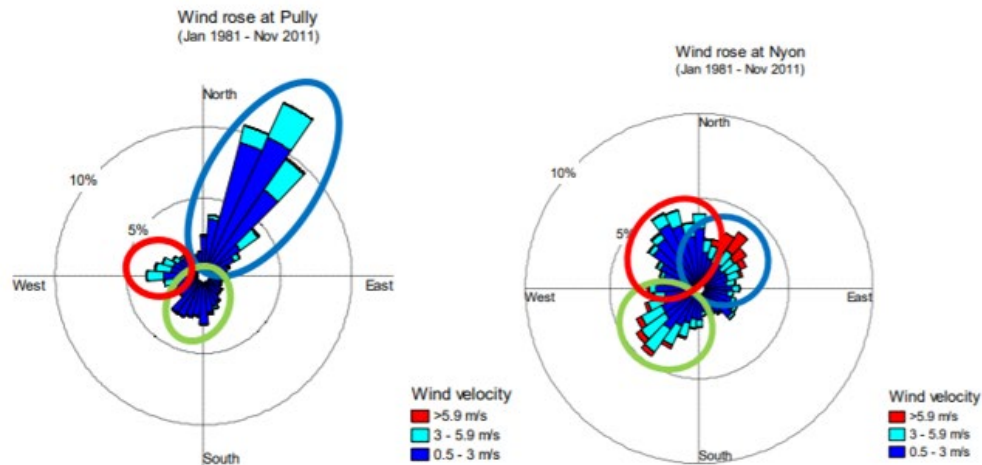


Figure 2: Roses des vents des stations de Pully (gauche) et Nyon (droite) (source : www.swisslakes.net)

Du côté de Pully, c'est la Bise qui domine, alors qu'à Nyon, les vents sont plus uniformément répartis et la Bise atteint fréquemment des vitesses de plus de 5.9 m/s. À ces vents viennent s'ajouter la Vaudaire, vent de l'Est, qui n'est pas ressenti à ces deux stations. Finalement, des épisodes de Foehn (vent du SE) peuvent aussi avoir lieu à l'embouchure du Rhône au Bouveret.

Lors de l'étude des sollicitations du lac sur la galère, l'accent ne doit pas être simplement mis sur l'état des phénomènes en jeu, mais surtout sur les événements extrêmes qu'ils peuvent induire. Dans le cas des vents, il est intéressant de voir si des vents extrêmes tels qu'enregistrés dans le Tableau 2 ont donné lieu à des vagues de hauteur élevée ou non.

Tableau 2: Vents extrêmes sur le Léman (source : Jeanneret, 2015)

Vent	Pointe [km/h]	Lieu	Année
Tempête Lothar	126	St-Prex	1999
Bise	90	St-Prex	2010
Bise	110	Mont-sur-Lausanne	1972
Joran	113	Nyon	2009
Vents d'orage	160	Bouveret	2005

Des vents comme la Bise ou le Joran ont déjà eu des valeurs se rapprochant de vents extrêmes lors de tempêtes comme Lothar. Cependant, tous les vents extrêmes ne donnent pas lieu à des événements de vagues importantes. Comme le souligne Jeanneret (2015), la force et la distance sur laquelle souffle un vent ne sont pas les seuls facteurs importants, la durée du vent compte tout autant dans la formation de vagues. Ainsi dans la majeure partie des cas, les vents d'orage comme le Joran s'accompagnent rarement de hautes vagues. En effet, selon les témoignages récoltés sur le Léman (Jeanneret, 2015), ce sont plutôt les vents d'Ouest comme le Vent qui induisent les vagues les plus hautes.

2.4. Les vagues

2.4.1. Théorie des vagues

Les vagues peuvent être définies comme un ensemble d'ondulations appelé la houle caractérisée par différents paramètres (Figure 3) (Bonnefille, 1992).

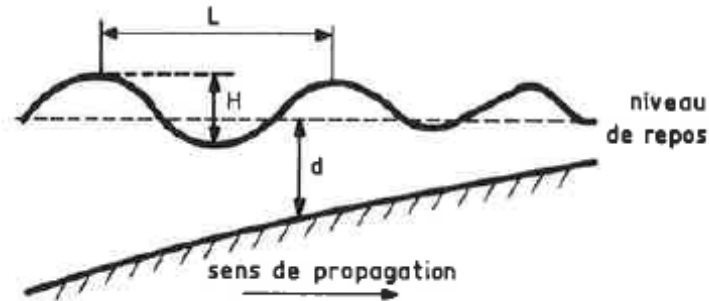


Figure 3: Représentation de la houle et des paramètres qui la forment (source : Bonnefille, 1992)

Où L représente la longueur d'onde [m], H la hauteur [m] et d la profondeur [m]. La période T [s] est aussi définie comme le temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe. La vitesse de propagation est alors définie comme la célérité C [m/s] et s'exprime par $C = \frac{L}{T}$.

Souvent, ce n'est pas la hauteur des vagues qui sera étudiée, mais la hauteur significative H_s de ces dernières. Cette quantité statistique, qui se définit comme la hauteur moyenne du tiers supérieur, peut se calculer ainsi (Holthuijsen, 2010) :

$$H_s = H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (1)$$

Où H_i représente la hauteur d'une vague de rang i . Par exemple, H_1 sera la plus grande hauteur, H_2 la deuxième plus grande hauteur, et ainsi de suite jusqu'à $N/3$ représentant le premier tier des hauteurs les plus élevées.

En pleine mer ou plus généralement en zone de grande profondeur, des méthodes comme la méthode JONSWAP permettent de calculer la hauteur significative et la période des vagues. Cette méthode se base sur la vitesse et la durée du vent, ainsi que sur le fetch correspondant (Kampuis, 2020). Le fetch représente la distance sur laquelle le vent crée un frottement sur une surface d'eau pour générer les vagues ou plus simplement la distance sur laquelle les vagues peuvent se former (LCH, 2008). Dès lors que la houle se rapproche des côtes, plusieurs phénomènes entrant dans les processus de déformation de la houle peuvent être observés (Bonnefille, 1992).

Lorsque la cambrure de la vague devient trop importante en raison d'une diminution de la profondeur, la vague se brise partiellement ou totalement et déferle (Bonnefille, 1992). Il existe différents modes de déferlement pour la vague (Figure 4) selon si elle déferle en grande profondeur ou sur une pente plus ou moins raide.

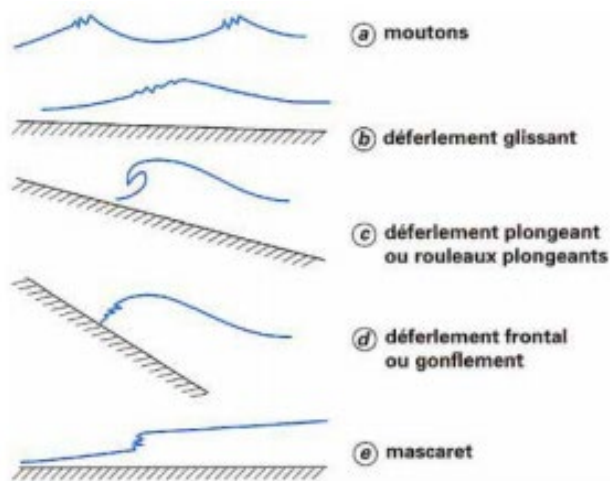


Figure 4: Différents modes de déferlement (source : Bonnefille, 1992).

Lorsque la houle rencontre un obstacle vertical à sa direction de propagation sans déferler, les vagues sont directement réfléchies dans la direction opposée (Bonnefille, 1992). La réflexion de l'onde mène à la formation d'oscillations stationnaires appelées clapotis.

Lorsque la houle rencontre un obstacle qui ne peut que partiellement la stopper, elle le contourne (Bonnefille, 1992). La diffraction se manifeste par la création d'oscillations derrière l'obstacle et peut être schématisée ainsi (Figure 5) :

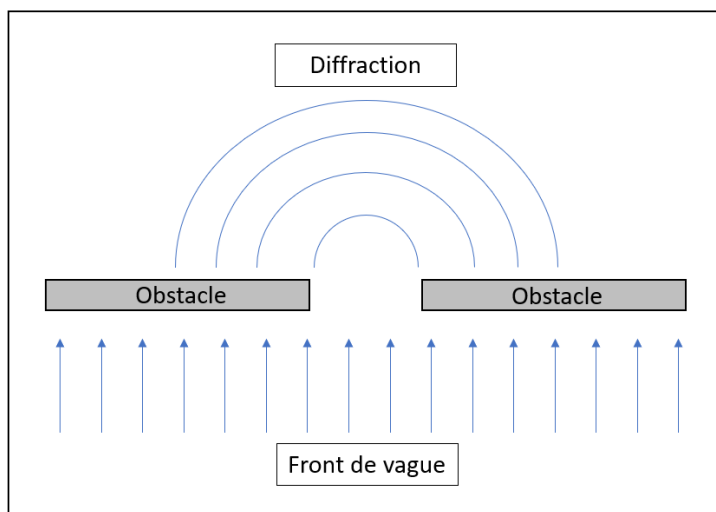


Figure 5: Explication schématique du phénomène de diffraction

Lorsque la houle s'approche d'une côte avec des lignes bathymétriques non parallèles, la vitesse des vagues sur une même crête ne sera pas pareille, forçant ainsi les vagues à s'aligner de manière parallèle aux lignes bathymétriques. Un bon exemple de réfraction dans une crique du sud de la France est présenté (Figure 6) et permet de bien observer ce phénomène.

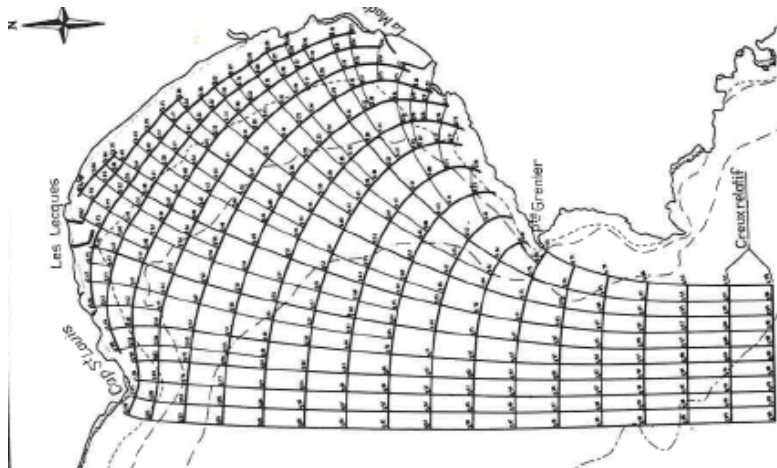


Figure 6: Réfraction de la houle à l'approche de la côte (source : Bonnefille, 1992)

2.4.2. Les vagues sur le Léman

Dans le cas de grands lacs, les vents ne sont pas les seuls facteurs participant à la formation des vagues. Le fetch disponible ainsi que la profondeur d'eau y participent aussi (Sayah, 2006). Le champ de vent sur le Léman a déjà été discuté dans une section précédente (Les vents sur le Léman). Un exemple de fetch de 30 km sur le Léman est présenté entre Genève et Rolle (Figure 7).



Figure 7: Fetch de 30km à Rolle pour un vent du sud-ouest (source : <https://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png>)

Lorsqu'une vague se crée, il faut déterminer si sa hauteur est limitée par le fetch ou par la durée du vent (Oriez, 2011). Dans une étude menée sur le quai Gustave Ador à Genève, c'est la durée du vent qui limite la hauteur de la vague pour des vents d'une durée de moins de 4h, alors que c'est le fetch qui est limitant pour des vents d'une durée de plus de 4h (LCH, 2008). Ainsi, si on se trouve à Rolle avec un vent soufflant du sud-ouest, la vague pourra se construire au maximum sur 30 km d'étendue d'eau (Figure 7) et ne pourra pas être plus grande qu'une certaine hauteur, même si le vent souffle plus longtemps.

Pour modéliser le champ de vague, il existe des modèles utilisés en pleine mer. Ces modèles peuvent utiliser des résolutions moindres, car les vagues et vents sont répartis de manière homogène près des côtes. Or sur un lac de montagne, le champ de vent peut avoir d'importantes variations, et il est donc nécessaire d'utiliser de plus grandes résolutions (Diebold & Heller, 2017). C'est ainsi qu'à l'aide du

modèle SWAN développé à l'Université Technique de Delft (Booij et al. 1992), un atlas des vagues disponible en ligne a vu le jour (swisslakes, 2020 ; Amini et al., 2017). De plus, l'utilisation du modèle SWAN permet d'inclure les processus de réflexion, réfraction et diffraction décrits plus haut (Heller & Amini, 2015). Le produit de cette étude est un atlas des vagues qui permet d'évaluer les hauteurs significatives des vagues induites par les vents pour 6 grands lacs suisses. Les résultats sont présentés sous la forme de rose de vague pour chaque point. Un exemple au large de Rolle (Figure 8) permet d'étudier pour une première fois la présentation de ces résultats.

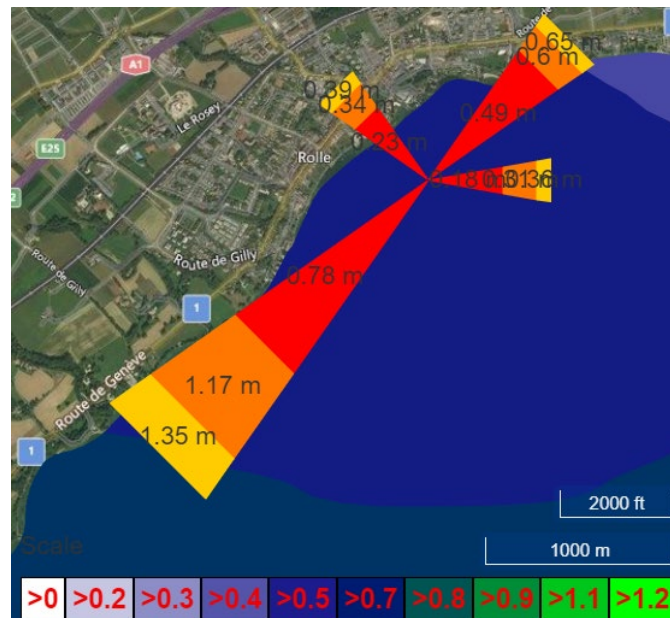


Figure 8: Exemple de résultat obtenu à Rolle à l'aide de l'atlas des vagues (source : www.swisslakes.net)

Les couleurs représentent la fréquence des événements. En rouge des événements très fréquents avec un temps de retour de 2 ans, en orange des événements fréquents avec un temps de retour de 20 ans et en jaune des événements rares avec un temps de retour de 50 ans (Amini et al., 2017). Dans l'exemple de Rolle (Figure 8), un vent soufflant du Sud-Ouest induira une vague de 0.78 m de hauteur significative très fréquemment, alors qu'il induira plus rarement une vague de 1.35 m de hauteur significative. Ceci confirme aussi les témoignages recueillis qui faisaient état de plus hautes vagues avec des vents d'Ouest (Jeanneret, 2015).

Le dernier paramètre à prendre en compte sera la bathymétrie du fond, dont les données sont disponibles sur le géoportail du canton de Vaud (Canton de Vaud, 2020).

2.5. Les courants et sédiments dans le Léman

Les vagues ont un impact très important sur la mise en mouvement des sédiments, car en se déplaçant, elles appliquent des contraintes sur le fond du lac, notamment des contraintes de cisaillement (Sayah, 2006). Elles peuvent mener à la formation de régimes de transport particuliers, formant parfois des dunes ou des rides (Sayah, 2006). Une méthode propose d'abord de calculer la vitesse de cisaillement pour savoir si les vagues mettent en mouvement les sédiments. Cette vitesse constitue en effet le paramètre essentiel dans le mécanisme du début d'entraînement des sédiments (Bonafille, 1992). Dans la situation où ce sont les vagues qui vont induire le courant susceptible de mettre en mouvement les sédiments, il faut reporter cette vitesse de cisaillement aux propriétés de la houle évoquées auparavant, ce qui donne :

$$u_* = 2.2 \left[\frac{\nu H^2}{T^3 s h^2 \left(2\pi \frac{d}{L} \right)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \nu : \text{coefficient dynamique de viscosité} \quad (2)$$

L'étape suivante sera de se reporter à la méthode de Shields, qui consiste à calculer une contrainte de cisaillement critique au-delà de laquelle les sédiments d'un diamètre donné vont être mis en mouvement (Hewes, 2018). Le paramètre de Shields est ainsi obtenu :

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)D} \quad (3)$$

Avec

$$\tau_{cr} = \rho \mu_*^2 \quad (4)$$

Où τ_{cr} représente la tension de cisaillement critique du lit, ρ la densité de l'eau et ρ_s la densité des sédiments.

Ensuite, la mise en mouvement des sédiments du lac peut être déterminée sur la base d'un diagramme de Shields (Figure 9).

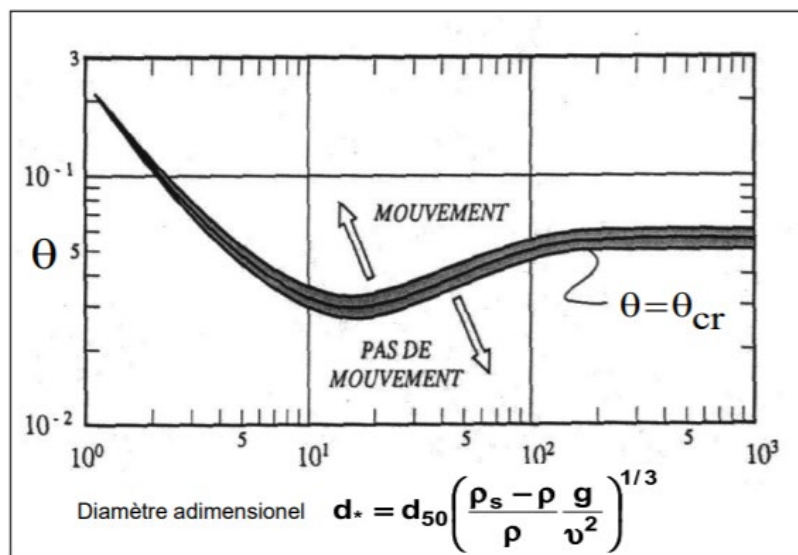


Figure 9: Diagramme de Shields pour déterminer la mise en mouvement de sédiments (source : De Cesare, 2019)

Une autre méthode pour mesurer la mise en mouvement des sédiments est d'analyser une courbe de Hjulstrum (Figure 10) qui pose les limites de déposition pour un certain diamètre de particules (Hewes, 2018).

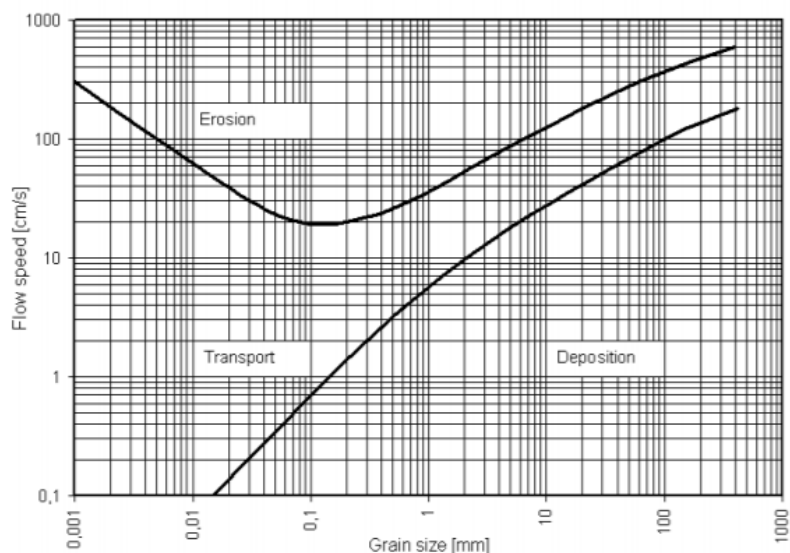


Figure 10: Courbe de Hjulstrum mettant en relation la taille des sédiments et la vitesse des courants (source : De Cesare, 2019)

Pour savoir si les sédiments sont déplacés dans le Léman, il faut analyser la taille des particules et les courants sur le fond aux différents lieux d'intérêt.

Finalement, un autre aspect intéressant est la direction dans laquelle les sédiments vont être déplacés. La courantologie du Léman est majoritairement influencée par les vents qui y soufflent, la variabilité des vents influence la variabilité des courants du lac (Razmi, 2014). Sur le site [meteolakes](http://meteolakes.ch) (Baracchini, 2019), les données donnent en direct la direction et la vitesse des courants du lac, permettant de se faire une première idée de leur comportement. Un exemple à l'échelle du lac est ainsi exposé (Figure 11).

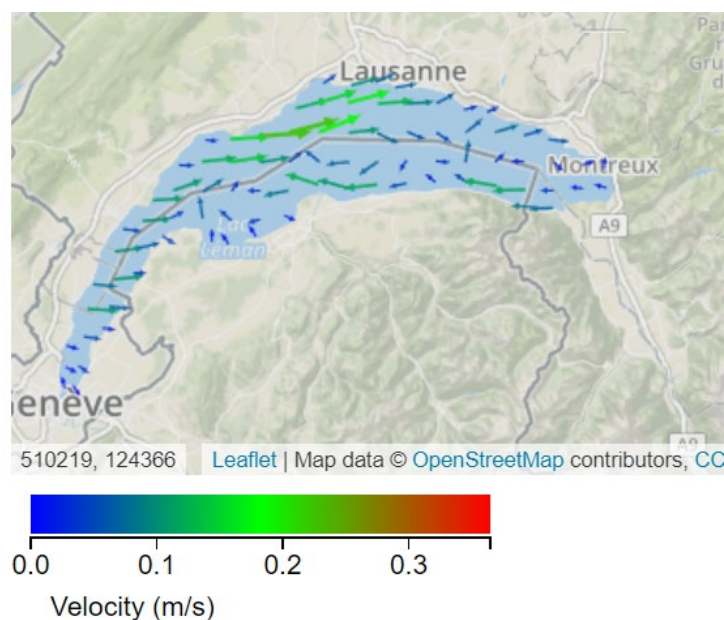


Figure 11: Courantologie du lac au 05.10.2020 à 15:00 à 0.6m de profondeur (source : www.meteolakes.ch)

A plus petite échelle et pour le secteur situé entre Morges et Nyon, les courants à la même heure sont aussi calculés (Figure 12).

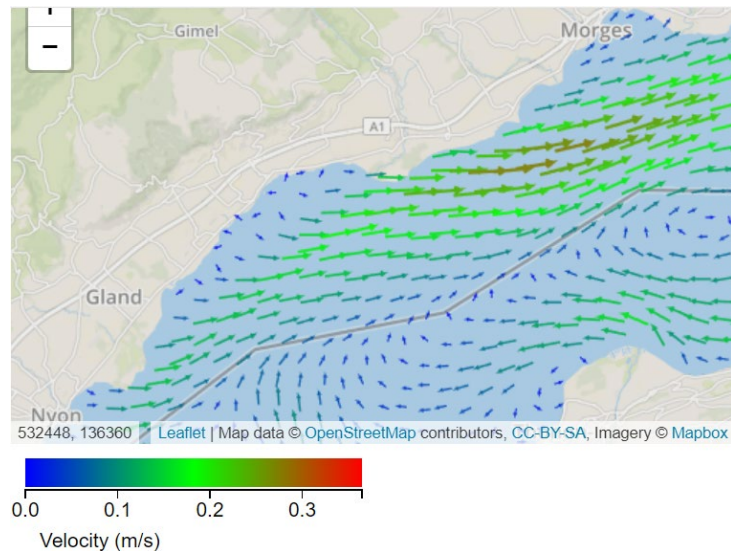


Figure 12: Courantologie du lac au 05.10.2020 à plus petite échelle (source : www.meteolakes.ch)

Ce qui ressort de ces images est qu'entre Morges et Nyon, différents courants circulent. De Morges à Buchillon, les courants ont tendance à circuler vers le lac, alors qu'après le renforcement en direction de Genève et jusqu'à Gland, les eaux ont plus tendance à rester à l'intérieur de la baie. Cela donne déjà une indication de plus faibles courants entre Gland et Buchillon, ce qui pourrait en faire un secteur préférentiel pour l'implantation d'un point d'ancrage.

2.6. Les berges du Léman

La Suisse, bien qu'étant avant tout un pays de montagnes, abrite aussi de nombreux lacs. En effet, ce ne sont pas moins de 2000 km de rives lacustres qui façonnent le paysage suisse (De Cesare, 2015). Il y a encore 200 ans, les rives lacustres n'étaient que très peu occupées, et la conquête de ces dernières a modifié leur visage naturel et sauvage. Aujourd'hui sur le Léman, seulement 3% des 200 km de rives sont entièrement naturels, et 23% semi-naturels (De Cesare, 2015). Le reste est entièrement artificiel, construit avec des murs ou des enrochements pour protéger les berges des contraintes du lac. C'est devant ce constat qu'a été fondé en 2008 le groupe de travail « Rives lacustres » (Arbeitsgruppe Seeufer AGS), dont le but est d'œuvrer pour la revalorisation des rives des lacs suisses avec une approche pluridisciplinaire. De plus, l'entrée en vigueur de la révision de la loi sur la protection des eaux (LEaux) en 2011 encourage la revitalisation et la réduction des effets de l'utilisation de la force hydraulique des cours d'eau (OFEV, 2018). Dans cette optique, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a développé une aide à l'exécution « Renaturation des cours d'eau » pour les cantons, dont un module fait l'objet de la revitalisation des rives lacustres. D'ici à fin 2022, tous les cantons devront avoir fourni une planification pour la revitalisation de leurs rives lacustres.

Dans l'optique de trouver un point d'ancrage à La Liberté, il faudra prendre en compte l'évolution progressive des mentalités vers une revalorisation des rives, et la possible difficulté de construire un ponton sur une rive naturelle. De plus, La Liberté veut s'orienter dans un courant de tourisme vert (Lavanchy J-M., interview, 2020), et il serait dommage pour elle de charger encore plus les berges du Léman.

2.7. Etudes préliminaires

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur la galère La Liberté et la possibilité de construire un nouveau lieu d'amarrage pour le navire. Deux études, une effectuée par l'association de la galère (Association Lémanique galère La Liberté, 2019), l'autre par le bureau CSD Ingénieurs (CSD, 2019), font l'inventaire de sites intéressants pour amarrer la galère et mettent en lumière les sollicitations d'intérêt pour un tel projet. D'autres documents moins en relation avec le présent projet mais non moins intéressants font le rapport des activités de la galère tout en proposant des solutions pour son avenir (FMP, 2017 ; CEVADE, 2020).

2.7.1. Etude de l'Association Lémanique galère La Liberté

L'association a étudié certains sites susceptibles d'accueillir la galère en mettant en avant l'accessibilité en transports, l'accès à un parking et aux personnes à mobilité réduite, tout en privilégiant d'éventuels partenariats. En s'appuyant sur ces critères, plusieurs sites intéressants ressortent de cette étude :

- Zone des quais de St-Prex
- Port des Abériaux à Prangins
- Nyon UEFA

Un critère évoqué mais rarement détaillé est l'aspect identitaire de La Liberté. Cette galère a su se forger son histoire dès sa construction jusqu'à aujourd'hui. Elle relate aussi l'histoire du Léman et est très attachée à Morges, son lieu de naissance. C'est un symbole pour toute la région de la Côte et il serait intéressant qu'elle y trouve son ponton d'attache, avec des préférences pour des lieux situés proche de Morges. Néanmoins, l'association doit rester ouverte et envisager d'autres lieux au bord du Léman pour accueillir la galère.

2.7.2. Etude de CSD

Durant une phase de pré-sélection, les critères suivants ont été comparés pour 7 sites potentiels dans la baie de Rolle :

- Distance à la rive avec un tirant d'eau de 3 m
- Statut de la rive
- Distance à un parking
- Distance jusqu'au château
- Emprise sur la vue
- Impact environnemental
- Nuisances sonores, présence d'habitations à proximité

Deux sites ont été retenus à la fin de l'étude comme sites potentiels pour accueillir un débarcadère pour la galère : le site du château et le site du camping. Cependant, Rolle ayant abandonné tout soutien envers la galère, celle-ci ne pourra pas se voir attachée à cette commune.

2.7.3. Audit

Cette stratégie marketing réalisée par FMP Solutions en 2017 fait état de 10 années d'exploitation de la galère. Cette étude est très importante pour permettre aux personnes futures de ne pas commettre les mêmes erreurs que durant ces 10 ans. Les problèmes suivants avaient alors été relevés.

Tout d'abord, l'association manquait d'une réelle structure et ne comptait pas beaucoup de professionnels du milieu pour savoir quoi mettre en place, à qui s'adresser pour recouvrer le permis de navigation. Le capitaine dépassait le quota d'heures hebdomadaires et n'était pas en règle avec la loi sur le travail. En somme, c'est un manque de professionnalisme global, tant au niveau de l'association que de la gestion des activités et du marketing de la galère qui ressort de cette étude. De

plus, la problématique de l'image de La Liberté est souvent apparue, notamment à cause d'une précédente étude de 1997 sur la gestion de la galère.

Sur cette base, des solutions ont été proposées, et un réel plan d'affaires a pu voir le jour en 2020. Dans cet audit de 2017, la création d'un ponton apparaît comme une évidence. En effet, il permettrait d'avoir une attache, de recréer une identité à la galère, et surtout de développer ses activités à terre. Finalement, cet audit très complet propose de réelles solutions pour étoffer l'offre de la galère et tenter de regagner la confiance des personnes l'ayant perdue.

2.7.4. Plan d'affaires

Ce plan d'affaires élaboré en 2020 par CEVADE prend soin de replacer La Liberté dans son contexte actuel. Etant un navire naviguant sur le Léman, elle a été comparée à ce qui se fait de similaire sur différents lacs en Suisse (Neuchâtel, Biemme, Morat et Léman). C'est donc basé sur la comparaison de 9 bateaux que ce plan d'affaires a pu voir le jour. Ici, un bref résumé des points essentiels de ce plan d'affaires est présenté.

Un rapport des activités montre que des activités régulières constituent une base économique sûre pour la galère. Plus d'informations peuvent être trouvées dans le document original (CEVADE, 2020). De plus, des activités à quai comme des visites guidées de la galère permettraient d'étoffer son offre. Dans ce contexte, La Liberté a clairement sa place sur le Léman, d'autant plus que le secteur de la Côte est le moins étoffé en termes d'offres lacustres. En outre, le public existe et la fréquentation du tourisme lacustre de la CGN est en augmentation ces dernières années. Cette dernière affirmation est à réévaluer au vu des conditions sanitaires de 2020.

Un autre aspect essentiel est l'inscription de La Liberté dans un mouvement de tourisme vert. Non seulement, la galère permettrait de poser un regard neuf sur l'environnement et la nature lacustre, mais elle entrerait en cohérence avec les politiques de développement des districts de Morges et Nyon. Ainsi, la galère ne devrait pas être considérée comme un acteur du tourisme vert, mais plutôt comme un partenaire de valorisation de ce tourisme.

Finalement et comme il a déjà été discuté auparavant, la recherche de partenariats et la construction d'un ponton d'amarrage pour la galère sont deux éléments essentiels au futur de La Liberté.

3. Comparaison multicritère

Avant d'analyser des lieux spécifiques, un inventaire des sollicitations du lac et de ce qui l'entoure doit être établi. Celui-ci servira de base sur laquelle une comparaison multicritère des différents lieux sera effectuée. Lors de cette analyse, chaque lieu sera évalué en fonction des sollicitations qu'il subit et se verra attribuer une note pour chacune d'entre elle. Finalement, le lieu avec la meilleure appréciation sera désigné comme le plus propice à l'accueil d'un ponton pour la galère et fera l'objet d'investigations supplémentaires. Avant de présenter l'inventaire des sollicitations, il est important de préciser que par souci de progression dans le projet, certains critères ont dû être abandonnés. C'est le cas par exemple des considérations politiques entourant la galère, ou encore des conflits entourant la construction d'un débarcadère. Evidemment, le site de Rolle ayant déjà été abandonné par la commune ne sera pas considéré dans ce projet.

3.1. Inventaire des sollicitations du Léman

Après révision des besoins de la galère, des différentes contraintes exercées par le lac et des études déjà effectuées sur le sujet, un inventaire des sollicitations sur un potentiel débarcadère peut être établi. Dans le tableau suivant (Tableau 3), les sollicitations prises en compte sont présentées. Le tableau résume aussi brièvement les raisons du choix de ces sollicitations et présente sommairement où les données peuvent être récoltées. Pour plus d'information sur le choix de certaines sollicitations, se référer à l'Annexe A.

Tableau 3: Inventaire des sollicitations avec explication sommaire de ce qui sera étudié

Sollicitation	Quoi ?	Pourquoi ?	Comment ?
Accessibilité	Proximité aux transports publics	Favoriser un déplacement vert autour de la galère, inscription dans le mouvement de tourisme vert	Réseaux des transports publics autour du Léman, Google Maps
Bathymétrie	Profondeur du fond du lac	Assurer un tirant d'eau suffisant pour la galère afin qu'elle ne touche pas le fond	Géoportail du canton de Vaud
Berges	Etat des berges (naturelles, artificielles, ...)	Etre en adéquation avec un tourisme vert, les mentalités d'aujourd'hui, dans une politique de revalorisation des berges	Photos, visite sur place, swisstopo, DGE
Cadastre	Inscription au cadastre	Vérifier qu'il n'y ait pas de zone protégée à proximité, zone de palafittes en particulier	Géoportail du canton de Vaud
Courant	Courants le long des rives	Obtenir une vitesse et direction de courant, pour pouvoir plus tard évaluer la mise en mouvement des sédiments	www.meteolakes.ch + swisslakes
Granulométrie	Taille des sédiments	Mettre en relation la taille des sédiments et la vitesse des courants pour évaluer la mise en mouvement des sédiments	Cas par cas, études locales
Identité	Proximité avec Morges, symbolique	La galère a été construite et exploitée dans la région de Morges, elle y est fortement attachée	Localisation du lieu
Intégration dans le paysage	Impact sur la vue	Ne pas importuner les usagers du lac	Interview paysagiste
Navigation déjà existante	Les navires déjà en place	Ne pas importuner les plaisanciers et les transports de personne, qui ont déjà leurs habitudes	Ports adjacents et routes de navigation CGN, autres
Partenariat	Possibilités de travailler en partenariat	Améliorer l'attractivité et l'exploitabilité de la galère, amener du monde pour l'autre partie	Contacts, opportunités (bar la coquette), offices de tourisme (billetterie, promotion, etc...)
Vagues	Hauteurs significatives, direction	Evaluer l'exposition du point d'ancrage aux vagues et l'orienter au mieux	www.swisslakes.net
Vents	Intensité et direction	Evaluer l'exposition du point d'ancrage aux vents et l'orienter au mieux	Rose des vents
Zone d'activité	Proximité d'une zone de loisir	Améliorer la visibilité de la galère, attirer plus de personnes plus facilement	Localisation du lieu

3.2. Détermination de solutions d'amarrage

La CGN est une référence en termes de navigation, de tourisme et de transport de personnes sur le Léman. Afin d'assurer ces services, elle compte 37 débarcadères répartis tout autour du Léman. Comme décrit plus tôt, la région de la Côte n'est pas la plus développée d'un point de vue touristique, et cela se voit bien sur cette carte représentant les débarcadères de la CGN (Figure 13) où la CGN ne compte que trois débarcadères.

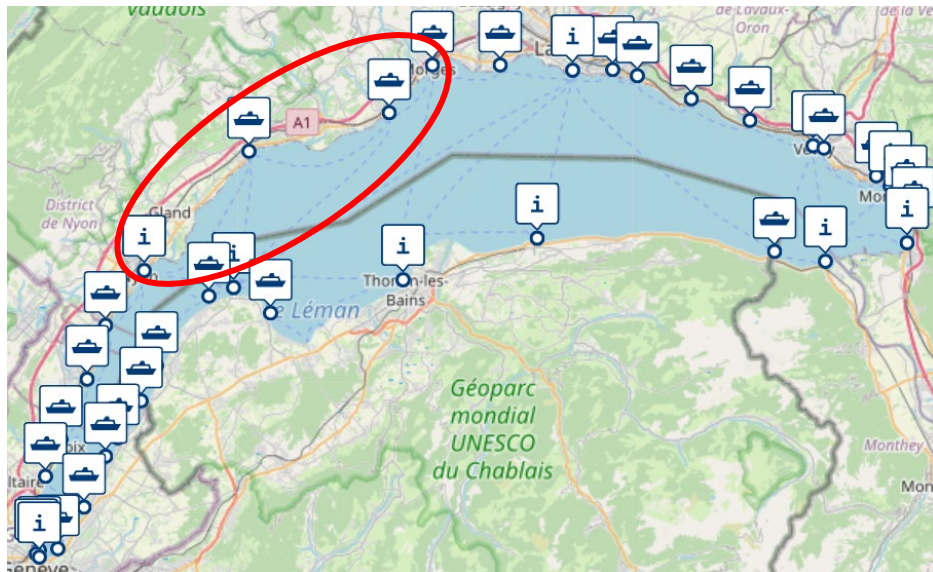


Figure 13: Carte des débarcadères de la CGN (source : www.cgn.ch/fr/contact-acces)

Comme autre point de comparaison et comme mentionné auparavant, des répliques de barques naviguent aussi sur le Léman. Elles ont des buts similaires à ceux de La Liberté et peuvent servir de référence à la galère. En résumé, toutes ces barques touristiques ont un point d'amarrage. Certaines, plus petites, ont simplement un emplacement attribué dans un port, alors que d'autres ont un débarcadère qui leur est propre, tant pour le débarquement de personnes que pour des activités à quai. Plus d'informations sur les points d'ancrage de ces barques peuvent être trouvées dans l'Annexe B.

Ainsi, il n'existe pas beaucoup d'alternatives à la construction d'un débarcadère pour La Liberté sur le Léman. Premièrement, il est primordial pour la galère d'avoir un point d'attache fixe pour ses activités à quai et pour les périodes de non-navigation. Ensuite, il paraît évident que la galère ne peut pas simplement rester ancrée au large de Morges, non seulement car elle perd en visibilité, mais surtout qu'une des conditions pour recouvrer son permis de navigation est d'avoir un point d'ancrage qui lui est propre. En effet, la location d'une place sur un débarcadère déjà existant n'est financièrement pas viable. Finalement, un débarcadère permettrait à La Liberté d'avoir une attache réelle et de ne plus être vue comme un navire errant sur le Léman telle qu'elle est perçue aujourd'hui (Bujard, P., interview, 2020).

Toutefois, le manque de place et d'endroits propices à la construction d'un port ou d'un débarcadère pourrait s'avérer problématique. En effet, la demande d'emplacements dans les ports ne faisant qu'augmenter et les ports arrivant à saturation, des solutions alternatives doivent être étudiées. C'est le cas par exemple d'un projet de port flottant qui a fait l'objet d'étude de plusieurs projets de master à l'EPFL. Un port flottant permettrait donc de libérer des emplacements pour la navigation de plaisance, mais aussi de réduire la charge sur les berges (Ugo et al., 2015). Il faudrait encore étudier la pertinence d'un tel projet pour la galère, en sachant que le port flottant étudié était prévu pour une centaine de bateaux à l'origine. De plus, l'ancrage dans un port flottant pourrait nuire aux activités à quai de la galère, car il induirait un déplacement supplémentaire des personnes vers celui-ci.

3.3. Choix des lieux d'implantation

Les sollicitations ayant été définies et la nature du ponton déterminée, la prochaine étape est de sélectionner et d'analyser les lieux susceptibles d'accueillir la galère. Sur la base des analyses effectuées par CSD et l'association de La Liberté (Etudes préliminaires), des lieux n'ayant pas encore fait l'objet d'étude plus approfondie ont été sélectionnés. Ensuite, des discussions et investigations ont été entreprises pour étudier d'autres endroits propices à l'accueil de la galère. Ainsi, huit sites répartis autour du Léman ont été sélectionnés (Figure 14) et ont fait l'objet d'une étude des sollicitations du lac.

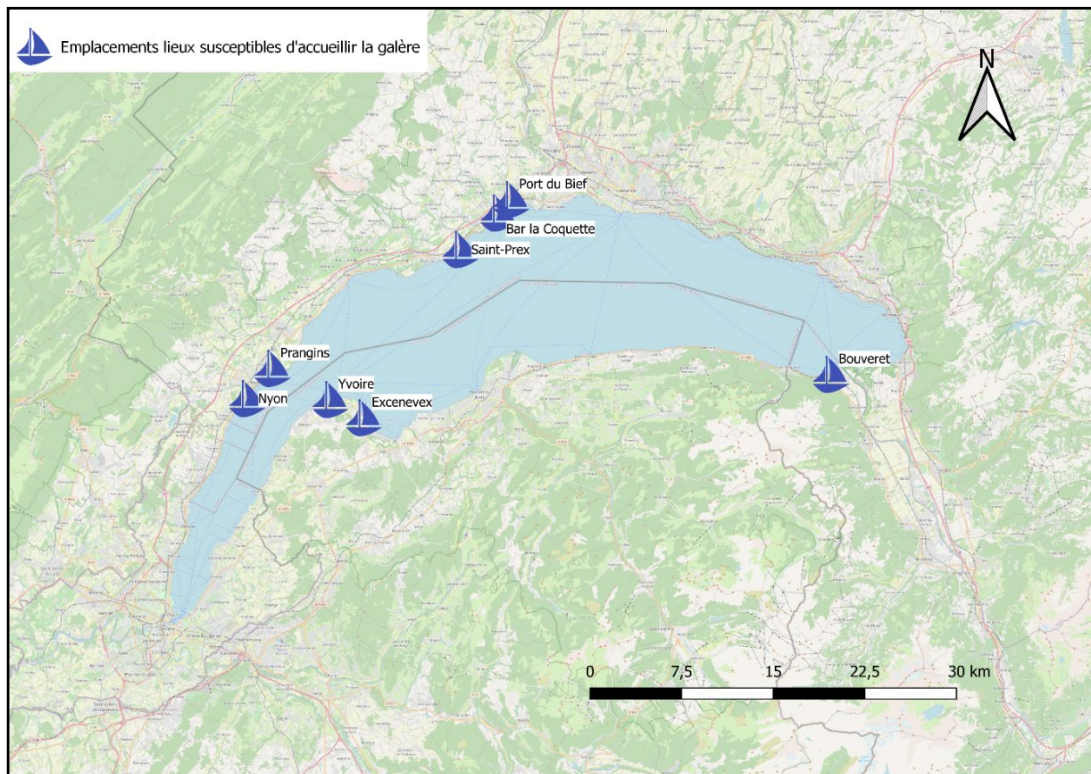


Figure 14: Carte des sites étudiés autour du Léman (fond de carte : <https://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png>)

Les prochaines pages font état de l'étude de ces sollicitations. Pour chaque site, un plan de situation à l'échelle 1:6000 est présenté. Ces plans sont accompagnés d'un texte décrivant le lieu et ce qui l'entoure. Sur la partie droite des fiches récapitulatives, les observations des sollicitations sont exposées sous forme d'un tableau, et une photo de situation est affichée. Le détail des observations se trouve dans l'Annexe C et les fiches suivantes résument l'information de manière à en améliorer la lisibilité. Le détail de l'analyse des courants se trouve dans l'Annexe D. Le fond de carte utilisé n'étant que peu lisible après importation des plans de situation, il est précisé ici :

https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}

Saint-Prex

1 Fiche récapitulative de St-Prex



Critère	Observation	
Arrêt TP le plus proche	200 m	
Tirant d'eau de 3m	50 m	
Etat des berges	Artificielles, enrochement	
Inscription au cadastre	Domaine public, parcelle privée juste à l'arrière, secteur S2 eaux	
Courant le long des rives	SO – 0.1 m/s	NE – 0.3 m/s
Proximité à Morges	Moins de 5 km	
Intégration dans le paysage	Bonne	
Navigation	Fréquenté	
Partenariat possibles	Visites vieille ville, Château	
Hauteur significative max. des vagues	T50 : 0.76 m	T2 : 0.49 m
Régime de vent dominant	Vent, Bise	
Loisirs environnants	Stade, port de plaisance, vieille ville	

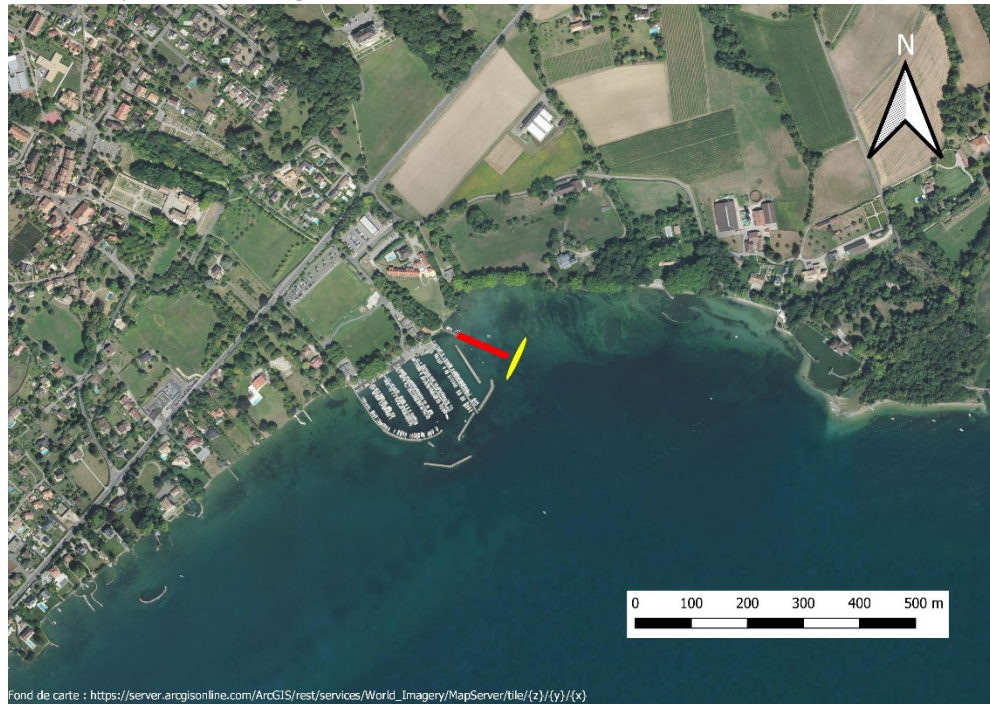
Saint-Prex est une commune du district de Morges située sur la région de la Côte. Sa vieille ville médiévale située sur les berges du Léman a orienté sa présélection comme lieu susceptible d'accueillir la galère. Ville accessible aux transports publics et déjà étudiée par l'association de La Liberté, Saint-Prex comprend beaucoup d'activités nautiques avec un port, un centre de plongée et une aile de la société internationale de sauvetage du Léman (SISL).



Photo : Ott Lucas, 14.11.20

Prangins

2 Fiche récapitulative de Prangins



Fond de carte : https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}

Prangins est une commune située dans le district de Nyon. Situé en périphérie de la localité, le site du port des Abériaux est plus tranquille et à proximité de terrains de foot et d'un skate-park. Plus à l'Est, faisant face au port, se trouve la plage de Promenthoux qui peut s'avérer intéressante pour la visibilité de la galère. Le lieu a déjà été retenu par l'étude de l'association qui prévoyait de prolonger un enrochement du port pour y amarrer la galère.

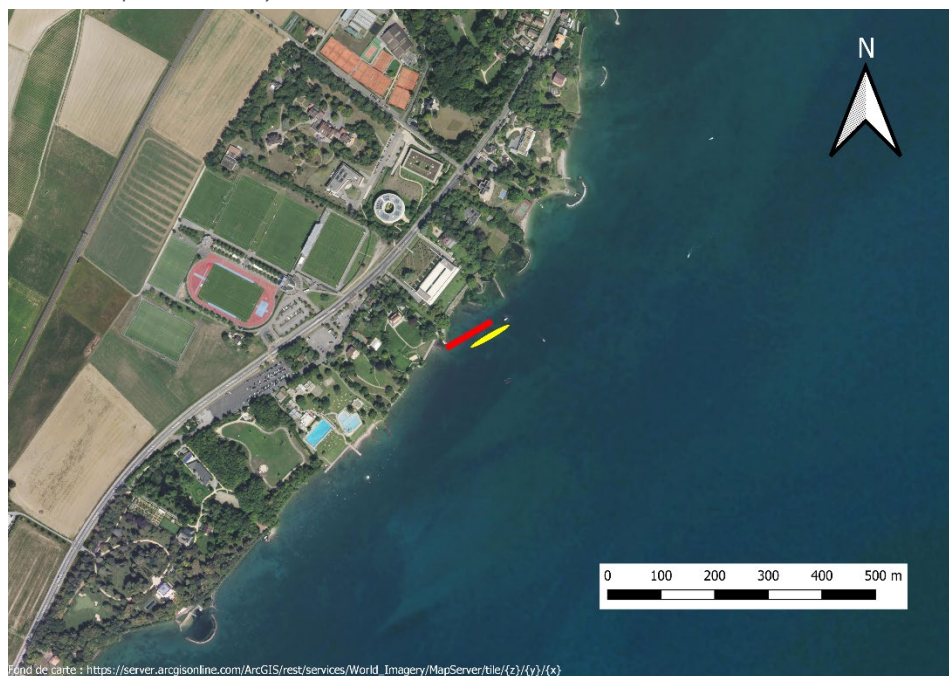
Critère	Observation	
Arrêt TP le plus proche	400 m	
Tirant d'eau de 3m	100 m	
Etat des berges	Artificielles, enrochement	
Inscription au cadastre	Domaine public	
Courant le long des rives	SO – 0.1 m/s	E-SE – 0.25 m/s
Proximité à Morges	25 km, Région de la Côte	
Intégration dans le paysage	Moyenne	
Navigation	Très fréquenté	
Partenariat possibles	Musée national, office de tourisme	
Hauteur significative max. des vagues	T50 : 1.29 m	T2 : 0.8 m
Exposition aux vents	Bise, Vent et Joran	
Loisirs environnants	Stade, restaurant, hôtel, musée national suisse, plage vis-à-vis	



Photo : Ott Lucas, 14.11.20

Nyon

3 Fiche récapitulative de Nyon



Critère	Observation	
Arrêt TP le plus proche	150 m	
Tirant d'eau de 3m	75 – 100 m	
Etat des berges	Artificielles	
Inscription au cadastre	Domaine public, parcelles privées juste à l'arrière	
Courant le long des rives	SO – 0.25 m/s	E-NE – 0.3 m/s
Proximité à Morges	25km, région de la Côte	
Intégration dans le paysage	Mauvaise	
Navigation	Peu fréquenté	
Partenariat possibles	Musée du Léman, festivals	
Hauteur significative max. des vagues	T50 : 1 m	T2 : 0.79 m
Exposition aux vents	Bise, Vent et Joran	
Loisirs environnants	Centre sportif, piscine de Colovray	

Nyon est une commune située dans le district du même nom, voisin du district de Morges et sur la région de La Côte. La ville abrite le musée du Léman, situé en face du port de plaisance et le siège de l'union des associations européennes de football (UEFA). C'est devant ce dernier que l'emplacement d'un débarcadère avait été étudié par l'association de la galère et sera repris ici. Cet emplacement se situerait en périphérie de la ville.



Bar la Coquette

4 Fiche récapitulative du bar La Coquette



Critère	Observation	
Arrêt TP le plus proche	450 m	
Tirant d'eau de 3m	75 - 100 m	
Etat des berges	Artificielles, enrochement	
Inscription au cadastre	Parcelle privée	
Courant le long des rives	SO – 0.1 m/s	NE – 0.25 m/s
Proximité à Morges	Morges même	
Intégration dans le paysage	Bonne	
Navigation	Très fréquenté	
Partenariat possibles	Bar la Coquette, parc de l'indépendance	
Hauteur significative max. des vagues	T50 : 1.23 m	T2 : 0.71 m
Exposition aux vents	Bise et Vent	
Loisirs environnants	Terrain de foot, piscine, port, château	

Situé à Morges même, le bar est un lieu incontournable de rencontres pour les Morgiens durant la période estivale. Ce lieu a été retenu en premier lieu car il offre des possibilités de partenariat très intéressantes pour les activités à quai de la galère. De plus, la ville de Morges possède de nombreux attraits touristiques, notamment dans le secteur des jardins du parc de l'indépendance et le château de Morges, tous deux situés non loin du port.



Source : Galerie photo La Coquette (<https://lacoquette.ch/galerie/>), consulté le 25.11.2018

Port du Bief

5 Fiche récapitulative du Port du Bief



Critère	Observation	
Arrêt TP le plus proche	400 m	
Tirant d'eau de 3m	40 m	
Etat des berges	Artificielles, enrochement	
Inscription au cadastre	Domaine public	
Courant le long des rives	O – 0.05 m/s	NE – 0.2 m/s
Proximité à Morges	Morges même	
Intégration dans le paysage	Bonne	
Navigation	Fréquenté	
Partenariat possibles	Offices du tourisme de Morges et de Prévèrenge	
Hauteur significative max. des vagues	T50 : 1.26 m	T2 : 0.73 m
Exposition aux vents	Bise et Vent	
Loisirs environnants	Parc de Vertou, skate-park, fitness urbain, port du Bief	

Actuellement, la galère est ancrée au large de Morges, non loin du port du Bief. Une telle situation est intéressante, car on peut y accéder par petit navire assez rapidement. Ce lieu a été retenu avant tout pour l'aspect identitaire que pourrait y conserver la galère. La zone promouvant la biodiversité locale et sensibilisant la population à la nature permettrait à la galère de mettre en avant son orientation vers un tourisme vert.



Photo : Ott Lucas, 14.11.20

Bouveret

6 Fiche récapitulative du Bouveret

Fond de carte : https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}



Critère	Observation	
Arrêt TP le plus proche	400 m	
Tirant d'eau de 3m	20 m	
Etat des berges	Artificielles, enrochements	
Inscription au cadastre	Domaine public, parcelle privée juste à l'arrière	
Courant le long des rives	Variable et peu intense	
Proximité à Morges	60 km par la route	
Intégration dans le paysage	Moyenne	
Navigation	Très fréquenté	
Partenariat possibles	Office du tourisme	
Hauteur significative max. des vagues	T50 : 0.53 m	T2 : 0.39 m
Exposition aux vents	Foehn et Joran	
Loisirs environnants	Swiss Vapeur Park, Aquaparc, port de plaisance	

Le Bouveret se trouve dans la commune de Port-Valais, située dans le canton du Valais, et est réputé pour ses activités nautiques et récréatives avec son port, Aquaparc ou le Swiss Vapeur Park. Le Bouveret a été présélectionné car il s'agit d'un lieu situé dans une autre partie du Léman. Les contraintes y sont différentes et peuvent apporter de bons points de comparaison avec les lieux situés sur la région de la Côte.



Source : Commune de Port-Valais (<https://www.port-valais.ch/fr/port-bouveret-1457.html>), consulté le 25.11.20

Excenevex

7 Fiche récapitulative d'Excenevex



Critère	Observation	
Arrêt TP le plus proche	350 m	
Tirant d'eau de 3m	Estimé à 75 m	
Etat des berges	Artificielles, route	
Inscription au cadastre	Domaine public, parcelle privée juste à l'arrière	
Courant le long des rives	SE – 0.1 m/s	SE – 0.15 m/s
Proximité à Morges	75 km par la route	
Intégration dans le paysage	Moyenne	
Navigation	Peu fréquenté, camping non loin	
Partenariat possibles	Campings, office du tourisme	
Hauteur significative max. des vagues	T50 : 1.14 m	T2 : 0.92 m
Exposition aux vents	Bise et Vent	
Loisirs environnants	Plage d'Excenevex, camping, agospace	

Excenevex est une commune française dans le département de la Haute-Savoie. Célèbre pour accueillir la seule plage de sable fin du Léman, elle est une localité calme et peu peuplée, comptant un peu plus de 1000 habitants à l'année. Néanmoins, elle reste attractive, notamment grâce au camping de la Pinède qui borde la plage. De plus, l'orientation de la commune sur le lac apporte un nouveau regard au niveau des contraintes des vagues et des vents.



Yvoire

8 Fiche récapitulative d'Yvoire



Yvoire est une commune française de Haute-Savoie, qui forme avec Nyon la frontière entre le Grand-Lac et le Petit-Lac. Comme ce qui avait été proposé à Prangins par l'association de La Liberté, une extension de l'enrochement protecteur du port peut être envisagée ici. Tout comme Excenevex, elle compte un millier d'habitants. Yvoire a été choisie car elle fait directement face à la région de la Côte et est bien reliée à la Suisse par voie navigable.

Critère	Observation	
Arrêt TP le plus proche	CGN à 500 m	
Tirant d'eau de 3m	30 m	
Etat des berges	Artificielles, enrochement	
Inscription au cadastre	Domaine public	
Courant le long des rives	SO – 0.1 m/s	SE – 0.2 m/s
Proximité à Morges	20 km à vol d'oiseau	
Intégration dans le paysage	Bonne	
Navigation	Très fréquenté	
Partenariat possibles	Office du tourisme, château	
Hauteur significative max. des vagues	T50 : 0.58 m	T2 : 0.54 m
Exposition aux vents	Bise et Vent	
Loisirs environnants	Vieille ville, camping, château	



3.4. Analyse multicritère

Pour l'analyse multicritère, les critères suivants ont été retenus. Pour chacun d'entre eux, le système de notation est également décrit.

Accessibilité

Afin d'assurer une bonne flexibilité pour les usagers en fonction des horaires de visite de La Liberté, la desserte est très importante pour le lieu de la galère. Ensuite, il faut que la distance entre l'arrêt de transport public (TP) le plus proche et le débarcadère soit raisonnable. Une bonne accessibilité est définie lorsque l'arrêt TP est bien desservi et qu'il se situe à moins de 400m de marche, distance raisonnable pour accéder à la galère. Une accessibilité est définie comme moyenne si le lieu n'est pas bien desservi mais que la distance reste en dessous des 400m. Une accessibilité sera mauvaise si le lieu est mal desservi, peu importe l'éloignement de l'arrêt.

Bathymétrie

La distance où se trouve une bathymétrie de 3m à partir de la berge ou de l'infrastructure existante définira la qualité de ce critère. Sur la base d'une quinzaine de débarcadères de la CGN choisis tout autour du lac, une distance de 15 à 45m est considérée bonne, une distance de 45 à 75m moyenne et mauvaise au-delà.

Cadastre

L'inscription au cadastre de la parcelle sur laquelle sera construit le débarcadère est primordiale. Si la parcelle est sur le domaine public, cela ne devrait pas poser de problème lors de la construction. En revanche, si elle est chez un privé, cela devient plus délicat (Gret, B., interview, 2020). Pour la classification, une parcelle sera soit du domaine public soit privée, avec une variante pour les parcelles publiques car situées sur le lac mais avec des parcelles privées situées derrière la berge ou la promenade de la berge.

Aspect identitaire

Afin de respecter l'objectivité du critère, la hiérarchie suivante est utilisée pour la classification de l'aspect identitaire : District de Morges – région de la Côte – ailleurs. Le critère devient donc un critère de distance et de proximité à Morges.

Intégration dans le paysage

L'intégration dans le paysage se base sur la présence d'aménagements et d'habitations privées alentours. Une intégration est jugée bonne si la zone est située proche d'une zone déjà aménagée et qu'il n'y a pas de privés sur la berge. Moyenne si aménagée mais en présence de parcelle privé ou non aménagée mais sur le domaine public. L'intégration est mauvaise si le lieu est non aménagé et privé.

Navigation déjà existante

La fréquentation par les plaisanciers de la zone est évaluée ici. La présence d'une route CGN n'a que peu d'effet (Beauval, A., interview, 2020), car ce sont des professionnels qui pilotent ces navires. C'est donc la taille du port adjacent qui sera déterminante pour la fréquentation. Sans port l'endroit sera peu fréquenté, des ports jusqu'à 200 places seront fréquentés et au-delà très fréquentés. Les données de place des ports sont recueillies sur le site des ports du Léman (2020).

Partenariat

Pour tous les sites, il y aura toujours des possibilités de développer des partenariats avec les localités ou les offices de tourisme. Le critère sera donc jugé sur d'excellentes, bonnes ou moyennes possibilités de partenariat. Ce critère aura une certaine part de subjectivité avec des partenariats qui peuvent paraître bons pour certains mais mauvais pour d'autres.

Vagues

En se basant sur les données de swisslakes les hauteurs de vagues maximales sont considérées à chaque lieu pour un temps de retour de 50 ans. Un intervalle entre la plus grande vague et la plus petite vague est alors créé et divisé en trois. La classification se fait selon la hauteur significative maximale à chaque lieu.

Vents

La même procédure que pour les vagues peut être utilisée pour les vents. Ici, les maximums de rafales de vents entre 2012 et 2018 aux stations météorologiques de Nyon/Changins, St-Prex, Genève et du Bouveret sont consultés (Prévision météo, 2020). La station de Genève servant de mesure la plus proche pour Yvoire et Excenevex, St-Prex valant aussi pour Morges et Nyon pour Prangins. Les données utilisées se trouvent, comme pour les courants, dans l'Annexe D.

Visibilité / zone d'activité

La visibilité de la galère sera évaluée selon les activités autour du lieu choisi. Les promenades, les parcs alentours sont aussi importants. De plus, la visite photographique effectuée le samedi 14 novembre permet pour certains sites de mieux se rendre compte de la visibilité de la galère.

Remarques

Dans le cadre de cette analyse, les courants ainsi que l'état des berges n'ont pas été jugés déterminants pour le choix du lieu et ont donc été mis de côté. Pour les autres sollicitations, certaines étant plus importantes que d'autres, il a fallu leur attribuer un poids adéquat. A l'aide de plusieurs interviews (Bujard P., 2020 ; Beauval, A., 2020 ; Gret B., 2020) et discussions internes deux catégories de poids ont été définies :

- Poids de 0.5 pour les sollicitations moins déterminantes
- Poids de 1 pour les sollicitations déterminantes

Le Tableau 4 résume les réponses des lieux sélectionnés aux sollicitations du lac. Le Tableau 5 quant à lui énonce les résultats des scores obtenus suite au calcul de la somme pondérée. Le détail de ce calcul est expliqué dans l'Annexe E.

Finalement, c'est le site situé devant le port du Bief qui a été retenu pour une analyse plus approfondie. En effet, le site a atteint le meilleur score (Tableau 5) et s'avère très intéressant pour l'association. En effet, le site est déjà connu et le critère identitaire fait fortement pencher la balance en sa faveur.

Tableau 4: Comparaison multicritère entre les différents sites étudiés

	Accessibilité	Bathymétrie	Cadastre	Aspect identitaire	Intégration paysagère	Navigation existante	Partenariat	Vagues	Vents	Zone d'activité
St-Prex	☹️	☹️	☹️	😊	😊	☹️	☹️	😊	☹️	☹️
Prangins	☹️	☹️	😊	☹️	☹️	☹️	☹️	☹️	😊	😊
Nyon	😊	☹️	☹️	☹️	☹️	😊	☹️	☹️	😊	☹️
Bar la Coquette	☹️	☹️	☹️	😊	😊	☹️	😊	☹️	☹️	😊
Port du Bief	😊	😊	😊	😊	😊	☹️	☹️	☹️	☹️	😊
Bouveret	☹️	😊	☹️	☹️	☹️	☹️	☹️	😊	☹️	☹️
Excenevex	☹️	☹️	☹️	☹️	☹️	😊	☹️	☹️	☹️	☹️
Yvoire	☹️	😊	😊	☹️	😊	☹️	☹️	😊	☹️	😊

Tableau 5: Tableau récapitulatif des scores de l'analyse multicritère

Lieu	Score
St-Prex	17,5
Prangins	14,5
Nyon	14,5
Bar la Coquette	14,5
Port du Bief	19
Bouveret	14
Excenevex	12
Yvoire	18

4. Modélisation

4.1. Méthodologie

La partie modélisation de ce projet se concentre sur les vents et les vagues du Léman au site défini du port du Bief. À l'aide du logiciel MIKE et des différents produits qui le composent, les vagues induites par les vents pourront être modélisées précisément pour trois différents temps de retour : 2 ans, 20 ans et 50 ans. Ces vagues permettront en premier lieu d'évaluer la courantologie locale sur le fond du lac. Sur la base d'une courbe de Hjulstrum, il sera ensuite déterminé si les sédiments sont mis en mouvement ou non afin d'évaluer la possibilité de construire un chenal d'accès.

L'organigramme ci-dessous (Figure 15) permet d'avoir une vue d'ensemble sur la méthodologie utilisée lors de la modélisation des vagues induites par les vents.

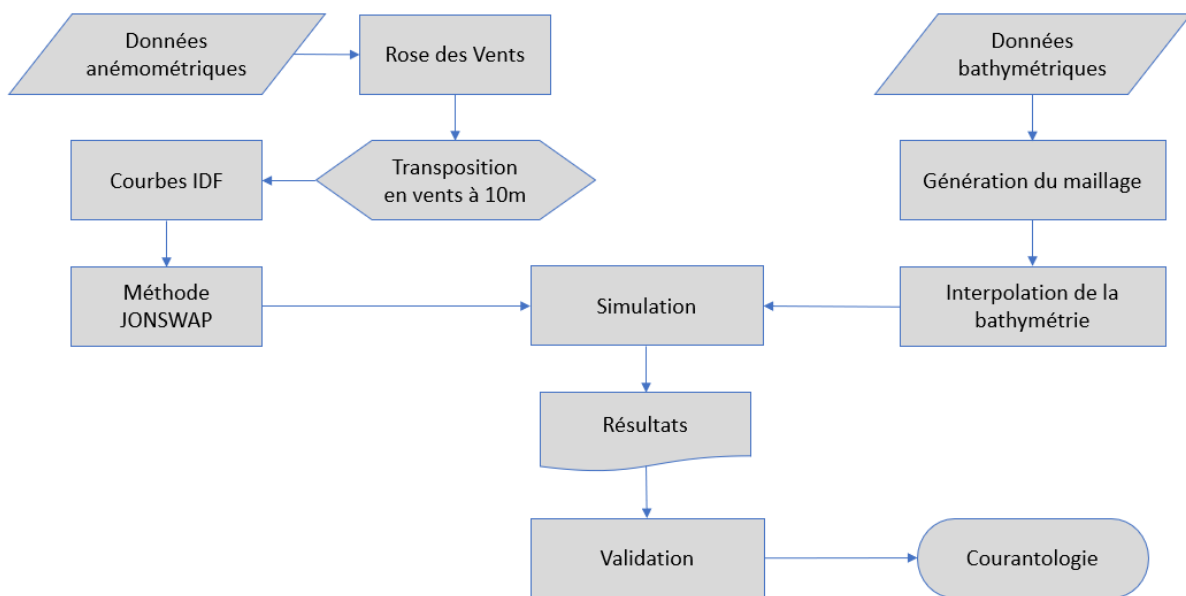


Figure 15: Organigramme des étapes de modélisation

L'organigramme permet de scinder les étapes de modélisation en deux parties distinctes qui se rejoignent lors de l'étape de simulation. D'un côté, la modélisation des vents, de l'autre, les étapes dites de « *pre-processing* » requises pour préparer le maillage et la bathymétrie utilisés pour modéliser les vagues. Comme énoncé auparavant, le but de ces simulations est d'obtenir trois paramètres pour les vagues : la hauteur significative, la période et la direction pour différents temps de retour. Après validation, la courantologie est à son tour simulée à l'aide des résultats de l'étape précédente. Une dernière étape de « *post-processing* » sera effectuée à l'aide du module plot composer de MIKE Zero pour la présentation des résultats.

4.1.1. Données à disposition

La station météorologique la plus proche du site étudié est celle de St-Prex, dont les données anémométriques de 1993 à 2018 ont été mises à disposition. Située à 6 km à vol d'oiseau du port du Bief vers l'Ouest (Figure 16), la station contient notamment les informations de vitesse et de direction des vents à St-Prex.



Figure 16 : Situation des stations météorologiques proches du site du port du Bief

En plus des vents, des données bathymétriques du Léman sont à disposition sous forme de nuage de points. L'intérêt de ces points est qu'ils sont peu nombreux dans les zones profondes du lac, alors qu'ils sont plus nombreux à l'approche des côtes.

4.1.2. Modélisation des vents

Le but de la modélisation des vents est d'obtenir les intensités de vent induisant les plus grandes hauteurs de vagues significatives. La première étape de ce processus est d'obtenir la rose des vents de la station de St-Prex à l'aide de Matlab. Elle sera présentée de manière conventionnelle avec le Nord à 0°, l'Est à 90°, le Sud à 180° et l'Ouest à 270°.

a. Transposition des vents

Le produit MIKE 21 fonctionne avec des vents situés à 10 m au-dessus du niveau du lac. Le niveau moyen du lac étant estimé à 372.0 msl (SISL, 2021), et l'altitude de la station à 425 msl, il est donc nécessaire de transposer les vents à 10 m au-dessus du niveau du lac. Pour ce faire, la relation suivante permet d'effectuer la transposition voulue (Oriez, 2011) :

$$U_{10} = R_{10} * U_{\Delta z} = \left(\frac{10}{\Delta z}\right)^{\frac{1}{7}} * U_{\Delta z} \quad (5)$$

U_{10} : Vitesse à 10 m au-dessus du lac [m/s]

R_{10} : Facteur de correction d'altitude [-]

$U_{\Delta z}$: Vitesse à la station de mesure [m/s]

Δz : Différence d'altitude entre la station et le niveau du lac [m]

Il est par ailleurs précisé que cette approximation est limitée à de faibles différences d'altitudes. Dans le cas de la station de St-Prex, la différence est de seulement 53 m. La station de St-Prex se situant à moins d'1 km des côtes lacustres (Figure 16), il peut être estimé que la friction terrestre est négligeable entre la côte et la station (Oriez, 2011). Les vents de la station de St-Prex peuvent ainsi être considérés comme des vents lacustres et aucune transformation supplémentaire n'est requise.

b. Courbes IDF

Une fois les vents transposés, la troisième étape est d'obtenir les courbes IDF des vents. Ces courbes statistiques permettent pour différentes fréquences d'obtenir une relation entre l'intensité et la durée du vent. Elles sont obtenues à l'aide de TeREsA. La statistique utilisée par le logiciel est un modèle réduit de Gumbel (Travaglini et al., 2016) similaire à celle utilisée dans l'implémentation du projet LATLAS (Oriez, 2011).

c. Méthode de JONSWAP

Après que les courbes IDF aient été calculées, l'objectif sera d'obtenir une courbe reliant la durée du vent avec la hauteur de vague induite. La méthode JONSWAP (Kampuis, 2020) est un outil fiable permettant d'obtenir ces relations. Cette méthode propose, à l'aide de relations entre nombres adimensionnels, de modéliser la hauteur significative ainsi que la période des vagues en connaissant la vitesse du vent, la durée du vent et le fetch disponible. Les paramètres adimensionnels sont les suivants :

$$F^* = \frac{gF}{U^2}, \quad H_{mo}^* = \frac{gH_{mo}}{U^2}, \quad T_p^* = \frac{gT_p}{U}, \quad t^* = \frac{gt}{U} \quad (6)$$

F : le fetch disponible [m]

g : la constante gravitationnelle 9.81 [m/s²]

U : la vitesse du vent [m/s]

H_{mo} : la hauteur significative des vagues [m]

T_p : la période des vagues [s]

t : la durée du vent pour obtenir H_{mo} [s]

Les relations entre ces paramètres sont les suivantes :

$$H_{mo}^* = 0.0016(F^*)^{\frac{1}{2}}, \quad T_p^* = 0.286(F^*)^{\frac{1}{3}}, \quad t^* = 68.8(F^*)^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

Toutefois, la hauteur des vagues ne dépendra pas seulement de la durée du vent. Il est important de savoir si la hauteur de vague sera limitée par la durée du vent ou par le fetch (LCH, 2008). En effet, lorsqu'elle est limitée par la durée du vent, ce dernier n'aura pas soufflé assez longtemps pour que la vague se forme sur tout le fetch disponible. En revanche, lorsque c'est le fetch qui est limitant, le vent souffle assez longtemps, mais la vague ne peut pas se former sur une distance plus grande que le fetch disponible. Il y a donc une hauteur de vague maximale qui survient entre ces deux phénomènes. Afin de prendre cela en compte, la méthode JONSWAP utilise le terme de « fetch effectif », qui se définit ainsi :

$$F_{eff}^* = \left(\frac{t^*}{68.8} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

Ainsi, lorsque $F_{eff}^* > F^*$, les vagues sont limitées par le fetch et ce sont les relations de base (6), (7) qui sont utilisées, alors qu'à l'inverse, quand $F_{eff}^* < F^*$, la durée est limitante et c'est le fetch effectif (8) qui est utilisé en lieu et place de fetch adimensionnel dans les relations de JONSWAP (Kampuis, 2020).

Après l'obtention des hauteurs de vagues maximales pour chaque temps de retour, les courbes IDF seront utilisées pour lire l'intensité de vent correspondant à la durée induisant la vague la plus haute.

C'est cette intensité de vent qui sera ensuite utilisée dans le module MIKE 21 SW pour générer les vagues.

4.1.3. Modélisation des vagues

a. Génération de la bathymétrie

Ce projet se concentrant sur une petite partie du Léman, il n'est pas nécessaire de modéliser tout le lac. Afin de réduire les temps de calcul, seule une partie du Grand Lac a été modélisée (Figure 17).

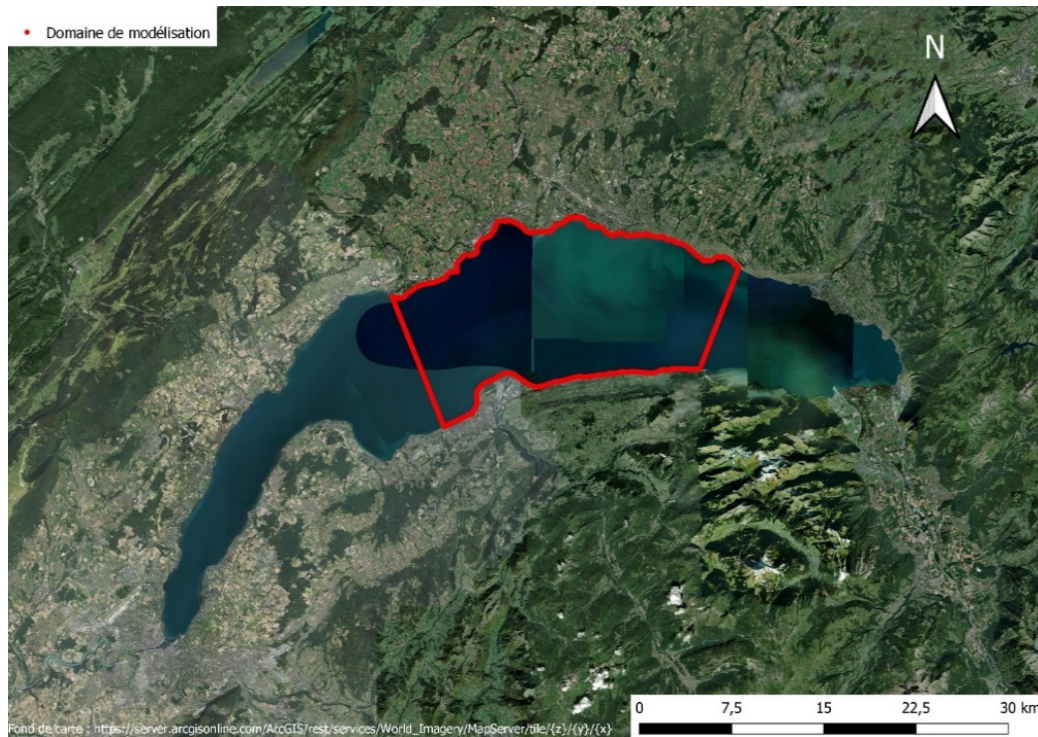


Figure 17: Domaine de modélisation. Grand Lac coupé à l'Est entre Chexbres et Meillerie, à l'Ouest entre Buchillon et Thonon

Un maillage est ensuite défini sur tout le domaine de modélisation à l'aide du module Mesh Generator de MIKE Zero. Une fois ce maillage obtenu, une interpolation pourra être effectuée avec les données bathymétriques pour couvrir tout le domaine. Pour la modélisation des vagues, un maillage triangulaire est à privilégier car il permet un raffinement du maillage en fonction de l'endroit d'intérêt. De plus, un maillage triangulaire permet de réduire les temps de calcul par rapport à un maillage rectangulaire (Oriez, 2011).

b. Simulation

Pour obtenir les contraintes liées aux vagues à l'endroit étudié, la modélisation consiste à simuler les hauteurs de vagues sous un régime de vent constant. Les intensités et directions de vent sont déterminées lors de la modélisation des vents, tout comme la durée maximale induisant les vagues les plus hautes. Plusieurs paramètres peuvent être modifiés dans le module MIKE 21 SW, tout comme les équations utilisées pour régir la simulation. Le vent simulé étant un vent constant, le choix se porte sur le mode stationnaire de MIKE 21. Pour la discrétisation, il est recommandé d'utiliser un algorithme rapide de bas ordre, réduisant considérablement le temps de calcul, et de définir un nombre d'itération maximum permettant aux paramètres de tolérance de converger. C'est également ici qu'il faut définir le forçage par le vent. Comme discuté auparavant, c'est un vent constant qui est simulé pour ce projet. Plusieurs phénomènes physiques peuvent être implémentés dans le module comme le déferlement, la diffraction ou le moutonnement.

Avant de lancer la simulation, il faudra encore définir les conditions de bord. Dans l'exemple d'un vent d'Ouest, il est nécessaire avant tout de définir les conditions de bord à l'Ouest du domaine de modélisation. Les conditions à l'Est ne seront pas forcément nécessaires, car ce sont les vagues d'Ouest qui forceront les vagues à l'Est. Dans les conditions de bord, il faut spécifier la hauteur de vague significative, la période de vague, la direction moyenne des vagues et l'indice de propagation directionnel. Ce dernier a pour valeur défaut 5 et il est recommandé de le laisser ainsi. Pour cette modélisation, les conditions de bord sont recueillies sur swisslakes. La limite Ouest du domaine de modélisation est divisée en 15 et chaque partie se verra insérer les paramètres mentionnés. Un exemple sur les figures ci-dessous (Figure 18, Figure 19) permet de mieux se représenter les données recueillies aux conditions de bord.

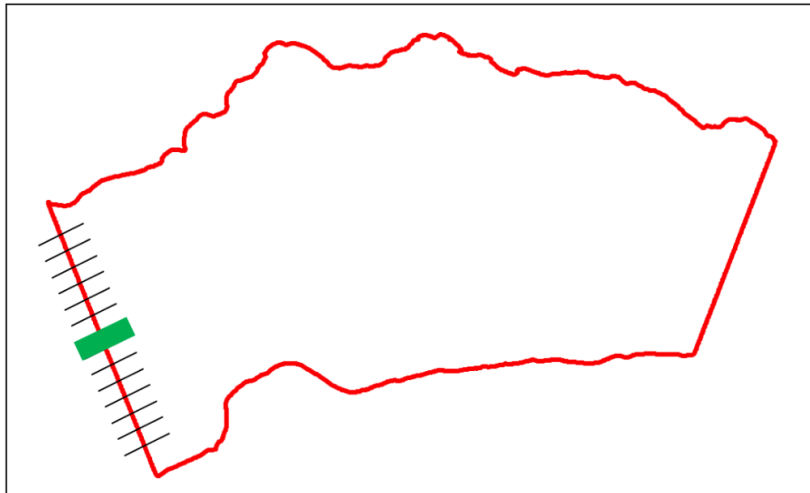


Figure 18: Découpe de la limite Ouest en 15 éléments. L'élément encadré en vert est l'élément pour lequel on veut insérer des conditions de bord particulières

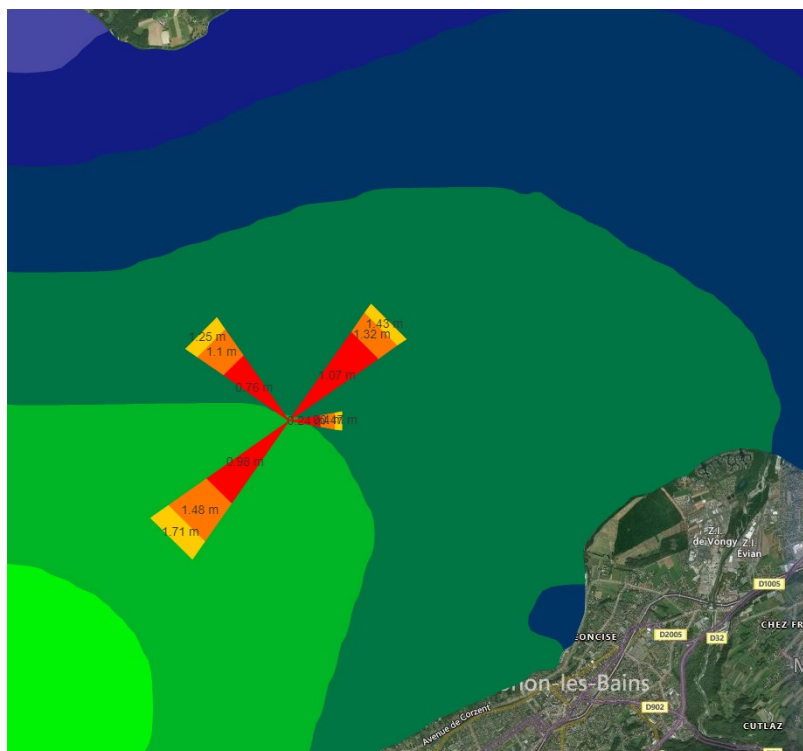


Figure 19: Point approximatif pour l'élément encadré en vert de la figure précédente (source : www.swisslakes.net)

c. Résultats

Les résultats obtenus sont la hauteur significative des vagues, leur période et leur direction. Les résultats présentés dans le rapport seront ceux correspondant à un temps de retour de 20 ans, fréquence utilisée pour le dimensionnement du débarcadère. Les autres résultats sont présentés dans l'Annexe F.

4.1.4. Validation

Etant impossible d'aller vérifier les résultats obtenus avec des données mesurées réelles à un endroit précis sur le lac, il faut se comparer à un modèle reconnu. Comme les conditions de bord sont introduites depuis swisslakes, il est intéressant de vérifier si les résultats obtenus par la modélisation correspondent à ceux mis à disposition en ligne. Pour ce faire, trois points seront sélectionnés à différentes profondeurs et les paramètres comparés entre les deux modèles. L'objectif de cette validation n'est pas d'effectuer une analyse statistique de similarité, mais de voir si le modèle correspond aux mêmes ordres de grandeur, et sinon de comprendre pourquoi.

4.1.5. Courantologie

Après la validation des résultats du module « Spectral waves », le module « Flow model » MIKE 21 FM sera utilisé pour étudier la courantologie locale. À nouveau, plusieurs possibilités sont offertes dans les choix des équations, et les paramètres recommandés sont données par MIKE 21. Il faut utiliser les données de radiation de vague modélisées avec MIKE SW pour les insérer dans ce module. Les résultats sont également présentés dans l'Annexe F pour des temps de retour de 2 et 50 ans. À ce moment-là, les vitesses modélisées seront introduites dans une courbe de Hjulstrum (Figure 10) pour évaluer la mise en mouvement des sédiments du lac.

4.2. Présentation et analyse des résultats

4.2.1. Modélisation des vents

La station météorologique de St-Prex a été choisie comme représentative du site du port du Bief. Les données brutes présentent quelques caractéristiques déjà évoquées de la station, en plus de ses coordonnées dans l'ancien système de projection CH1903_LV03 : 523'549/148'525. Les données de vents (Tableau 6) comprennent pour chaque année la direction et la vitesse du vent à des intervalles de 10 min.

Tableau 6: Exemple de données brutes de la station de St-Prex pour l'année 2008

N° station	Année	Mois	Jour	Heure	Minute	Direction du vent [°]	Vitesse du vent [m/s]
STA	Jahr	MO	TG	HH	MM	197	196
331	2008	1	1	0	10	73	2.6
331	2008	1	1	0	20	66	2.6
331	2008	1	1	0	30	66	2.6
...

Les numéros 197 et 196 représentent le numéro des paramètres attribués à la direction et la vitesse du vent. Avant d'établir la rose des vents, il faut préparer les données sous un seul et même tableau pour qu'elles soient utilisables plus tard par TeREsA. Ceci peut être fait à l'aide de traitement de texte sur Matlab. De plus, il faut enlever toutes les valeurs aberrantes de ces données. Toute valeur avec une direction inférieure à 0° ou supérieure à 360° peut automatiquement être retirée du jeu de données. Après tri par ordre décroissant, des valeurs de 3762 m/s ainsi que des valeurs négatives ont été identifiées et retirées pour la vitesse du vent. Ces valeurs aberrantes supprimées, la rose des vents de St-Prex peut être obtenue (Figure 20) à l'aide d'une fonction utilisateur Matlab (Al Mac, 2020).

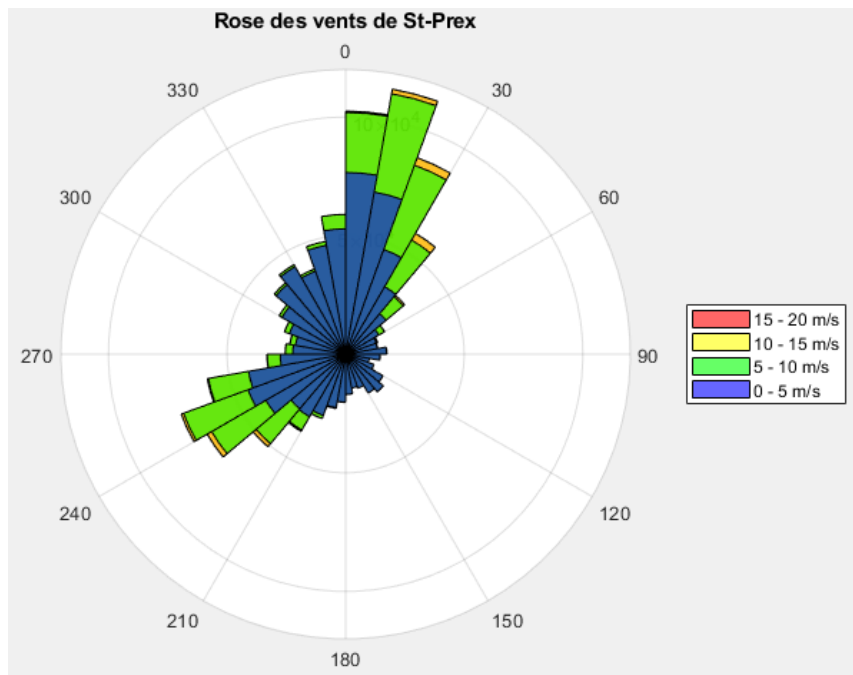


Figure 20: Rose des vents de St-Prex. Les cercles intérieurs représentent des occurrences d'événements de 50'000 et 100'000

Sur cette rose des vents, deux régimes majeurs sont observés. Le premier est un régime de Bise avec des vents soufflant entre 0° et 45° le plus fréquemment. Le second est un régime de Vent et de Vent Blanc avec des vents soufflant entre 210° et 270°. C'est ce dernier qui fera l'objet de la modélisation des vents par la suite, car les vents de Bise induisent de faibles hauteurs de vagues au site du port du Bief, étant donné que le fetch disponible est nul. Ceci se vérifie sur swisslakes où les vagues induites par les vents du Nord-Est sont beaucoup moins hautes que les vagues induites par des vents d'Ouest.

a. Courbes IDF

Après transposition des vents de la station en vents à 10 m au-dessus du lac, les courbes IDF sont tracées (Figure 22). Il est important de noter que les données doivent figurer sous un format particulier (Figure 21). Les instructions figurant dans le manuel de l'utilisateur (Travaglini et al., 2016) doivent être suivies consciencieusement pour éviter tout problème. Par exemple, si un caractère spécial de type « é » figure dans le chemin d'accès au fichier de données, ce dernier ne sera pas lu par le logiciel. Ensuite, il faut choisir la durée des événements ainsi que les temps de retour qui apparaîtront dans le fichier de résultats. Dans ce projet, des vents soufflant jusqu'à 48h pour des temps de retour de 2, 20 et 50 ans ont été introduits.

```
DATE, P
1993-10-01 22:00,0.3
1993-10-01 23:00,0.1
1993-10-02 00:00,0.8
1993-10-02 01:00,0.2
1993-10-02 02:00,0.2
1993-10-02 03:00,0.1
1993-10-02 04:00,0.5
1993-10-02 05:00,0.2
```

Figure 21:Exemple de format de données de précipitations à préparer pour TeREsA

Pour le Vent et le Vent Blanc, en utilisant les vitesses de vent de direction 210° à 270°, les courbes IDF sont tracées sur TeREsA (Figure 22).

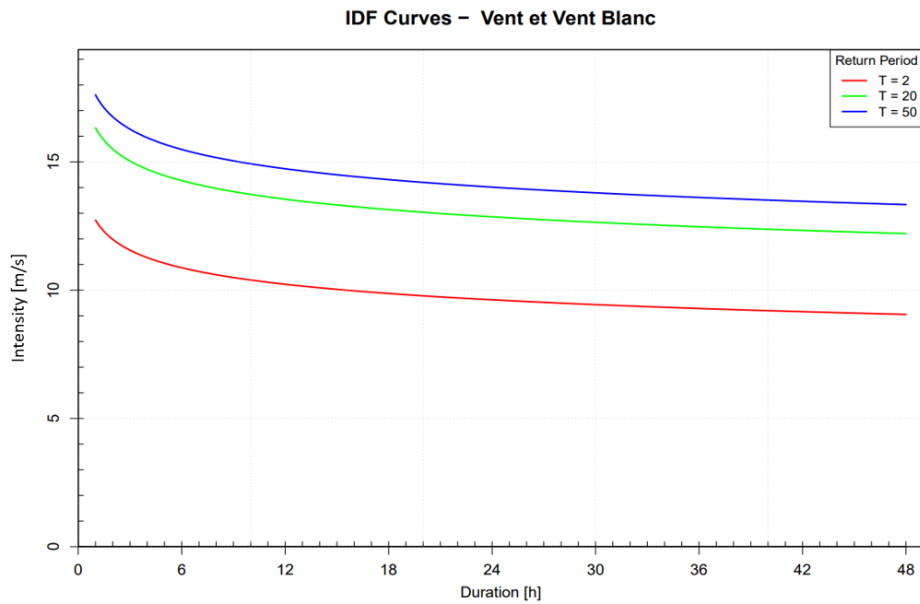


Figure 22: Courbes IDF pour le régime de Vent et Vent Blanc obtenues à l'aide de TeREsA

b. Méthode JONSWAP

Après application des calculs de la méthode JONSWAP, les résultats sont obtenus pour le Vent et le Vent Blanc (Figure 23) avec un fetch maximal disponible de 20 km en direction du Sud-Ouest.

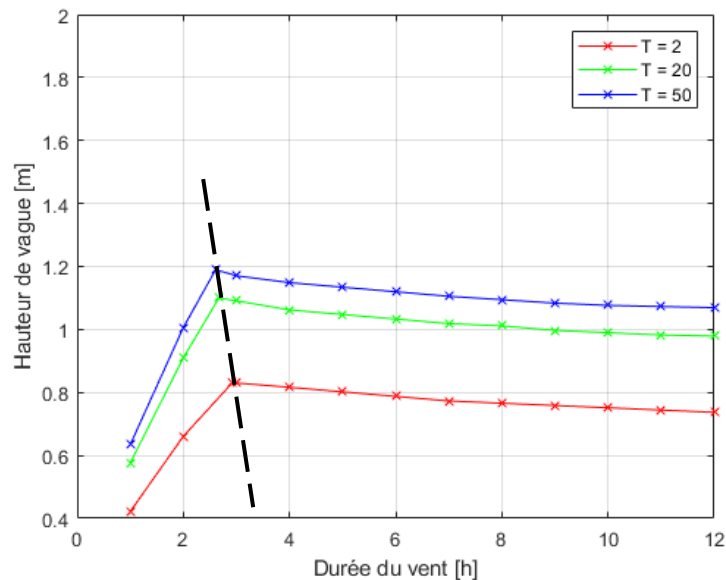


Figure 23: Courbes obtenues après application de la méthode JONSWAP. La ligne noire sépare les phénomènes de limitation par le fetch et par la durée

A gauche de la ligne en traitillé, la hauteur de vague est limitée par la durée du vent, alors qu'elle est limitée par le fetch à droite. La lecture de cette courbe nous indique qu'à environ 3h de durée de vent, la hauteur de vague est maximale. En relisant les courbes IDF, une durée de 3h correspond à un vent d'intensité de 11.6 m/s pour un temps de retour de 2 ans par exemple. Pour plus de lisibilité, les résultats pour chaque temps de retour sont présentés sous forme de tableau (Tableau 7).

Tableau 7: Résultats après application de la méthode JONSWAP

Temps de retour [an]	Hauteur significative des vagues [m]	Période des vagues [s]	Durée du vent [h]	Intensité du vent [m/s]
2	0.83	3.8	2.9	11.6
20	1.10	5.0	2.7	15.1
50	1.19	5.4	2.6	16.2

Finalement, ce sont ces intensités qui seront implémentées comme intensité de vent lors du forçage par le vent sur le domaine de modélisation durant les simulations de vagues.

4.2.2. Modélisation des vagues

a. Génération de la bathymétrie

Après avoir défini le domaine de modélisation, il faut tracer la ligne de côte. Celle-ci est ensuite affinée et lissée en plaçant des nœuds tous les 50 m pour approximer la ligne de rivage (Figure 24). Il est important de trouver un bon compromis entre une approximation trop précise qui rendrait le maillage très fin en bord de côte et une approximation trop large. Pour ce projet, les 50 m suffisent à avoir une bonne approximation de la côte.

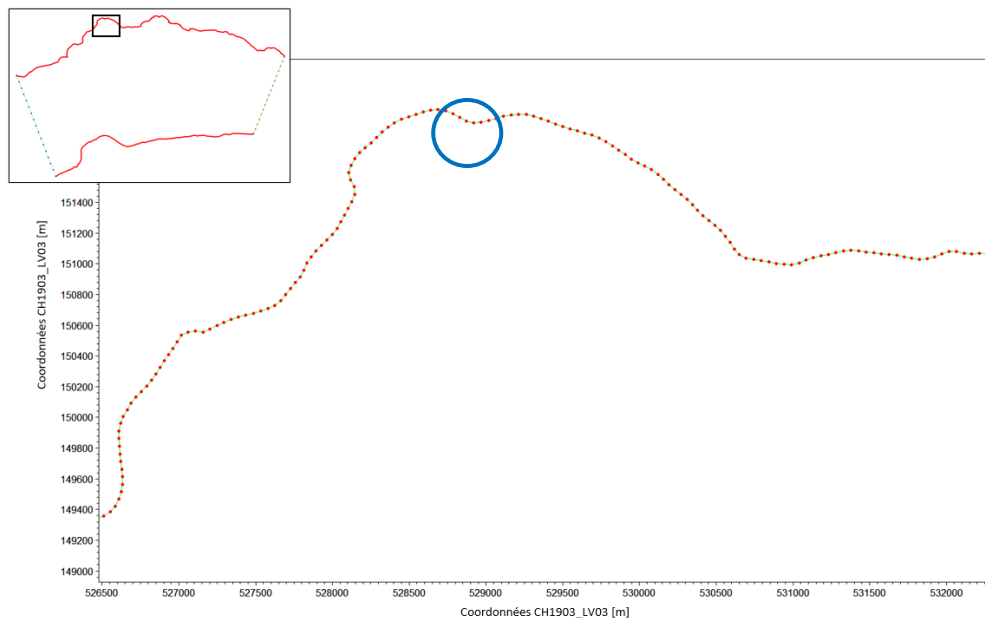


Figure 24: Rive du lac Léman lissée par des nœuds placés tous les 50 m. L'encadré zoome sur la partie étudiée plus finement du lac au port du Bief. Le cercle bleu désigne le site précis du port du Bief

Une fois les limites tracées, il est important de s'assurer que l'altitude en ces points corresponde à celle du niveau du lac. Ici, c'est une altitude moyenne du lac de 372.3 msl qui a été utilisée. Ensuite, il faut générer un maillage. L'objectif est d'avoir un maillage plus grossier dans les zones non étudiées comme le Sud du lac et les grandes profondeurs, et un maillage qui se raffine à l'approche du site étudié. Ainsi, les phénomènes et paramètres étudiés le seront plus précisément. Pour ce faire, il faut définir des polygones dans le générateur de maillage et leur donner une surface maximale d'élément de maillage. Comme le maillage est triangulaire, il faut calculer les surfaces correspondant aux triangles de côtés souhaités. Pour les simulations futures, des triangles de 300 m, 100 m et 20 m de côté ont été utilisés, correspondant respectivement à des surfaces de 38'971 m², 4'330 m² et 173 m². Pour diminuer les calculs, un nombre maximum de 50'000 éléments a été autorisé pour le maillage. Après quelques étapes de raffinement, ce nombre dépassait les 50'000, c'est pourquoi certaines ont été abandonnées.

Le maillage final est composé de trois polygones et compte 47'178 éléments (Figure 25). Le maillage raffiné est aussi présenté au site du port du Bief après le maillage global (Figure 26).

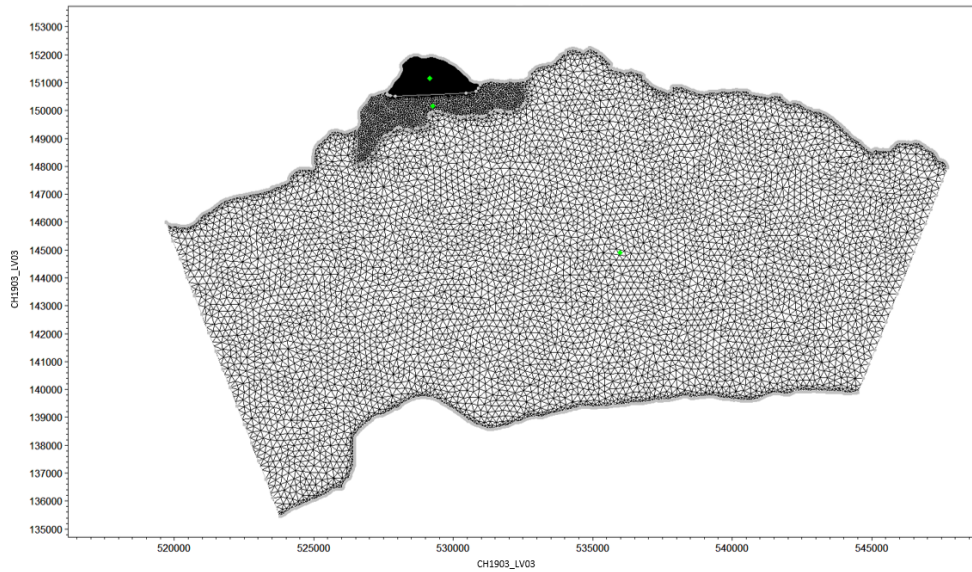


Figure 25: Maillage sur tout le domaine modélisé composé de trois polygones avec des maillages de plus en plus fins

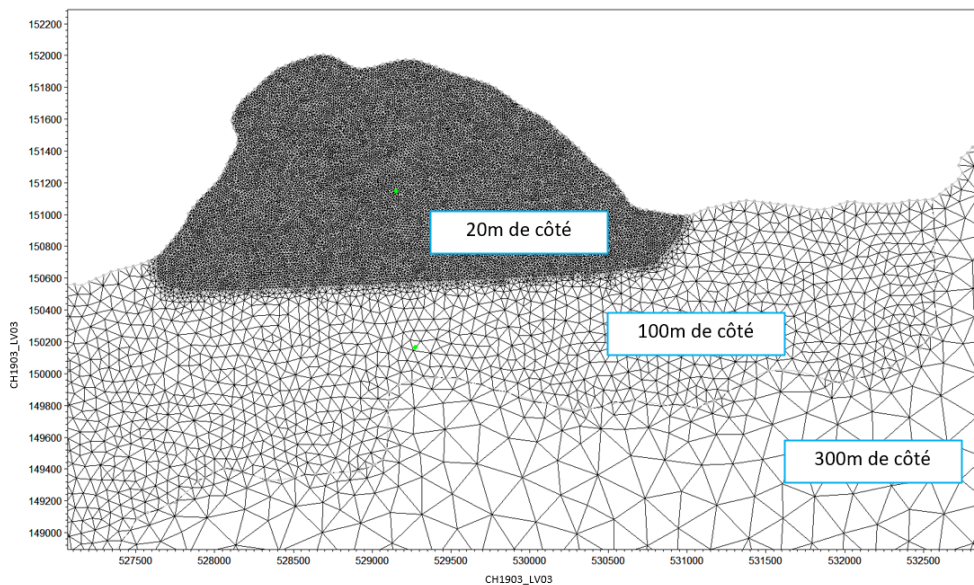


Figure 26: Maillage à l'approche du site du port du Bief. Trois tailles de maillage sont présentées ici avec des triangles de 300m, 100m et 20 de côté

Sur le maillage global (Figure 25), le maillage intermédiaire suit une ligne bathymétrique. Ceci aide le logiciel à ne pas avoir de saut bathymétrique lors de l'interpolation entre deux tailles de maillage. La bathymétrie est ensuite obtenue par interpolation linéaire (Figure 27), ce qui signifie que chaque triangle verra la valeur interpolée linéairement avec celle de son voisin le plus proche. Après quelques tests, la méthode des voisins naturels n'apportait pas de changement significatif et demandait plus de temps pour générer la bathymétrie.

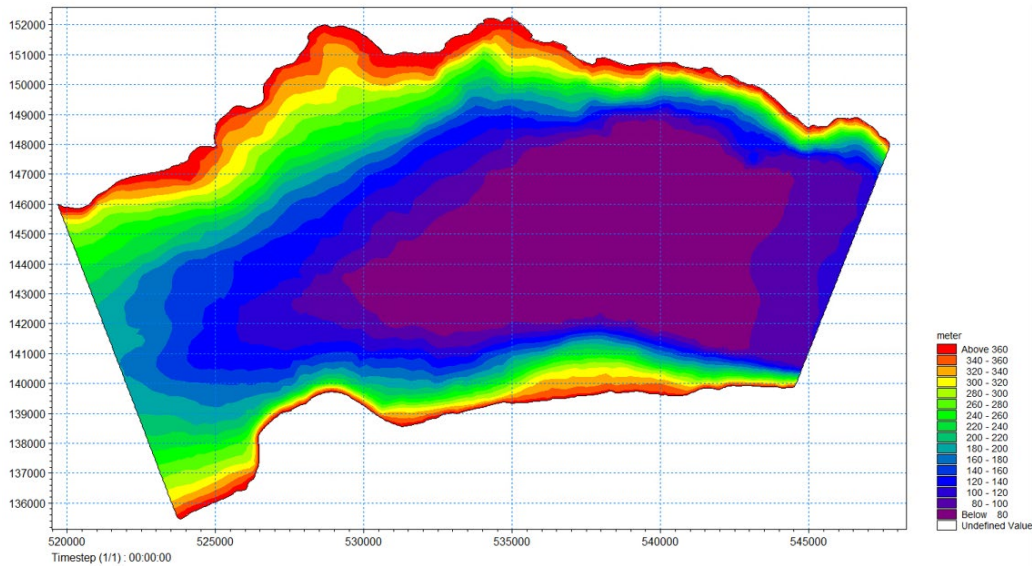


Figure 27: Bathymétrie du Léman interpolée linéairement par le maillage sur la base des données bathymétriques

b. Simulation

Les données de forçage par le vent sont introduites par les résultats obtenus à l'aide de la méthode JONSWAP (Tableau 7). Pour chaque temps de retour, c'est une direction moyenne du Vent et Vent Blanc de 240° qui a été choisie comme dernier paramètre pour le forçage par le vent.

c. Résultats

Les hauteurs de vagues significatives ainsi simulées apparaissent comme telles (Figure 28). Une vision à plus petite échelle est proposée pour mieux se concentrer sur le site étudié du port du Bief (Figure 29). Par la suite, la période moyenne des vagues (Figure 30) ainsi que la direction incidente des vagues (Figure 31) sont présentées pour ce même temps de retour à plus petite échelle.

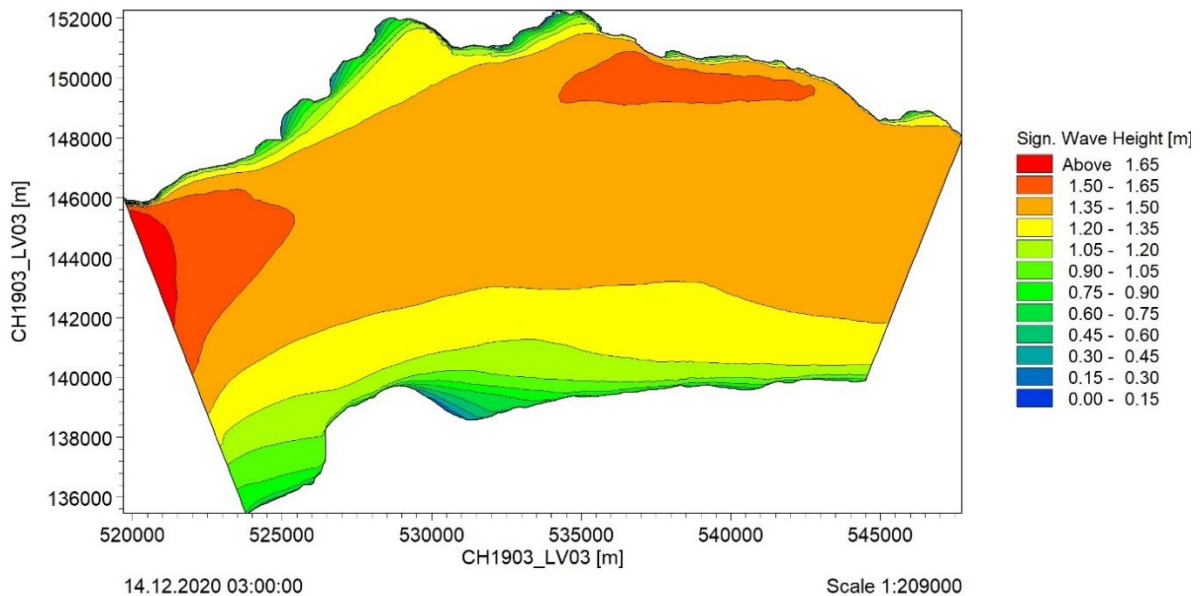


Figure 28: Hauteurs significatives des vagues pour un temps de retour de 20 ans à l'échelle du domaine modélisé

Bien que les hauteurs de vagues soient forcées à l'Ouest, les grandes profondeurs du Grand Lac établissent une houle plutôt homogène entre 1.35 et 1.50 m de haut. Au Nord-Est, les vagues sont à nouveau plus hautes entre 1.50 m et 1.65 m. Ceci est probablement dû au fetch qui leur a permis de

se construire sur une grande distance, avant d'arriver vers une bathymétrie plus faible et de diminuer leur hauteur. A l'approche des côtes, la hauteur significative des vagues diminue en effet avec la bathymétrie.

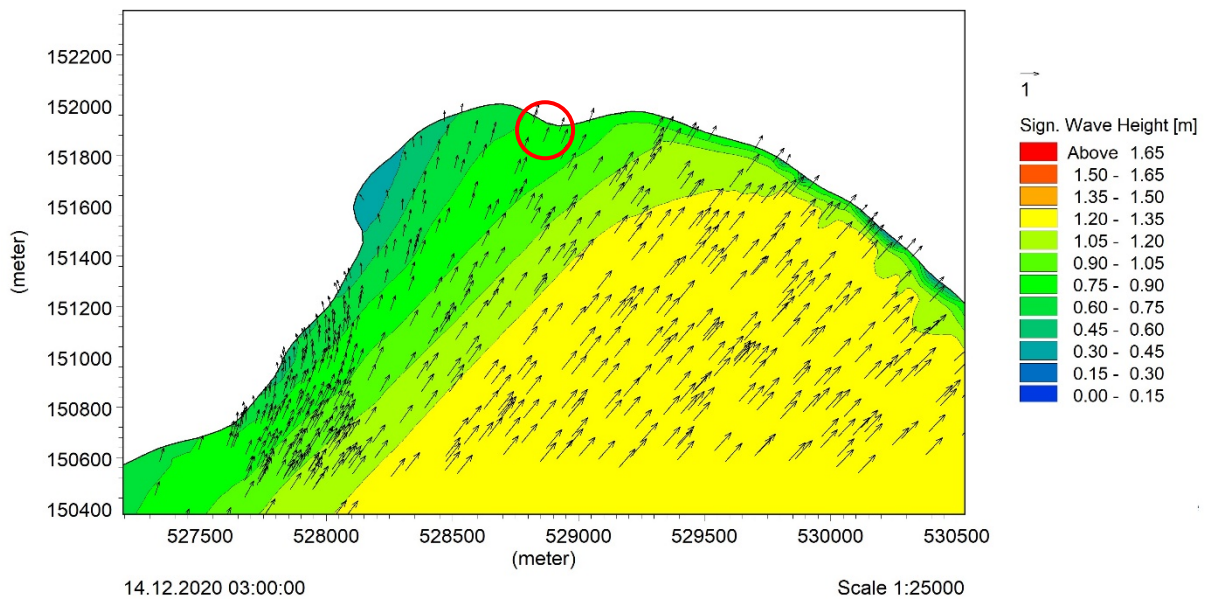


Figure 29: Hauteurs significatives des vagues pour un temps de retour de 20 ans à l'échelle du site étudié.

A plus petite échelle, la hauteur des vagues diminue plus précisément en fonction des lignes bathymétriques et ce phénomène s'observe particulièrement là où le maillage est plus fin. Les aspérités à l'Est sont dues à l'abandon des étapes de raffinement du maillage mais elles peuvent être corrigées et lissées. Au niveau de l'emplacement du débarcadère (cercle rouge sur la Figure 29), les hauteurs de vagues mesurent 81 cm.

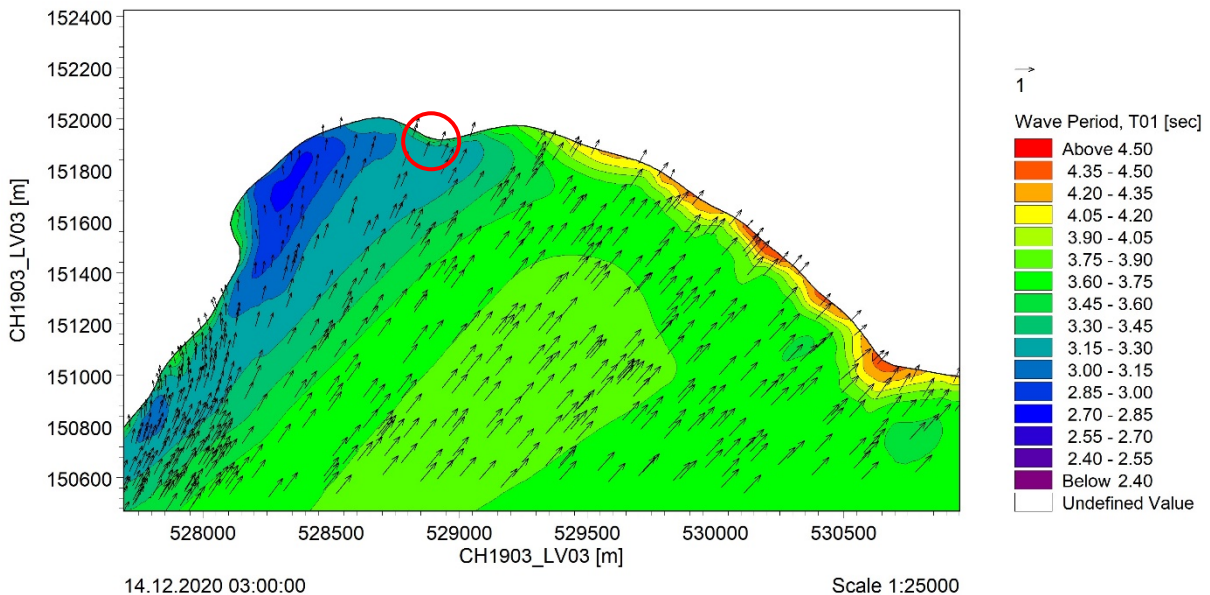


Figure 30: Périodes moyennes des vagues pour un temps de retour de 20 ans exprimées en [s]. Le cercle rouge désigne l'emplacement prévu pour le débarcadère

La période moyenne des vagues suit approximativement le même comportement que les hauteurs significatives. La période diminue avec la bathymétrie du lac et les mêmes aspérités sont observées à l'Est. A l'emplacement du débarcadère, la période moyenne est de 3.27 s.

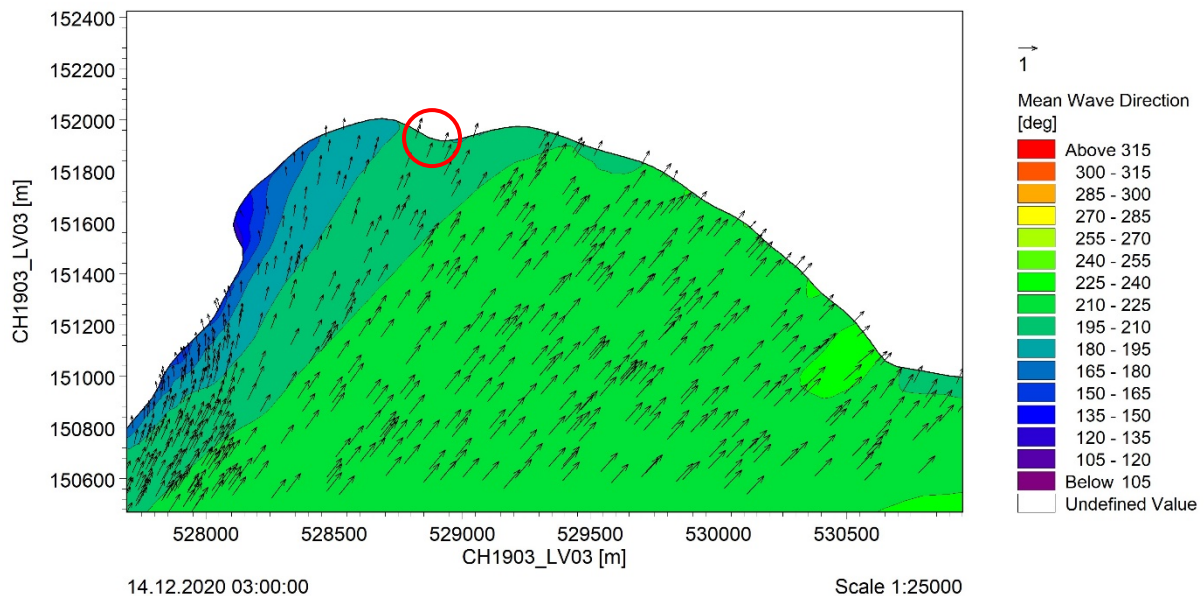


Figure 31: Directions moyennes des vagues incidentes exprimées en degré selon la même convention que la rose des vents. Le cercle rouge désigne l'emplacement prévu pour le débarcadère

La direction moyenne des vagues permet de bien observer le phénomène de réfraction pour lequel les vagues s'alignent de façon à suivre les lignes bathymétriques lorsqu'elles approchent la côte. Il est bon de rappeler que les directions indiquées ici sont celles de la provenance des vagues avec le Nord à 0°, l'Est à 90°, le Sud à 180° et l'Ouest à 270°. Au site choisi pour le débarcadère, la direction des vagues est de 200°.

4.2.3. Validation

Les trois points de comparaison ont été choisis de manière à représenter des profondeurs différentes. Le premier point est le plus proche possible des côtes sur swisslakes avec une bathymétrie de 10 m, le second a une bathymétrie de 30 m et le dernier de 50 m (Figure 32). Ils se situent respectivement à 200 m, 500 m et 1 km du bord.



Figure 32: Points de référence utilisés pour la validation entre les deux modèles

Un tableau récapitulatif des résultats et comparaisons entre les deux modèles est présenté ici (Tableau 8). Il fait état des calculs effectués sur swisslakes pour les trois points de référence et les compare avec ceux modélisés dans MIKE 21 dans ce projet. Pour rappel, les résultats graphiques de 2 et 50 ans se trouvent dans l'Annexe F.

Tableau 8: Récapitulatif des résultats et comparaison pour les trois points de référence. En bleu ciel le point à 200 m du bord, en vert clair le point à 500 m du bord et en blanc le point situé à 1 km du bord

T [an]	Hauteur significative [m]		Période [s]		Direction [°]	
	swisslakes	modèle	swisslakes	modèle	swisslakes	modèle
2	0,73	0,61	3,65	2,9	201,45	205
2	0,8	0,84	3,8	3,3	206,95	215
2	0,89	0,89	3,87	3,3	212,6	218
20	1,1	0,84	4,35	3,2	200,15	203
20	1,22	1,13	4,4	3,6	204,55	215
20	1,38	1,3	4,57	3,8	211,58	218
50	1,26	0,96	4,53	3,3	199,75	203
50	1,4	1,34	4,65	3,8	204,19	215
50	1,6	1,48	4,97	4	211,62	218

4.2.4. Courantologie

Finalement, pour un temps de retour de 20 ans, la courantologie suivante est modélisée à l'échelle du port du Bief (Figure 33) :

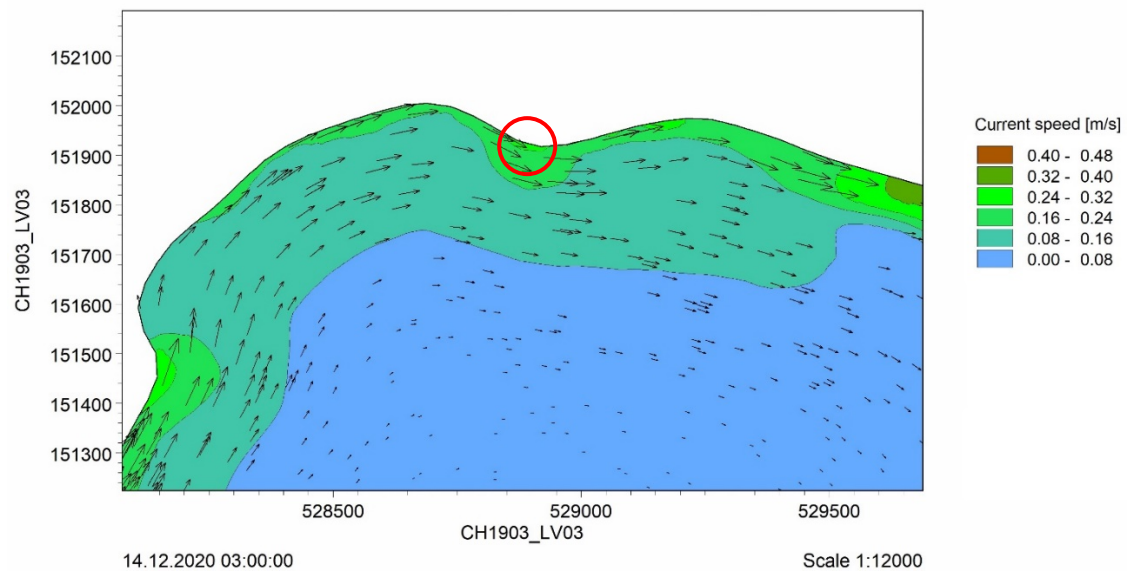


Figure 33: Courantologie à l'échelle du port du Bief. Le cercle rouge désigne l'emplacement prévu pour le débarcadère

Les courants suivent les lignes de côtes et semblent s'en éloigner à l'Ouest. La vitesse des courants à l'emplacement prévu du débarcadère est de 0.17 m/s pour un temps de retour de 20 ans. Les vitesses s'élèvent pour les temps de retour de 2 et 50 ans respectivement à 0.17 et 0.2 m/s à l'emplacement du débarcadère. Les résultats graphiques sont également présentés dans l'Annexe F. Globalement, la vitesse est de l'ordre de 0.15-0.25 m/s dans la zone prévue pour le débarcadère. En se référant à la courbe de Hjulstrum (Figure 10), ces vitesses de l'ordre de 20 cm/s mettent automatiquement les sédiments en mouvement jusqu'à 4 mm de diamètre.

5. Prédimensionnement du débarcadère et notice d'impact

Dans cette section, un débarcadère est prédimensionné. L'éventualité d'un chenal d'accès est étudiée sur la base de la courantologie et les forces exercées par les vagues modélisées sont calculées sur les pieux les plus en avant du débarcadère. Une notice d'impact environnemental est ensuite présentée pour évaluer les effets les plus importants d'un tel ouvrage.

En Suisse, c'est l'office fédéral des transports (OFT) qui régit les demandes d'approbation pour la construction d'ouvrages de type débarcadère. La directive sur l'approbation de débarcadères (OFT, 2017) introduit les notions de présentations, bases légales et documents à fournir lors de l'élaboration d'un tel ouvrage. De plus, c'est aussi l'OFT qui établit les règles de sécurité et les équipements sur la base de normes de construction (Beauval, A., interview, 2020). Le prédimensionnement ne va pas s'attarder sur les éléments sécuritaires et sur tous les détails à fournir. Pour ce prédimensionnement, un plan de situation à l'échelle 1:600 (Figure 35) ainsi qu'un profil latéral à l'échelle 1:200 (Figure 36) sont proposés.

5.1. Procédure

Pour effectuer le prédimensionnement, plusieurs documents ont pu être utilisés. Des schémas de l'étude effectuée par CSD (CSD, 2019) ainsi qu'un plan officiel d'un débarcadère à Chevroux fourni par Mr. Bernard Gret ont grandement aidé à la compréhension des composantes d'un débarcadère. En effet, plusieurs éléments composent un débarcadère, comme des pieux, un garde-corps, une rampe d'accès, des éléments de sécurité, etc. Pour les couleurs des plans, l'OFT a établi dans sa directive le code couleur suivant :

- Rouge pour les éléments nouveaux
- Jaune pour les éléments à démolir
- Noir pour les éléments déjà existants

Le Tableau 9 résume les valeurs obtenues des paramètres lors de l'étape de modélisation. Pour le débarcadère, un temps de retour de 20 ans est considéré. Les hauteurs de vagues significatives permettent de définir l'altitude de la dalle du débarcadère, alors que la direction incidente des vagues permet d'orienter celui-ci.

Tableau 9: Récapitulatif des valeurs de paramètres obtenues lors de la modélisation

T [an]	Hs [cm]	Tp [s]	Direction [°]
2	53	2.83	200
20	81	3.27	200
50	89	3.35	200

L'orientation est définie à 200° par rapport au Nord et l'emplacement du débarcadère a pu être optimisé par rapport à l'analyse multicritère (5 Fiche récapitulative du Port du Bief). Pour ce faire, les données bathymétriques du canton de Vaud (2021) peuvent être utilisées. Comme seules les courbes bathymétriques de 2 et 4 m de profondeur sont disponibles, la bathymétrie est supposée linéaire. La longueur du débarcadère peut être définie à l'aide de l'outil de traçage de ligne du géoportail du canton de Vaud (Figure 34).

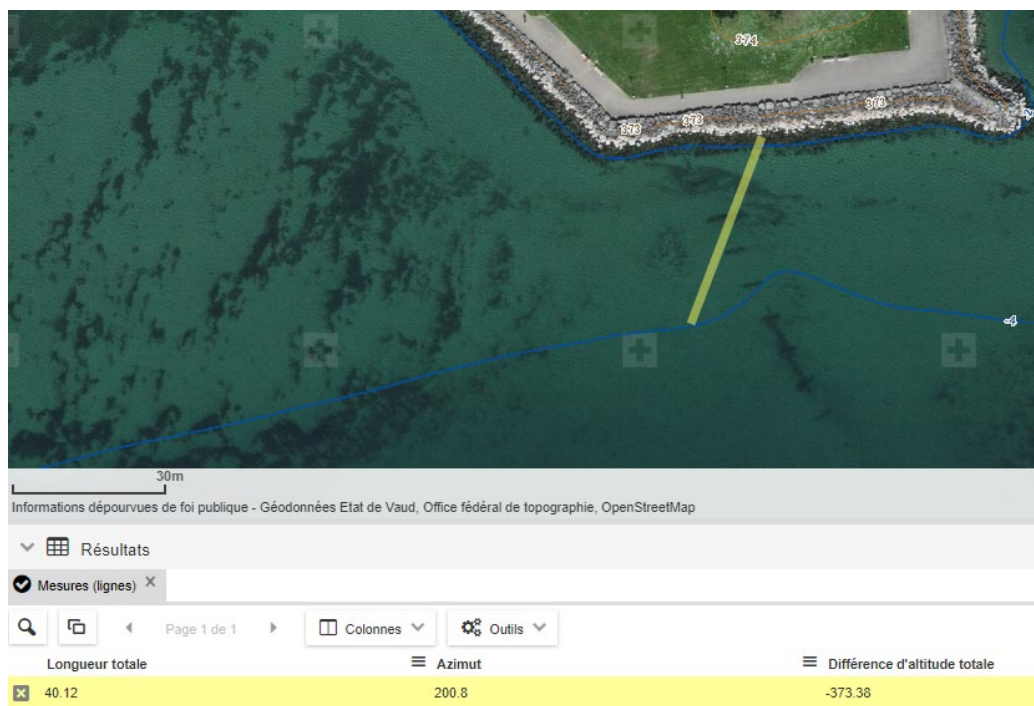


Figure 34: Emplacement du débarcadère. Une orientation de 200° donne une profondeur de 4m à 40m du bord (source www.geo.vd.ch).

L'étape suivante aurait été d'obtenir des informations sur le fond du lac. N'ayant pas trouvé d'études de granulométrie à cet endroit, seules des suppositions seront prises en compte. Dans le bassin de Morges, les sédiments sont des sables fins et limons sableux et les matériaux sont très mobiles (Bujard, P., interview, 2020). Une couche vaseuse de plusieurs mètres peut donc être estimée ici. Selon les vitesses de courant modélisées, la décision a été prise de ne pas creuser de chenal d'accès, qui se remplirait trop vite en raison de la cette couche sédimentaire dynamique. Ainsi, la galère a été placée de manière à laisser une marge entre son tirant d'eau de 2.2 m et le fond du lac.

Les variations du niveau d'eau du Léman sont aussi à prendre en compte. Selon la société internationale de sauvetage du Léman (SISL, 2021), le niveau moyen du lac est estimé à une altitude de 372 msl, avec une variation entre hautes eaux à 372.3 msl et basses eaux à 371.5 msl les années bissextiles. Pour le débarcadère, le niveau du bord en enrochement est de 373 msl (Figure 34), avec le chemin pédestre qui se situe environ 50 cm plus bas à 372.5 msl. De plus, la galère a un tirant d'eau de 2.2 m et elle a été placée le long du débarcadère afin d'éviter de devoir creuser un chenal d'accès. En tenant compte des hautes eaux et des hauteurs de vagues significatives pour un temps de retour de 20 ans, le débarcadère est placé à une altitude de 373.6 msl, autorisant une marge de 50 cm pour s'assurer que la dalle ne soit pas frappée par la houle.

5.2. Plans

A l'aide de ces documents et des étapes de modélisation, les plans dessinés sur Inkscape sont présentés ici. Dans le but de respecter l'échelle A4 des plans, ces derniers sont présentés sur toute une page au format paysage. Ils sont présentés dans l'ordre suivant avec les numéros de légende attribués. Sur chacun d'eux se trouve aussi un schéma de la galère là où elle sera implantée.

- Figure 35 : Plan de situation en vue aérienne du débarcadère (échelle 1:600)
- Figure 36: Plan en profil latéral du débarcadère (échelle 1:200)

Légende

- Eléments à construire
- Lac Léman
- Enrochement à démolir
- Parc du Vertou
- Enrochement déjà existant
- Chemin pédestre
- Emplacement galère

Lac Léman

Parc du Vertou

Chemin pédestre

Rampe d'accès

Appareil de choc

N

Prédimensionnement d'un débarcadère pour la galère de la Liberté
Projet de Master École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Vue Plan du débarcadère

EPFL

Auteur Ott Lucas

Date 07.01.2021

Contact

Echelle 1:600

lucasott107@gmail.com

Format A4

+41794259614

Z:\Projet de Master\06_Documents de travail\07_Débarcadère\Vue plan débarcadère.svg

10m 20m 30m 40m 50m 60m

Profil Débarcadère



Auteur Ott Lucas

Date 07.01.2021

Contact
lucasott107@gmail.com
+41794259614

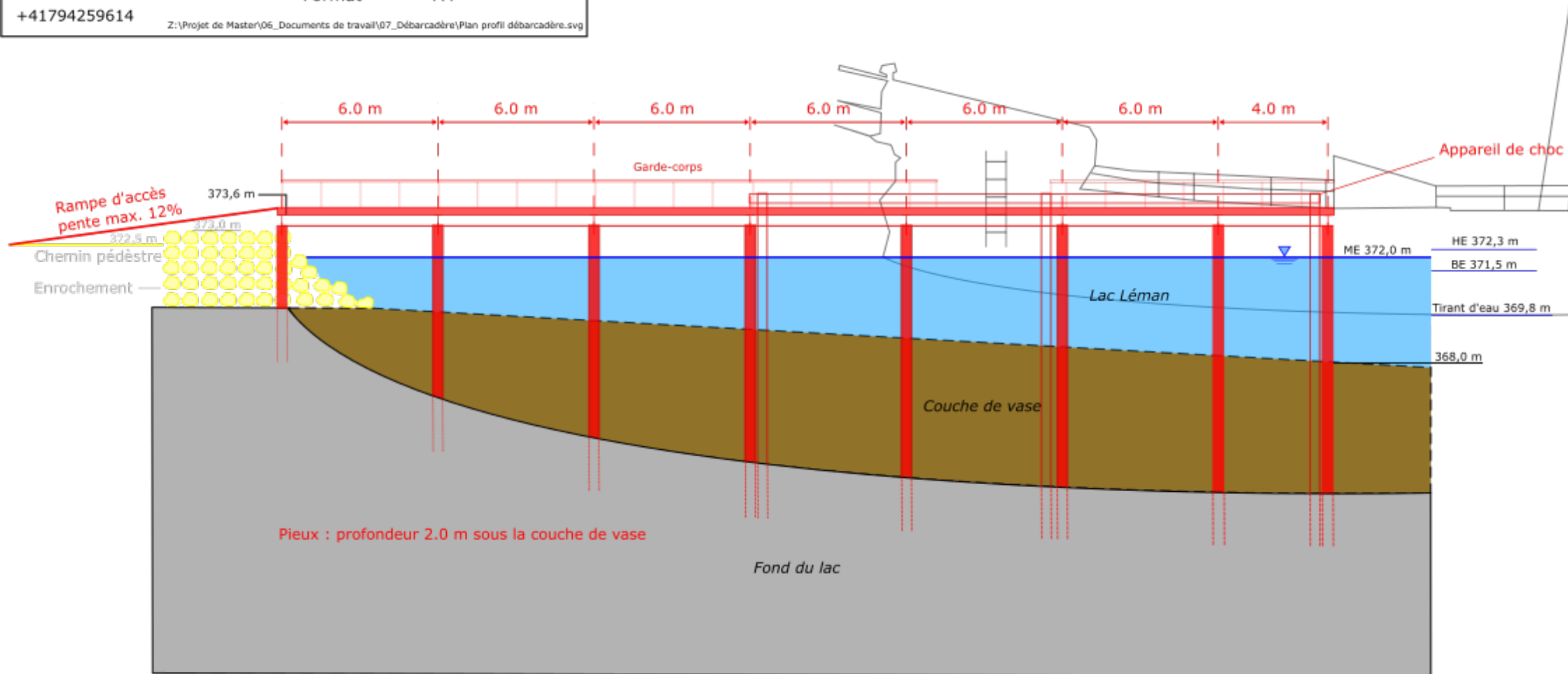
Echelle 1:200

Format A4

Z:\Projet de Master\06_Documents de travail\07_Débarcadère\Plan profil débarcadère.svg

Légende

- Eléments à construire
- Lac Léman
- Eléments à démolir
- Couche de vase supposée
- Eléments déjà existants
- Fond du lac
- Emplacement galère



5.3. Calcul de la force exercée par la houle

Maintenant que le débarcadère a été dimensionné, il est possible de calculer les pressions exercées par la houle sur les pieux. Pour évaluer cette pression, la méthode de Goda (2000) peut être utilisée comme référence. Sur la base du diagramme de pressions sur un brise-lame en mer élaboré par Goda en 1985 (Figure 37), la pression horizontale P ainsi que la pression de soulèvement U peuvent être calculées.

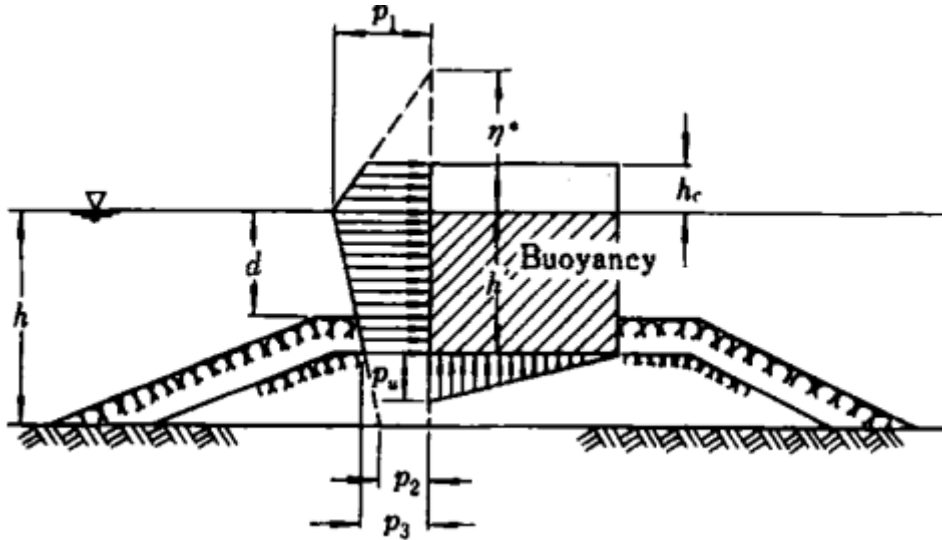


Figure 37: Diagramme de pressions (Goda, 2000)

Les valeurs indiquées sur ce diagramme sont calculées ainsi :

$$p_1 = 0.5(1 + \cos\theta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2\theta)\rho_0 g H_{max} \quad (9)$$

$$p_2 = p_1 / \cosh(2\pi h/L) \quad (10)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (11)$$

$$p_u = 0.5(1 + \cos\theta)\alpha_1 \alpha_3 \rho_0 g H_{max} \quad (12)$$

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\theta) H_{max} \quad (13)$$

Avec H_{max} qui est estimée à 1.8 fois la hauteur de la houle correspondant à la hauteur significative qui sera modélisée pour un temps de retour de 20 ans (recommandation selon Goda, 2000). Les coefficients des différentes pressions sont calculés ainsi (Goda, 2000) :

$$\alpha_1 = 0.6 + 0.5\{(4\pi h/L)/\sinh(4\pi h/L)\}^2 \quad (14)$$

$$\alpha_2 = \min\{1/3(1 - d/h_b)(H_{max}/d)^2, 2d/H_{max}\} \quad (15)$$

$$\alpha_3 = 1 - (h'/h)\{1 - 1/\cosh(2\pi h/L)\} \quad (16)$$

Avec comme paramètres :

θ : l'angle d'incidence de la houle, qui sera de 15° pour prendre en compte l'incertitude de la direction
 h_b : la profondeur d'eau à une distance du débarcadère de $5H_s$ (H_s étant la hauteur significative)
 L : la longueur d'onde correspondant à la période significative des vagues T (celle modélisée). Elle est estimée par la relation $L = 1.56 * T^2$.

Finalement, les pressions horizontales et de soulèvement exercées par la houle sur le débarcadère se calculent ainsi :

$$P = 0.5(p_1 + p_3)h' + 0.5(p_1 + p_4)h_c^* \quad (17)$$

$$U = 0.5 p_u B \quad (18)$$

Pour lesquels

$$p_4 = p_1(1 - h_c/\eta^*) \text{ pour } \eta^* > h_c \text{ et } p_4 = 0 \text{ pour } \eta^* \leq h_c \quad (19)$$

Et B : largeur au sol de l'ouvrage.

À l'aide de Matlab, la méthode de Goda est appliquée, et les pressions horizontales et de soulèvement exercées par la houle sont les suivantes :

$$P = 34.96 \text{ [kN/m]} \quad (20)$$

$$U = 0.77 \text{ [kN/m]} \quad (21)$$

Le détail du calcul de ces forces par Goda (2000) se trouve dans l'Annexe G.

5.4. Notice d'impact environnemental

Lors de l'élaboration d'un projet de construction, il faut toujours se référer à l'ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (OEIE) pour savoir si l'installation prévue est soumise à un rapport d'impact. Dans l'annexe 1 de cette ordonnance, il est précisé que les installations portuaires pour les bateaux des entreprises publiques de navigation doivent répondre à la procédure décisive établie par l'OFT (Conseil fédéral, 2016). Un débarcadère comme celui imaginé pour la galère doit donc faire l'objet d'un rapport d'impact. Dans ce projet, une notice d'impact évaluant les effets principaux du débarcadère sur l'environnement est proposée.

Pour connaître les éléments à évaluer lors d'une étude d'impact sur l'environnement (EIE), le manuel EIE est mis à disposition par l'OFEV (OFEV, 2009). On peut notamment y trouver les éléments le plus en rapport avec la construction d'un débarcadère. Ces-derniers sont énoncés ci-dessous et seront étudiés dans la suite de cette notice.

- Bruit
- Aménagement du territoire
- Eaux
- Déchets, substances dangereuses pour l'environnement
- Flore, faune, biotopes
- Paysages et sites
- Monuments historiques, sites archéologiques

Bruit

Bien que le moteur de la galère puisse engendrer du bruit, l'emplacement du débarcadère au sud du parc du Vertou est situé à plus de 200 m de toute habitation. La gêne occasionnée lors des travaux ne devrait pas être conséquente. Les potentielles nuisances sonores sont donc considérées comme faibles.

Aménagement du territoire

Comme étudié en détail dans l'Annexe C, l'emplacement est situé sur le domaine public (DP). Il se trouve sur la parcelle DP 120 pour la partie du chemin pédestre et sur la parcelle DP 9103 et DP 5642 pour la partie enrochement et lac.

Eaux

La zone du parc du Vertou est référencée comme zone de protection des eaux souterraines (indice de protection Au). La seule étape susceptible de déranger les eaux souterraines serait lors des travaux de construction du débarcadère. Par la suite, celui-ci n'aura plus de contact avec les eaux souterraines et ne devrait plus les déranger.

Déchets, substances dangereuses pour l'environnement

Comme vu sur le plan en profil (Figure 36), une rampe d'accès avec une pente maximale de 12 % devra être construite pour garantir l'accès aux personnes à mobilité réduite. Pour ce faire, il faudra empiéter sur le chemin pédestre actuellement présent, et peut-être décaper la couche de béton ou d'asphalte. Il faudra à ce moment-là évaluer la pollution de cette couche afin de l'évacuer selon l'ordonnance sur l'élimination des déchets (OLED). Le débarcadère en lui-même ne sera pas source de déchet sur le site et l'impact sera donc présent uniquement lors des travaux.

Flore, faune, biotopes

Bien que le site du Bief ne comprenne pas de biotope classé, le delta du Bief, renaturé en 2018, se situe à moins de 150 m du site prévu pour le débarcadère (Figure 38). La renaturation avait permis non seulement de résoudre les problèmes d'ensablement du port, mais surtout d'améliorer la valeur écologique de l'embouchure de la rivière (Bernard Schenk SA & ECOSCAN, 2016). Malgré son aspect aménagé, le site comporte 9 espèces piscicoles, dont la truite de rivière. Le projet avait aussi pour but la création de sites favorables à l'avifaune. Des panneaux didactiques expliquant le principe de renaturation et présentant les différentes espèces qui en profitent ont été implantés sur le site du port. Les risques de dérangement de cette faune locale existent, particulièrement lors des travaux d'aménagement. Par la suite, la galère devrait s'approcher le moins possible de cette partie du lac afin d'éviter tout dérangement de l'avifaune. En l'absence d'informations supplémentaires, il sera recommandé d'effectuer les travaux en dehors des périodes de frai et de nidification.



Figure 38: Emplacement du delta du Bief et de la zone de palafittes par rapport au site du débarcadère (source : www.geo.vd.ch)

Paysages et sites

L'impact sur le paysage sera très important, principalement à cause des dimensions imposantes de la galère. En se baladant sur les rives le long du parc du Vertou, la galère est déjà bien visible aujourd'hui (Figure 39) et la construction d'un débarcadère de 40 m de long ne la rendra que plus impressionnante. L'impact sera fort, mais aucune habitation ou parcelle privée ne se situe à proximité directe du site.



Figure 39: Prise de vue de la galère en face du parc du Vertou

Monuments historiques, sites archéologiques

À une centaine de mètres à l'Ouest se situe une zone de palafittes (Figure 38). Elle est inscrite en tant que région archéologique au numéro cantonal 175 et fédéral 5642. Lors de la construction du débarcadère et de l'exploitation de la galère, il faudra veiller à ne pas empiéter sur cette zone.

Résumé

Pour une meilleure lisibilité, le tableau suivant (Tableau 10) reprend les éléments étudiés et évalue leur impact sur l'environnement.

Tableau 10: Récapitulatif notice d'impact sur l'environnement

Bruit	Aménagement du territoire	Eaux	Déchets, substances dangereuses pour l'environnement	Flore, faune, biotopes	Paysages et sites	Monuments historiques, sites archéologiques
Faible impact, pas d'habitation proche	Domaine public DP 120 DP 9103 / DP 5642	Secteur de protection Au Impact potentiel lors des travaux	Pas de rejet Impact potentiel lors des travaux	Faune piscicole riche (Truite de rivière) Avifaune	Fort impact paysager	Zone de palafittes à proximité

Perspectives

Selon la planification stratégique de la revitalisation des cours d'eau du canton de Vaud (DGE, 2014), le Bief, situé non loin du site du débarcadère, est en priorité 2 de revitalisation. Cela signifie que le canton est prêt à apporter un soutien financier important pour les projets incluant une renaturation. Le Bief ayant déjà fait l'objet d'une renaturation en 2018 à l'Est du port, il pourrait être très intéressant pour la galère d'étendre cette renaturation sur l'ensemble du site. Le débarcadère pourrait se servir de la destruction des enrochements pour proposer une approche axée sur la nature et créer des habitats favorables à la faune piscicole locale. La galère s'inscrirait donc dans un courant de tourisme vert qui lui est cher. De plus, le calendrier concorderait avec celui du canton qui doit rendre sa planification stratégique de revitalisation des rives lacustres en 2022. L'opportunité est à saisir.

Si ce débarcadère voit le jour, il faudra aussi considérer la circulation routière induite par celui-ci. Bien que non directement liée à la construction même du débarcadère, la galère qui y sera attachée demeure une attraction au potentiel touristique important. En plus des usagers du port et du parc du Vertou, des touristes risquent d'affluer pour l'admirer et profiter d'une croisière à son bord. Aujourd'hui, seuls deux parkings se situent aux alentours du port du Bief (Figure 40) et il n'est pas certain que ceux-ci suffisent à accueillir les nombreux touristes. Une solution à ce niveau-là sera à déterminer. Une investigation sur la circulation de l'axe routier serait aussi indispensable (Bujard, P., interview, 2020), mais elle n'est pas effectuée ici par manque de temps.



Figure 40: Parkings à proximité du débarcadère

6. Discussion

6.1. Résultats

L'analyse multicritère a permis d'établir non seulement une liste de sollicitations importantes du lac et de ce qui l'entoure, mais aussi une méthodologie de classification des sites. Après attribution de différents poids à ces critères, les huit sites ont été comparés sur la base d'une somme pondérée et des scores leur ont été octroyés. Finalement, c'est le site du Port du Bief qui a obtenu le meilleur score et qui a été sélectionné. Dans le monde de l'ingénierie, plusieurs analyses multicritères existent mais la méthodologie globale reste la même : trouver des critères indépendants et les comparer pour différents objets. Une comparaison similaire avait déjà été effectuée pour la galère à Rolle et sept sites avaient alors été retenus et évalués par CSD (2019). Le site ayant obtenu la meilleure appréciation avait été sélectionné pour y implanter la galère. De plus, la conception de fiches récapitulatives permet de résumer l'information et de la rendre accessible.

Les étapes de modélisation ont permis de poser les bases pour la modélisation de la courantologie. La rose des vents obtenue montre un régime dominant de Bise. Le régime de Vent et Vent Blanc est aussi bien représenté avec plus de 50'000 occurrences sur 25 ans de données. Pour comparaison, la rose des vents de Nyon montrait une répartition plus homogène des vents, alors que la station de Pully était surtout exposée au régime de Bise. De plus, les intensités sont plus importantes à St-Prex avec des vitesses entre 10 et 15 m/s souvent atteintes, alors qu'elles sont plus faibles à Nyon et Pully. Après transposition des vents en vents à 10 m au-dessus du niveau du lac, les courbes IDF obtenues (Figure 22) montraient des vents plus forts que ce qui a déjà pu être observé, notamment sur le quai Gustave Ador à Genève (LCH, 2008). Ceci résulte en des durées plus faibles pour obtenir la hauteur de vague maximale après application de la méthode JONSWAP (Figure 23). Dans l'étude du quai Gustave Ador, des durées de vent de 4 heures avaient été calculées, alors qu'elles sont ici de l'ordre de 3 heures.

Le maillage pris en compte a été raffiné en se rapprochant du bord pour des résultats plus précis au site d'intérêt. De la partie non étudiée au site étudié, ce sont progressivement des triangles de 300 m, 100 m puis 20 m de côtés qui ont été considérés pour affiner le maillage. Dans le projet LATLAS à la base de swisslakes, seuls des triangles de 100 m de côté avaient été étudiés pour les lacs, avec un lissage de la rive comprenant des nœuds tous les 25 m (Amini et al., 2017). La bathymétrie ensuite interpolée a pu être vérifiée sur le géoportail du canton de Vaud. Les résultats obtenus à l'emplacement du débarcadère font état de hauteurs de vagues significatives de 81 cm, de période de 3.27 s et de direction moyenne de 200° pour un temps de retour de 20 ans. La validation de ces résultats pour chaque temps de retour avec le modèle de swisslakes a donné lieu à quelques différences (Tableau 8). En ce qui concerne les hauteurs significatives, les valeurs modélisées ont tendance à être légèrement inférieures à celles calculées sur swisslakes, tout comme les directions. Pour les périodes, ces différences sont plus notables. Elles restent légères et peuvent s'expliquer par l'utilisation d'un maillage plus raffiné. Comme il avait été proposé par Oriez (2011), un maillage raffiné permet d'améliorer la résolution autour des variations bathymétriques et de mieux prendre en compte des phénomènes comme la réfraction à l'approche des côtes. Le modèle utilisé ici est plus fin et tient mieux compte de ces variations.

Pour la courantologie, les vitesses de l'ordre de 0.2 m/s ainsi que les directions suivant la côte sont comparables à des études effectuées sur la même côte du lac. De la même manière que Hewes (2018), ces vitesses ont pu être insérées sur une courbe de Hjulstrum où il a été observé que les sédiments supposés sont mis en mouvement, éliminant de fait l'éventualité d'un chenal d'accès. Sur le quai Gustave Ador à Genève, des vitesses de 0.3 m/s avaient été obtenues pour des vagues de l'ordre de 1 m de hauteur significative (LCH, 2008).

Avec ces hauteurs de vagues et directions, le débarcadère peut être dimensionné. Il est orienté tel que le front de vague lui arrive de manière incidente et qu'une marge de 50 cm entre les vagues et le fond de la dalle en béton soit prise en compte. En comparaison, les plans d'un débarcadère de Chevroux sur le lac de Neuchâtel prenaient une marge de 50 cm avec les hautes eaux, et les pieux étaient placés chaque 6 m. Ensuite, la pression horizontale exercée par la houle a été calculée à 34.96 kN/m, et celle de soulèvement à 0.77 kN/m. Goda (2000) fournissait un exemple de force exercée sur un brise-lame en pleine mer. Il utilisait une houle de 5.8 m de haut avec une période de 11.4 s, soit une houle 7 fois plus haute et une période 3 fois plus longue que celles modélisées ici. Il obtenait une pression horizontale de 927 kN/m et une pression de soulèvement de 488 kN/m pour un brise-lame de 15 m de large. Les différences de taille et de période de la houle ainsi que de largeur d'ouvrage expliquent la disparité entre les résultats. Une autre étude menée en France (Groupement IMDC ; Alp'Géorisques, 2015) étudiait la force des vagues obtenue par plusieurs méthodes. En appliquant la méthode de Goda, que l'étude qualifie toutefois de non applicable, les pressions horizontales calculées autour de 50 kN/m montrent que le calcul des forces sur le débarcadère se situe dans les mêmes ordres de grandeur. Les forces calculées peuvent servir pour un dimensionnement plus précis du débarcadère

Finalement, la notice d'impact environnemental a montré qu'un débarcadère avait plusieurs effets sur l'environnement (Tableau 10). Dans une notice similaire, il avait été évalué que les impacts sur le bruit et le paysage étaient les plus importants pour la galère (CSD, 2019), ce qui est aussi le cas ici. Les impacts sur la faune étaient alors faibles, mais c'était sans considérer que le lieu choisi serait situé à proximité d'un site renaturé. Toutefois, cette notice a aussi permis de souligner la possibilité pour le projet d'apporter une plus-value environnementale en s'intégrant dans la politique de revitalisation des rives lacustres du canton de Vaud.

6.2. Propositions d'amélioration

Bien que les résultats obtenus soient tout à fait convenables, ils peuvent encore être améliorés. Cette dernière partie vise à proposer des pistes pour obtenir de meilleurs résultats et des plans plus fiables pour le débarcadère.

Pour la modélisation, la direction de vent a été considérée entre 210 et 270 °. Il est possible de diviser cet intervalle en parties de 10 ° et d'effectuer la même procédure pour obtenir la direction précise avec laquelle les vagues seraient les plus hautes. Par exemple, le projet LATLAS considérait des directions de vents de 30 ° d'intervalles (Oriez, 2011). De plus, la Vaudaire n'a pas été étudiée ici par manque de temps. En utilisant la rose des vents d'Aigle, il aurait été possible de sortir des conditions de vent venant du Sud-Est et d'observer les effets de la houle au port du Bief en appliquant la même méthodologie. Lors de la génération du maillage, certaines étapes de raffinement ont dû être abandonnées pour améliorer le temps de calcul. Sans modifier la nature des résultats, un meilleur raffinement aurait certainement donné des résultats plus lisses et plus lisibles pour certaines parties du Léman. De plus, l'utilisation d'un maillage encore plus fin aurait permis de modéliser les pieux du débarcadère et d'évaluer leur effet sur les vitesses et directions des courants.

Finalement, lors de l'élaboration des plans, la bathymétrie a été supposée linéaire et la couche de sédiments grossièrement estimée. Une étude de granulométrie et de stabilité du sol (type forage SPT (Standard Penetration test)) permettrait une meilleure connaissance du site et des plans plus fiables pour le dimensionnement du débarcadère. L'étude d'un brise-houle aurait aussi pu être considérée dans ce projet.

7. Conclusion

L'approche proposée dans ce projet a permis d'établir une nouvelle méthodologie pour l'étude d'un lieu d'amarrage pour la galère La Liberté. Afin de mieux cerner les enjeux relatifs à la galère, plusieurs interviews avec des personnes connaissant la galère et travaillant dans différents milieux ont été effectuées.

Après une revue littéraire évaluant les contraintes du lac Léman, un passage en revue de quelques études antérieures à ce projet a permis d'établir une base pour l'analyse multicritère. Elles mettaient en valeur le potentiel touristique et d'inscription dans un tourisme vert de la galère. La comparaison multicritère s'est fondée sur une sélection de sollicitations du Léman, avant d'établir une méthode de classification et de comparaison entre huit lieux présélectionnés. Finalement, c'est le site du port du Bief qui a été choisi pour les étapes de modélisation.

Ces étapes avaient pour but d'évaluer les hauteurs de vagues significatives dans l'optique de modéliser la courantologie locale et de calculer les forces exercées par la houle. Pour ce faire, l'étude des vents dans une station à proximité a été nécessaire. Un travail a dû être effectué sur les données brutes pour effacer les valeurs aberrantes, et les vents ont été transposés en vents à 10 m au-dessus du niveau du lac. Par la suite, les courbes IDF des vents ont permis, à l'aide de la méthode JONSWAP, de mesurer la durée de vent formant les plus grandes hauteurs de vagues. Après cela, un maillage se raffinant à l'approche des côtes a été utilisé pour interpoler la bathymétrie du lac. Une fois les hauteurs, périodes et directions de vagues modélisées pour trois temps de retour, la courantologie a pu être calculée. Les vitesses ont montré que les sédiments du lac étaient mis en mouvement, permettant d'éliminer l'idée de la création d'un chenal d'accès pour la galère.

Ensuite, un débarcadère a pu être prédimensionné avec pour idée de servir de base pour les projets futurs de la galère. Utilisant les résultats de la modélisation et les dimensions de ce débarcadère, les forces exercées par la houle sur les piliers ont été calculées à l'aide de la méthode de Goda. Une notice évaluant l'impact environnemental du débarcadère a finalement souligné les aspects les plus importants à prendre en compte. Ces derniers sont le paysage, le bruit et la faune locale profitant de la renaturation de l'embouchure du Bief.

Pour terminer, il est intéressant de relever le contexte dans lequel s'inscrirait la construction d'un débarcadère au port du Bief. En rappelant que le canton doit fournir pour 2022 sa planification pour la revitalisation des rives lacustres, le potentiel est grand pour un débarcadère d'offrir un ouvrage unique s'inscrivant dans une politique de tourisme vert.

Liste des illustrations

Liste des figures

FIGURE 1: SITUATION DU LAC LÉMAN (SOURCE : OFEFP, 1994).....	4
FIGURE 2: ROSES DES VENTS DES STATIONS DE PULLY (GAUCHE) ET NYON (DROITE) (SOURCE : WWW.SWISSLAKES.NET).....	5
FIGURE 3: REPRÉSENTATION DE LA HOULE ET DES PARAMÈTRES QUI LA FORMENT (SOURCE : BONNEFILLE, 1992)	6
FIGURE 4: DIFFÉRENTS MODES DE DÉFERLEMENT (SOURCE : BONNEFILLE, 1992).	7
FIGURE 5: EXPLICATION SCHÉMATIQUE DU PHÉNOMÈNE DE DIFFRACTION	7
FIGURE 6: RÉFRACTION DE LA HOULE À L'APPROCHE DE LA CÔTE (SOURCE : BONNEFILLE, 1992)	8
FIGURE 7: FETCH DE 30KM À ROLLE POUR UN VENT DU SUD-OUEST (SOURCE : HTTPS://TILE.OPENSTREETMAP.ORG/{Z}/{X}/{Y}.PNG)	8
FIGURE 8: EXEMPLE DE RÉSULTAT OBTENU À ROLLE À L'AIDE DE L'ATLAS DES VAGUES (SOURCE : WWW.SWISSLAKES.NET).....	9
FIGURE 9: DIAGRAMME DE SHIELDS POUR DÉTERMINER LA MISE EN MOUVEMENT DE SÉDIMENTS (SOURCE : DE CESARE, 2019)	10
FIGURE 10: COURBE DE HJULSTRUM METTANT EN RELATION LA TAILLE DES SÉDIMENTS ET LA VITESSE DES COURANTS (SOURCE : DE CESARE, 2019).....	11
FIGURE 11: COURANTOLOGIE DU LAC AU 05.10.2020 À 15:00 À 0.6M DE PROFONDEUR (SOURCE : WWW.METEOLAKES.CH).....	11
FIGURE 12: COURANTOLOGIE DU LAC AU 05.10.2020 À PLUS PETITE ÉCHELLE (SOURCE : WWW.METEOLAKES.CH).....	12
FIGURE 13: CARTE DES DÉBARCADÈRES DE LA CGN (SOURCE : WWW.CGN.CH/FR/CONTACT-ACCES)	17
FIGURE 14: CARTE DES SITES ÉTUDIÉS AUTOUR DU LÉMAN (FOND DE CARTE : HTTPS://TILE.OPENSTREETMAP.ORG/{Z}/{X}/{Y}.PNG)	18
FIGURE 15: ORGANIGRAMME DES ÉTAPES DE MODÉLISATION	30
FIGURE 16 : SITUATION DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES PROCHES DU SITE DU PORT DU BIEF	31
FIGURE 17: DOMAINE DE MODÉLISATION. GRAND LAC COUPÉ À L'EST ENTRE CHEXBRES ET MEILLERIE, À L'OUEST ENTRE BUCHILLON ET THONON.....	33
FIGURE 18: DÉCOUPE DE LA LIMITE OUEST EN 15 ÉLÉMENTS. L'ÉLÉMENT ENCADRÉ EN VERT EST L'ÉLÉMENT POUR LEQUEL ON VEUT INSÉRER DES CONDITIONS DE BORD PARTICULIÈRES	34
FIGURE 19: POINT APPROXIMATIF POUR L'ÉLÉMENT ENCADRÉ EN VERT DE LA FIGURE PRÉCÉDENTE (SOURCE : WWW.SWISSLAKES.NET).....	34
FIGURE 20: ROSE DES VENTS DE ST-PREX. LES CERCLES INTÉRIEURS REPRÉSENTENT DES OCCURRENCES D'ÉVÉNEMENTS DE 50'000 ET 100'000	36
FIGURE 21:EXEMPLE DE FORMAT DE DONNÉES DE PRÉCIPITATIONS À PRÉPARER POUR TERESA	36
FIGURE 22: COURBES IDF POUR LE RÉGIME DE VENT ET VENT BLANC OBTENUES À L'AIDE DE TERESA	37
FIGURE 23:COURBES OBTENUES APRÈS APPLICATION DE LA MÉTHODE JONSWAP. LA LIGNE NOIRE SÉPARE LES PHÉNOMÈNES DE LIMITATION PAR LE FETCH ET PAR LA DURÉE.....	37
FIGURE 24: RIVE DU LAC LÉMAN LISSÉE PAR DES NŒUDS PLACÉS TOUS LES 50 M. L'ENCADRÉ ZOOMÉ SUR LA PARTIE ÉTUDIÉE PLUS FINEMENT DU LAC AU PORT DU BIEF. LE CERCLE BLEU DÉSIGNE LE SITE PRÉCIS DU PORT DU BIEF	38
FIGURE 25: MAILLAGE SUR TOUT LE DOMAINE MODÉLISÉ COMPOSÉ DE TROIS POLYGONES AVEC DES MAILLAGES DE PLUS EN PLUS FINS	39
FIGURE 26: MAILLAGE À L'APPROCHE DU SITE DU PORT DU BIEF. TROIS TAILLES DE MAILLAGE SONT PRÉSENTÉES ICI AVEC DES TRIANGLES DE 300M, 100M ET 20 DE CÔTÉ.....	39
FIGURE 27: BATHYMÉTRIE DU LÉMAN INTERPOLÉE LINÉAIREMENT PAR LE MAILLAGE SUR LA BASE DES DONNÉES BATHYMÉTRIQUES.....	40
FIGURE 28: HAUTEURS SIGNIFICATIVES DES VAGUES POUR UN TEMPS DE RETOUR DE 20 ANS À L'ÉCHELLE DU DOMAINE MODÉLISÉ.....	40

FIGURE 29: HAUTEURS SIGNIFICATIVES DES VAGUES POUR UN TEMPS DE RETOUR DE 20 ANS À L'ÉCHELLE DU SITE ÉTUDIÉ	41
FIGURE 30: PÉRIODES MOYENNES DES VAGUES POUR UN TEMPS DE RETOUR DE 20 ANS EXPRIMÉES EN [S]. LE CERCLE ROUGE DÉSIGNE L'EMPLACEMENT PRÉVU POUR LE DÉBARCADÈRE	41
FIGURE 31: DIRECTIONS MOYENNES DES VAGUES INCIDENTES EXPRIMÉES EN DEGRÉ SELON LA MÊME CONVENTION QUE LA ROSE DES VENTS. LE CERCLE ROUGE DÉSIGNE L'EMPLACEMENT PRÉVU POUR LE DÉBARCADÈRE.....	42
FIGURE 32: POINTS DE RÉFÉRENCE UTILISÉS POUR LA VALIDATION ENTRE LES DEUX MODÈLES.....	43
FIGURE 33: COURANTOLOGIE À L'ÉCHELLE DU PORT DU BIEF. LE CERCLE ROUGE DÉSIGNE L'EMPLACEMENT PRÉVU POUR LE DÉBARCADÈRE	44
FIGURE 34: EMBLEMMENT DU DÉBARCADÈRE. UNE ORIENTATION DE 200° DONNE UNE PROFONDEUR DE 4M À 40M DU BORD (SOURCE WWW.GEO.VD.CH).....	46
FIGURE 35: PLAN DE SITUATION EN VUE AÉRIENNE DU DÉBARCADÈRE (ÉCHELLE 1:600).....	47
FIGURE 36: PLAN EN PROFIL LATÉRAL DU DÉBARCADÈRE (ÉCHELLE 1:200).....	48
FIGURE 37: DIAGRAMME DE PRESSIONS (GODA, 2000).....	49
FIGURE 38: EMBLEMMENT DU DELTA DU BIEF ET DE LA ZONE DE PALAFITTES PAR RAPPORT AU SITE DU DÉBARCADÈRE (SOURCE : WWW.GEO.VD.CH)	52
FIGURE 39: PRISE DE VUE DE LA GALÈRE EN FACE DU PARC DU VERTOU	52
FIGURE 40: PARKINGS À PROXIMITÉ DU DÉBARCADÈRE	53

Liste des tableaux

TABEAU 1: LISTE DES LOGICIELS UTILISÉS TOUT AU LONG DU PROJET.....	2
TABEAU 2: VENTS EXTRÊMES SUR LE LÉMAN (SOURCE : JEANNERET, 2015).....	5
TABEAU 3: INVENTAIRE DES SOLlicitATIONS AVEC EXPLICATION SOMMAIRE DE CE QUI SERA ÉTUDIÉ.....	16
TABEAU 4: COMPARAISON MULTICRITÈRE ENTRE LES DIFFÉRENTS SITES ÉTUDIÉS	29
TABEAU 5: TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SCORES DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE	29
TABEAU 6: EXEMPLE DE DONNÉES BRUTES DE LA STATION DE ST-PREX POUR L'ANNÉE 2008.....	35
TABEAU 7: RÉSULTATS APRÈS APPLICATION DE LA MÉTHODE JONSWAP	38
TABEAU 8: RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS ET COMPARAISON POUR LES TROIS POINTS DE RÉFÉRENCE.....	43
TABEAU 9: RÉCAPITULATIF DES VALEURS DE PARAMÈTRES OBTENUES LORS DE LA MODÉLISATION	45
TABEAU 10: RÉCAPITULATIF NOTICE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT.....	53

Liste des fiches récapitulatives

1 FICHE RÉCAPITULATIVE DE ST-PREX.....	19
2 FICHE RÉCAPITULATIVE DE PRANGINS	20
3 FICHE RÉCAPITULATIVE DE NYON	21
4 FICHE RÉCAPITULATIVE DU BAR LA COQUETTE	22
5 FICHE RÉCAPITULATIVE DU PORT DU BIEF.....	23
6 FICHE RÉCAPITULATIVE DU BOUVERET	24
7 FICHE RÉCAPITULATIVE D'EXCENEVEX	25
8 FICHE RÉCAPITULATIVE D'YVOIRE	26

Bibliographie

- Al Mac (2020). wind_rose(wind_direction,wind_speed) (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/65174-wind_rose-wind_direction-wind_speed), MATLAB Central File Exchange. Retrieved December 7, 2020.
- Association Lémanique galère La Liberté (2019). *Motivation pour l'identification des sites*.
- Azin Amini, Blaise Dhont & Philippe Heller (2017). *Wave atlas for Swiss lakes: modeling design waves in mountainous lakes*, Journal of Applied Water Engineering and Research, 5:2, 103-113, DOI: 10.1080/23249676.2016.1171733, <http://doi.org/10.1080/23249676.2016.1171733>
- Baracchini, T. (2019). *From observations to 3D forecasts: Data assimilation for high resolution lakes monitoring*. PhD thesis No 9475, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. <http://meteolakes.ch/#!/hydro/geneva>
- Beauval, A. (2020). Communication personnelle, 17 novembre.
- Bernard Schenk SA, ECOSCAN (2016). *Renaturation du Bief Morges & Préverenges – Présentation publique du projet*.
- Bonnefille, R. (1992). *Cours d'hydraulique maritime*, 3ème edn, Masson.
- Bujard P. (2020). Communication personnelle, 17 novembre.
- Canton de Vaud, guichet cartographique cantonal. <https://www.geo.vd.ch/> consulté le 08.01.21
- Centre d'élaboration et de développement de politiques publiques (CEVADE) (2020). *La Liberté sur le Léman pour un tourisme de nature*. Plan d'affaires.
- Compagnie générale de navigation sur le Léman (2020). <https://www.cgn.ch/fr/flotte> consulté le 30.12.20
- Compagnie générale de navigation sur le Léman (CGN). <https://www.cgn.ch/fr/contact-acces> consulté le 23.10.20
- Conseil fédéral (2016). *Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (OEIE) du 19 octobre 1988*.
- Couleurs locales (2020). RTS, émission du 28.09.2020, Lavanchy J.-M. <https://www.rts.ch/play/tv/couleurs-locales/video/couleurs-locales?urn=urn:rts:video:11637734>
- CSD Ingénieurs SA (2019). *Recherche de sites d'amarrage pour « La Liberté »*.
- De Cesare, G. (2015). *Les rives lacustres et le génie biologique*. Ingenieurbiologie, Atlas des vagues, Bulletin n° 4/2014, 5-12.
- De Cesare, G. (2019). *Notes de cours : Hydraulique fluviale et aménagement de cours d'eau*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Diebold, M. & Heller, P. (2017) *Scaling wind fields to estimate extreme wave heights in mountainous lakes*, Journal of Applied Water Engineering and Research, 7:1, 1-9, DOI: 10.1080/23249676.2017.1317294, <https://doi.org/10.1080/23249676.2017.1317294>
- Direction générale de l'environnement (DGE) (2014). *Etat de Vaud, plan cantonal de renaturation des cours d'eau – planification stratégique de la revitalisation des cours d'eau, plan de synthèse*.

FMP Solution (2017). *Stratégie Galère La Liberté*.

Girardclos, S. (2001). *Sismostratigraphie et structure sédimentaire en 3D d'un bassin lacustre, du retrait glaciaire à nos jours (lac Léman, Suisse)*. Thèse n°3275, Université de Genève, Faculté des Sciences.

Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. 2nd edn, World Scientific Publishing. Advanced series on ocean engineering – volume 15, 132-141.

Gret B. (2020). Communication personnelle, 23 novembre.

Groupement IMDC ; Alp'Géorisques (2015). *Étude des aléas naturels sur les secteurs : « Pays de Monts », « Pays d'Olonne » et « Pays Talmondais » : Pression sous chocs mécaniques – version 2.0*. http://www.vendee.gouv.fr/IMG/pdf/RA15164_pression_sous_chocs_mecaniques_v2-0.pdf

Heller, P. & Amini, A. (2015). *LATLAS : Atlas des vagues pour les lacs de Suisse – Généralisation pour le dimensionnement*. Ingenieurbiologie, Atlas des vagues, Bulletin n° 4/2014, 29-31.

Hewes, S. (2018). *Analysis of current and sediment transport patterns in Lake Biel before and after the modernization of the Hagneck Hydroelectric power Plant*. Master Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Hofmann, B. (2020). *Galère*. Journal de Morges, édition du 29.12.2020.

Holthuijsen, Leo H. (2010). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 27-28.

Jeanneret, P. (2015). *Vents sur le Léman : exemples de situations extrêmes*. Ingenieurbiologie, Atlas des vagues, Bulletin n° 4/2014, 23-28.

Kampuis, J.W., 2020. *Introduction to Coastal Engineering and Management*. 3rd edition. Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 48, 105-107.

Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH) (2008). *Le parc plage sur le quai Gustave-Ador dans la rade de Genève : modélisation numérique et physique de la courantologie et de la propagation des vagues*. Rapport n° 03/2008, Lausanne.

Lavanchy J.-M. (2020). Communication personnelle, 6 octobre.

Office fédéral de l'environnement (OFEV) (2009). *Manuel EIE – directive de la Confédération sur l'étude de l'impact sur l'environnement (art. 10b, al. 2, LPE et art. 10, al. 1, OEIE)*.

Office fédéral de l'environnement (OFEV) (éd.) (2018). *Revitalisation des rives lacustres – planification stratégique. Un module de l'aide à l'exécution « Renaturation des eaux »*. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique no 1834 : 46 p.

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) (1994). *L'état des lacs en Suisse*. Cahier de l'environnement N°237, Protection des eaux.

Office fédéral des transports (OFT) (2017). *Directive OFT, Exigences relatives aux demandes d'approbation des plans de débarcadères (Dir. Approbation débarcadères)*. Concrétisant les DE-OCEB ad art. 16, feuille 1, ch. 1.1.

Oriez A. (2011). *Analyse des vagues liées aux vents, projet LATLAS*. Mémoire technique de projet de Master, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Ports du Léman (2020). <https://ports-du-leman.ch/> consulté le 12.11.2020.

Prévisions météo (2020). <https://www.prevision-meteo.ch/meteo/suisse> consulté le 16.11.2020.

Razmi, A. M. (2014). *Hydrodynamic variability of lacustrine open embayments - Implications for water quality*. PhD thesis, No. 6249, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Sayah, S. (2006). *Efficiency of brushwood fences in shore protection against wind-wave induced erosion*. PhD thesis, No. 3424, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Société internationale de sauvetage du Léman (SISL) : <http://www.sisl.ch/OLD/leman.htm> consulté le 02.01.21

Swisslakes, 2020. <https://www.swisslakes.net/> consulté le 29.12.2020.

Travaglini, E., Fluixá-Sanmartín, J., Alesina, S., Foehn, A. and García Hernández, J. (2016). TeREsA – User Manual v1.1. CREALP Group, Switzerland.

Ugo M., Caillet J., Schleiss A. (2015). *Des ports flottants pour réduire les pressions sur les rives lacustres*. Ingenieurbiologie, Atlas des vagues, Bulletin n° 4/2014, 45-48.

Annexes

A. Inventaire des sollicitations – remarques

Il est évident que l'inscription au cadastre doit être consultée avant le choix des lieux et qu'il n'est pas nécessaire de l'inscrire en tant que sollicitation, mais certaines zones du cadastre ne sont pas clairement définies. C'est le cas de certains sites archéologiques sous-marins comprenant des palafittes aux abords du port du Bief sur la commune de Morges. Il y a là des zones archéologiques qui ne le sont peut-être pas et qui mériteraient des investigations supplémentaires.

Dans les critères d'accessibilité, la proximité d'un parking n'a pas été retenue. Bien que ce fût un critère important pour l'association, celui-ci n'entre pas en accord avec l'inscription de la galère dans un programme de tourisme vert, il faut donc privilégier l'accès par transport public à la nécessité d'avoir un parking non loin. Cela favoriserait trop l'utilisation de la voiture.

Ensuite, certaines sollicitations sont plus subjectives comme l'intégration dans le paysage et les conflits, ou encore la proximité à une zone d'activité qui fait encore débat au sein de l'association. Ces critères, bien qu'ayant peu d'importance d'un point de vue technique, doivent être traités comme les autres. Pour ce qui est des conflits, ils ne seront pas forcément traités mais il est important de les mentionner dans le but d'anticiper certains problèmes.

B. Informations sur les barques naviguant sur le Léman

Barque la Savoie : Point d'attache à Evian, sur la côte française du Léman.

Barque la Neptune : Ponton d'accès sur le quai des Eaux-vives à Genève.

Barque la Vaudoise : Gérée par la confrérie des pirates d'Ouchy, elle a son débarcadère dans le port d'Ouchy, à côté du débarcadère de la CGN. Elle a aussi son propre ponton d'accès. Un plan du port peut être trouvé en suivant ce lien :

http://www2.lavaudoise.com/data/dataimages/Upload/plan_port_ouchy.pdf

Barque la Demoiselle : Port d'attache à Villeneuve au canal de l'eau froide

Cochère l'Aurore : Port d'attache à Saint-Gingolph, dans un port, pas très grande comparée aux autres barques sur le Léman

Il est aussi intéressant de noter que de temps en temps a lieu un événement de rassemblement des voiles latines sur le Léman où toutes les barques se rejoignent et naviguent ensemble. Si La Liberté changeait son gréement comme cela est envisagé, elle pourrait participer à cet événement et profiterait par la même occasion d'une très bonne visibilité.

C. Etude des lieux

Les plans de situation représentent une ou plusieurs orientations possibles pour les débarcadères dans le sens de la vague (Beauval, A., interview, 2020).

Saint-Prex

Plan de situation



Commentaire

Saint-Prex est une commune du district de Morges située sur la région de la côte. Sa vieille ville médiévale située sur les berges du Léman a orienté sa présélection comme lieu susceptible d'accueillir la galère. Ville accessible aux transports publics et déjà étudiée par l'association de La Liberté, Saint-Prex comprend beaucoup d'activités nautiques avec un port de plaisance, un centre de plongée et une aile de la société internationale de sauvetage du Léman (SISL). L'étude de la Liberté (Association Lémanique galère La Liberté, 2019) prévoyait d'installer la galère à l'Ouest du débarcadère de la CGN, mais peu de choses intéressantes et une forte exposition au Vent lui ont préféré un emplacement à l'Est, mieux protégé.

Sollicitations

- **Accessibilité** (source : Google maps, CFF) : Avec la gare CFF de Saint-Prex située à 600 m (10min à pied) et l'arrêt de des TPM (MBC) Saint-Prex place d'armes à 200 m, le quai d'embarquement serait très bien facilement accessible pour des personnes à mobilité réduite. Cependant, l'arrêt n'est pas très bien desservi avec un bus par heure au départ de Morges, ou un train par heure au départ de Nyon.
- **Bathymétrie** : 3m situés à 50m du bord. (source : www.geo.vd.ch)
- **Berges** (vu sur l'orthophoto) : Enrochement, artificielles le long de la promenade, des pontons ont déjà été construits. Le port est très proche du lieu envisagé.
- **Cadastre** :

Source	https://www.geo.vd.ch/
Parcelle	Domaine public, parcelle privée derrière
Site pollué, protection des eaux	Non, secteur S2 (captage des eaux)
Zone d'affectation	Zone verte et zone de non bâtir
Patrimoine	Aucun
Dangers naturels	Zone inondable sans danger

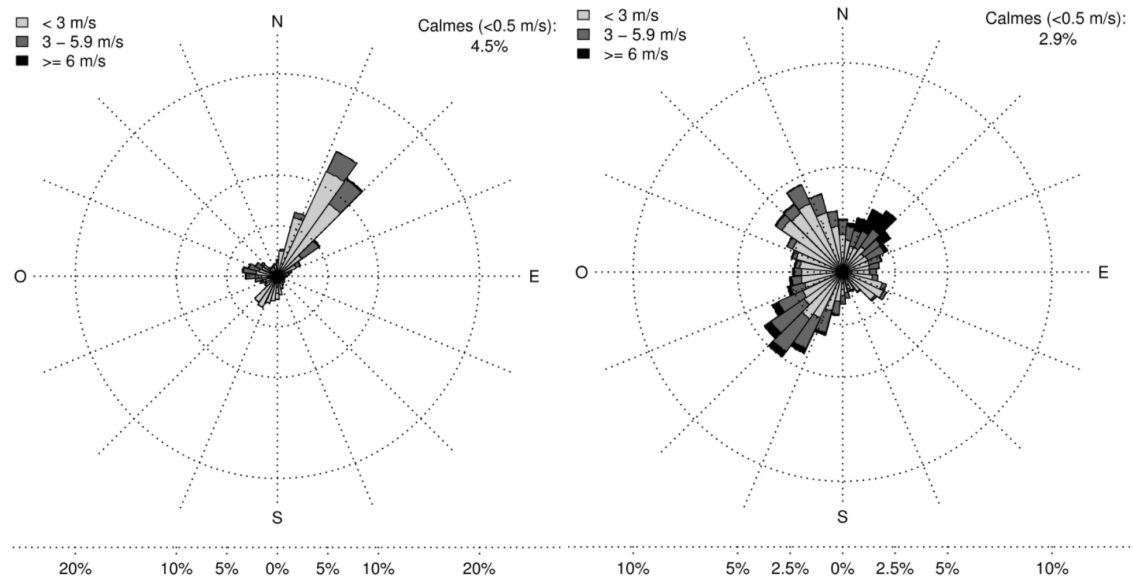
Le site se situe en secteur S2 de protection des eaux, car il y a un captage d'eau dans la zone. Le captage du vieux moulin se situe là et draine de l'eau du sol, mais aussi de l'eau issue du lac.

- **Identité** : Le simple fait que Saint-Prex ait une vieille-ville médiévale traduit déjà d'une proximité avec la galère qui a à cœur de rendre hommage à l'histoire du Léman. De plus, Saint-Prex se situe à moins de 5km de Morges et dans le même district, ce qui en fait une ville très proche du lieu d'origine de la galère.
- **Intégration dans le paysage** : Il faudrait voir les critères exacts pour juger ça, mais il est évident que la galère prend de la place sur la vue. Au lieu choisi cependant, la galère se situerait devant un stade et à proximité d'un port de plaisance et sur la même côte que le débarcadère déjà existant de la CGN. L'impact direct sur la vue serait donc moindre et s'inscrirait bien avec l'environnement dans lequel il serait construit.
- **Navigation** : la route de la CGN passe au large, mais il faudra veiller à ne pas interférer avec un bateau venant au débarcadère de la CGN. Le port de Saint-Prex (port de Taillecou) serait situé à proximité du débarcadère et il faudra faire attention aux plaisanciers y naviguant. Ce port compte en effet 140 places d'amarrages avec une entrée serrée (source : www.ports-du-leman.ch).
- **Partenariat** : Beaucoup d'activités nautiques se situent à Saint-Prex. La ville promeut en effet des activités comme la navigation de plaisance ou la plongée sous-marine. La galère permettrait d'étoffer cette offre, sans compter que des visites de la vieille ville ou du château de Saint-Prex pourraient être organisées et suivies d'une visite ou d'une croisière à bord de La Liberté.
- **Vagues** : La zone semble exposée à un régime de Bise et protégée du Vent par le relief vers l'Ouest. Avec les données de swisslakes, des vagues de hauteur significative de 76cm pourraient être observées pour un temps de retour de 50 ans. Des vagues de 43cm de haut peuvent être observées assez fréquemment avec un temps de retour de 2 ans seulement. Ces vagues sont similaires à celles observées en temps de Bise pour le même temps de retour. Le secteur est donc bien protégé du Vent, car à l'Ouest de Saint-Prex, des vagues pouvaient être calculées à 1.37m de hauteur significative.



Source : www.swisslakes.net

- **Vents** : Pour les vents de Saint-Prex, on peut se baser sur les roses des vents de Pully et Nyon pour avoir une idée des vents qui y soufflent. Les roses des vents sont mises à disposition sur le site de la confédération suisse par l'office fédéral météorologie et de climatologie MétéoSuisse (www.meteosuisse.admin.ch) :



Pully (à gauche) est soumis à un régime dominant de Bise, alors qu'à Nyon (à droite), les vents sont répartis de manière plus homogène avec une dominance pour le Vent, le Joran et un peu de Bise. Saint-Prex se situant entre les deux, on peut s'imaginer que la Bise et le Vent seront des vents importants.

- **Activités** : Le stade du Vieux Moulin et le centre culturel et sportif se situent à proximité. De plus le port de plaisance est aussi proche. La vieille ville ne se situe qu'à quelques centaines de mètres et peut être rapidement ralliée lors d'une balade sur la côte. Le château est aussi un lieu touristique important à Saint-Prex.

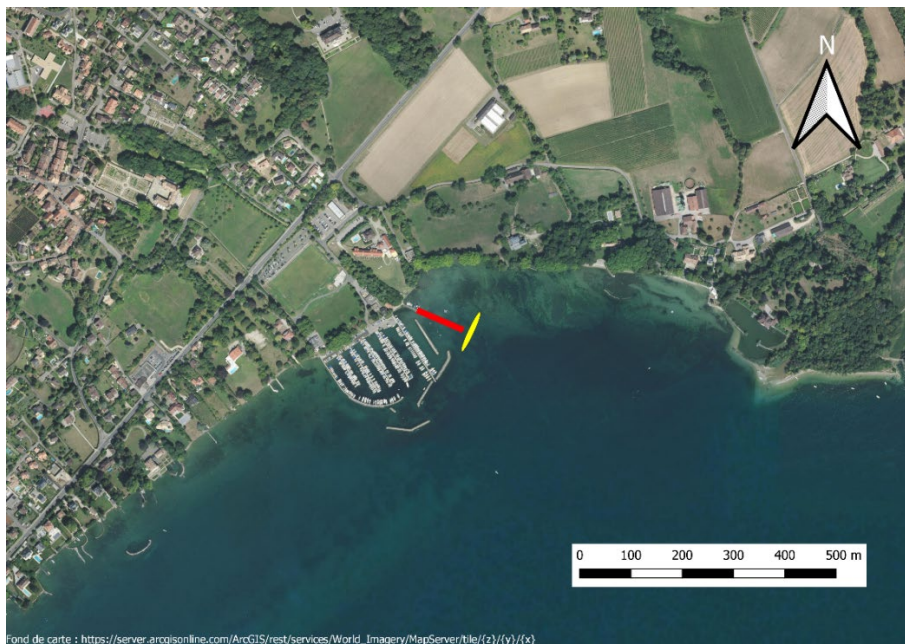
Photo



Photo : Ott Lucas, 14.11.20

Prangins

Plan de situation



Commentaire

Prangins est une commune située dans le district de Nyon. Plus éloignée de Morges que Saint-Prex, elle reste un lieu intéressant pour la galère. Situé en périphérie de la localité, le site du port des Abériaux est plus tranquille et situé à proximité des terrains de foot et d'un skatepark. Plus à l'est, faisant face au port, se trouve la plage de Promenthoux qui peut s'avérer intéressante pour la visibilité de la galère. Le lieu a déjà été retenu par l'étude de l'association qui prévoyait de prolonger un enrochement du port pour y amarrer la galère. C'est le même endroit qui est étudié ici.

Sollicitations

- **Accessibilité** (source : Google maps, CFF) : La gare CFF de Prangins se situe à 1.3km du port des Abériaux. Il faut compter un quart d'heure à pied ou une dizaine de minutes en prenant le bus. Cela reste accessible mais ce n'est pas optimal. Autrement, il y a l'arrêt de bus Prangins les Abériaux à 400m (5min à pied) qui donne directement sur le stade des Abériaux. Avec trois bus par heure et un voyage de 15 à 8min, la station est bien desservie.
- **Bathymétrie** : Les 3m de profondeur se situeraient à une centaine de mètre au large de la digue latérale du port. La création d'un chenal d'accès pour la galère devrait être envisagée (source : www.geo.vd.ch).
- **Berges** : Etant donné que le débarcadère serait envisagé en prolongement d'un enrochement, l'état des berges ne poserait pas de problème ici. La STEP se situe juste en bordure du port et rejette ses eaux directement dans le Léman (peut causer des désagréments pour les visiteurs).
- **Cadastre** :

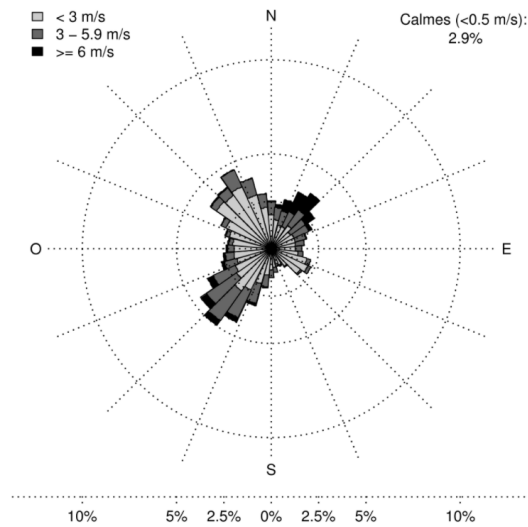
Source	https://www.geo.vd.ch/
Parcelle	Domaine public
Site pollué protection des eaux	Non inscrit, üb
Zone d'affectation	Domaine public
Patrimoine	Non inscrit
Dangers naturels	Inondation, zone de danger résiduel

- **Identité** : Située à 25km de Morges, il faut avouer que la localité de Prangins ne partage pas grand-chose avec la région de Morges. Même si les deux communes ne se trouvent pas dans le même district, elles restent des localités côtières rattachées au Léman et située sur la région de la Côte. La galère ne perdrait donc pas tout intérêt à y être ancrée, mais perdrait un peu de vue son lieu de naissance qui lui est cher.
- **Intégration dans le paysage** : La galère se situerait à côté du port de plaisance des Abériaux, ce qui ne devrait pas poser de problème de voir un bateau de plus dans le port. Cependant, elle pourrait être visible depuis le bar de l'hôtel la Barcarolle situé sur terre non loin du port. Ce serait à double tranchant, à étudier avec une possibilité de partenariat avec ce même hôtel 4 étoiles.
- **Navigation** : située au sein même du port, la galère pourrait rencontrer des problèmes de navigation avec les nombreux plaisanciers allant et venant du port qui compte 375 places d'amarrage (source : www.ports-du-leman.ch).
- **Partenariat** : Une possibilité serait de discuter avec l'hôtel Barcarolle qui gère aussi un bar « beach bar » juste au bord du Léman au même endroit envisagé. A Prangins se trouve aussi l'aile romande du musée national suisse, rendant la région plutôt attractive. De plus, il ne faut pas oublier que Nyon se situe très proche de Prangins, avec notamment le Paléo festival, des possibilités touristiques sont donc envisageables avec la localité ou les offices de tourisme.
- **Vagues** : La zone semble fortement exposée aux vents du sud-ouest (régime de Vent). En effet, avec les données de swisslakes des vagues d'une hauteur significative de 1.29m sont calculées avec une fréquence rare (T = 50), et des vagues de 0.8m de haut sont calculées très fréquemment (T = 2). La Bise est aussi présente mais présente des vagues 2 fois moins hautes.



Source : www.swisslakes.net

- **Vents** : Prangins se situant à côté de Nyon, on peut utiliser les données de la station de Nyon/Changins sur www.meteosuisse.admin.ch. Les régimes dominants sont la Bise, le Vent et le Joran. Les vitesses les plus élevées sont observées pour le Vent et la Bise, mais en raison du fetch disponible, ce sont les vents d'Ouest qui formeront les vagues les plus hautes. Le secteur est tout de même très exposé à toute sorte de vents.



- **Activités** : Entre l’hôtel la Barcarolle, le port des Abériaux et le stade du même nom non loin, la zone est très active et beaucoup de monde pourrait observer la galère. En effet, l’hôtel propose un bar, le port comprend un restaurant et les stades de foot ne sont pas loin. De plus, à 850m se trouve le château de Prangins qui abrite l’aile romande du musée national suisse. En face du port des Abériaux se trouve aussi la plage de Promenthoux et sa buvette « Le petit Bouchon » très prisée en été.

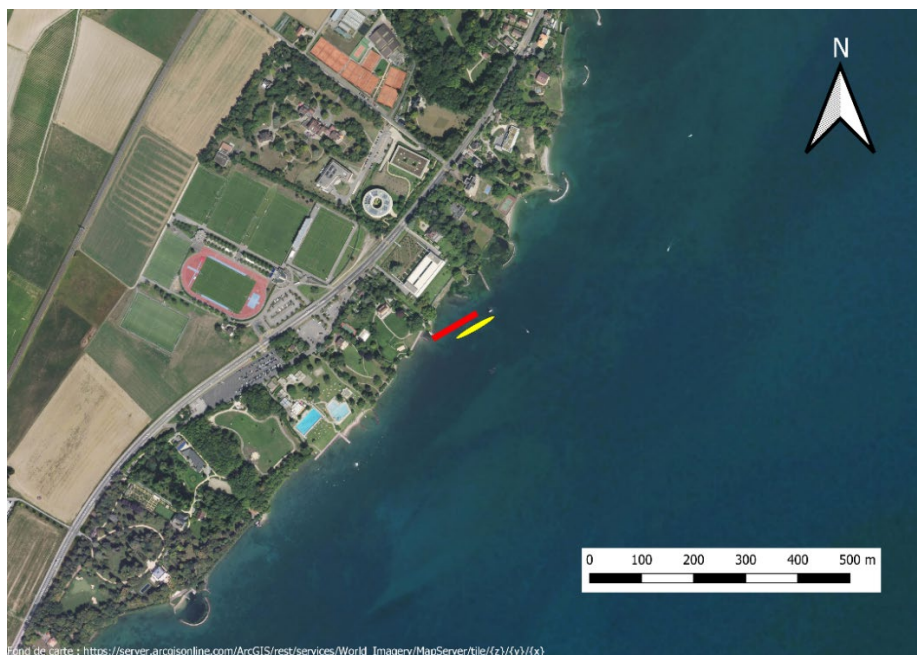
Photo



Photo : Ott Lucas, 14.11.20

Nyon

Plan de situation



Commentaire

Nyon est une commune située dans le district du même nom, voisin du district de Morges et sur la région de La Côte. La ville de Nyon est très attractive, notamment grâce aux différents festivals qui s’y tiennent, comme le Paléo ou le Caribana. La ville abrite aussi le musée du Léman, situé en face du port de plaisance et le siège de l’union des associations européennes de football (UEFA). C’est devant ce dernier que l’emplacement d’un débarcadère avait été étudié par l’association de la galère et sera repris ici. Contrairement aux sites déjà étudiés jusqu’ici, l’emplacement se situerait vraiment en périphérie de la ville.

Sollicitations

- **Accessibilité** (source : Google maps, CFF) : l’arrêt de bus Nyon, Route de Genève, se situe à seulement 150m de la plage. Il est directement accessible depuis la gare de Nyon sur la ligne 811 des transports publics de la région nyonnaise (source : www.bustpn.ch) avec un bus toutes les 30min. De plus, la gare de Nyon est très bien située entre Lausanne et Genève et est très bien desservie. L’emplacement est donc facilement accessible par transports publics.
- **Bathymétrie** : les 3m de profondeur sont situés entre 75 et 100m (source : www.geo.vd.ch)
- **Berges** : les berges sont classées comme zone de verdure publique au cadastre cantonal, mais semblent tout de même artificielles. Un déplacement sur place pourrait s’avérer utile pour mieux s’en rendre compte. En zoomant plus près, on remarque que des constructions en béton sont là, brisant la continuité écosystémique. Les berges sont ici artificielles.
- **Cadastre** :

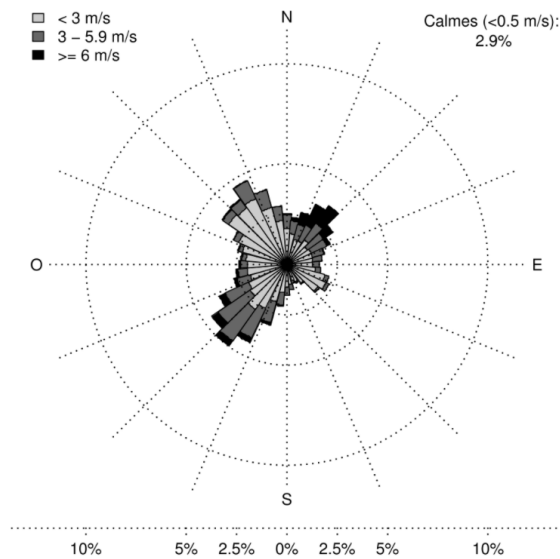
Source	https://www.geo.vd.ch/
Parcelle	Domaine public, parcelles privées derrière
Site pollué, protection des eaux	Non inscrit, üB
Zone d’affectation	Parcelle privée, zone de verdure
Patrimoine	Non inscrit
Dangers naturels	Zone à bâtir sans danger reconnu

- **Identité** : La ville de Nyon, située à quelques encablures à l'est du site étudié, se trouve à environ 25km de Morges. Ceci reste similaire à Prangins, et le district de Nyon est voisin à celui de Morges. Le lieu choisi est en plus situé un peu à l'abri des regards et n'attiserait peut-être pas la curiosité, but de la galère dans un premier temps. Cependant, la ville abrite le musée du Léman qui vise à sauvegarder le patrimoine humain et naturel du Léman, et ce pourrait être un grand plus d'avoir le soutien de ce musée dans sa ville.
- **Intégration dans le paysage** : La galère aurait ici un fort impact sur la vue, étant donné qu'elle se trouverait devant ce qui est non seulement une propriété privée, mais aussi le siège d'une association internationale. La vue aujourd'hui dégagée sur le lac serait encombrée, même si la galère est envisagée sur le côté de la plage. De plus, les berges, bien que non naturelles, ont l'air sur l'orthophoto de se composer d'arbres et petites étendues herbues, laissant place au calme et à la tranquillité. Des promeneurs pourraient se trouver gêner par la présence de la galère au bord du lac à cet endroit.
- **Navigation** : L'endroit ne semble pas fréquenté. Le port de plaisance à plusieurs centaines de mètres à l'Est se trouve dans la ville de Nyon. Cependant, des petits bateaux sont ancrés derrière les enrochements créés pour les abriter des contraintes lacustres. La galère aurait peu de problème à naviguer dans cette zone, mais elle devrait faire attention aux petits bateaux de plaisance.
- **Partenariat** : Il serait peut-être compliqué d'envisager un partenariat avec l'UEFA directement, mais les possibilités à Nyon sont nombreuses. Entre le musée du Léman qui vise à promouvoir et préserver le patrimoine du Léman et les festivals ayant lieu durant la période estivale, de nombreuses visites et croisières peuvent être envisagées. En revanche, le site se situe en dehors de la ville.
- **Vagues** : La zone semble plutôt exposée à la Bise. Des vents du Sud-Ouest peuvent aussi avoir lieu et créer de plus fortes vagues. Selon la rose des vagues du lieu, c'est bien la Bise qui pourrait causer les vagues les plus hautes avec une hauteur significative de 1m pour un temps de retour 50 ans (rarement), et 0.79m pour un temps de retour de 2 ans (très fréquemment). En effet, le fetch semble plus important pour les vents du Nord-Est que ceux du Sud-Ouest.



Source : www.swisslakes.net

- **Vents** : Comme pour Prangins, c'est la rose des vents de Nyon qui sert de référence ici (source : www.meteosuisse.admin.ch). Les vents dominants sont la Bise le Vent et le Joran.



- **Activités :** Au sud et dans les terres se trouve le centre sportif de Colovray avec un stade d’athlétisme et deux grands terrains de foot. Plus à l’Ouest à environ 300 mètres se trouve la piscine extérieure de Colovray avec un accès au lac, qui pourrait avoir une belle vue sur la galère. Autrement, il faut plutôt se référer aux activités de la ville de Nyon qui se situe tout de même plus loin à l’Est, il est donc difficile de considérer ces activités comme en lien avec la galère. Toutefois, la galère se trouve sur la route du festival Caribana qui pourrait lui offrir une bonne visibilité.

Photo



Photo : Ott Lucas, 14.11.20

Bar la Coquette

Plan de situation



Commentaire

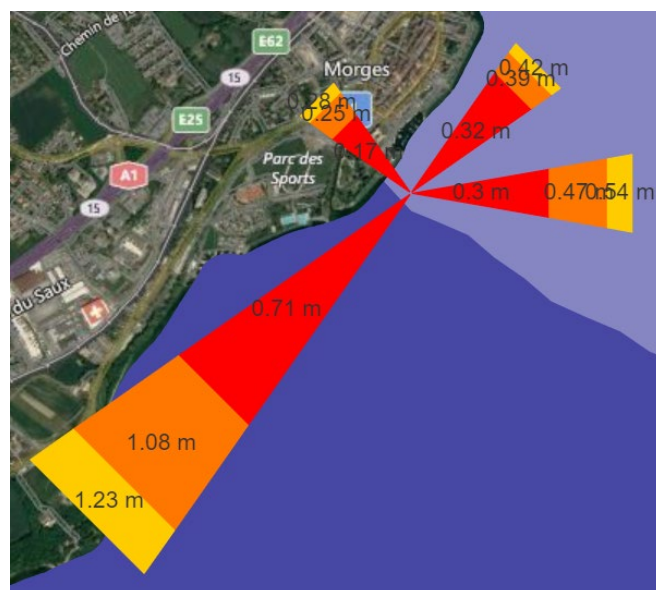
Situé à Morges même, le bar est un lieu incontournable de rencontres pour les Morgiens durant la période estivale. Avec une vue imprenable sur le Léman et des scènes temporaires, il s'adapte à tout type d'événement et peut accueillir beaucoup de monde. Il allait donc de soi de proposer de construire un débarcadère dans un lieu si fréquenté de Morges, afin d'attirer l'œil sur la galère et d'augmenter son rayonnement dans sa ville natale. De plus, la ville de Morges a de nombreux attraits touristiques, surtout dans le secteur avec les jardins du parc de l'indépendance et le château de Morges.

Sollicitations

- **Accessibilité** (source : Google maps, CFF) : La gare CFF, très bien desservie par les trains, se trouve à 700m du bar. Depuis la gare, il y a fréquemment la possibilité de prendre un bus jusqu'à Morges Poste, qui se situe à 450m du bar.
- **Bathymétrie** : 3m à un peu moins de 100m (~95m), peut-être envisager de creuser un chenal d'accès (source : www.geo.vd.ch).
- **Berges** : Construites, artificielles. Cependant le parc de l'indépendance se trouve non loin du bord et il faudrait veiller à ne pas empiéter sur ce dernier. A noter que le parc de l'indépendance est inscrit au patrimoine comme jardin historique.
- **Cadastre** :

Source	https://www.geo.vd.ch/
Parcelle	Privée
Site pollué	Non inscrit
Zone d'affectation	Zone de verdure
Patrimoine	Non inscrit
Dangers naturels	Danger moyen d'inondation

- **Identité** : Il est difficile de faire mieux que le bar de la Coquette en termes d'identité pour la galère. En effet, le bar en lui-même revendique déjà une forte identité morgienne en promouvant les produits de la région, et aussi en ne comptant que des Morgiens parmi ses fondateurs. La galère se situerait non loin du port de Morges et pourrait exposer son histoire aux yeux de la ville qui l'a vu naître.
- **Intégration dans le paysage** : Avec la vue que propose le bar, il est difficile d'imaginer que la galère n'aura pas un fort impact sur celle-ci. Cependant, des infrastructures existent déjà et le port situé à côté permettrait une bonne intégration dans le paysage.
- **Navigation** : Le port du Petit-Bois se trouve plus loin à l'est et compte 425 emplacements, il faudrait donc veiller à ne pas déranger les plaisanciers (source : www.ports-du-leman.ch). De plus, une route de navigation de la CGN passe au large du bar, avec le débarcadère de la CGN qui se trouve en face du casino, à l'est du port. C'est donc un lieu très fréquenté.
- **Partenariat** : Le partenariat principal serait à effectuer avec le bar de la Coquette. Des possibilités d'activités à quai seraient fort intéressantes, des spectacles devant le bar pourraient avoir lieu, des visites de la galère permettraient d'augmenter la visibilité du bar, et les activités du bar celle de la galère. Des événements comme la fête de la tulipe organisée dans le parc de l'indépendance pourraient aussi largement profiter à la galère, qui en contrepartie pourrait proposer des croisières didactiques sur le parc et sa création. Le château de Morges pourrait aussi faire l'objet de partenariat.
- **Vagues** :



Source : www.swisslakes.net

Les vagues les plus hautes sont induites par le Vent avec des hauteurs significatives atteignant rarement les 1.23m et très fréquemment 0.71m.

- **Vents** : On peut procéder comme pour Saint-Prex et comparer les stations de Pully et de Nyon/Changins qui sont les plus proches à disposition. Ainsi ce sont les régimes de la Bise et du Vent qui sont supposés dominant ici.

- **Activités** : Comme déjà vu, le secteur du bar de la Coquette est très animé. De plus, des terrains de foot ainsi que la piscine communale de Morges se trouvent non loin à l'ouest. Avec en plus le port situé à l'est, le secteur peut être évalué comme vrai centre attractif lacustre, et la galère ne ferait qu'améliorer cet aspect.

Photo



Port du Bief

Plan de situation



Commentaire

Actuellement, la galère est ancrée au large de Morges, non loin du port du Bief. Une telle situation est intéressante, car on peut y accéder par petit navire assez rapidement. L'idée serait de construire un débarcadère à côté de ce port pour y installer définitivement la galère. Le port est situé à cheval sur les communes de Morges et de Préverenges, mais le projet sortant du port, c'est la commune de Morges qui serait choisie pour accueillir le débarcadère.

Sollicitations

- **Accessibilité** (source : Google maps, CFF) : L'arrêt Morges, Bief est situé à proximité même du port du Bief, à moins de 400m de l'endroit choisi pour le débarcadère. Il est accessible directement depuis la gare de Morges toutes les 15min avec la ligne 701 des MBC. C'est un endroit bien desservi, avec une distance réduite de marche pour des personnes à mobilité réduite.
- **Bathymétrie** : 3m situés à environ 40m du bord. Un chenal d'accès peut être envisagé (source : www.geo.vd.ch).
- **Berges** : Les berges, comme on peut le voir sur l'orthophoto, sont artificielles avec des enrochements. A l'arrière se trouve le parc du Vertou.
- **Cadastre** :

Source	https://www.geo.vd.ch/
Parcelle	Domaine public
Site pollué, protection des eaux	Non inscrit, secteur de protection Au
Zone d'affectation	Domaine publique
Patrimoine	Palafittes à côté, région archéologique
Dangers naturels	Zone inondable sans danger

- **Identité** : Comme pour le bar de la Coquette, le port du Bief est situé à Morges même et l'aspect identitaire serait parfaitement conservé.
- **Intégration dans le paysage** : Située à côté du port du Bief et devant un parc du domaine public, la galère n'aurait pas un grand impact sur la vue et resterait assez discrète dans ce paysage. Le parc de Vertou, en effet, a vu naître des espaces de fitness urbain et un skate-park, qui ne devraient pas être dérangés par la galère.
- **Navigation** : La galère se trouverait à côté du port du Bief, dans la baie de Morges, qui compte 100 places d'amarrage (www.ports-du-leman.ch). En comparaison avec le port du Petit-Bois, on peut dire que le port du Bief est un petit port de plaisance. Au large passe aussi une route de la CGN, mais elle est plus loin qu'à d'autres endroits étudiés. L'endroit est donc.
- **Partenariat** : Le site étudié ne compte pas vraiment de possibilité de partenariat alentours. Il faudrait donc plutôt se tourner vers les offices de tourisme de Morges ou de Prévèrenge pour d'éventuels partenariats. Le camping TCS de Morges ou encore le château de Morges pourraient trouver un intérêt à travailler avec la galère.
- **Vagues** : les données récoltées sur [swisslakes](http://swisslakes.net) permettent d'observer des vagues de hauteur significative de 1.26m pour un temps de retour de 50 ans (rarement) et des vagues de 0.73m pour un temps de retour de 2 ans (très fréquemment). Ce résultat n'est pas surprenant, car la zone semblait bien exposée aux vents du SO, avec un fetch d'environ 20km.



Source : www.swisslakes.net

- **Vents** : On peut procéder comme pour Saint-Prex et comparer les stations de Pully et de Nyon/Changins qui sont les plus proches à disposition. Ainsi ce sont les régimes de la Bise et du Vent qui sont supposés dominant ici.
- **Activités** : Le parc de Vertou au nord du débarcadère est un lieu vivant. Depuis 3 ans maintenant, un skate-park a pu voir le jour ainsi que des espaces de fitness urbain au sein du parc. Le port du Bief est aussi un lieu d'activité, avec une promenade didactique visant à sensibiliser la population à la biodiversité locale et globale. Des courts de tennis sont aussi disponibles au nord du port du Bief. Ce n'est pas une zone d'activité comme le bar de la Coquette, mais plutôt une zone de loisirs et de calme.

Photo



Photo : Ott Lucas, 14.11.20

Le Bouveret

Plan de situation



Commentaire

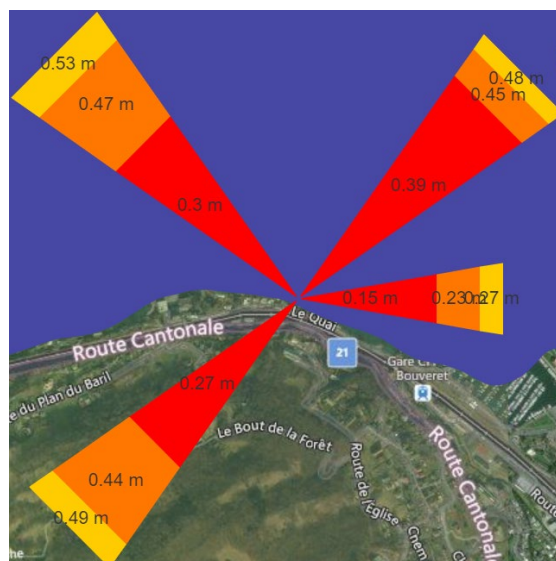
Le choix du Bouveret a été orienté tout d'abord car il s'agit d'un lieu situé dans une autre partie du Léman. Les contraintes y sont donc différentes et peuvent apporter de bons points de comparaison avec les lieux situés sur la Côte. Le Bouveret se trouve dans la commune de Port-Valais située dans le canton du Valais et est réputé pour ses activités nautiques et récréatives avec son port, Aquaparc ou le Swiss Vapeur Park.

Sollicitations

- **Accessibilité** (source : Google maps, CFF) : La gare CFF du Bouveret se situe à 400m du lieu indiqué. Elle est accessible en train depuis Saint-Maurice ou Martigny si on vient du canton de Vaud. Depuis Lausanne, un train chaque heure et un voyage de 1h10 permettent d'atteindre le Bouveret, qui n'est donc pas bien desservi.
- **Bathymétrie** : les 3m de profondeur sont atteints très proche du bord, entre 10 et 20m où se trouvent les lignes de 2 et 4m respectivement (source : www.geo.vd.ch).
- **Berges** : Les berges sont artificielles et renforcées à l'aide d'enrochements.
- **Cadastre** :

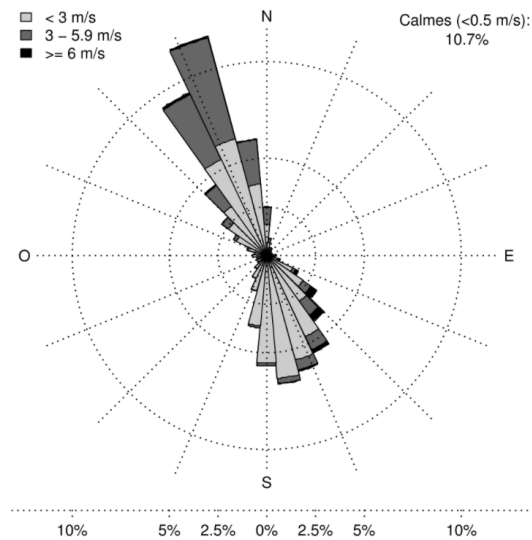
Source	https://www.vs.ch/web/egeo/cartes
Parcelle	Domaine public, parcelle privée derrière
Site pollué, protection des eaux	Non inscrit, secteur Au
Zone d'affectation	Zone d'activité touristique
Patrimoine	Non inscrit
Dangers naturels	Non inscrit pour inondation du Rhône

- **Identité** : Situé à 30km à vol d’oiseau de Morges, le Bouveret se trouve tout de même très loin de la ville natale de la galère. En transport publique, il faut compter environ 2h pour rallier les deux localités et 60km de route en voiture. D’un point de vue identitaire, le Bouveret partage peu de choses avec Morges. Les deux ne sont pas dans le même canton et ne sont pas situés sur la même région du Léman. Toutefois, le Bouveret reste un lieu connu pour son port et ses activités touristiques centrées autour du lac, et la galère y trouverait une place de choix. La galère qui n’a de cesse de réécrire son histoire, pourrait aussi pourquoi pas se réinventer sur les berges valaisannes.
- **Intégration dans le paysage** : Le port du Bouveret, qui compte environ 630 places, fait incontestablement partie des plus grands ports du Léman et donne au Bouveret son rayonnement connu en Suisse. De plus, un débarcadère de la CGN se trouve non loin du lieu prédéterminé pour accueillir la galère. Ainsi, la construction d’un débarcadère supplémentaire dans la zone n’impacterait que très peu la vue déjà existante. Cependant, il faut se rappeler que l’endroit est situé devant l’école hôtelière César Ritz.
- **Navigation** : La présence du port du Bouveret et du Débarcadère de la CGN fait de cet endroit un lieu extrêmement fréquenté et rendrait la navigation délicate.
- **Partenariat** : Peu de possibilités de partenariat dans cette région. Les centres d’activités comme le Swiss Vapeur Park ou Aquaparc n’auraient pas de réel intérêt à travailler avec la galère. Il faudrait plutôt s’orienter vers l’office de tourisme pour trouver quelque chose.
- **Vagues** : Les hauteurs significatives des vagues sont réparties plus ou moins de la même manière en fonction des directions. Rarement, des vagues d’environ 0.5m peuvent être observées venant du NE, SO et NO (0.53m), alors que fréquemment des vagues de 0.4m peuvent être observées en provenance du NE.



Source : www.swisslakes.net

- **Vents** : Pour évaluer les vents du Bouveret, la station anémométrique la plus proche est celle d’Aigle. Comme pour les autres, la rose des vents d’Aigle est disponible sur www.meteosuisse.admin.ch :



Les régimes dominants sont donc nettement des vents du NO et du SE (respectivement Joran et Foehn).

- **Activités** : Beaucoup d'activités prennent place au Bouveret. On compte tout d'abord des parcs de loisir avec le Swiss Vapeur Park, ou encore le parc aquatique Aquaparc dans la région. Le port de 650 places adjacent est aussi source de beaucoup d'activités nautiques de plaisance, et le débarcadère de la CGN situé juste à côté indique d'une forte activité de tourisme lacustre.

Photo



Source : Commune de Port-Valais (<https://www.port-valais.ch/fr/port-bouveret-1457.html>) consulté le 25.11.20

Excenevex

Plan de situation



Commentaire

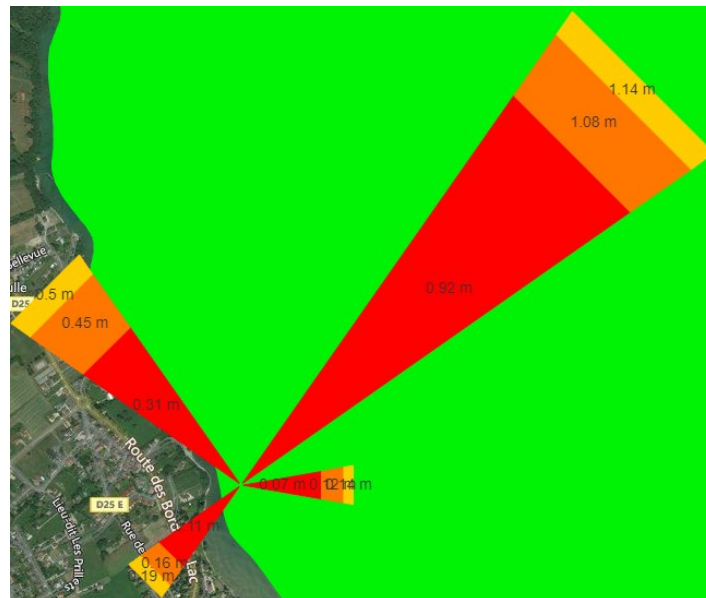
Excenevex est une commune française dans le département de la Haute-Savoie. Célèbre pour accueillir la seule plage de sable de fin du Léman, elle est une localité calme et peu peuplée, comptant un peu plus de 1000 habitants à l'année. Néanmoins, elle reste attractive, notamment grâce au camping de la Pinède qui borde la plage. De plus, l'orientation sur le lac de la commune apporte un nouveau regard au niveau des contraintes des vagues et des vents.

Sollicitations

- **Accessibilité** (source : Google maps, CFF) : Accessible en bus depuis Evian qui se rallie facilement en bateau depuis Lausanne, ou depuis Genève avec un bus Genève-Sciez puis un bus Thonon-Sciez, la commune n'est pas la plus simple à atteindre au bord du lac. Plusieurs correspondances et des bus peu fréquents font d'elle une commune mal desservie depuis la Suisse, notamment pour des personnes à mobilité réduite. Sinon l'arrêt de bus Excenevex Chef-Lieu se situe à 350m du lieu défini. Autrement, on peut accéder à Excenevex par Yvoire, mais avec une fréquence d'un bus par heure, ce n'est pas non plus vraiment mieux.
- **Bathymétrie** : Pas de données précises sur le géoportail vaudois, et non disponible sur le géoportail français. On estime donc cette profondeur à la longueur du débarcadère de la CGN, qui est de 75 m. Les 3m sont donc estimés à environ 75m.
- **Berges** : Artificielles, route
- **Cadastre** : La parcelle au bord du lac est publique, mais plusieurs parcelles qui semblent privées sont situées à l'arrière
- **Identité** : Au niveau de l'identité, on s'éloigne ici clairement de Morges. Très peu accessible, la localité ne fait même pas face à Morges ou à la région de la Côte. De plus, peu d'activités lacustres en termes de navigation ont lieu à Excenevex, si ce n'est la présence d'un débarcadère de la CGN non loin vers un petit port de pêcheurs. A vol d'oiseau, Excenevex se

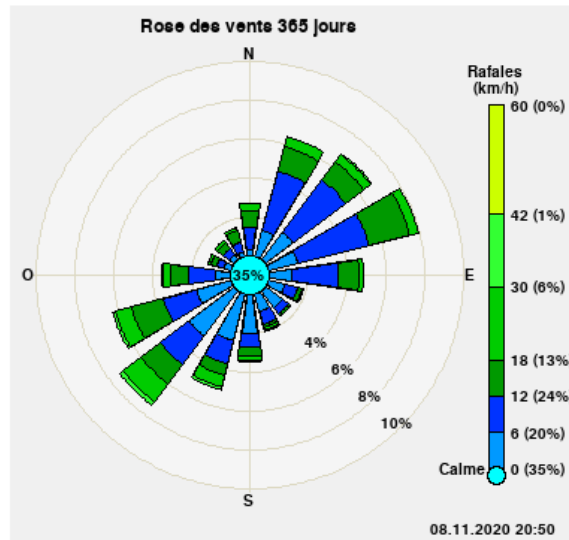
trouve à 20 km de Morges, mais sur la terre ferme, il faut parcourir 75 km de route pour l'atteindre.

- **Intégration dans le paysage** : Hormis le débarcadère de la CGN, il n'y a pas grand-chose d'autre à côté de la plage de sable fin d'Excenevex. De plus, cette dernière est fréquentée par le camping de la pinède, et il est clair que la galère aurait beaucoup de visibilité, mais cela ne va pas sans impacter la vue. Finalement, quelques villas privées se trouvent au bord du lac, et beaucoup de terrain pour l'instant non construits pourraient le devenir, ne laissant alors que peu de place à la galère sur les berges du lac.
- **Navigation** : Le lieu est peu fréquenté par des bateaux, même si une route de la CGN passe au large. En revanche, le camping et la plage d'Excenevex proposent beaucoup d'activités lacustres, comme des promenades en pédalo, en paddle ou en bateaux sans permis de navigation. Il faudrait donc absolument veiller à ne pas rencontrer ces petits plaisanciers pour éviter tout accident.
- **Partenariat** : Hormis deux campings ayant accès à la plage d'Excenevex, il n'y a pas grand-chose d'autre à espérer à Excenevex à part étoffer l'offre touristique du lieu. Toutefois, Excenevex fait partie de l'office de tourisme intercommunal « destination Léman » qui aurait une belle place dans son catalogue pour la galère.
- **Vagues** : Comme pressenti, le secteur est très exposé à des vagues dues à la Bise. Une différence de seulement une vingtaine de centimètres sépare les hauteurs significatives évaluées pour des événements rares et très fréquents. Pour des événements rares, c'est une hauteur de 1.14m, alors que pour des événements très fréquents, c'est une hauteur de 0.92m qui est estimée.



Source : www.swisslakes.net

- **Vents** : Pour les vents d'Excenevex et d'Yvoire, on peut se baser sur les mesures de la rose des vents de Sciez. Normalement, une rose des vents est établie sur plusieurs années, mais là seules les données sur les 365 derniers jours sont disponibles. Pour ce qu'on veut en faire, on pourra s'en satisfaire pour représenter le régime des vents global dans la région (données disponibles sur www.meteo-sciez.fr) :



Les régimes dominants sont donc la Bise et le Vent.

- **Activités** : A l'échelle de la localité, il y a plusieurs activités disponibles. Un terrain de foot est disponible, ainsi qu'un agospaces à environ 500m dans les terres. Autrement, plusieurs campings se trouvent dans la localité, avec le camping de la Pinède qui borde le Léman via la plage de sable fin, elle aussi très prisée. Sinon, peu de choses à faire, une église à visiter.

Photo



Yvoire

Plan de situation



Commentaire

Yvoire est une commune française de Haute-Savoie, qui avec Nyon forment la frontière entre le Grand-Lac et le Petit-Lac. Comme ce qui avait été proposé à Prangins par l'association de La Liberté, une extension de l'enrochement protecteur du port peut être envisagée ici. Tout comme Excenevex, elle compte un millier d'habitants, mais est beaucoup mieux reliée à la Suisse. Faisant face à la région de la Côte, Yvoire reste donc un lieu intéressant pour accueillir la galère.

Sollicitations

- **Accessibilité** (source : Google maps, CFF) : Malgré la situation d'Yvoire sur la rive gauche du Léman, elle reste facilement et accessible depuis Nyon en 20min en bateau avec un départ environ toutes les 50min (www.cgn.ch/fr/cgn-mobilite). En transports publics depuis Genève, l'itinéraire passant par Nyon est aussi à privilégier. Ensuite, le débarcadère de la CGN serait situé dans le même port que le débarcadère de la galère à 500m de marche. Yvoire est donc facilement accessible mais pas bien desservie.
- **Bathymétrie** : Comme pour Excenevex, les 3m de la côte sont estimés en rapport avec la longueur du débarcadère de la CGN qui mesure une centaine de mètres. On estime donc à 25-30m la profondeur de 3m en partant de la digue du port, sachant qu'à l'intérieur de celui-ci se trouvent des profondeurs de 2 à 2.5m (www.ports-du-leman.ch).
- **Berges** : Artificielles, enrochement du port.
- **Cadastre** : Située dans un port, la parcelle est certainement du domaine public.
- **Identité** : Bien qu'Yvoire soit française, la région ne serait pas dénuée d'identité pour la galère pour autant. Tout d'abord, Yvoire fait directement face à la région de La Côte, et est étroitement reliée à Nyon par la CGN. De plus, à l'image de Saint-Prex, Yvoire possède un château médiéval qui témoigne du passé important de la localité à cette période, se

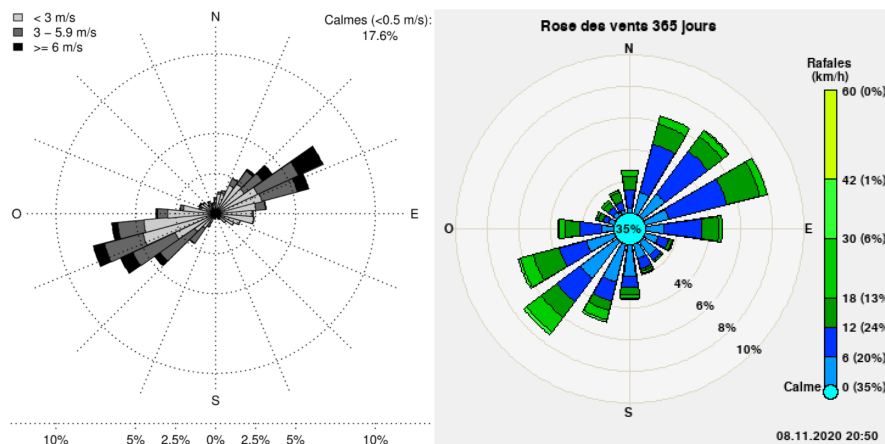
rapprochant ainsi de La Liberté. A vol d'oiseau, la ville se trouve à 20km de Morges, à un peu plus de 5km de Nyon et de La Côte.

- **Intégration dans le paysage** : Avec la présence du port de 440 places, la galère ne devrait pas poser de problème au niveau de la vue. Au contraire, avec la présence du château à l'Est, la galère pourrait lui faire face à l'Ouest du port et s'inscrire dans la continuité de la vieille ville portuaire. La galère n'aurait pas un fort impact sur la vue.
- **Navigation** : Avec le port de plaisance et le débarcadère de la CGN, le lieu est très fréquenté par la navigation. Le port d'Yvoire compte 440 places d'amarrages.
- **Partenariat** : Office de tourisme intercommunal « destination Léman », château d'Yvoire, proposition d'un tourisme nautique et de redécouverte de la région du Petit-Lac.
- **Vagues** : Le secteur est exposé pour les vagues les plus hautes à des vagues venant du NE et du NO, qui donnent des vagues de hauteur significatives plutôt similaire. Venant du NE, direction de la Bise, des vagues de 0.58m de haut sont rarement atteintes, alors que des vagues de 0.54m de haut sont très fréquemment atteintes. Il y a donc peu de différence entre des vagues rares et fréquentes pour le NE.



Source : www.swisslakes.net

- **Vents** : Comme pour Excenevex, les régimes dominants sont la Bise et le Vent. De plus, la rose des vents de Genève qui se situe non loin de Sciez a les mêmes régimes dominants, appuyant la supposition de ces régimes à Yvoire :



Source : www.meteosuisse.admin.ch ; www.www.meteo-sciez.fr

- **Activités** : Le château d'Yvoire à visiter, le port de plaisance, la présence d'un camping, possibilité de visiter la ville médiévale.

Photo



D. Courantologie

Le but de cette analyse sera de montrer la méthodologie utilisée pour pouvoir comparer les courants entre les différents sites. Tout d'abord, il faut trouver une période stable pour la Bise et pour le Vent sur la région de la Côte, Aigle, et côté France. Pour ce faire, on peut tout simplement chercher sur un moteur de recherche par exemple « Bise Nyon » et on tombe rapidement sur des épisodes de forte bise à Nyon. Une fois que les dates sont à notre disposition, on peut aller sur www.prevision-meteo.ch qui recense l'historique des prévisions météo pour toutes les stations en Suisse. Le site contient notamment les données de direction et de vitesse des vents. Ensuite il faut encore vérifier les articles de journaux sur ce site pour contrôler que nous avons une période stable du vent en question. La dernière étape est d'aller sur www.meteolakes.ch (Baracchini, 2019) pour chercher la direction et l'intensité des courants durant la phase stable du vent recherché.

Bise

Dans un article du Temps, il est fait référence à un épisode de forte Bise quelques jours avant la publication de l'article le 15 mai 2019, en particulier à St-Prex. A la station de Nyon/Changins, on peut voir ci-dessous que le régime de Bise est resté stable plusieurs jours, notamment entre le 14 et le 15 mai 2019. On va donc pouvoir se référer à cette semaine sur meteolakes pour évaluer les courants en temps de Bise.

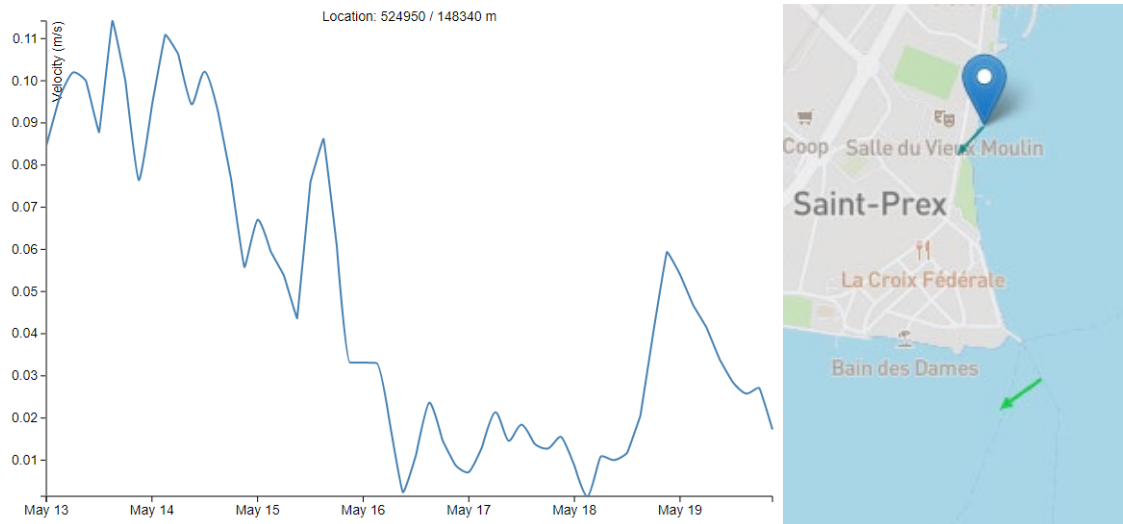
Relevés horaires à Nyon / Changins - Mardi 14 Mai 2019													
Heure UTC ¹	Température [°C]			Vent [km/h]				Hum. [%]	Pres. ⁴ [hPa]	Visi. [Km]	Nébu. [octa]	Préc. ⁵ [mm]	Cond.
	2m.	Res.	Ros.	Dir. ²	Vit.	Moy.	Raf. ³						
18:00	12.3	9.2	-3.3	NE	37.0	--	77.8	33	1020.3 (-0.1/3h)	--	--	0/1h 0/12h	--
12:00	14.5	11.8	-2.6	NE	44.4	--	74.1	31	1020.7 (-0.5/3h)	--	--	0/1h 0/6h	--
12:00	14.5	11.8	-2.6	NE	44.4	--	74.1	31	1020.7 (-0.5/3h)	--	--	0/1h 0/6h	--
06:00	9.5	5.7	-1.2	NNE	33.3	--	72.2	47	1023.5 (-0.2/3h)	--	--	0/1h 0/12h 0/24h	--
06:00	9.5	5.7	-1.2	NNE	33.3	--	72.2	47	1023.5 (-0.2/3h)	--	--	0/1h 0/12h 0/24h	--

Relevés horaires à Nyon / Changins - Mercredi 15 Mai 2019													
Heure UTC ¹	Température [°C]			Vent [km/h]				Hum. [%]	Pres. ⁴ [hPa]	Visi. [Km]	Nébu. [octa]	Préc. ⁵ [mm]	Cond.
	2m.	Res.	Ros.	Dir. ²	Vit.	Moy.	Raf. ³						
18:00	11.0	7.7	--	NE	33.3	--	68.5	--	1016.9 (0.6/3h)	--	--	0/1h 0/12h	--
12:00	12.1	8.5	1.0	NE	46.3	--	72.2	47	1016.2 (-0.7/3h)	--	--	0/1h 0/6h	--
06:00	6.8	1.7	0.3	NNE	40.7	--	75.9	63	1018.1 (0.4/3h)	--	--	0/1h 0/12h 0/24h	--
00:00	8.4	4	-2.0	NNE	37.0	--	64.8	48	1020.1 (-0.5/3h)	--	--	0/1h 0/6h	--

Source : Meteosuisse. www.previsions-meteo.ch, consulté le 13.11.2020

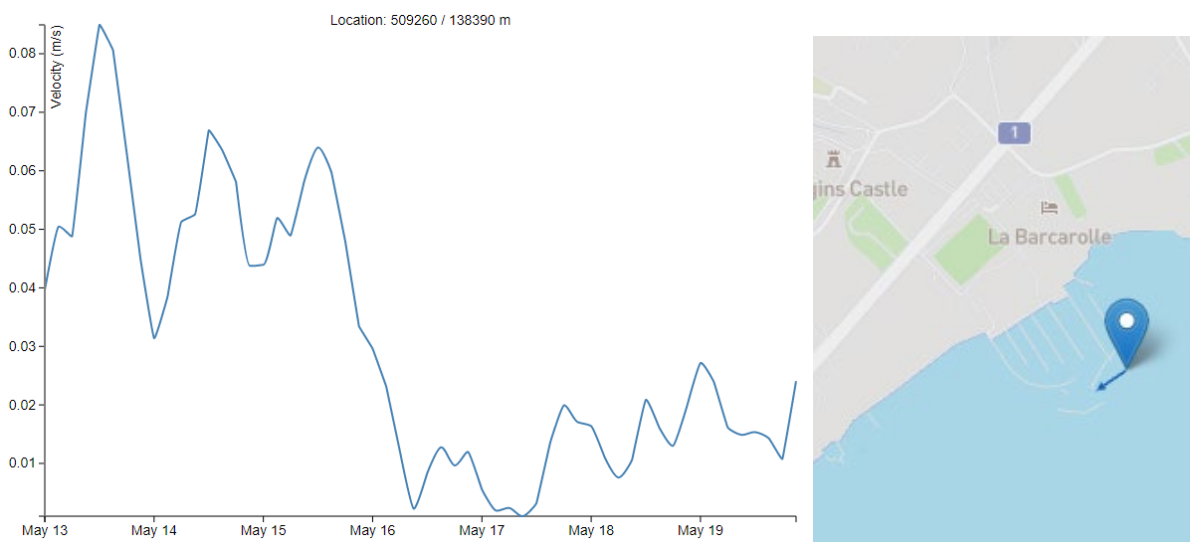
Assumant donc une phase stable de Bise entre le 13 et le 15 mai 2019, l'intensité des courants ainsi que leurs directions étaient les suivantes aux lieux étudiés (source images : www.meteolakes.ch, Baracchini, 2019).

Saint-Prex



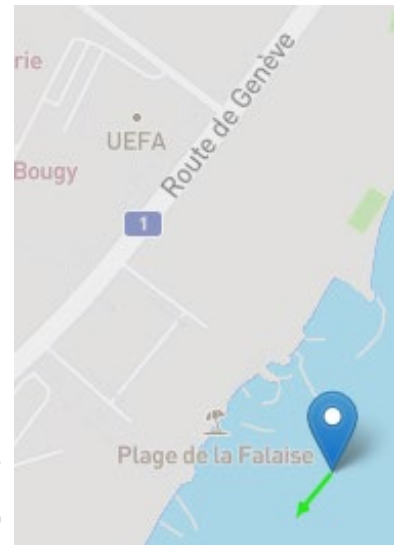
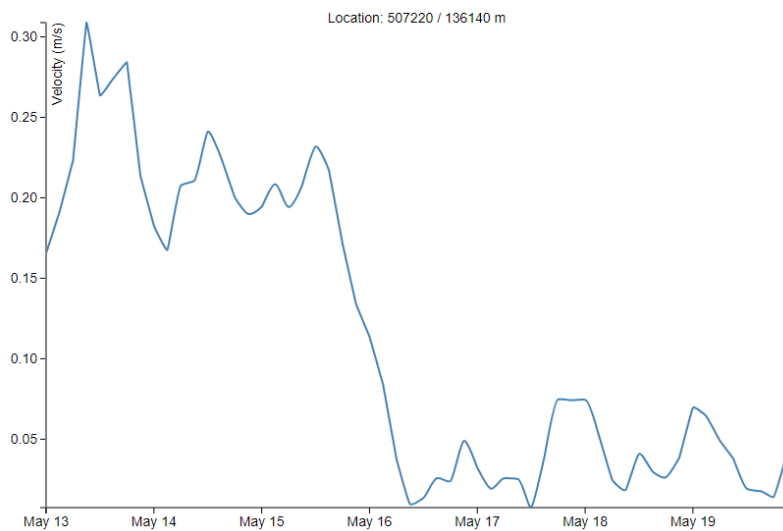
Le 14 mai 2019 à 12h00, le courant circulait vers le SO, suivant la direction du vent, avec une intensité de 0.1 m/s. La direction du courant tout au long de l'épisode de bise est restée la même. Les intensités ont varié entre 0.04 et 0.11 m/s tout au long de la forte bise.

Prangins



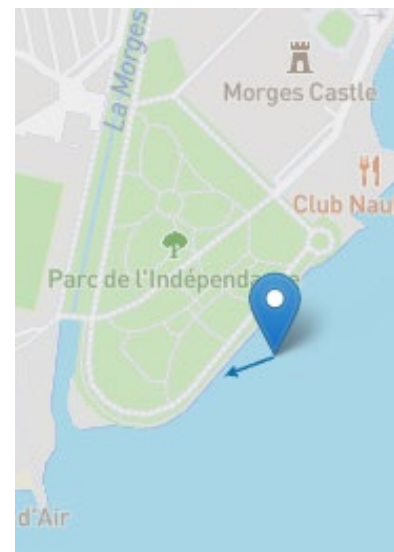
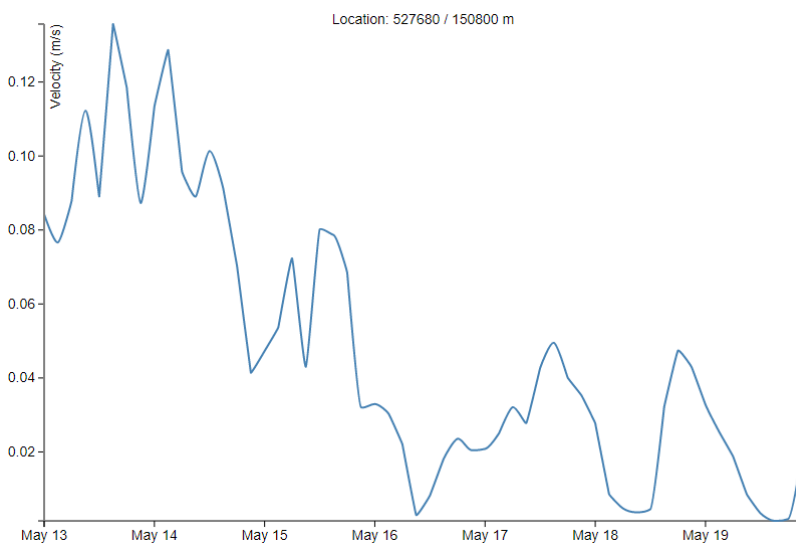
Le 14 mai 2019 à 12h00, le courant circulait vers le SO, suivant la direction du vent, avec une intensité d'environ 0.07 m/s. La direction du courant tout au long de l'épisode est restée inchangée, et les intensités ont varié entre 0.03 et 0.09 m/s.

Nyon



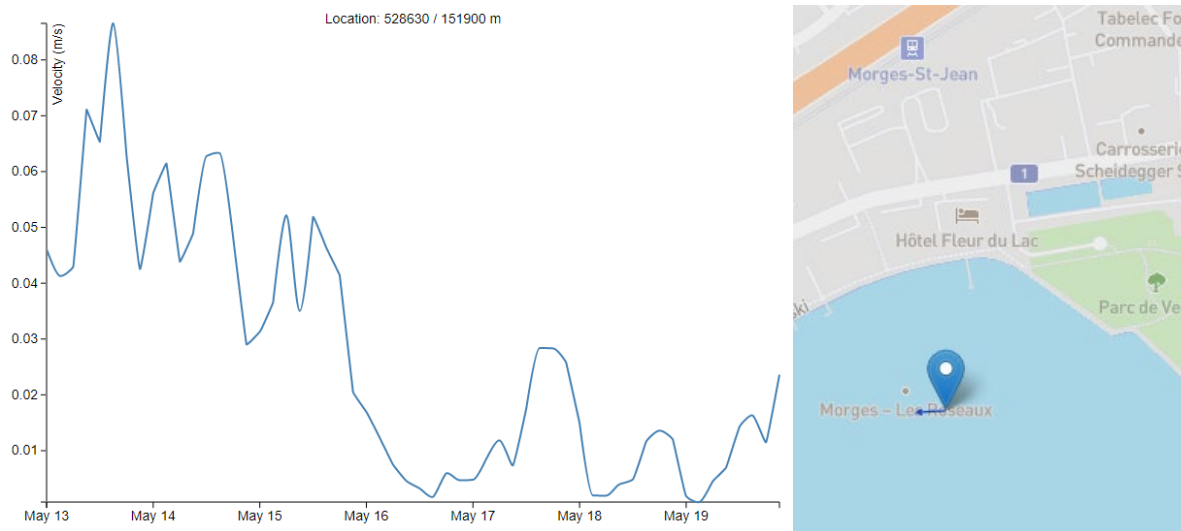
Le 14 mai 2019 à 12h00, le courant circulait vers le SO avec une intensité d'environ 0.25 m/s. Ce secteur est beaucoup plus exposé à la Bise car aucun relief ou aucune baie ne le protège de ce vent, et cela se remarque avec des courants oscillant entre 0.16 et 0.31 m/s durant l'épisode de Bise.

Morges – Coquette



Le 14 mai 2019 à 12h00, l'intensité du courant était de 0.1 m/s et sa direction le SO. La direction est restée constante, et les intensités ont varié entre 0.04 m/s et 0.13 m/s au maximum.

Morges – Bief

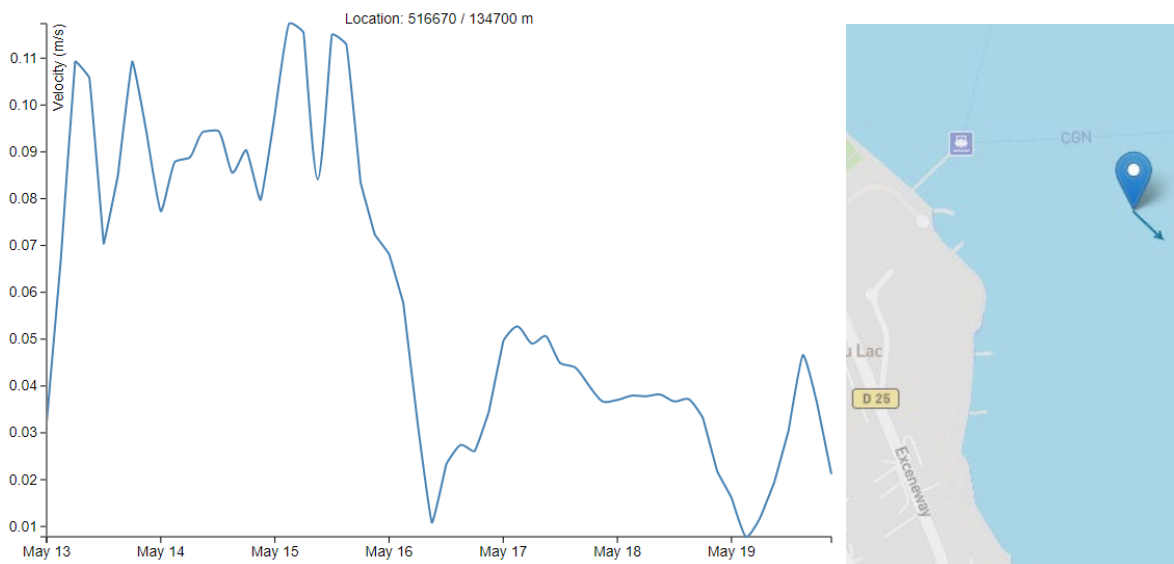


La situation au 14 mai 2019 à 12h00 comptait des courants de 0.05 m/s d'intensité circulant à l'ouest. De plus faibles intensités allant jusqu'à 0.09 m/s et une direction constante vers l'ouest montrent que ce secteur est plutôt protégé de la bise, en tout cas en ce qui concerne les courants. Ceci vient aussi du fait que le fetch soit plus petit.

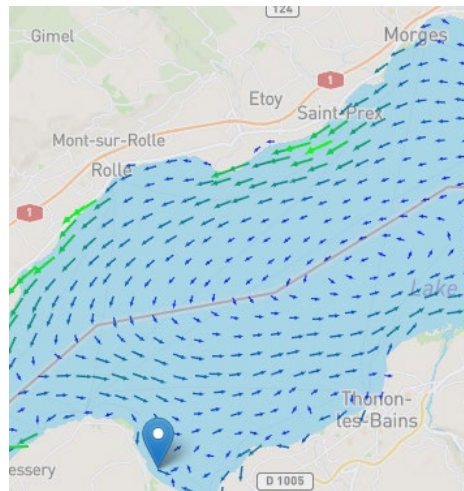
Le Bouveret

La bise n'étant pas un vent dominant au Bouveret, il n'est pas nécessaire d'évaluer les courants en temps de bise, car ils ne sont pas représentatifs de ce qui peut arriver.

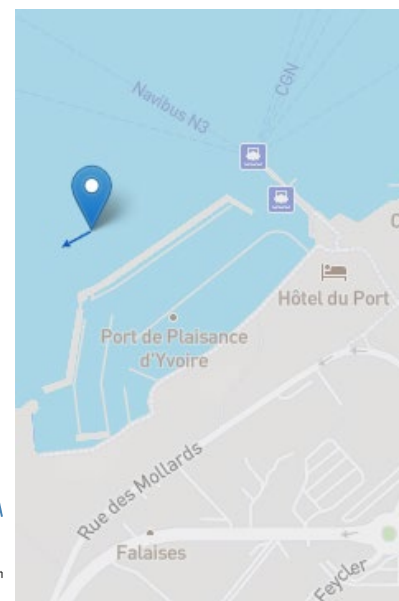
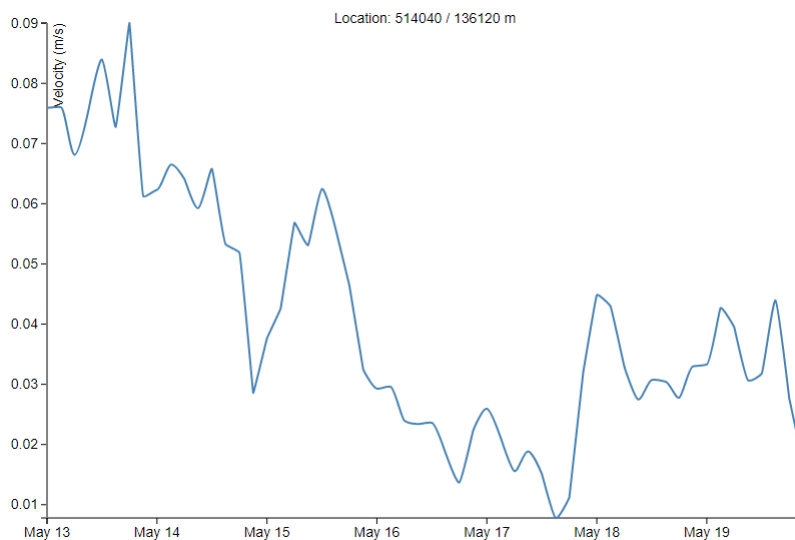
Excenevex



Le 14 mai 2019 à 12h00, le courant circulait en direction du SE avec une intensité de 0.09 m/s. Les intensités ont varié entre 0.04 m/s et 0.12 m/s et les directions étaient perpendiculaires au vent adjacent, et suivaient la ligne de côte. Ceci est dû au fait que la bise soufflait sur la rive nord du Léman, entraînant un courant circulaire sur le Léman, comme on peut le voir sur l'image ci-dessous :



Yvoire



Le 14 mai à 12h00 le courant circulait vers le SO avec une intensité de 0.07 m/s. Les intensités ont varié entre 0.03 m/s et 0.09 m/s et la direction est restée inchangée.

En conclusion, tous les lieux étudiés ont subi cet épisode de Bise avec des intensités plus hautes que la moyenne jusqu'au 16 mai, puis une retombée une fois l'épisode passé. L'influence sur les courants s'est particulièrement ressentie à Nyon, où ils atteignaient des intensités de 0.3 m/s. Elle s'est moins ressentie à des endroits comme Excenevex, ayant pourtant un long fetch disponible lors de bise.

Vent

Dans un article du Nouvelliste (<https://www.lenouvelliste.ch/articles/suisse/meteo-des-vents-violents-ont-balaye-la-suisse-durant-la-nuit-753982>), il est fait référence à de forts vents qui ont balayé toute la Suisse dans la nuit du 29 au 30 avril 2018. Après cet évènement, des rafales de vents du sud-ouest d'environ 70 km/h étaient attendues. Le 30 avril 2018 à la station de Nyon/Changins, une situation de vent du sud-ouest stable a pu être observée, avec des rafales de 63 km/h.

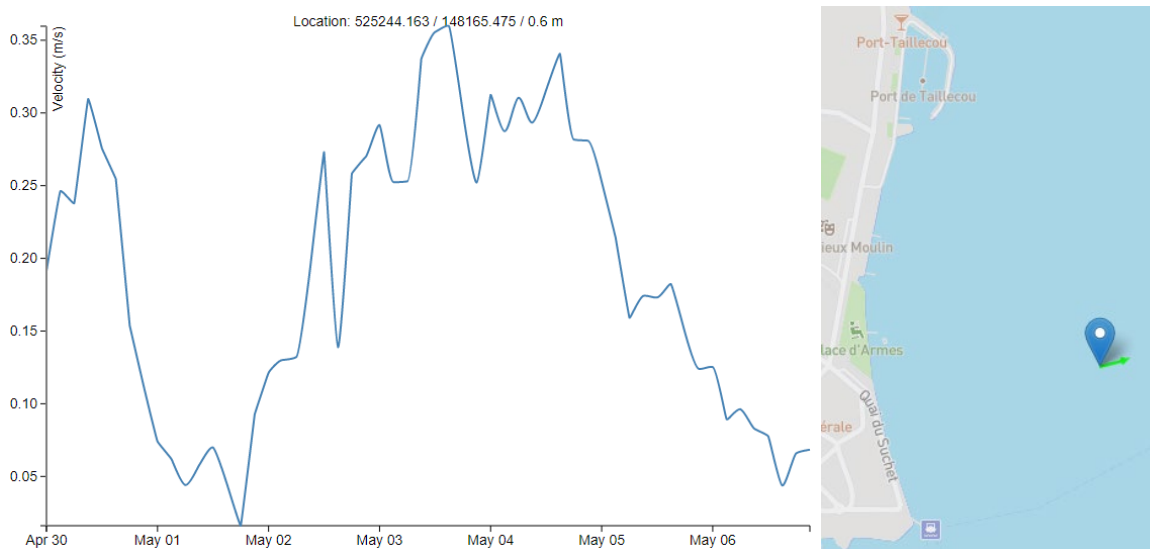
« jour précéd. Relevés horaires à Nyon / Changins - Lundi 30 Avr. 2018 Jour suiv. »

Heure UTC ¹	Température [°C]			Vent [km/h]				Hum. [%]	Pres. ⁴ [hPa]	Visi. [Km]	Nébu. [octa]	Préc. ⁵ [mm]	Cond.
	2m	Res.	Ros.	Dir. ²	Vit.	Moy.	Raf. ³						
18:00	11.0	9.7	6.1	SO	11.1	--	63.0	72	1010 (1.2/3h)	--	--	0/1h 0.3/12h	--
12:00	14.8	12.8	3.8	SO	31.5	--	63.0	48	1008.5 (-0.1/3h)	--	--	0/1h 0/6h	--
06:00	9.6	7	5.2	SO	18.5	--	38.9	74	1008.4 (1.2/3h)	--	--	0/1h 8/12h 8.1/24h	--
00:00	--	--	--	NNO	0.0	--	--	--	850	--	--	--	--

Source : Meteosuisse. www.previsions-meteo.ch, consulté le 17.11.2020

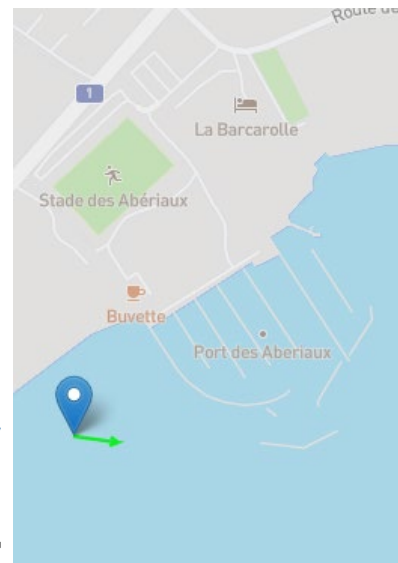
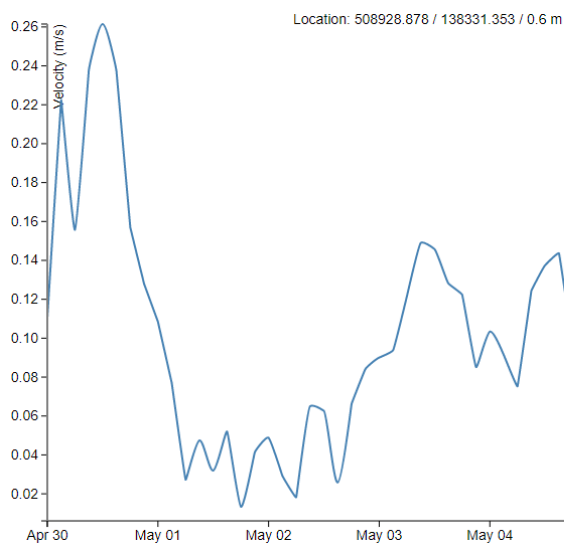
On peut donc étudier les courants sur le Léman lors de cette journée du 30 avril 2018 pour chaque lieu autour du Léman.

St-Prex



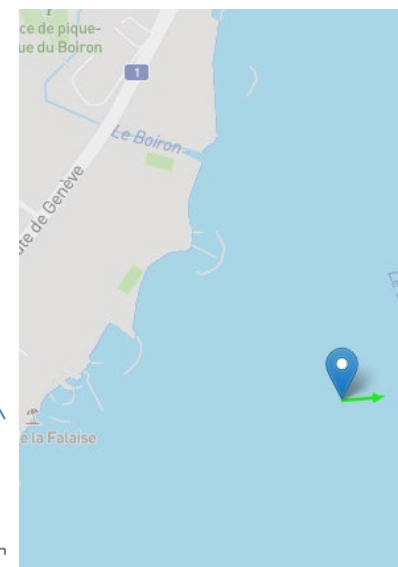
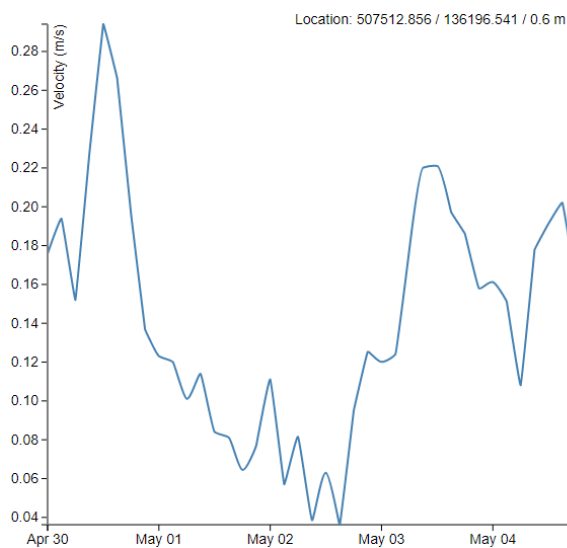
Le 30 avril 2018 à 12h00, le courant circulait en direction du NE avec une intensité de 0.28 m/s. Les intensités ont varié entre 0.05 m/s et 0.31 m/s au cours de cet évènement, et les directions sont restées les mêmes. La suite de la semaine a été marquée par un épisode de Bise avec des rafales de 63 km/h aussi, mais qui ne sont pas dues au Vent.

Prangins



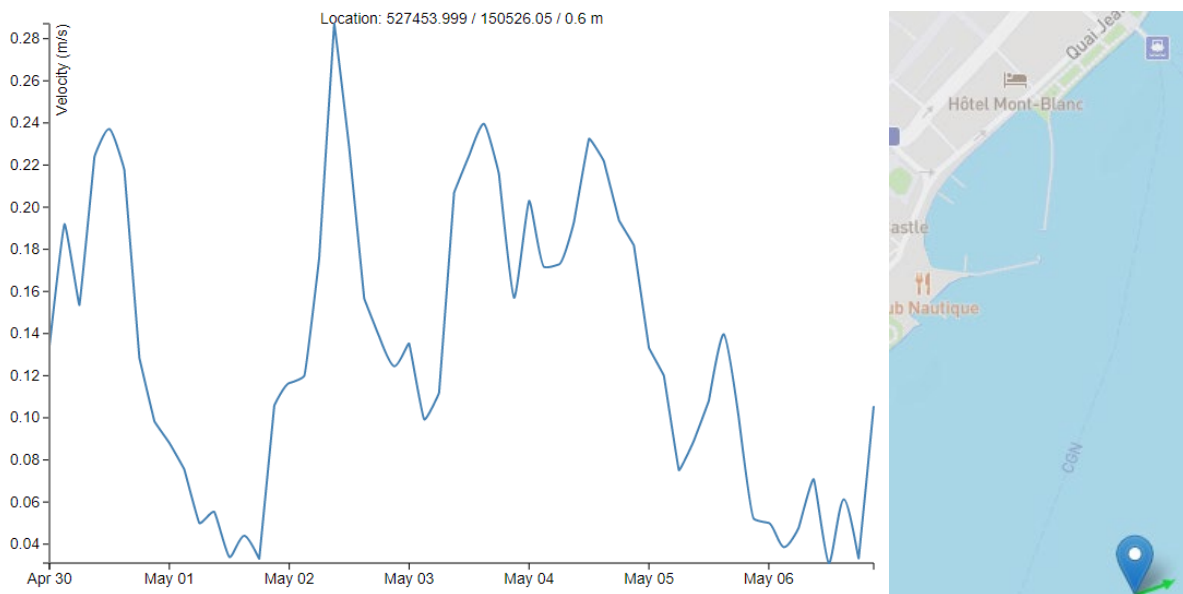
Le 30 avril 2018 à 12h00 le courant circulait en direction E-SE avec une intensité de 0.26 m/s. Au cours de l'épisode de Vent, les directions du courant sont restées similaires à l'ouest du port des Abériaux, et les intensités ont varié entre 0.05 m/s et 0.26 m/s.

Nyon – UEFA



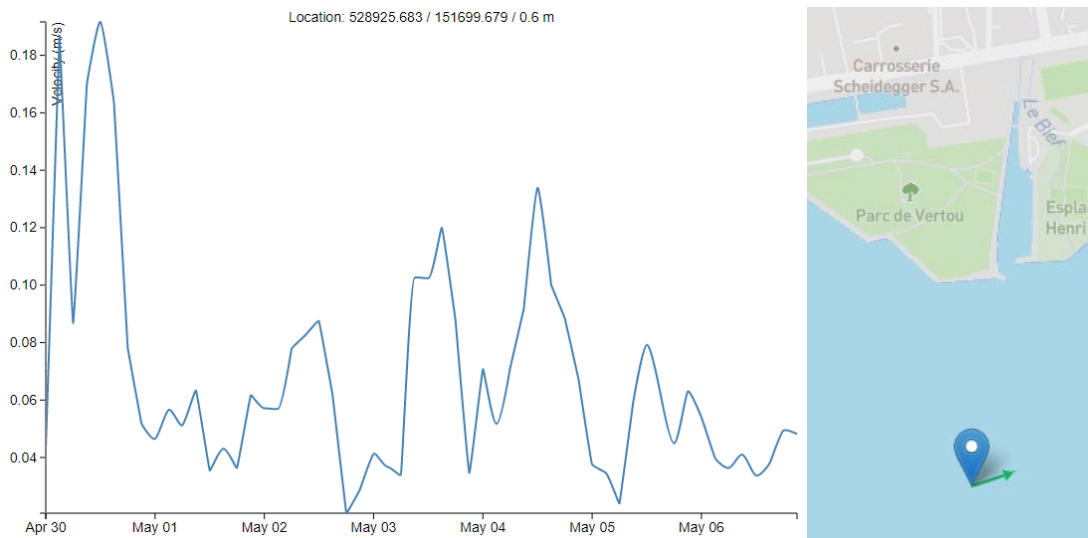
Le 30 avril 2018 à 12h00 le courant circulait en direction E-NE avec une intensité de 0.30 m/s. Les directions sont restées inchangées tout au long de l'épisode de Vent et les intensités ont varié entre 0.10 m/s et 0.29 m/s. Jusqu'ici, les pics de courants dus au Vent sont de l'ordre de 0.30 m/s.

Morges – Coquette



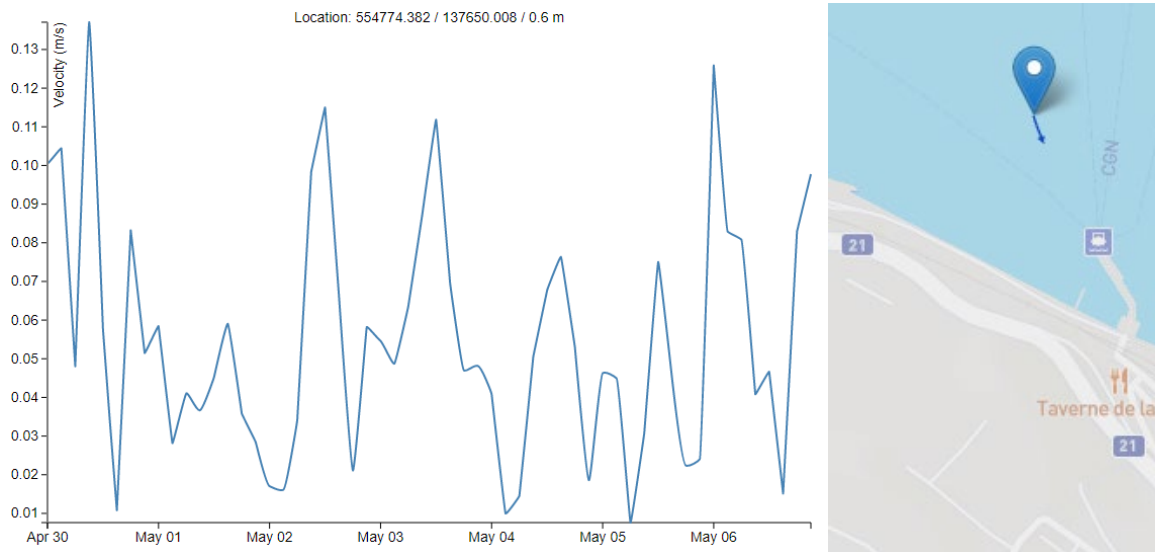
Le 30 avril 2018 à 12h00 le courant circulait en direction du NE avec une intensité de 0.24 m/s, suivant la direction dans laquelle soufflait le Vent. Au cours de l'événement, les courants ont varié de 0.06 à 0.24 m/s et les directions sont restées inchangées.

Morges – Bief



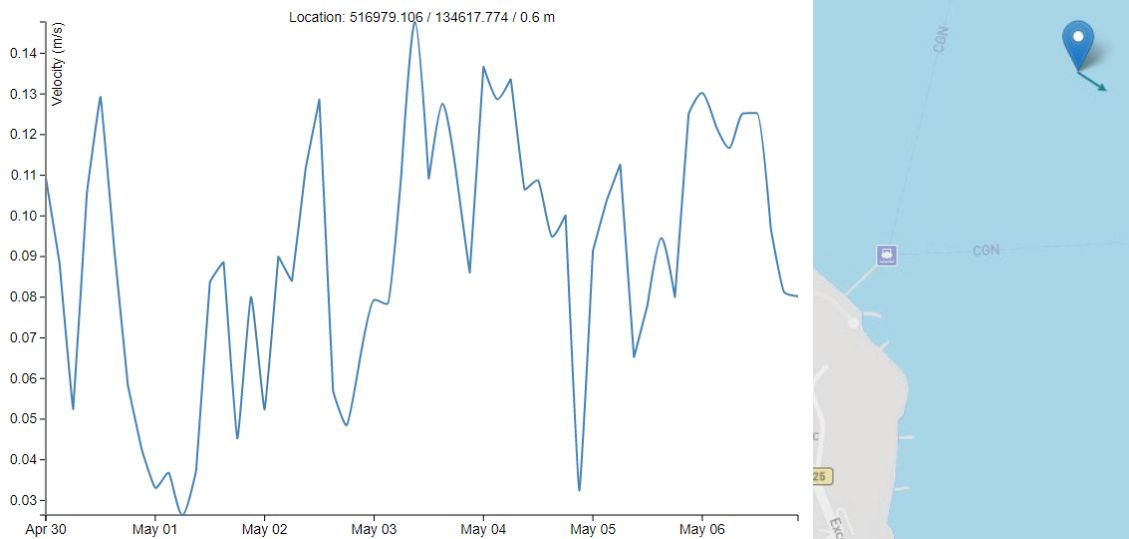
Le 30 avril 2018 à 12h00 le courant circulait en direction du NE avec une intensité de 0.20 m/s. Les directions sont restées inchangées au cours de l'événement et les intensités ont varié entre 0.05 m/s et 0.20 m/s.

Bouveret

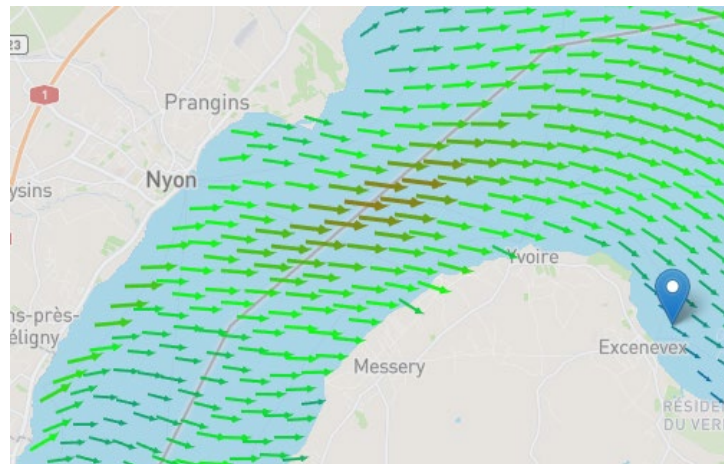


Le 30 avril 2018 à 12h00 le courant circulait en direction S-SE avec une intensité de 0.06 m/s. Les directions ont changé entre S-SE et N-NE et les intensités ont varié entre 0.01 m/s et 0.14 m/s. Etant donné la rose des vents d'Aigle, on sait que le Bouveret ne subit que très peu le Vent et les courants vus ici ne sont pas forcément associés à un vent d'ouest. Le Vent n'étant pas un vent dominant au Bouveret, il n'est pas nécessaire d'évaluer les courants, car ils ne sont pas représentatifs de ce qui peut arriver.

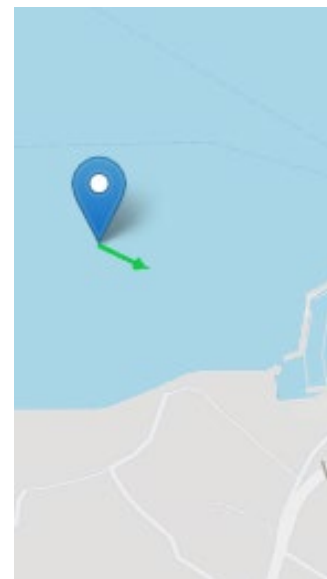
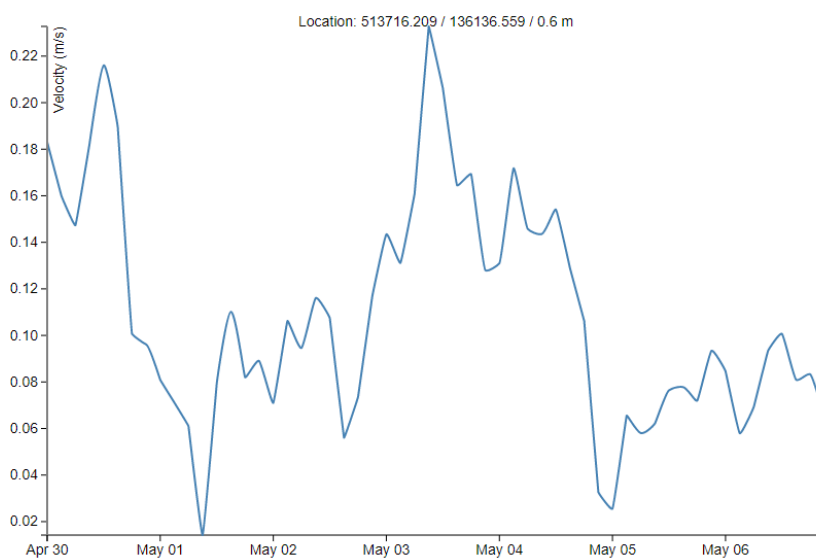
Excenevex



Le 30 avril 2018 à 12h00 le courant circulait en direction du SE avec une intensité de 0.13 m/s. la direction générale du courant lors de l'événement de Vent a été SE avec quelques petites variations, et les vitesses ont varié entre 0.03 m/s et 0.13 m/s. A nouveau, on peut prendre un peu de recul ici pour comprendre comment le lac réagit à un vent d'Ouest :



Yvoire



Le 30 avril 2018 à 12h00 le courant circulait en direction du SE avec une intensité de 0.22 m/s. La direction de circulation du courant est restée inchangée au cours de l'événement de Vent et les vitesses ont varié entre 0.06 m/s et 0.22 m/s.

Granulométrie

La région se situe plutôt dans une zone de sédiments avec petits graviers et limons. La baie de l'église, où est actuellement amarrée la galère se situe dans une zone de sable fin / limon sableux.

E. Calcul de la comparaison multicritère

Le tableau avec les calculs se trouve ci-dessous. Il prend en compte les poids donnés aux différents critères et effectue une somme pondérée sur la base de la classification effectuée dans le rapport.

	Accessibilité	Bathymétrie	Cadastre	Aspect identitaire	Impact sur la vue	Navigation déjà existante	Partenariat	Vagues	Vents	Zone d'activité	Score
Poids	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	
St-Prex	2	2	2	3	3	2	2	3	2	2	17,5
Prangins	2	1	3	2	2	1	2	1	3	3	14,5
Nyon	3	1	2	2	1	3	2	2	3	1	14,5
Bar la Coquette	2	1	1	3	3	2	3	1	2	3	14,5
Port du Bief	3	3	3	3	3	2	2	1	2	3	19
Bouveret	1	3	2	1	2	1	1	3	1	2	14
Excenevex	1	2	2	1	2	3	1	1	2	1	12
Yvoire	1	3	3	2	3	1	2	3	2	3	18

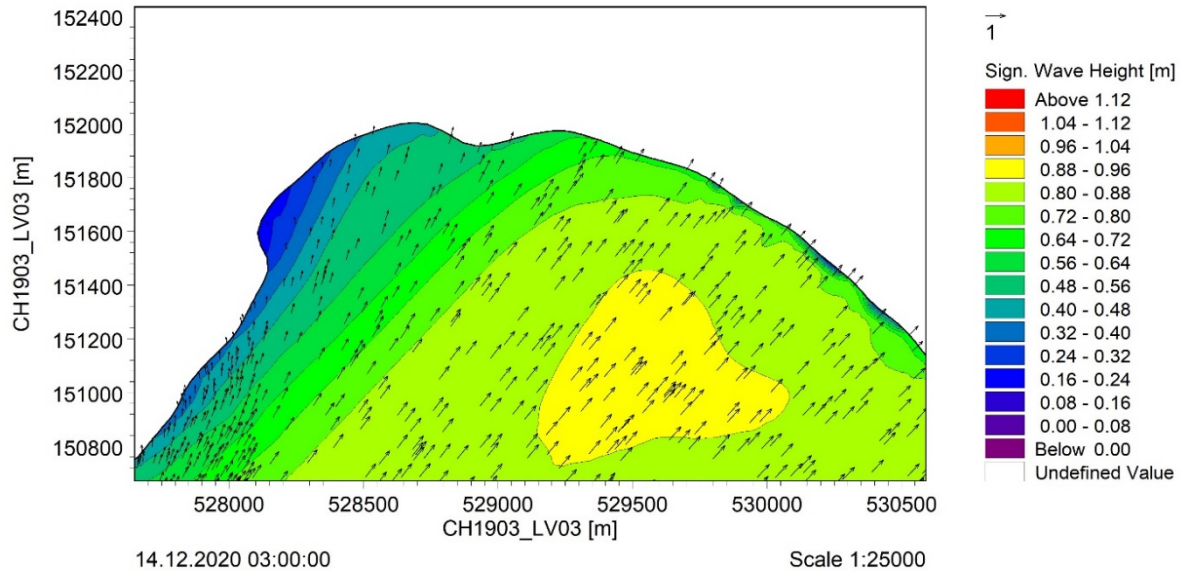
La somme pondérée prend le score obtenu et le multiplie par le poids du critère correspondant. Par exemple, pour obtenir le score de Nyon, le calcul suivant est effectué :

$$\text{Score Nyon} = 3 * 1 + 1 * 1 + 2 * 1 + 2 * 0,5 + 1 * 1 + 3 * 0,5 + 2 * 0,5 + 2 * 1 + 3 * 0,5 + 1 * 0,5 = 14,5$$

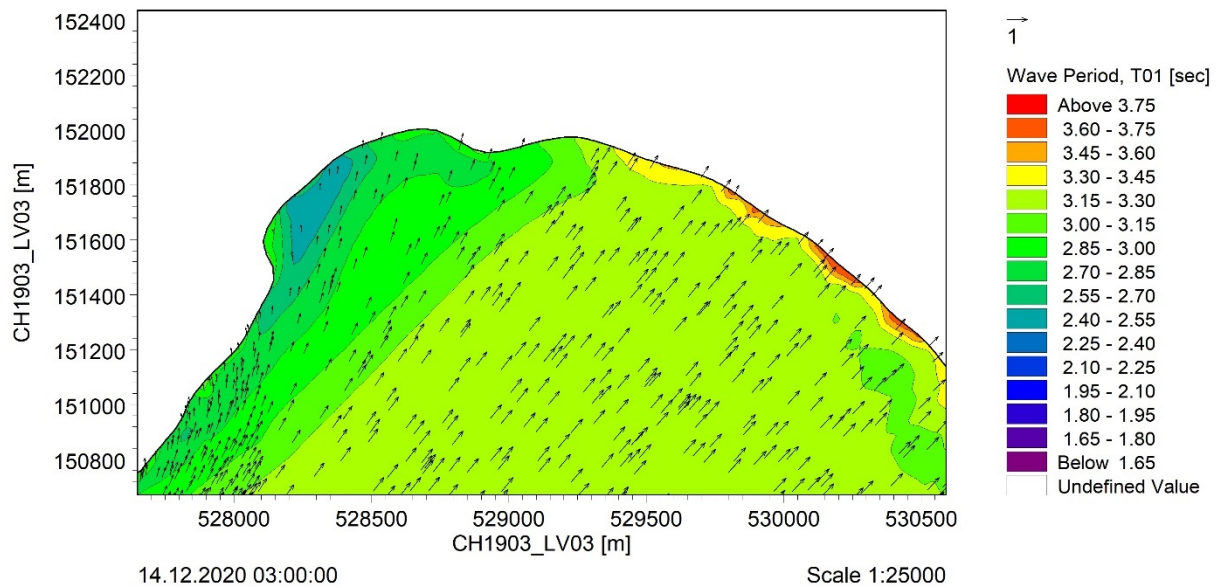
F. Résultats modélisation pour T2 et T50

Temps de retour de 2 ans

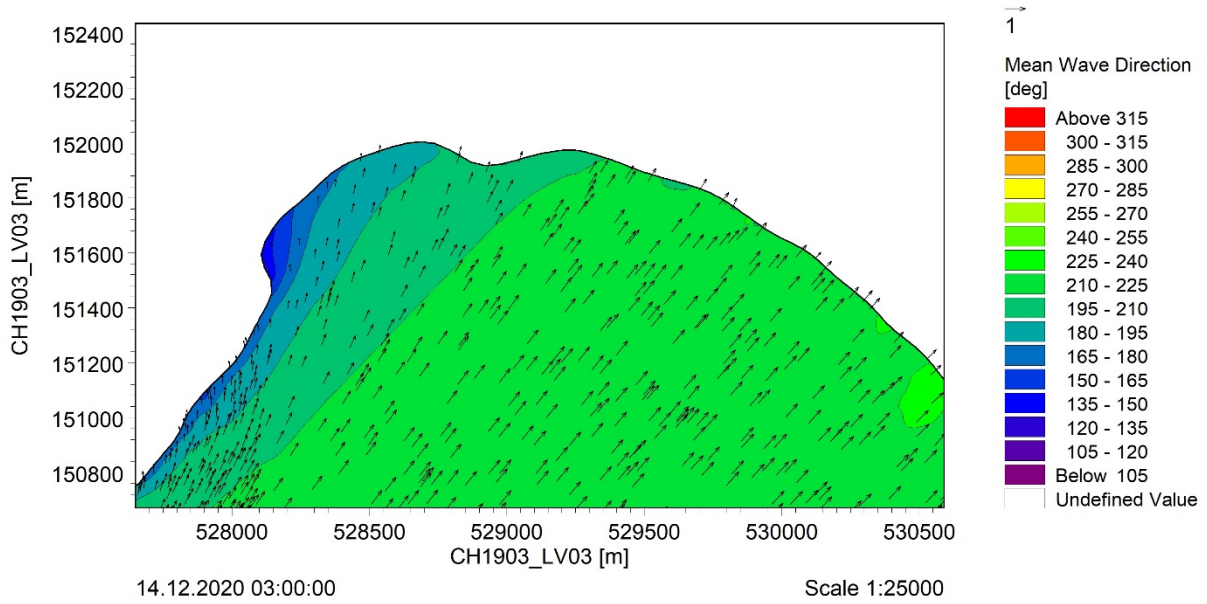
Hauteurs significatives :



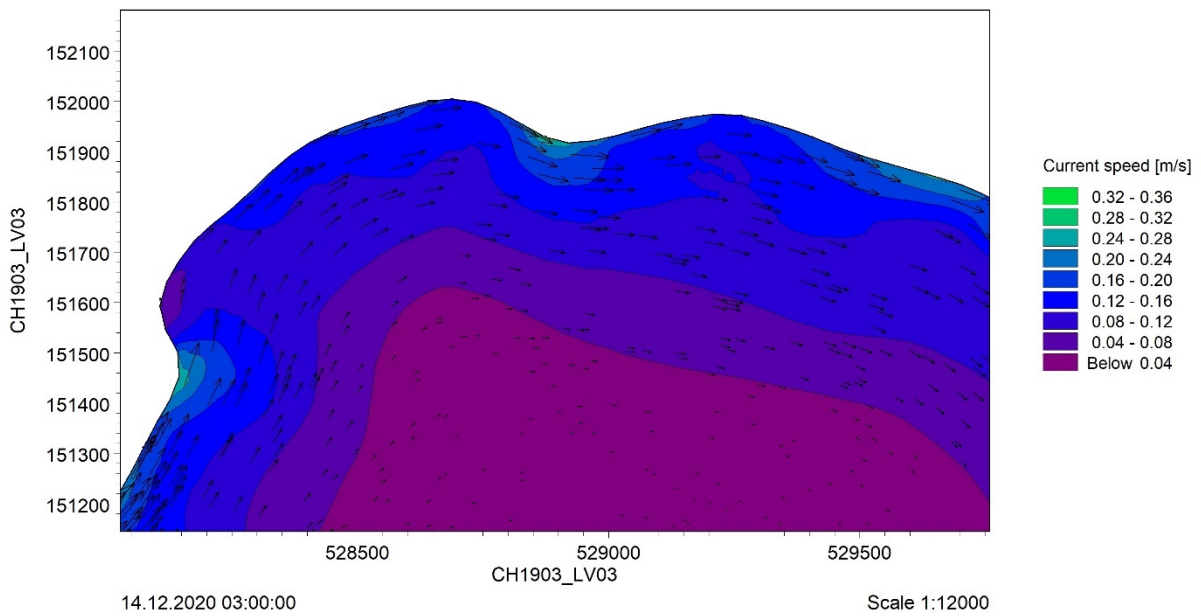
Périodes :



Directions moyennes :

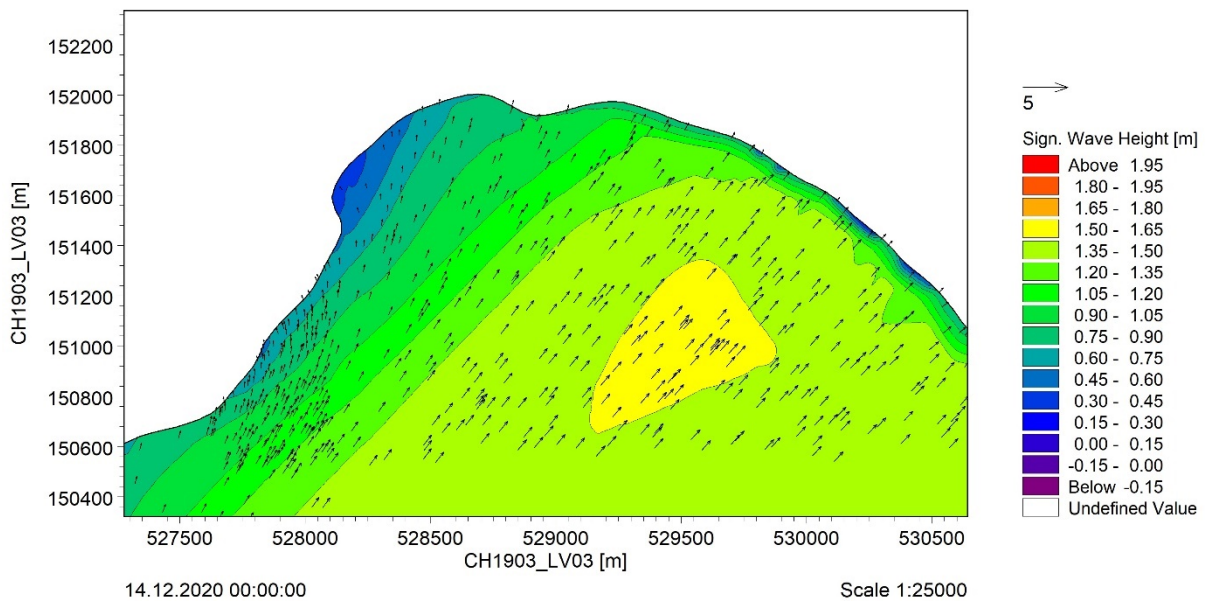


Courants :

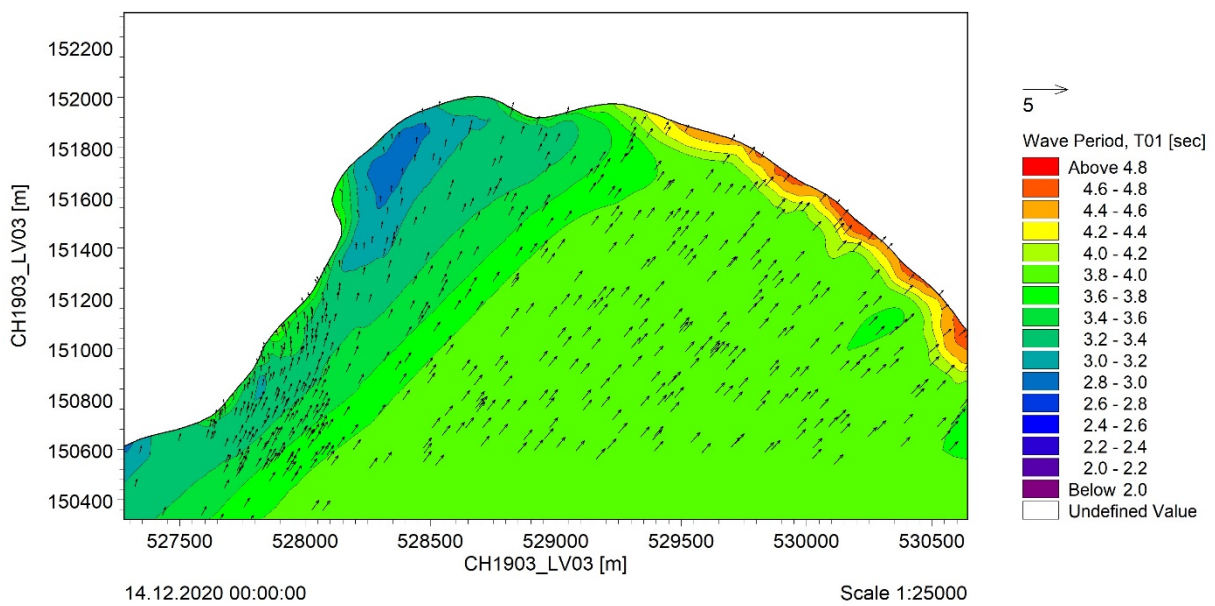


Temps de retour de 50 ans

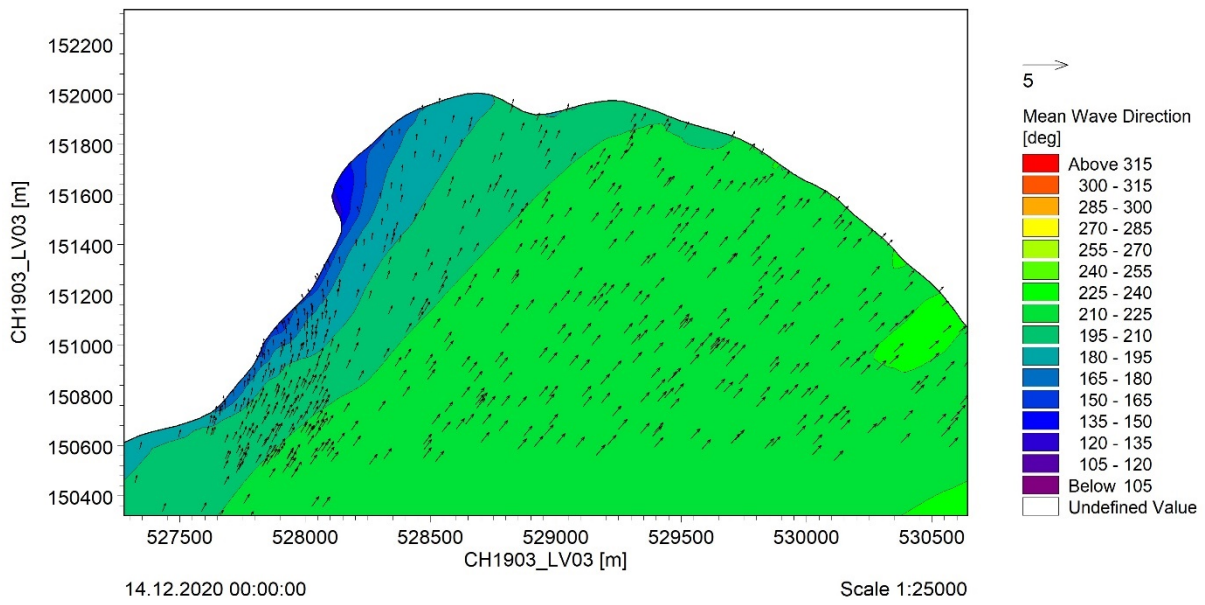
Hauteurs significatives :



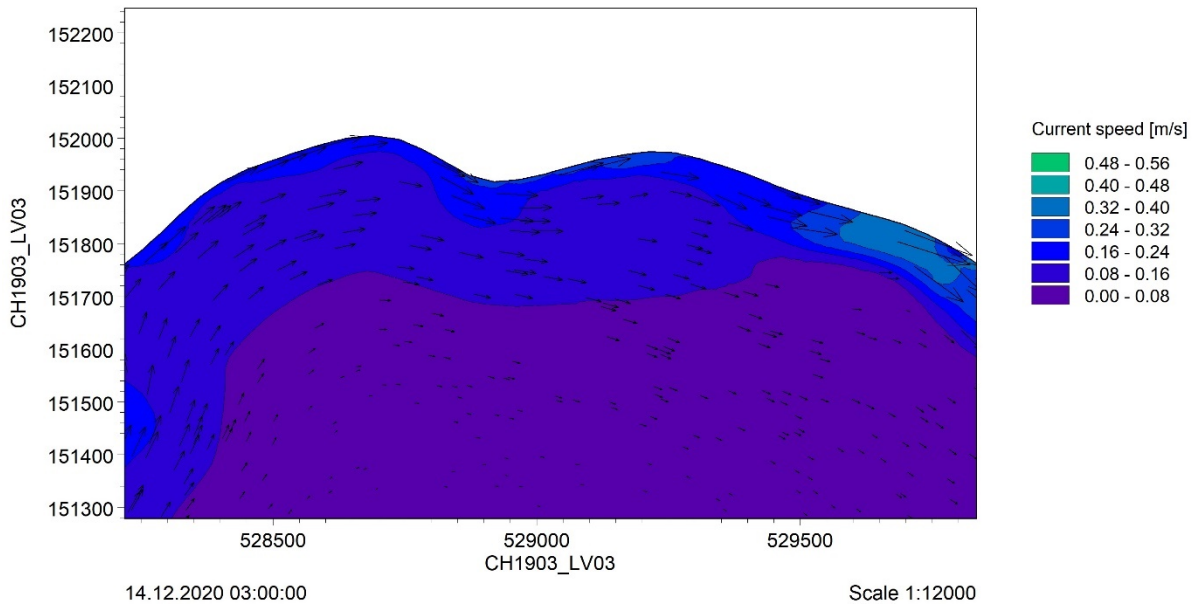
Périodes :



Directions moyennes :



Courants :



G. Méthode de Goda

Application aux données d'un temps de retour de 20 ans. Il faut souligner l'importance des unités exprimées et toujours vérifier leur cohérence.

$$H_s = 0.81 \text{ m}, T_p = 3.27 \text{ s}, h = 4.0 \text{ m}, h_c = 1.6, h_b = 4.2 \text{ m}, d = 4.0 \text{ m}, \theta = 15^\circ \pi/180 \text{ rad}, \rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \\ B = 0.4 \text{ m}$$

$$L = 1.56 * 3.27^2 = 16.68 \text{ [m]}$$

$$H_{\max} = 1.8 * 0.81 = 1.46 \text{ [m]}$$

$$\eta^* = 0.75 * (1 + 0.966) * 1.46 = 2.15 \text{ [m]}$$

$$\alpha_1 = 0.6 + 0.5 * 0.3281^2 = 0.64 \text{ [-]}$$

$$\alpha_2 = \min(0.0025 ; 5.21) = 0.0021 \text{ [-]}$$

$$\alpha_3 = 1 - (1 - 0.42) = 0.42 \text{ [-]}$$

$$\alpha_4 = 1 - 0.74 = 0.26 \text{ car } h_c < \eta^* \text{ [-]}$$

Donc

$$p_1 = 0.5 * 1.97 * 0.65 * 0.45 * 1000 * 9.81 * 1.46 = 9.08 \text{ [kg/(m*s}^2\text{)]} = 9.08 \text{ [kPa]}$$

$$p_2 = 9.08 / 2.21 = 3.84 \text{ [kPa]}$$

$$p_3 = 0.42 * 9.08 = 3.84 \text{ [kPa]}$$

$$p_4 = 0.26 * 9.08 = 2.32 \text{ [kPa]}$$

$$p_u = 0.5 * 1.97 * 0.64 * 0.42 * 1000 * 9.81 * 1.46 = 3.83 \text{ [kPa]}$$

Et donc la pression exercée :

$$P = 0.5 * (9.08 + 3.84) * 4 + 0.5 * (9.08 + 2.32) * 1.6 = 34.96 \text{ [kPa*m]} = 34.96 \text{ [kN/m]}$$

Et la force de soulèvement

$$U = 0.5 * 3.83 * 0.4 = 0.77 \text{ [kN/m]}$$