SERRE-PONCON

Mission d’accompagnement
Etude de prédimensionnement d’une solution d’atténuation de vagues

MARINA MANAGEMENT & CONSULTING
BY PORALU MARINE

Marina Management & Consulting
Document confidential

SOMMAIRE

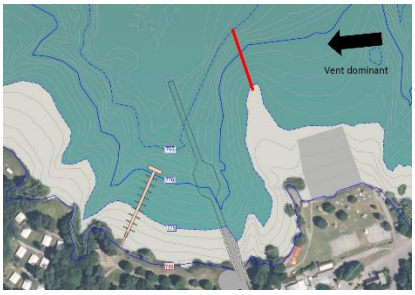
1. CONTEXTE 3
2. INFORMATIONS GENERALES DU SITE 4
3. REUNION INTERMEDIAIRE 7
4. EVALUATION DE LA NOTION DE TRANQUILITE DES BASSINS 9
5. ETUDE DU CONCEPT DE BRISE-CLAPOT FLOTTANT ACIER 10
5.1 Largeur et tirant d'eau de l'atténuateur 11
5.2 Porosité et franc-bord 13
6. LIMITES DU SYSTEMES DANS LES CONDITIONS DU LAC DE SERRE-PONCON 14
7. SOLUTIONS ALTERNATIVES 16
7.1 Déploiement d'une barrière de vagues en modules PE 16
7.2 Creusement du bassin et protection fixe 19
7.3 Déploiement d'un dispositif d'atténuation expérimental & innovant en tube PE 23
7.3.1 Solution technique – stade faisabilité 24
7.3.2 Estimation du coefficient de transmission 25
7.3.3 Vérifications structurelles 32
7.3.4 Implantation sur le site de Savines-Le-Lac 33
7.3.5 Ancrage de l'atténuateur 34
7.3.6 Préconisations de mesures 35
7.3.7 Budgétisation du concept 36
7.3.8 Conclusion sur le dispositif expérimental 36

1. CONTEXTE

Le Syndicat Mixte d'Aménagement et de Développement de Serre-Ponçon (SMADESEP) souhaite étudier les solutions techniques qui pourraient permettre de protéger les sites de plaisance de Savines-le-Lac, de la Baie Saint-Michel et de Saint-Vincent les Forts. Comme le décrivent les schémas ci-dessous, ces sites subissent l'action des vagues dues à de forts vents dominants. Il est donc envisagé d'étudier la meilleure option technique permettant de sécuriser les installations portuaires.

Site de Savines-le-Lac

Site de la Baie Saint-Michel



Site de Saint-Vincent Les Forts

Il a été validé en réunion de lancement que les deux sites à traiter sont les sites des Savines-le-Lac et de la baie Saint-Michel. De manière pratique, MM&C et le syndicat analysent plus précisément le site de Savines-Le-Lac qui dispose de contraintes techniques très poussées, faisant ainsi d'une solution compatible avec ce site, une solution déployable sur l'ensemble des sites.
Les travaux sur le site de Saint-Vincent les Forts avec la construction d'une structure fixe devraient permettre de protéger l'espace d'amarrage.

Le lac de Serre-Ponçon est un site assez particulier. Sa localisation, en montagne, et en bordure de barrage, en fait un site ou les variations de niveaux d'eau sont extrêmement importantes. En retraitant les valeurs de bathymétrie pour un niveau haut a 0m (+780m) et un niveau bas a -30m (+750m), on peut observer des variation d'eau de plus de 30m.
Ces variations d'eau, ainsi que la configuration du site, imposent les contraintes suivantes :

- Tout élément flottant devra être ancré sur chaine/câble/corde
- Les éléments flottants prix individuellement ne doivent pas dépasser 8m de long
- La configuration doit faire en sorte que les systèmes d'ancrage ne soient pas localisés dans le lit de l'ancienne rivière

Les conséquences du réchauffement climatique se manifestent sur les différents bassins de Serre-Ponçon, dont celui situé à proximité de la Capitainerie sur Savines-le-Lac. Durant l'été 2022, le niveau d'eau du lac durant la période estivale, période où l'eau est logiquement à son plus haut niveau, est descendu a -12m (+768m) comme le montre la figure 1 ci-dessous. Cette configuration entraine des complications dans la délivrance du service d'amarrage aux plaisanciers, et contraint le SMADESEP à anticiper de futurs niveaux d'eau similaires dans les années à venir.

L'objectif du syndicat est d'assurer la continuité du service d'amarrage durant les périodes estivales jusqu'à des niveaux d'eau allant jusqu'à -18m (+762m). Cela implique une extension de la zone d'amarrage (extension des pannes actuelles) et par conséquent, un besoin de protection de ce nouveau bassin.

Figure 1 – Lac de Serre-Ponçon a l'été 2022 – Hauteur d'eau -12m

C'est dans ce contexte que les systèmes d'atténuation de vagues devront être prés dimensionnés. L'objectif de la mission d'accompagnement est de mettre à disposition du SMADESEP un schéma de principe des installations possibles, d'en définir les caractéristiques techniques générales et les budgets d'investissement associés.

Ce rapport présentera deux typologies de solutions afin d'ouvrir le champ des possibles au syndicat. Une première typologie de solutions constituée de technologies relativement standards d'atténuateurs de vagues « pontons flottant », une seconde typologie beaucoup plus sur-mesure dont la caractéristique principale est de répondre aux contraintes techniques du site tout en offrant la performance d'atténuation requise.

2. INFORMATIONS GENERALES DU SITE

Le site et la marina peuvent être décrits comme suit :

- Les bateaux naviguant sur le lac présentent une longueur moyenne de 6 à 8m et un tirant d'eau moyen de 0,6 m.
- Le bassin intérieur de Savines-le-Lac est actuellement protégé par des digues en enrochement à l'est et à l'ouest. À l'ouest, cette digue sert de fondation à au pont qui traverse le lac.
- La hauteur d'eau oscille entre 780 m et 750 m dans la zone concernée. Le sol est sablonneux, avec des traces de petites roches.

La Figure 2 présente les différents fetchs du site de Savines-le-lac : 5,2 km depuis le nord-est (65°), 2,2 km depuis le sud-ouest (240°) et 6,3 km depuis l'ouest-sud-ouest (255°).

Figure 2 – Fetchs et orientations de Savines-le-Lac définis par Océanide (2023)

Le Tableau 1 ci-dessous résume les conditions nominales de vent, de fetch et de vagues de vent affectant ce site (Océanide, 2023). Océanide a aussi simulé ces conditions sur un logiciel de propagation de vagues afin de mieux appréhender la façon dont cela affecte le bassin de la capitainerie (voir figure 3).

Condition climatique	Secteur d'incidence	Fetch max. [km]	U10 [m/s]	Hs [m]	Tp [s]
Usuelle 1 %	NE	5.2	10.3	0.50	2.6
	SO	2.2	7.0	0.23	1.8
Usuelle 10%	NE	5.2	5.5	0.24	1.9
	SO	2.2	5.0	0.15	1.5
1 an	NE	5.2	12.6	0.63	2.9
	SO	2.2	9.2	0.31	2.1
	SO - thermique	2.2	8.1	0.27	1.9
	OSO	6.3	9.2	0.48	2.7
	OSO - thermique	6.3	8.1	0.41	2.5
10 ans	NE	5.2	13.7	0.69	3.1
	SO	2.2	10.8	0.37	2.2
	SO - thermique	2.2	9.2	0.31	2.1
	OSO	6.3	10.8	0.58	2.9
	OSO - thermique	6.3	9.2	0.48	2.7
Orage	NE	5.2	19.7	0.35	2.0
	SO	2.2	28.4	0.58	2.5
	OSO	6.3	28.4	0.58	2.5

Tableau 1 – Conditions nominales de vagues de vent établies par Océanide (2023)

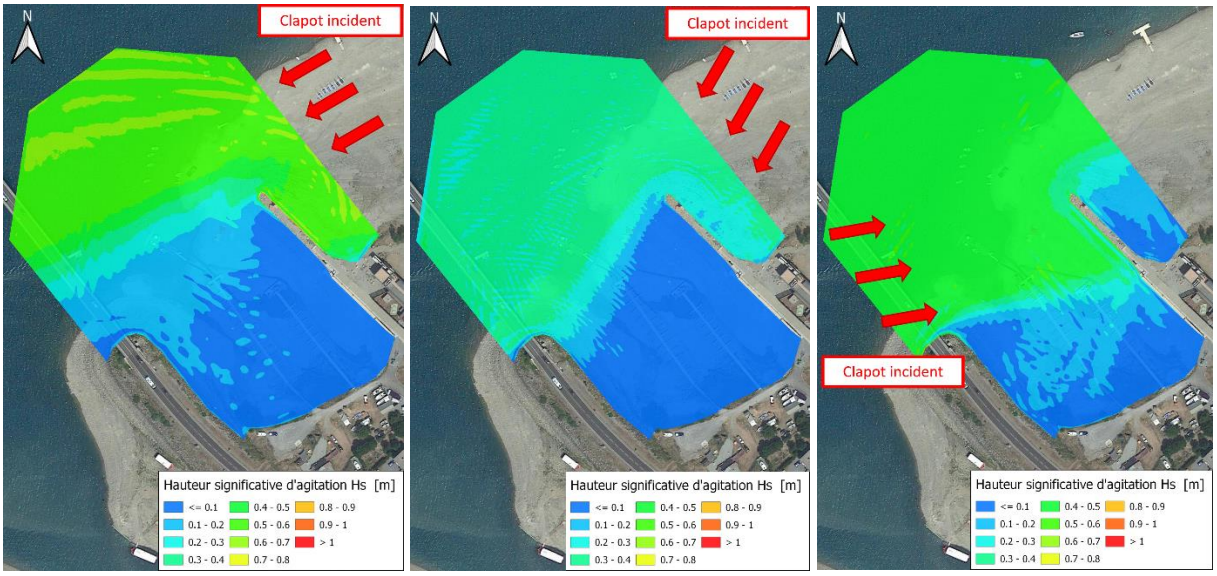


Figure 3 – Agitation du site de la capitainerie

Le site de la Baie Saint-Michel a lui aussi été qualifiée par Océanide avec cependant un peu moins de précisions quant au niveau d'agitation du bassin. Les figure 5 et tableau 2 mettent en évidence l'exposition aux vagues de ce site.

Figure 4 – Fetchs et orientations de la Baie Saint-vincent définis par Océanide (2023)

Condition climatique	Secteur d'incidence	Fetch max. [km]	U10 [m/s]	Hs [m]	Tp [s]
Usuelle 1 %	NE	0.6	10.3	0.21	1.6
	SO	3.0	7.0	0.26	2.0
Usuelle 10%	NE	0.6	5.5	0.10	1.2
	SO	3.0	5.0	0.17	1.6
1 an	NE	0.6	12.6	0.26	1.8
	SO	3.0	9.2	0.35	2.3
	SO - thermique	3.0	8.1	0.30	2.1
10 ans	NE	0.6	13.7	0.28	1.9
	SO	3.0	10.8	0.43	2.5
	SO - thermique	3.0	9.2	0.35	2.3
Orage	NE	3.0	19.7	0.35	2.0
	SO	3.0	28.4	0.58	2.5

Tableau 2 – Conditions nominales de vagues de vent établies par Océanide (2023)

3. REUNION INTERMEDIAIRE

Suite à la mise à disposition le 30.06.2023 d'un rapport effectué par le bureau d'étude Océanide, MM&C a étudié les différentes options possibles et existantes qui ont fait l'objet d'une réunion intermédiaire tenue le 04.10.2023 dans les bureaux du SMADESEP.

Lors de cette réunion dont la présentation ppt est disponible en annexe 1, il a été évoqué les solutions classiques d'atténuation de vagues (notamment les brise-houle béton flottant) et l'incompatibilité des ces solutions avec les différents sites de Serre-Ponçon, et plus particulièrement la capitainerie de Savines-le-Lac.
Les raisons principales de cette incompatibilité sont les suivantes :

- Lorsqu'une seule partie de la panne de ponton béton est échouée, l'ensemble des charges appliquées aux pontons (force des vagues qui poussent le ponton principalement) se concentrent sur une ou deux connexions. Ce manque de répartition des charges sur l'ensemble des connecteurs du système, implique un risque très élevé de rupture des connecteurs concernés.
- L'échouage des pontons sur des surface non planes et non régulière entraine des risques pour l'intégrité structurelle des pontons, ne garantissant ainsi pas la durabilité, et donc indirectement, ne constituant pas une solution pérenne dans le temps.
- Lors des tempêtes, les vagues entrainent des mouvements verticaux des pontons béton. Lorsque ces derniers sont à la limite de l'échouage mais toujours en flottaison, leur mouvements verticaux peut entrainer des chocs avec le les fonds marins entrainant un risque semblable au point précédent
- Enfin, le dimensionnement d'ancrages chaines nécessite une bonne répartition des charges appliquées à chacune des lignes d'ancrage. Afin d'éviter des mouvements latéraux trop important, il faudrait proposer des chaines beaucoup plus courtes sur les zones à faibles profondeur, ce qui pourrait avoir tendance à concentrer les charge du système d'ancrage sur ces seuls points. Cette configuration est difficilement envisageable pour des pontons d'un tel poids

A des fins de vérification des résultats obtenus, MM&C a consulté notamment deux fournisseurs de pontons béton. Les deux marques ont confirmé que dans l'éventualité d'une sollicitation, elles ne se positionneraient pas sur un tel projet, le risque technique étant beaucoup trop important.

Fort de ce constat, deux autres options ont été évoquées durant cette réunion, à savoir :

- L'étude d'un atténuateur de vagues flottant en structure acier qui supporterait peut-être mieux les contraintes du site
- L'installation d'une barrière de modules en polyéthylène dont l'efficacité reste cependant à prouver car aucune étude n'existe pour ce type de configuration

Il a été convenu avec le SMADESEP que MM&C devait envisager les deux possibilités et étudier leur viabilité technique, tout en proposant un budget de construction conformément au contenu de la mission.

Pour cela et lors de la restitution intermédiaire, un plan d'implantation semblant plus efficace avait être présenté au SMADESEP afin de maximiser la protection du futur bassin (voir figure 2). Si le principe d'atténuation avait été validé, l'ancrage dans le lit de l'ancienne rivière a par contre été réfuté puisque représentant un risque trop important d'endommagement.

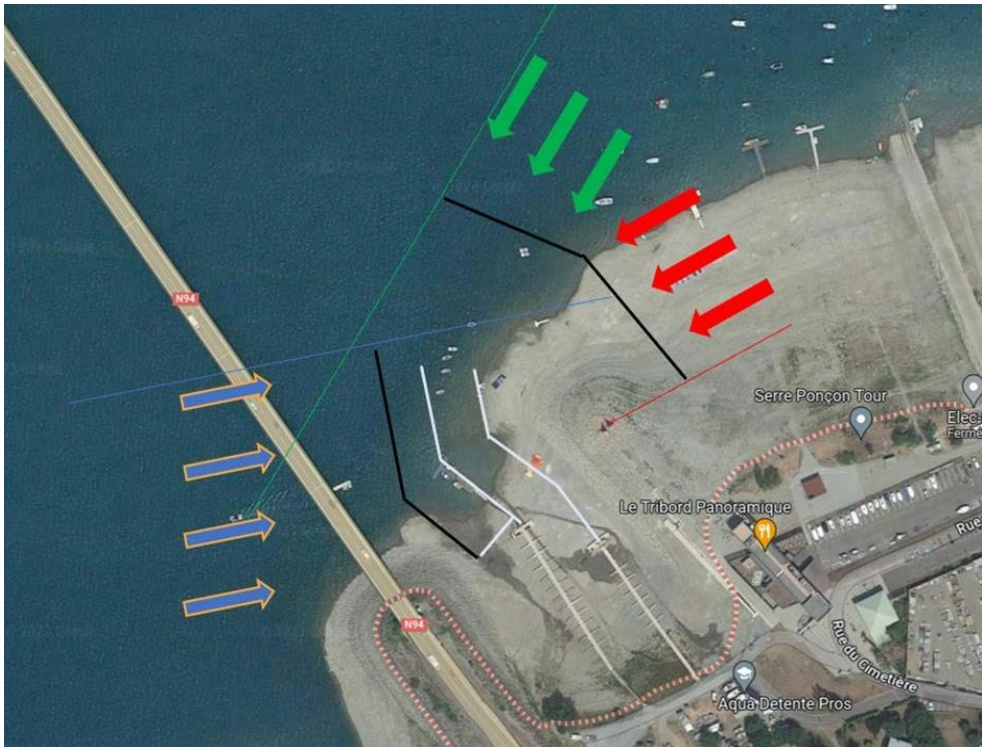


Figure 5 : plan d'implantation proposé en réunion de restitution intermédiaire

Suite à ce travail et en consultation avec le SMADESEP, une dernière solution a été proposé. Elle est constituée de modules en tube PE relies ensemble par une structure aluminium. Cette solution a le double avantage de s'adapter facilement aux contraintes de variation d'eau, tout en ne disposant pas de contrindication à l'échouage. Cette option sera développée plus tard dans le rapport.
Un premier scenario d'expérimentation sera proposé afin de mesurer l'efficacité du système sur les vagues usuelles les plus perturbantes, à savoir les vagues d'ouest et de sud-ouest.

4. EVALUATION DE LA NOTION DE TRANQUILITE DES BASSINS

Le rapport d'Océanide fait référence au compte rendu du PIANC (1995) comme base de calcul des conditions de tranquillité des places de bateaux. Les critères de tranquillité (et l'analyse de concept qui en résulte) se rapportent uniquement à une périodicité d'1 an pour la houle de l'avant et de travers. Aucune mention n'est faite des critères cibles applicables aux autres scénarios de périodicité ni des détails propres à une quelconque direction. Dans un souci d'exhaustivité, nous préférons utiliser les critères de tranquillité de l'ASCE (2012), qui identifient la tranquillité comme une fonction de la direction des vagues relative à la position de la place de bateau et utilisent également des critères de périodicité (hebdomadaire et jusqu'à 50 ans).
L'ASCE (2012) établit les critères de climat des vagues associés à la tranquillité des places de bateaux dans les ports et marinas destinés aux petites embarcations, comme c'est le cas sur le lac de Serre-Ponçon.

Les courbes qui découlent de cette analyse sont fonction de la hauteur de vagues (Target wave height) à l'intérieur du bassin et de la période de retour de l'analyse (return period). Deux cas de figure sont pris en compte, à savoir un amarrage des bateaux perpendiculaire à la direction des vagues (beam seas), un amarrage des bateaux face a la direction des vagues (head seas). Les conditions de tranquillité acceptables pour un bassin d'amarrage sont ensuite évaluées sur des courbes afin de déterminer si elles sont « modérées », « bonnes » ou « excellente ». La figure 6 ci-dessous détaille cela.

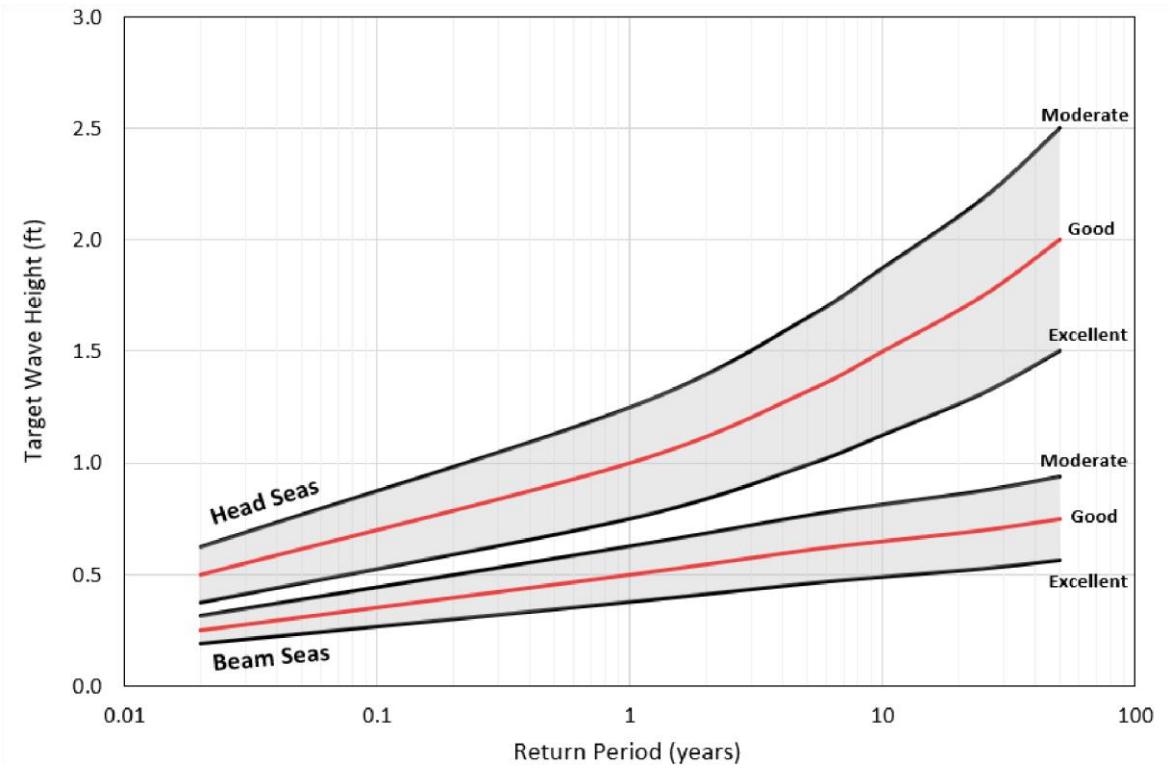


Figure 6 – Conditions de tranquillité des places destinées aux petites embarcations (ASCE, 2012)

Pour une périodicité hebdomadaire, le climat des vagues doit être inférieur à Hs=0,15 m (0,5 pied) pour la houle de face et à Hs = 0,08 m (0,25 pied) pour la houle de travers. Pour une périodicité annuelle, le climat des vagues doit être inférieur à Hs=0,3 m (1 pied) pour la houle de face et à Hs=0,15 m (0,5 pied) pour la houle de travers. Pour une périodicité de 50 ans, le climat des vagues doit être

inférieur à Hs = 0,6 m (2 pieds) pour la houle de face et à Hs = 0,23 m (0,75 pied) pour la houle de travers. À noter que des conditions de climat des vagues « modérées » et « excellentes » sont également proposées, sur la base d'un relâchement et d'un resserrement de 25 % des « bonnes » conditions susmentionnées. Sauf circonstances inhabituelles, les « bons » critères servent généralement de base pour évaluer les conditions de tranquillité dans les marinas.

Le Tableau 3 résume le climat des vagues de vent sur le site de Savines-le-Lac, déterminé à partir des calculs basés sur le fetch d'Océanide (2023), et le compare aux objectifs de tranquillité associés à un « bon » climat des vagues défini par l'ASCE (2012).

Remarque : Océanide proposant uniquement une périodicité d'1 an et de 10 ans, les périodicités mensuelles et de 50 ans ont été extrapolées.

Cas	Direction Vague (degré N)	Vague incidente Hs (m)	Période Tp (sec)	Objectif de vague Ho (m)	Ct (%)
Mensuel	65	0.57	2.7	0.11	19%
Mensuel	240	0.25	2.0	0.10	43%
Mensuel	255	0.37	2.5	0.11	30%
Retour 1 an	65	0.63	2.9	0.16	25%
Retour 1 an	240	0.31	2.1	0.15	49%
Retour 1 an	255	0.48	2.7	0.16	34%
Retour 10 ans	65	0.69	3.1	0.20	29%
Retour 10 ans	240	0.37	2.2	0.20	54%
Retour 10 ans	255	0.58	2.9	0.22	37%
Retour 50 ans	65	0.73	3.2	0.24	32%
Retour 50 ans	240	0.41	2.3	0.23	56%
Retour 50 ans	255	0.65	3.0	0.25	39%

Tableau 3 – Conditions de clapot comparées aux « bons » objectifs de tranquillité des marinas de l'ASCE (2012)

L'analyse de ces conditions permet d'établir qu'un coefficient de transmission des vagues compris entre 19 et 32 % est nécessaire pour atteindre les objectifs de tranquillité des places de bateaux en fonction de la direction des vagues incidentes et des événements extrêmes pris en compte.

5. ETUDE DU CONCEPT DE BRISE-CLAPOT FLOTTANT ACIER

Il existe sur le marché une multitude de systèmes d'atténuateurs de vagues flottants artificiels. Le type le plus courant est l'atténuateur de vagues en béton flottant, commercialisé par des pontonniers spécialisés. Pour les raisons techniques évoquées plus haut, et après une prière passe d'étude de la solution dans l'environnement de Serre-Ponçon, cette option a été mise de côté.

Un autre système a été évoqué lors de la réunion intermédiaire. Un atténuateur flottant acier à jupe double (voir Figure 7). Ce système a pour fonction principale de renvoyer une grande partie de l'énergie de la vague incidente. En comparaison a un atténuateur a jupe simple, les jupes installées sur la bordure extérieure du ponton flottant le rendent bien plus stable que les systèmes à jupe unique fixée au centre du ponton (situation comparable à la différence de stabilité d'un catamaran et d'un voilier à quille fixe).

Figure 7 – Exemple d'un atténuateur de vagues acier a jupe double

Comme tout objet flottant, les atténuateurs de vagues flottants sont des systèmes dynamiques, soumis à des mouvements d'oscillation, de tangage et de roulis (entre autres), qui peuvent involontairement réduire les performances de propagation des vagues. Les effets de tangage peuvent quasiment être compensés en augmentant le tirant d'eau de l'atténuateur jusqu'à atteindre l'amplitude de la hauteur de vague maximale attendue. Les mouvements d'oscillation peuvent être contrôlés plus efficacement à l'aide d'ancrages pieux alors que les ancrages plus lâches (ici, des ancrages chaînes) qui sont moins performants. Les pontons plus larges peuvent améliorer la stabilité de l'atténuateur contre le roulis. La fréquence naturelle de l'atténuateur joue également un rôle dans la réponse dynamique : si elle se situe sur une plage comprise entre 0,8*Tp et 1,3*Tp (PIANC, 1981), l'atténuateur risque d'entrer en résonance avec les vagues incidentes et de ne pas être en mesure de réduire suffisamment l'impact du champ de vagues. Il est par conséquent important de veiller à ce que la conception et l'ancrage du système tiennent compte de cette plage de fréquences.

5.1 Largeur et tirant d'eau de l'atténuateur

L'efficacité des atténuateurs de vagues flottants augmente très fortement lorsque leur tirant d'eau est supérieur ou égal à la moitié de la profondeur d'eau ou lorsque leur largeur est supérieure ou égale à la moitié de la longueur d'onde. Le niveau d'efficacité varie ensuite en fonction de la largeur et du tirant d'eau du ponton par rapport à la profondeur d'eau, à la longueur d'onde et à sa réponse dynamique (entre autres facteurs).

La charge environnementale (vagues) et le type d'ancrage doivent également être pris en compte dans la conception des atténuateurs de vagues flottants. Accroître le tirant d'eau de l'atténuateur permet de réduire la largeur requise ; en revanche, les charges et les exigences d'ancrage augmentent. Au

contraire, réduire le tirant d'eau de l'atténuateur et accroître la largeur de l'unité permet de limiter les exigences d'ancrage mais accroît la taille de la structure (et son coût). Les systèmes flottants pouvant être soumis à des mouvements d'oscillation, de tangage et de roulis, mieux vaut privilégier une largeur de ponton supérieure ou égale aux deux tiers de la longueur d'onde (dans les limites de l'économique et du raisonnable), afin de réduire considérablement le mouvement de roulis du système flottant et d'accroître son efficacité relative.

MM&C s'est rapproché d'une société d'ingénierie spécialisée afin de vérifier/confirmer la solution technique initialement proposée. L'objectif est de confirmer si la solution proposée confèrera au SMADESEP le niveau d'efficacité attendu au vu de l'investissement que cela va représenter.

La société s'appuie sur une étude de Cox (1987) qui a développé une expression en forme analytique pour la propagation des vagues par les atténuateurs flottants, en étendant la théorie de la transmission de l'énergie des vagues formulée par Wiegel (1964) de manière à inclure les barrières de largeur limitée. Même si cette expression ignore les mouvements dynamiques des atténuateurs flottants, l'auteur affirme que la formule prédit tout de même raisonnablement les performances de propagation des vagues des atténuateurs flottants, notamment dans le cas de systèmes à ancrage pieux. Une analyse détaillée des calculs de propagation des vagues par 13 m de profondeur d'eau et 3 m de profondeur d'eau est résumée dans les tableaux 4 et 5. À noter que les valeurs calculées pour la propagation des vagues à l'aide de la formulation de Cox ont été ajustées afin de tenir compte du rapport largeur du ponton (W) / longueur d'onde (L) du corps flottant. Cet ajustement s'appuie sur les valeurs généralisées de propagation des vagues pour différents rapports W/L présentés par Gaythwaite (2016).

Cas	Largeur (m)	Hauteur (m)	Vagues Hs (m)	Période Tp (s)	Vagues Hmax (m)	Hauteur d'eau (m)	Longueur d'ondes (m)	Calc. Ct	Ct cible	Pass/Fail
M	5	1	0.57	2.7	1.02	13	11.2	30%	19%	FAIL
M	5	1	0.25	2.0	0.44	13	6.2	15%	43%	PASS
M	5	1	0.37	2.5	0.67	13	9.6	26%	30%	PASS
1 an	5	1	0.63	2.9	1.13	13	13.1	35%	25%	FAIL
1 an	5	1	0.31	2.1	0.56	13	6.9	17%	49%	PASS
1 an	5	1	0.48	2.7	0.86	13	11.4	30%	34%	PASS
10 ans	5	1	0.69	3.1	1.24	13	15.0	40%	29%	FAIL
10 ans	5	1	0.37	2.2	0.67	13	7.6	19%	54%	PASS
10 ans	5	1	0.58	2.9	1.04	13	13.1	35%	37%	PASS
50 ans	5	1	0.73	3.2	1.32	13	16.4	43%	32%	FAIL
50 ans	5	1	0.41	2.3	0.74	13	8.0	21%	56%	PASS
50 ans	5	1	0.65	3.0	1.17	13	14.4	39%	39%	PASS

Tableau 4 – Synthèse des calculs de propagation des atténuateurs de vagues flottants – Hauteur d'eau 13m

Cas	Largeur (m)	Hauteur (m)	Vagues Hs (m)	Période Tp (s)	Vagues Hmax (m)	Hauteur d'eau (m)	Longueur d'ondes (m)	Calc. Ct	Ct cible	Pass/Fail
M	5	1	0.57	2.7	1.02	3	10.6	30%	19%	FAIL
M	5	1	0.25	2.0	0.44	3	6.2	15%	43%	PASS
M	5	1	0.37	2.5	0.67	3	9.3	26%	30%	PASS
1 an	5	1	0.63	2.9	1.13	3	12.0	34%	25%	FAIL
1 an	5	1	0.31	2.1	0.56	3	6.8	18%	49%	PASS
1 an	5	1	0.48	2.7	0.86	3	10.7	31%	34%	PASS
10 ans	5	1	0.69	3.1	1.24	3	13.3	37%	29%	FAIL
10 ans	5	1	0.37	2.2	0.67	3	7.5	20%	54%	PASS
10 ans	5	1	0.58	2.9	1.04	3	12.0	34%	37%	PASS
50 ans	5	1	0.73	3.2	1.32	3	14.2	39%	32%	FAIL
50 ans	5	1	0.41	2.3	0.74	3	7.9	21%	56%	PASS
50 ans	5	1	0.65	3.0	1.17	3	12.9	37%	39%	PASS

Tableau 5 – Synthèse des calculs de propagation des atténuateurs de vagues flottants – Hauteur d'eau 13m

Les calculs proposés dans les tableaux précédents ne permettent pas d'atteindre les conditions de tranquillité cibles lorsque les vagues de vent viennent du nord-est.
Il est à noter en revanche que l'unité comme décrite permettrait d'atteindre des conditions d'atténuation « modérés », qui sont tout de même acceptables selon les recommandations des standards *ASCE 2012.*

MM&C recommande donc d'axer le concept initial sur la base d'un atténuateur flottant de 5 m de large. Compte tenu de l'incertitude relative à la réponse dynamique de l'atténuateur, l'effet de tangage maximal de l'atténuateur de vagues flottant est considéré comme équivalant à l'amplitude des vagues calculée à partir de leur hauteur maximale. Cet effet de tangage est ensuite ajouté au tirant d'eau par calme plat utilisé dans les calculs, ce qui permet d'obtenir un tirant d'eau final recommandé d'1,5 m (tirant d'eau calculé d'1 m + 0,5 m de compensation du tangage). Les performances varient très peu entre 13 m et 3 m de profondeur d'eau (que l'on considère comme valeurs références de profondeur d'eau pour ce travail préliminaire).

5.2 Porosité et franc-bord

Sans mesure de réduction adéquate, la porosité (c'est-à-dire l'espacement entre les chemises/panneaux) autorise la propagation des vagues à travers l'atténuateur flottant. Selon la conception des jupes/panneaux, cette caractéristique peut avoir une forte influence sur les performances de propagation, surtout en cas de longue période de vagues en eaux peu profondes. Par exemple, un panneau constitué de planches verticales de 250 mm de large et espacées de 25 mm autorisera la propagation de presque 50 % des vagues. Pour que la vague passante soit influencée/modifiée par une structure, la largeur ininterrompue des jupes/panneaux doit correspondre au minimum à la moitié de la longueur d'onde maximale. Sauf si cela pose des problèmes de fabrication ou d'assemblage, les jupes/panneaux doivent être constitués de panneaux pleins (non poreux) d'une longueur minimale de 8 m, ce qui correspond à la longueur maximale autorisée des modules sur le lac de Serre-Ponçon. Cette exigence correspond par conséquent aux contraintes de conception.

L'espacement entre les jupes doit être réduit dès que possible jusqu'à 5 % maximum de la longueur des chemises/panneaux ou 0,4 m, sur la base d'une section de chemise/panneau de 8 m de long. À

leurs extrémités, les sections de panneaux doivent être plus larges en haut qu'en bas. Cela permet de garantir que deux panneaux adjacents ne se heurtent pas en cas de mouvements dynamiques et indépendants des atténuateurs.

Le franc-bord des atténuateurs de vagues flottants est également une caractéristique importante. S'il est trop bas, la vague risquera de se propager par-dessus l'unité, d'endommager le mobilier du ponton et de faire naître un risque pour la sécurité du public en raison de la submersion du ponton (en cas d'unités accessibles aux piétons). S'il est trop haut, il peut compliquer le mouillage des bateaux et l'embarquement/débarquement. D'une manière générale, on considère que les événements d'une périodicité d'1 an constituent la limite opérationnelle (absence de bateaux et accès public limité sur les pontons), tandis que les événements d'une périodicité de 50 ans sont utilisés pour la conception structurelle. Il est donc recommandé de s'appuyer sur les événements d'une périodicité d'1 an pour déterminer le franc-bord des atténuateurs. L'OCDI (2002) propose un guide de conception concernant le franc-bord des structures maritimes constituées de panneaux en fonction de la profondeur et du tirant d'eau. Le franc-bord des panneaux permettant de limiter la submersion en conditions de vagues de vent d'une périodicité d'1 an est de 0,65 m.

6. LIMITES DU SYSTEMES DANS LES CONDITIONS DU LAC DE SERRE-PONCON

Apres étude approfondie de la solution, et si d'un point de vue atténuation pure, le système comme proposé peut effectivement fonctionner, MM&C émet des réserves quant à la configuration proposée en figure 5 lors de la présentation intermédiaire. En effet, les unités risquent de subir des contraintes excessives en termes de forces de torsion, car leur position n'est pas nécessairement perpendiculaire aux contours du lit du lac. Si ce plan peut fonctionner sur le papier, il induit que les unités soient déconnectées les unes des autres en fonction de leur séquençage d'échouage. Sans cela, et en plus des efforts sur les structures acier échouées, il existe pour ces systèmes acier aussi, un risque très élevé de rupture des connexions à l'échouage.

Initialement fait d'acier galvanisé, l'échouage des modules pourrait entrainer une altération immédiate de la protection galvanique. Une fois hors d'eau, un risque fort d'apparition de corrosion sur le sous-bassement des structures risque de venir endommager les supports de jupe d'atténuation.

Toute comme cela avait été évoqué durant la réunion intermédiaire, une autre option consisterait à déplacer les atténuateurs au fur et à mesure que le niveau d'eau baisse afin que ces derniers soient toujours en eau (voir schéma de principe figures 8, 9 et 10).
Il est à noter que ces options obligeraient les équipes de gestion à trouver une solution technique pour retirer complètement l'ouvrage lorsque le lac est à sec ou s'assurer que leur échouage se fait à plat.
Cette option ne serait envisageable qu'à partir du moment où les systèmes d'ancrage pourraient être positionnés de part et d'autre du lit de l'ancienne rivière.

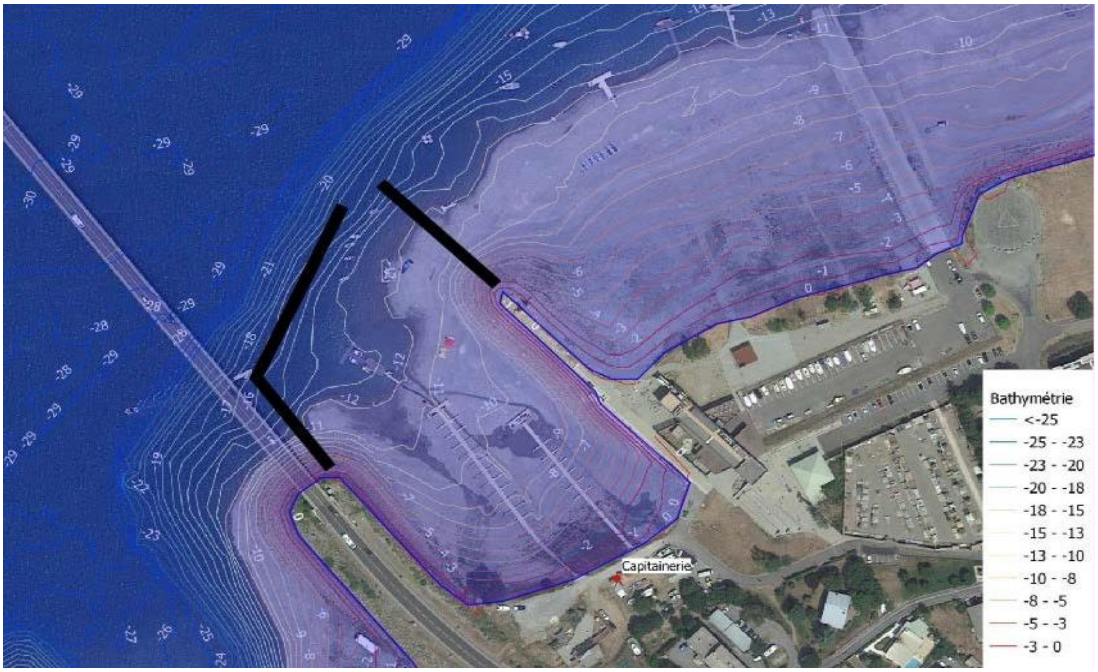


Figure 8 – Position de l'atténuateur à une hauteur d'eau de 780m

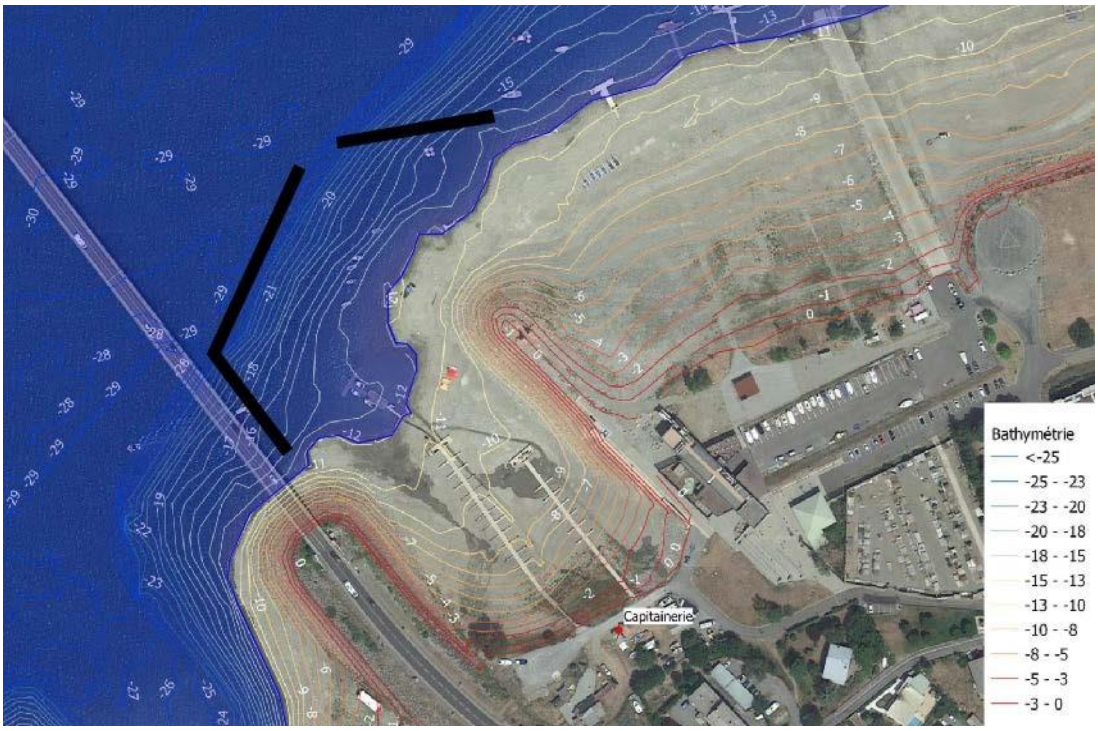


Figure 9 – Position de l'atténuateur à une hauteur d'eau de 768m

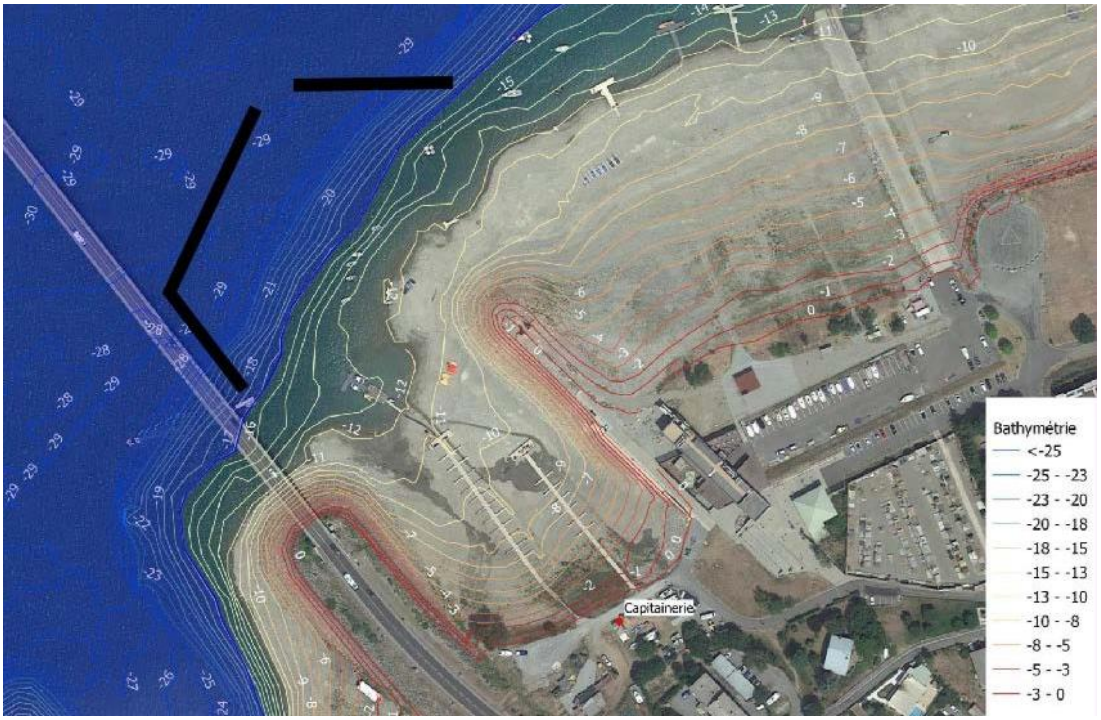


Figure 10 – Position de l'atténuateur à une hauteur d'eau de 763m

Au regard des contraintes communiquées par le SMADESEP, il semble que cette option ne soit pas optimale dans le cadre de déploiement d'une solution techniquement et opérationnellement acceptable pour le syndicat.

En conclusion de cette section atténuateur de vagues flottant « format pontons » et après avoir investigué plusieurs options existantes et prouvées, MM&C confirme que ces solutions ne sont peut-être pas les plus adaptées au site de Savine-Le-Lac notamment.
Les contraintes d'échouage et leurs implications sur les structures, au risque même de ne pas trouver de société souhaitant réaliser ces travaux, en font un site difficilement compatible avec ce type de d'ouvrage.

MM&C recommande donc de travailler sur des solutions alternatives, dont trois d'entre elles sont proposées dans la section suivantes.

7. SOLUTIONS ALTERNATIVES

MM&C a donc repris le dossier pour évaluer trois solutions alternatives qui pourraient éventuellement parer aux problématiques rencontrées avec le déploiement d'une solution classique « ponton atténuateur ». Il est à noter que la troisième solution semble être, pour le site de Savines-le-Lac, la plus efficace.

7.1 Déploiement d'une barrière de vagues en modules PE

Les barrières de vagues flottantes sont constituées de modules en polyéthylène de différents diamètre (de 650 à 900 mm) et sont connectés grâce à un tube en caoutchouc ou des cordes de qualité marine,

et des structures aluminiums ou inox. Elles peuvent être constituées de plusieurs lignes d'éléments, assemblés, allant de 1 à 7 lignes.
Suite à la réunion intermédiaire, il avait été évoqué la possibilité d'installer ce type d'éléments sur le lac, dont la nature même, rendrait la problématique d'échouage moins critique pour l'intégrité structurelle du système.

Figure 11 – Exemple de barrière de vagues flottante

Il est très important de noter que ces barrières sont très souvent utilisées pour atténuer l'effet des vagues d'étraves des petits bateaux, qui sont très peu profondes et régulières. Elles sont aussi, dans la majorité des cas d'ailleurs, installées comme system anti-intrusion.

Il n'existe aucune étude d'ingénierie précise quant à leur efficacité réelle et leurs limites d'utilisation. Il semblerait en revanche que leur efficacité ait pu être observée sur certains sites, sites sur lesquels notamment la tension dans le système d'ancrage peut être maintenue au cours du temps.
Il n'existe a ce jour pas de fabricant de cette solution en France, les produits peuvent donc être fournis par :

- Des fabricants chinois
- Plus proche du site, une société de travaux maritimes située en Angleterre qui s'approvisionne auprès d'un fabricant Turc.

MM&C a pu s'entretenir avec la société de travaux maritime basée en Angleterre qui a installé deux projets de ce type en Europe, et qui distribue ces produits sur la Grande Bretagne.
Point important et primordial au vu du site, la société en question confirme qu'il est tout à fait envisageable de faire échouer les modules en question.

Lorsque nous avons évoqué le site de Serre-Ponçon et ses contraintes de hauteur d'eau notamment, il nous a été précisé que le système serait susceptible de fonctionner à condition de garantir une tension relativement continue dans le système d'ancrage. Cela implique donc d'être en mesure de resserrer/desserrer les ancrages au fur et a mesure que le niveau d'eau évolue. C'est cette tension dans les ancrages qui permet de conserver le module en position et de créer une barrière diminuant l'effet et la hauteur des vagues.

Comme évoqué lors de la réunion intermédiaire, cette option pourrait être déployée sous forme de test afin d'en étudier l'efficacité sur le site de Savines-Le-Lac pour les vagues de direction sud-ouest, vagues les plus impactantes au quotidien durant la saison estivale.
Le fabricant contacté recommande pour le site et l'exposition en question une barrière a deux modules (voir figue 12 ci-dessous) pour cette phase de test.

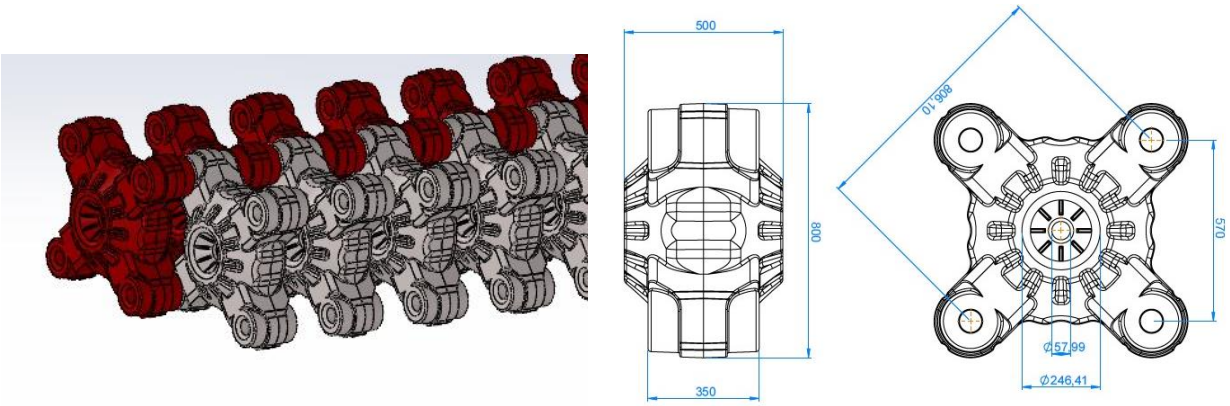


Figure 12 – Barriere a deux modules

Pour un test sur un ensemble de 25m, voici quel pourrait être le budget d'une telle solution, budget HT (hors installation, à confirmer si elle est faite par les équipes du port) :

DESCRIPTION	PRIX UNITAIRE	QUANTITE	TOTAL
Barriere de vagues en PE- 2 modules	800 euros / ml	25 m	20 000 euros
Transport	3 500 euros	1	3 500 euros
10 points d'ancrage chaine (hors corps morts)	PU	1	6 250 euros
Balise GPS de mesure des vagues (achat produit) – Attention système parfois peu fiable en zone encaisse (non ouverte comme la pleine mer)	PU	1	8 000 euros
Capteur de pression qui mesure les hauteurs d'eau (location incluant installation)	PU	1	40 000 euros

Tableau 6 – Budget d'une barrière de vagues en polyéthylène

Si cette solution pourrait mériter d'être testé, MM&C émet un avis réservé quant à son efficacité. Si elle parait intéressante sur le papier, notamment d'un point de vue financier mais aussi dans son déploiement technique, il est relativement complexe d'obtenir des informations fiables de la part des fournisseurs de ce type de solutions. Nous avons à titre d'information demandé des détails techniques justifiant le choix d'une barrière a deux modules, ces justifications n'ont jamais pu être fournies.

D'un point de vue pratique, cette barrière PE poserait en plus la question d'une possibilité d'adaptation du système pour coller aux besoins de la Baie Saint-Vincent. La nouvelle configuration du site (avec la construction de la cale de mise à l'eau) ajoute une dimension fonctionnelle au futur atténuateur. Ce dernier devra aussi permettre d'amarrer temporairement des bateaux au moment de leur mise à l'eau, et devra donc aussi disposer d'un platelage permettant aux plaisanciers de circuler sur ce dernier.
La barrière PE comme présentée ne permettrait pas une telle adaptation, ou en tout cas nécessiterait un développement approfondi et à part entière afin de remplir cette fonction.

7.2 Creusement du bassin et protection fixe

Les données d'entrées du projet reposaient sur le besoin d'extension du bassin afin d'aller chercher les « eaux profondes » permettant ainsi d'assurer un service d'amarrage des bateaux jusqu'à -18m (782 m). Comme évoqué en conclusion de l'analyse des solutions de pontons-atténuateur, cela contraint les éléments à échouage et il semble techniquement difficile d'échapper a toute forme d'ancrage dans l'ancien lit de la rivière.

Si l'on reprend les cas d'exposition aux vagues du bassin actuel (présents dans la figure 3), il semble qu'une seule partie infime du bassin actuel est exposé à des hauteurs de vagues problématiques

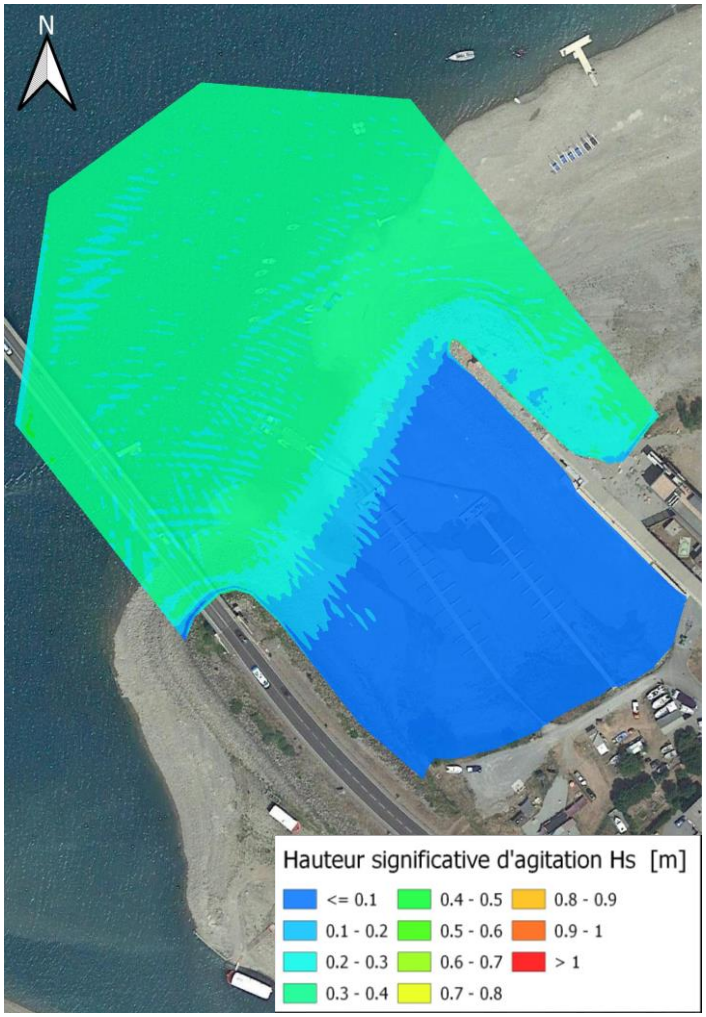


Figure 13 – Agitation due au clapot de nord-est

Pour ces vagues de nord-est, le bassin et les pontons comme positionnés actuellement ne sont que très peu affectés le clapot.
Nous pouvons observer une agitation d'environ 0.1 à 0.2 m extrémité d'une des deux pannes. Nous pouvons donc considérer que le niveau de protection du bassin existant pour des clapots de nord-est est suffisant.

Si l'on considère ensuite le clapot résultant des vents d'est-nord-est, nous observons une agitation relativement similaire. L'extrémité de la même panne est légèrement affectée par des vagues allant de 10 à 20 cm, en conformité donc avec ce qui est attendu pour un bassin disposant d'un bon niveau d'atténuation.

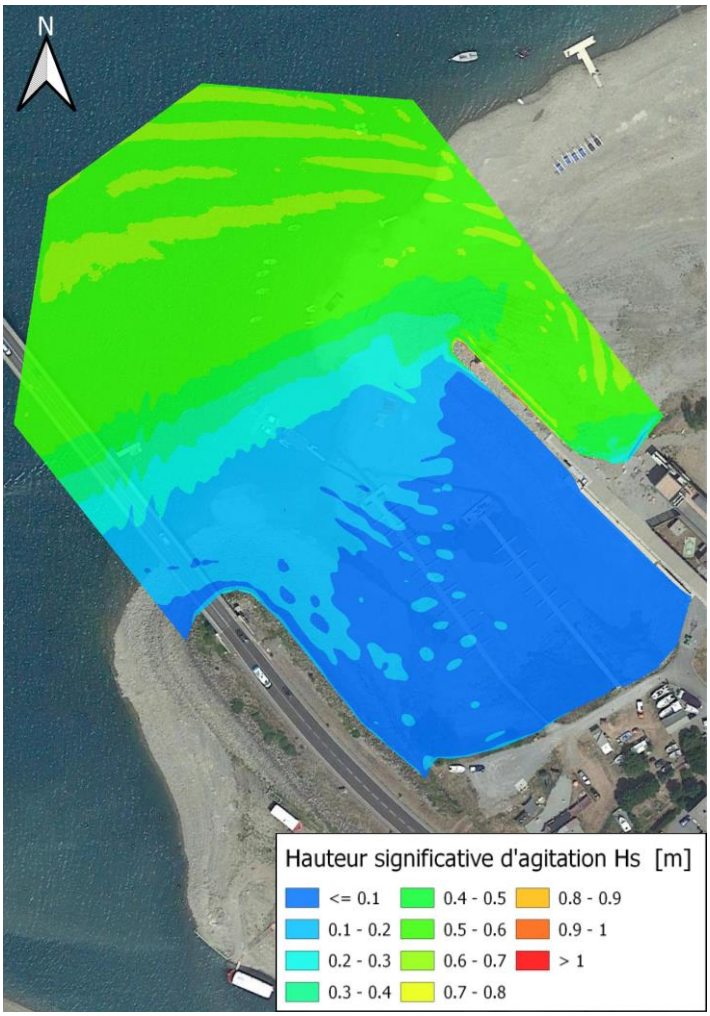


Figure 14 – Agitation due au clapot de nord-est

L'observation de l'exposition du bassin actuel au vagues de vent venant d'ouest confirme en revanche que c'est la direction qui vient créer le plus d'agitation dans l'espace d'amarrage actuel. Les deux pannes en leur extrémité sont affectées par des vagues pouvant atteindre 0,4 à 0,6 m de haut. Même dans les conditions actuelles, et dans le cas où la hauteur d'eau permet d'amarrer des bateaux sur les pontons actuellement en place, on peut considérer cette agitation comme trop élevée pour le confort des usagers.

En estimant que le SMADESEP serait en mesure d'abaisser la profondeur du bassin au niveau désiré, seule une infime partie de l'exposition du bassin actuel devrait être corrigée, en lieu et place d'un système d'atténuation comme initialement proposé combiné a une extension des pontons existants.
La figure 14 illustre la solution proposée.
Très concrètement, cette proposition consisterait à créer une protection en dur à hauteur de 780m sur une distance d'environ 20m.

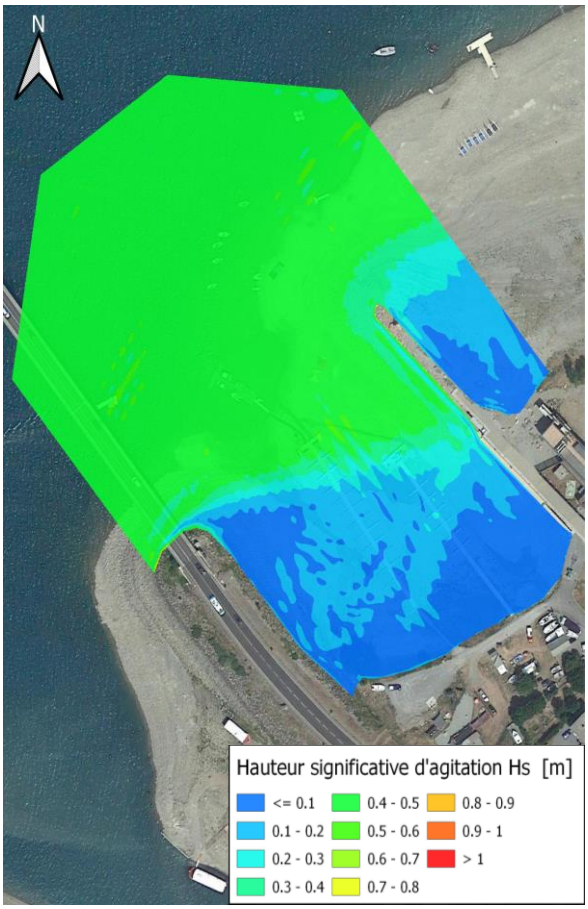


Figure 15 – Agitation due au clapot d'ouest

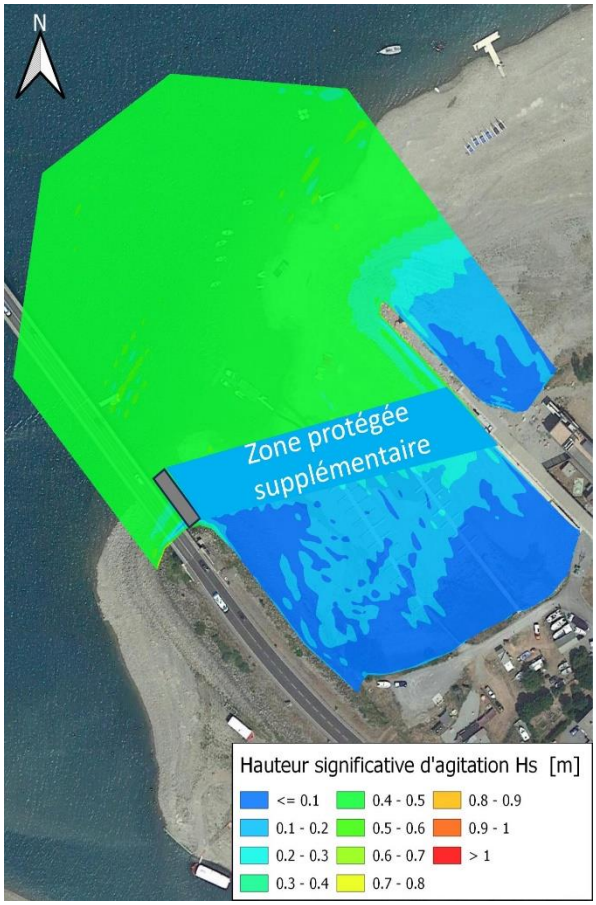


Figure 16– Agitation due au clapot d'ouest après protection

Deux options peuvent être envisagées afin de mettre en place une telle structure :

1) Une digue en dure de conception classique
2) Un écran de protection de protection ancré sur pieux

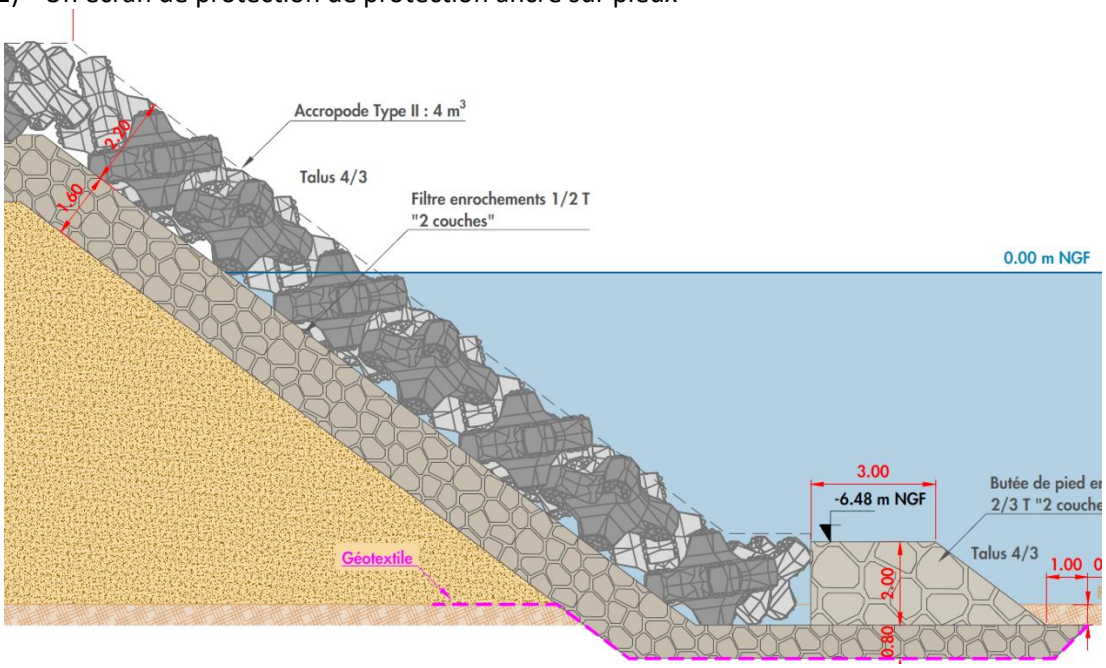


Figure 17 – Exemple de coupe type d'une digue avec tetrapodes/accropodes

Figure 18 – Exemple d'un écran de protection sur pieux

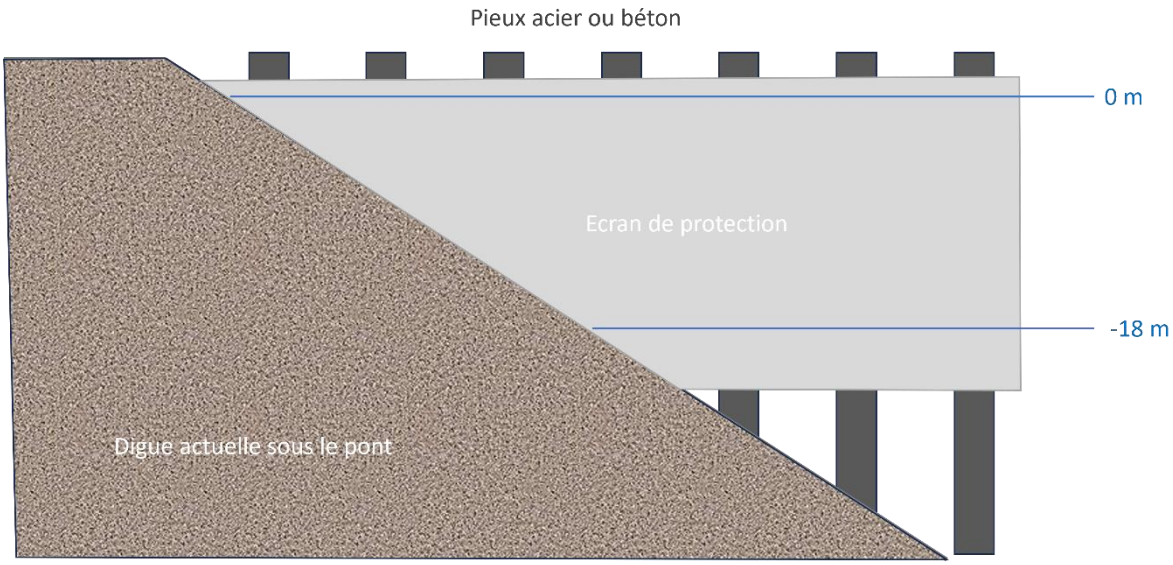


Figure 19 – Coupe de principe sur le site de Serre-Ponçon

Il est à noter que l'écran de protection fonctionne différemment d'une digue classique. Il n'a pas vocation à constituer une barrière sur l'ensemble de la hauteur d'eau mais seulement sur une hauteur permettant de limiter les vagues transmises.

L'option qui nous semble la plus viable afin d'abaisser la hauteur du bassin serait de profiter de la saison hivernale, lorsque le niveau d'eau est au plus bas, pour creuser le bassin. Ces opérations « à sec » permettrait de très largement diminuer le cout de réalisation de tels travaux pour le syndicat.

Se pose ensuite la question de la disposition des matériaux de dragage. Dans le cas d'un système digue avec tétrapodes, ces derniers pourraient justement être réutilisés pour la construction du système de protection supplémentaire à installer « sous » le pont qui traverse le lac : d'une part comme matériaux de sous-bassement, et d'autre part en matériaux de base pouvant permettre la construction de tétrapodes bétons (fabrication locale possible) qui seraient ensuite positionnés de façons à constituer la protection complémentaire nécessaire au bassin actuel.

Il est à noter que l'option de réutilisation des matériaux de dragages a des fins de construction a récemment été proposé par le port d'Argeles sur Mer afin de s'adapter aux conséquences du changement climatique en rehaussant les quais du port. Ce projet s'intégrait dans un projet plus global de repli stratégique des infrastructures portuaires a des fins d'adaptation au changement climatique. Ce projet considéré comme novateur leur a permis d'être lauréat « Port de plaisance d'avenir » et d'obtenir une subvention du CEREMA.
Proposer une continuité dans le service publique malgré les aléas climatiques, c'est exactement ce que cherche à faire le SMADESEP avec ce projet.

Dans le cas de l'écran de protection, il faudra s'assurer que son positionnement ne générerait pas de réflexion de vagues vers l'intérieur du bassin. Cela devrait être étudié par des simulations de propagation de vagues complémentaires.

Le coût de ces options doivent-être évaluées par un bureau d'étude spécialisé.

Cette option semble la plus efficace « techniquement » pour le site. Il a été en revanche clairement évoqué la difficulté de mise en œuvre d'une telle solution, avec notamment les contraintes suivantes :

- Une contrainte esthétique évidente du fait des très fortes variation d'eau, avec des avancées de construction en dur dans le lac. Le site de Savines-Le-Lac, par son attrait touristique notamment, ne peut supporter de telles infrastructures dénaturant très fortement l'aspect visuel cet espace
- La proposition d'implantation qui interfère avec les fondations du Pont de Savines. Cet ouvrage d'art constitue un élément essentiel des infrastructures routières de Savines-Le-Lac, avec des enjeux de sécurité très importants pour l'ensemble des usagers. Proposer un système risquant d'affecter ses fondations n'est tout simplement pas envisageable.

7.3 Déploiement d'un dispositif d'atténuation expérimental & innovant en tube PE

Une solution technique innovante et expérimentale a été étudiée dans le cadre de la présente étude, en phase de faisabilité.

Il a été convenu avec le SMADESEP de se focaliser sur une atténuation de la panne la plus à l'Ouest et de ne pas considérer une atténuation locale sur le ponton carburant situé en bout de panne Est.

Une note d'hypothèse récapitulant le projet, les références normatives & règlementaires, les conditions environnementales et les hypothèses du système envisagé est jointe en Annexe A.
Les études techniques ont été réalisées sur la base d'un atténuateur de vague de 25 à 30 mètres de long, cependant la longueur pourra être ajustée en fonction de l'évaluation budgétaire.

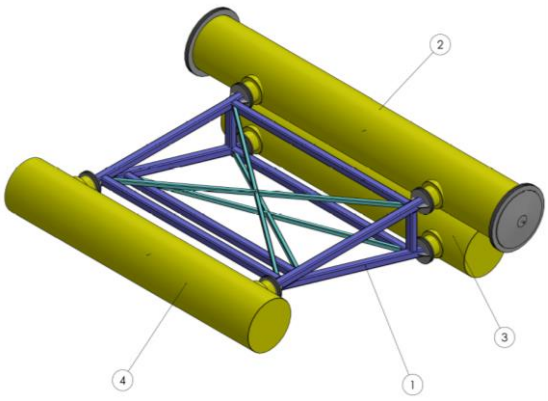
Fort des résultats obtenus lors de l'analyse des solutions précédemment étudiés, MM&C supporté par le Bureau d'étude SPISEA a souhaité proposer en premier lieu d'étudier une solution répondant aux problématiques d'ancrage « souple » et d'échouage des modules, pour ensuite analyser les performances d'atténuation du système.

Les éléments détaillés ci-après mettent en avant, sur papier, l'efficacité potentielle de cette solution. Tester ce dispositif en condition réelle et à petite échelle permettrait de confirmer les résultats de cette étude préalable. Etant donne que la solution n'est aujourd'hui pas disponible sur étagère comme « produit standard », MM&C proposerait de développer ces modules sous la forme d'une convention de recherche et développement. Cette approche nous semble plus appropriée dans l'optique d'un tel développement en opposition a une approche classique de « fourniture » qui a pour vocation seule de répondre à une obligation de moyen.

7.3.1 Solution technique – stade faisabilité

Le dispositif d'atténuation est composé de 5 (25.00m) à 6 (30.00m) modules flottants liaisonnés de manière souple.
Cette solution technique est composée :

- D'une structure en aluminium de qualité marine
- De tubes PEHD de diamètre 600mm – SDR17 ou SDR 11
    - 1 tube de 5.00m permettant la flottabilité et la liaison inter-structures
    - 1 tube de 4.00m assurant la flottabilité d'un côté
    - 1 tube de 4.00m percé permettant l'enfoncement du système dans l'eau et l'atténuation du clapot
- D'organes de liaisons entre tubes PEHD
- D'un système d'ancrage souple avec chaînes et corps morts



Repère	Description FR pièce	Quantité
1	Structure Aluminium	1
2	Tube PEHD longueur 5m	1
3	Tube PEHD percé longueur 4m	1
4	Tube PEHD longueur 4m	1

Figure 20 - Schématisation d'un module flottant

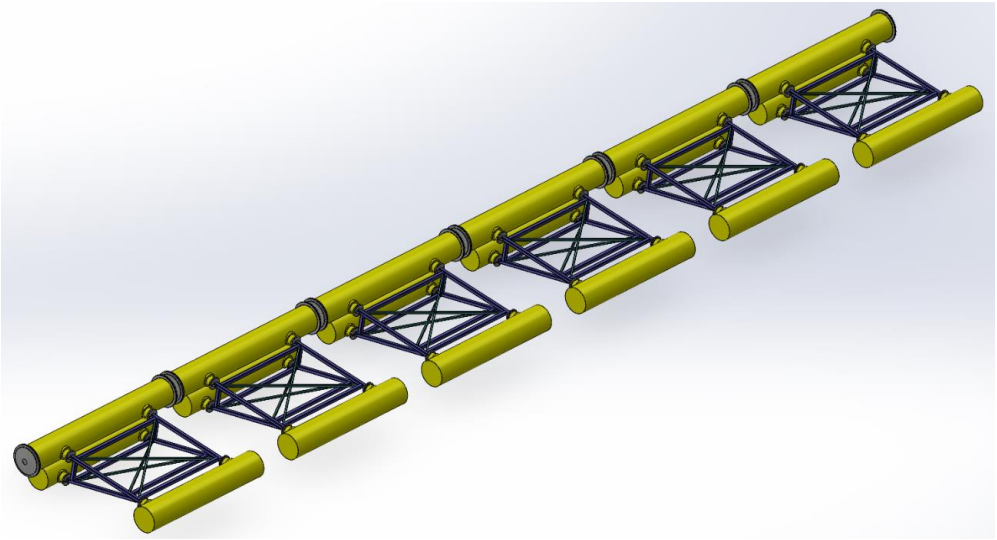
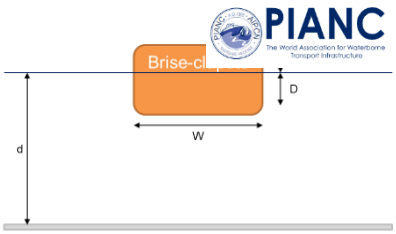


Figure 21 - Vue des modules assemblés

7.3.2 Estimation du coefficient de transmission

Nous proposons une analyse de plusieurs référentiels existants afin d'estimer le coefficient de transmission du système étudié.

7.3.2.1 Etude du PIANC



Référence : « *PIANC – Les digues flottantes – Un guide pratique de conception et de construction – Rapport n°13 – 1994* »
En se basant sur le PIANC, les principaux paramètres de dimensionnement des brise-clapots de type ponton peuvent être évalués :
Le guide du PIANC recommande les limites suivantes afin de garantir une action significative sur le clapot :

- Tp < 3√D pour le tirant d'eau du brise-clapot (Tp la période du clapot),
- L < 3W pour la largeur du brise-clapot (L la longueur d'onde),
- F ≥ 0.8 Hs pour le franc-bord du brise-clapot (Hs la hauteur du clapot).

Ce qui amène au tableau suivant pour différents clapots du site étudié :

		1% NE	1% SO	1 AN THERMIQUE OSO
TP < 3√D	D (Tirant d'eau)	0.75m	0.45m	0.7m
L < 3W	W (Largeur)	3.5m	2m	3.3m
F ≥ 0.8 HS	F (Franc-bord)	0.4m	0.2m	0.3m
HAUTEUR TOTALE (F+D)		1.15m	0.65m	1m

D'après ces éléments, **il est préconisé d'utiliser des tubes de diamètre ≥ 600mm** pour le projet afin d'obtenir une hauteur totale et un tirant d'eau suffisants pour respecter les limites théoriques indiquées dans le guide du PIANC.

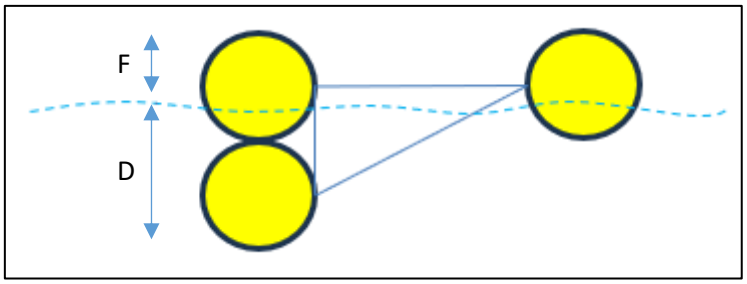


Figure 22 – Coupe de principe des modules

Pour rendre le brise-clapot plus efficace, il peut être envisagé d'avoir 2 x 2 tubes.
Cette disposition permettrait également de revêtir l'atténuateur de vagues d'un platelage et, sur la base d'un nouveau dimensionnement, permettre aux bateaux de s'amarrer.
Par ailleurs, en se basant sur les résultats de la théorie linéaire de la houle présentés par le PIANC, le coefficient de transmission peut être évalué (*) :

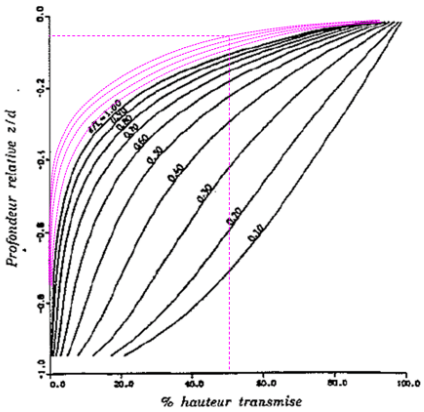


Figure 2.7 - Impact de la profondeur d'eau et du mouillage de l'ouvrage

Houles 1% (Ouest) :

- Hors courbes des abaques => approximation
- $\frac{d}{L} \sim 3$ très au-delà des courbes
- Si D=0.5m, alors rapport D/d ≈ 0.05
- Donc Ct ≈ 50%

(*) On est en dehors du domaine de validité, donc cette approximation reste très incertaine

Houles 1an (Ouest) :

- Hors courbes des abaques => approximation
- $\frac{d}{L} \sim 2.3$ au-delà des courbes
- Probablement pas de différence : Ct ≈ 50%

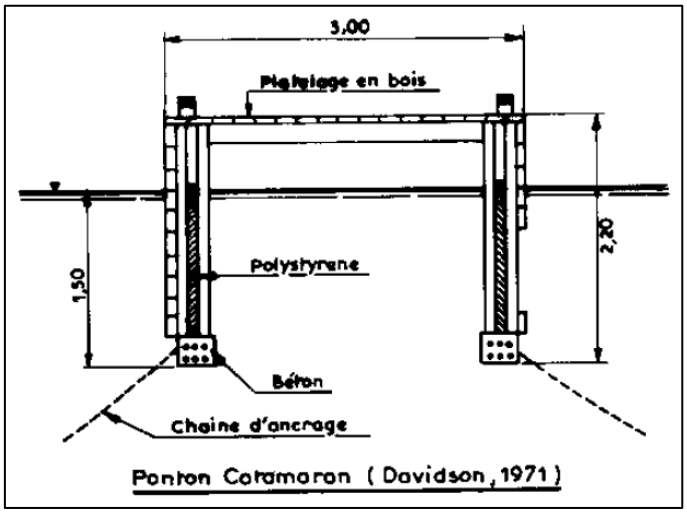
Il faudrait un tirant d'eau ≥ 2m pour baisser le Ct

(*) Cette estimation reste une indication de l'ordre de grandeur du coefficient d'atténuation par analogie avec les abaques théoriques disponibles. Seuls des essais en modèle physique ou l'étude d'un prototype permettrait de connaître précisément le comportement du brise-clapot.

7.3.2.2 Exemples de brise-clapots de type « non-pontons »

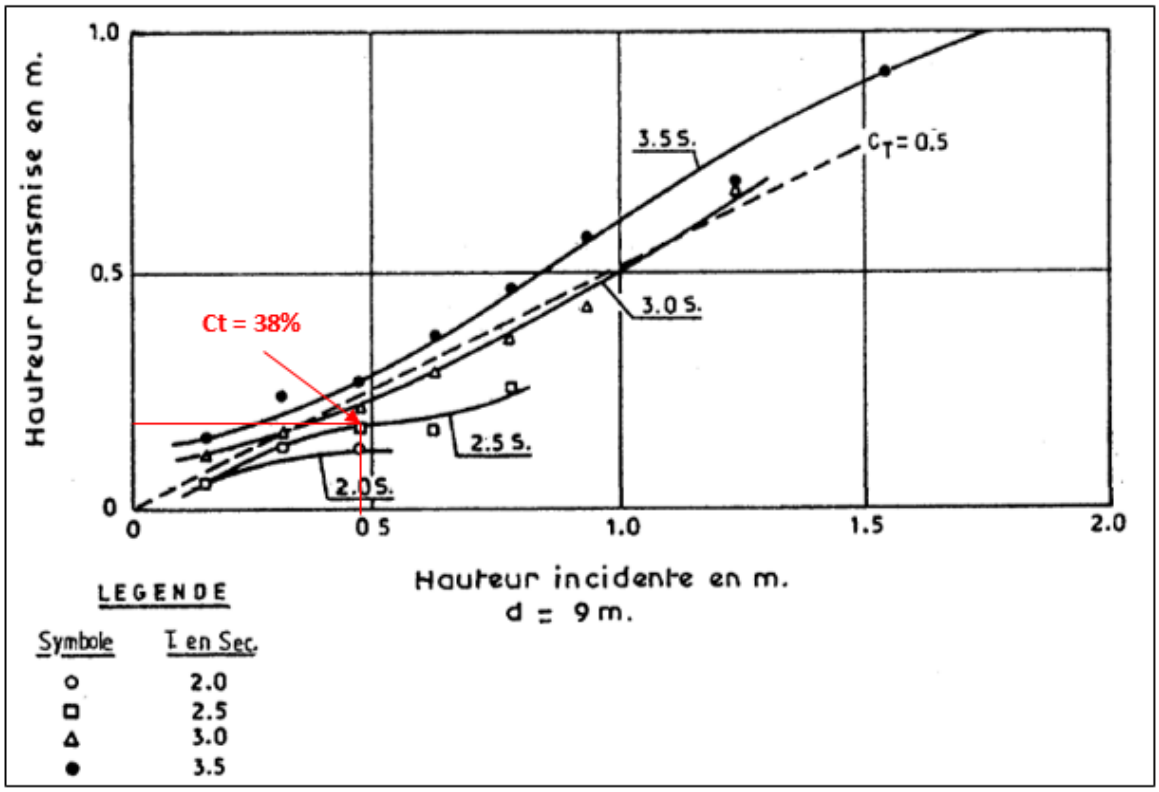
Référence : « *CETMEF – Conception des brise-clapots flottants – 1991* »

1. **Brise-clapot de type « catamaran »**



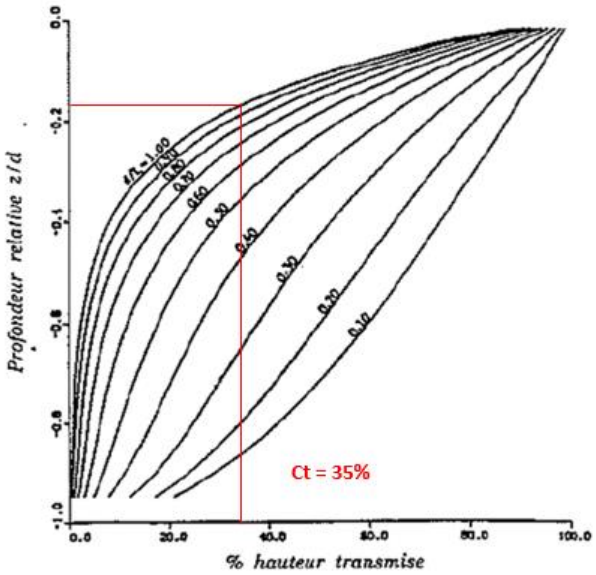
Etude en canal à houle en 1971

- Niveaux d'eau : 3m et 9m
- Clapot :
  - Tp : 2 à 3.5s
  - Amplitude : 0.15 à 1.50m (Hs : 0.08 à 0.75m)

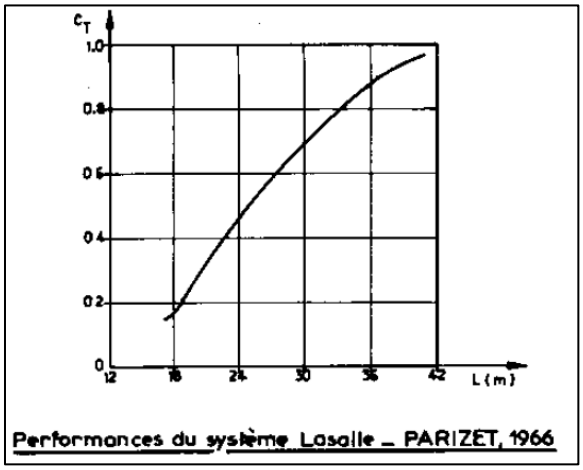


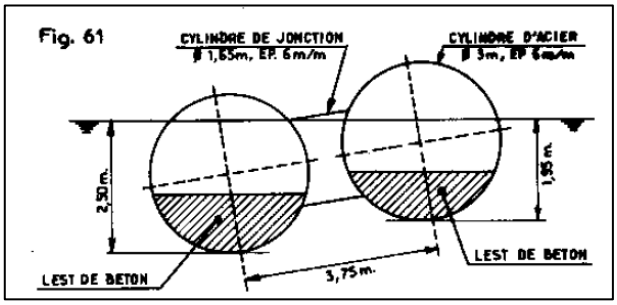
Si on compare avec la courbe du PIANC :

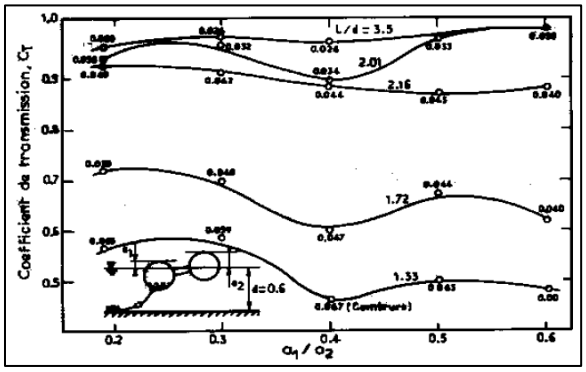
- 1.50m de tirant d'eau pour 9.00m de profondeur : d/D = 0.17
- 2.5s pour 9.00m de profondeur : L = 9.75m => d/L=0.92 quasi 1



2. Brise-clapot de type double cylindres







Pour les fortes valeurs de L/d (donc Tp élevé), l'agitation est peu atténuée.

Pour aller vers Ct $\leq$ 0.5, il faut un ratio L/d < 1.3

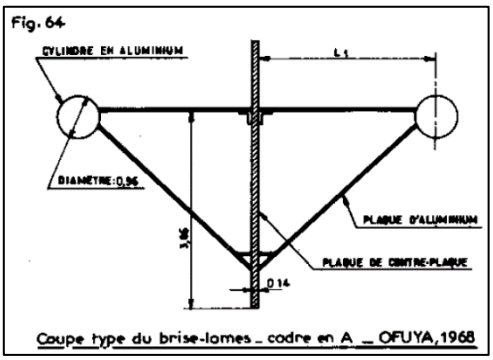
Pour T=2.7s, Ct $\leq$ 0.5

3. Brise-clapot de type « Cadre en A »

Utilisé au Canada
Tests effectués pour évaluer les performances

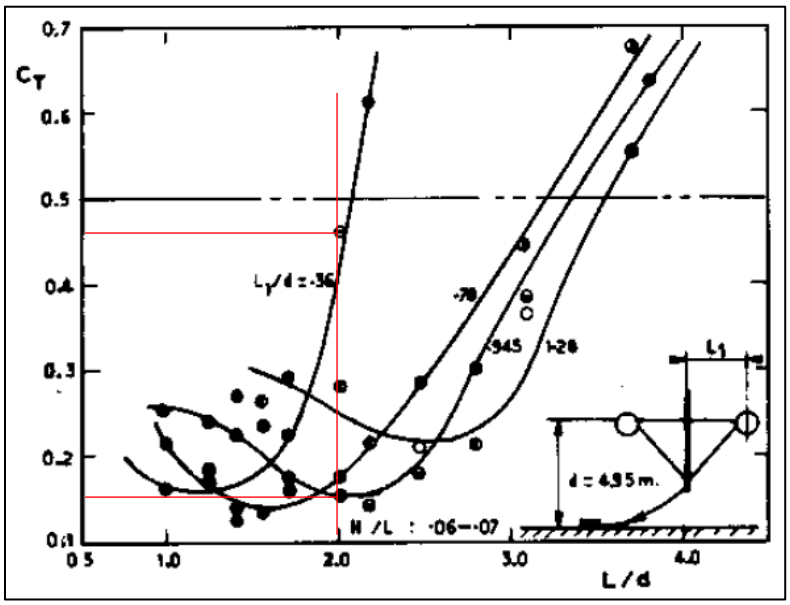
- Niveaux d'eau : 4.95m et 8.25m
- Clapot :
  - Tp : jusqu'à 3.8s
  - Amplitude : jusqu'à 1.50m (Hs : 0.75m)

Pour d=4.95m et T=2.5s : L=9.7m => L/d = 2



Coupe type du brise-lames _ codre en A _ OFUYA, 1968

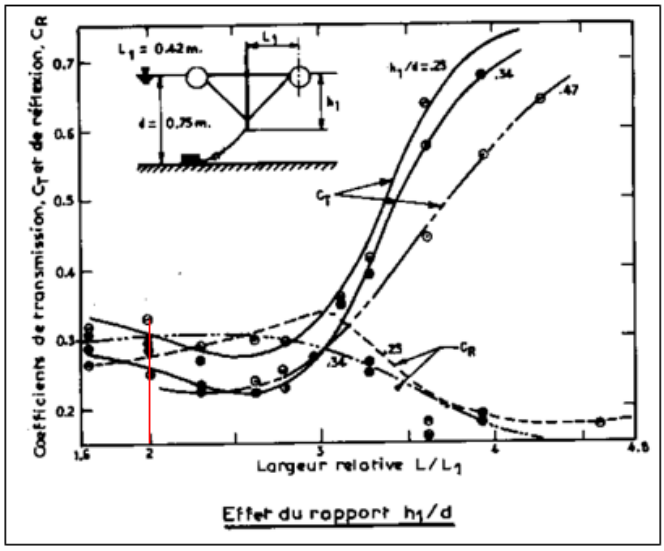
Effet de l'inertie du dispositif :



Ct varie entre 15% et 45% selon l'écartement des flotteurs (en lien avec les mouvements d'oscillation du dispositif).

Tendances difficiles à extraire car les courbes se croisent selon la période du clapot considéré (optimum différent selon l'onde incidente)

Effet du tirant d'eau :



Pour d=0.45m et T=2.5s : L=5m

En prenant une valeur arbitraire de L1=2.5m : L/L1=2

Ct variant entre 25% et 35%

7.3.2.3 Référence : « Jean BOUGIS – Les brise-lames – 2018 »

Citations :
« D'après les expériences systématiques de V. Grigorief, pour avoir une action significative sur la houle, une paroi mince verticale fixe doit avoir une hauteur émergée supérieure à la hauteur des vagues et une hauteur immergée de 2 à 3 fois la hauteur de la houle. Ainsi, pour une hauteur de 1m, la jupe verticale fixe doit aller au minimum de -2m à -3m jusqu'à +1m. »

« Les travaux effectués sur des digues partielles fixes montrent que la houle passe très bien par dessous dès que la longueur d'onde augmente au-delà de 10 fois la hauteur immergée du caisson. Pour un voile d'un mètre, cette limite correspond à une longueur d'onde de 10 mètres, soit une période de 2.5 secondes. »
« Des études sur modèles physiques puis sur prototypes in situ qui ont été menée en Union Soviétique ont conduit à l'expression suivante du coefficient de transmission, expression d'où le tirant d'eau est absent :

(Pour pontons)

$$C_T = \exp\left(-1.15\left[\frac{B}{\lambda}\right]^{3/2}\right)$$

Ce qui implique un coefficient de transmission supérieur à 0.5 dès que le rapport /B devient supérieur à 1.4 »

« Les procédés flottant fondés sur un voile vertical (cadre en A, syst. Lapérrière) fonctionnent assez bien jusqu'à des périodes de 2 secondes pour des hauteurs de l'ordre de 0.5 mètre. »

« Les performances des autres types de brise-lames réflecteurs sont souvent supérieures à celles des pontons, mais ce gain est obtenu au détriment de la simplicité des formes et du coût. »

Le tableau 6.2 rassemble des résultats concernant les principaux systèmes réflecteurs en fonction de la profondeur d'eau h, de la largeur B, du tirant d'eau D, de la masse linéique, de la période T et de la hauteur de la houle incidente H_I. Il indique les périodes en deçà desquelles les coefficients de transmission sont inférieurs à C_T et le rapport entre la longueur d'onde et la largeur du ponton correspondante.

Système	h (m)	B (m)	D (m)	M (t/m)	T (s)	H_I (m)	C_T	F kdaN/m)	λ/B
Ponton Carver	7.60	3.70	1.05	4.00	3.00	0.75	0.47	-	3.80
(essais en bassin)	7.60	3.70	1.05	4.00	3.50	0.90	0.61	-	5.10
	3.00	3.70	1.05	4.00	3.50	0.90	0.51	-	4.29
Ponton Carver	7.60	4.90	1.05	5.30	3.00	0.75	0.40	-	2.87
Ponton DHI	4.00	3.00	0.55	1.50	2.90	0.60	0.50	-	4.22
Ponton Ofuya	6.40	7.10	0.95	6.60	3.50	0.75 à 1.30	0.50	-	2.62
	6.40	7.10	1.22	8.50	3.50	0.75 à 1.30	0.40	-	2.62
	6.40	7.10	1.93	13.40	3.50	0.75 à 1.30	0.40	-	2.62
Alaska (Carver)	7.60	6.40	1.40	4.70	3.50	0.90	0.50	-	2.95
Alaska (LCHF)	9.50 à 13.60	9.00	1.50	5.90	3.80	1.10	0.50	0.97	2.50
Ponton Davidson	3.00	3.00	1.50	-	3.00	0.90	0.33	0.80	4.23
(Catamaran)	9.00	3.00	1.50	-	3.50	1.20	0.54	1.60	6.34
Equiport	-	7.60	1.80	0.58	4.00	1.30	0.50	0.60	3.28
Cadre en A Ofuya	4.95	6.30	3.86	-	3.50	1.30	0.50	1.25	2.85
	8.25	6.30	3.86	-	3.50	1.30	0.50		
Chen et Wiegel A	7.50	13.00	3.20	-	3.50	1.45	0.50		
Chen et Wiegel B	7.50	7.00	4.20	-	3.80	1.20	0.50		
Lasalle	20.00	6.60	2.50	-	4.00	1.50	0.50		
BS 107 C	60.00	10.00	1.40	-	4.00	1.50	0.50		

Tableau 6.2 : Systèmes brise-lames réflecteurs

Les valeurs encadrées sont les cas qui se « rapprochent » le plus de l'étude pour le lac de Serre-Ponçon.

Globalement, la valeur de 0.50 semble celle qui est la plus fréquente pour des dispositifs flottants réflecteurs, on descend rarement en dessous.

7.3.2.4 Conclusion sur le coefficient de transmission

Il est difficile d'estimer précisément l'efficacité du brise-clapot car cela dépendra de son fonctionnement hydrodynamique et de ses caractéristiques finales.

Néanmoins, les tendances suivantes peuvent être indiquées :

- Le clapot sur site correspond à des faibles longueurs d'onde, l'ouvrage pourra donc réduire l'agitation malgré ses dimensions réduites ;
- Le dispositif sera efficace surtout pour les clapots de période $\leq$ 2s ;
- **Le coefficient de transmission est a priori de l'ordre de 50%**
- Pour améliorer Ct, deux pistes sont envisageables :
    - Augmenter le tirant d'eau (au détriment de l'inertie),
    - Disposer de 2 x 2 tubes (à l'avant et à l'arrière) avant d'avoir un brise-clapot de type « catamaran » : cette configuration permettrait à l'ouvrage d'avoir une largeur un effet plus important sur le clapot et sur la réduction de l'énergie transmise.

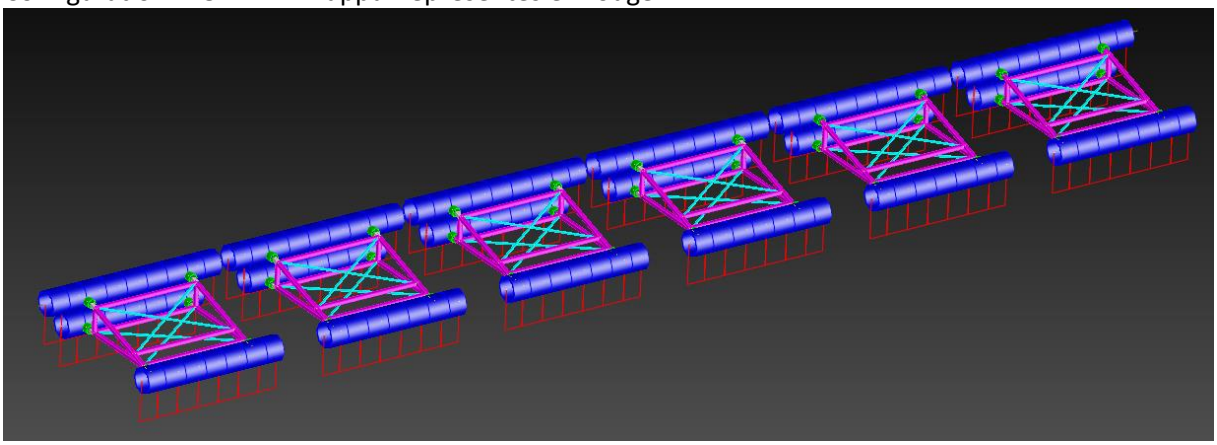
- ⇨ La largeur de l'ouvrage est, selon le clapot considéré, plus efficace contre l'agitation que le tirant d'eau.

- Ces indications ne sont valides que si le brise-clapot reste relativement stable sur le plan d'eau : si l'ouvrage oscille ou pilonne trop sous l'effet des vagues, son efficacité se réduira. Il faut donc « alourdir » l'ensemble si possible.

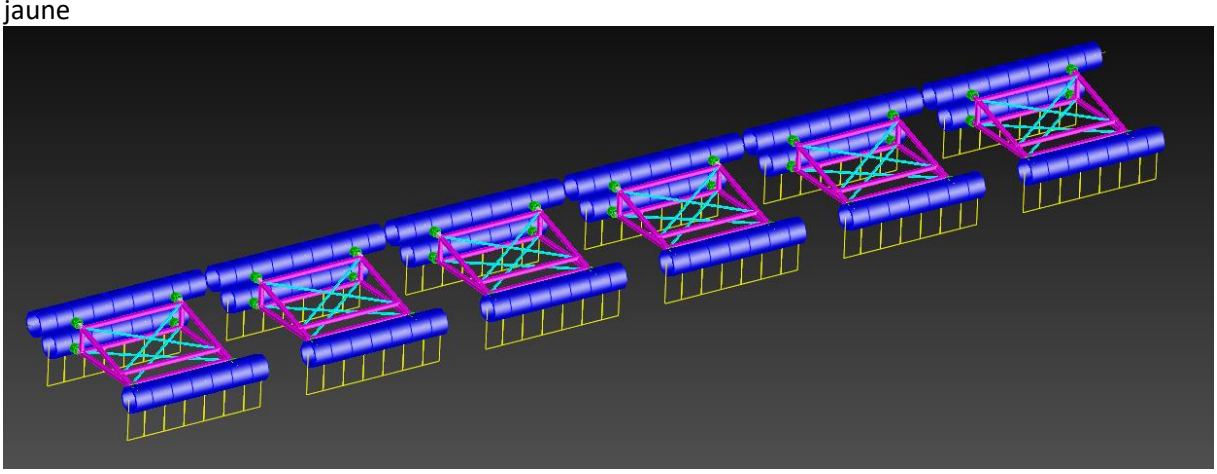
7.3.3 Vérifications structurelles

Nous procédons à des vérifications des déformations de la structure flottante permettant de réaliser un prédimensionnement sur les configurations flottant et échoué.

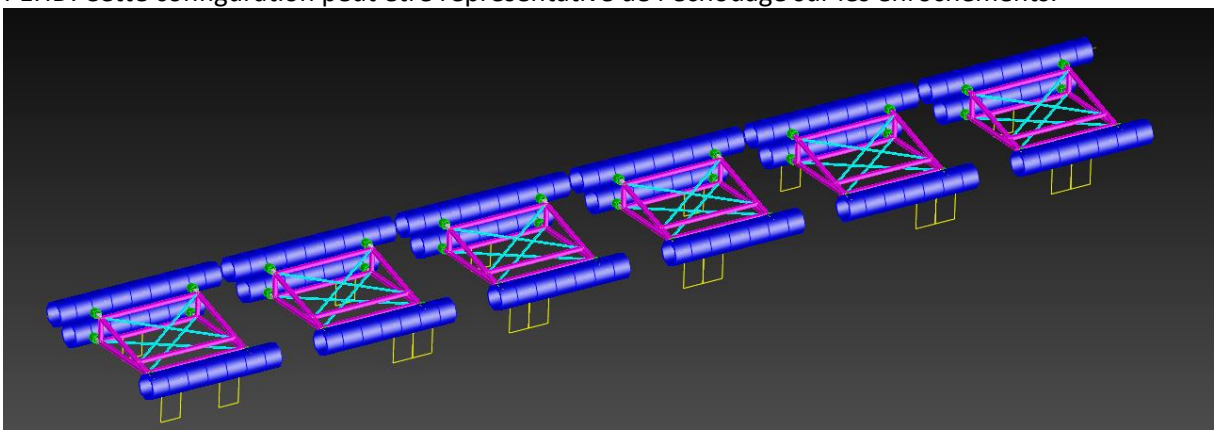
Configuration FLOTTANT – appui représentés en rouge :



Configuration ECHOUE – appuis linéaire réparti sur toute la longueur du tube PEHD - représentés en jaune



Configuration ECHOUE – appuis représentés en jaune – cas d'un appui ponctuel sur la totalité du tube PEHD. Cette configuration peut être représentative de l'échouage sur les enrochements.



7.3.4 Implantation sur le site de Savines-Le-Lac

Il est proposé d'implanter l'atténuateur de vague, d'environ 30.00m de longueur, le plus proche possible de la digue afin de limiter le flux d'eau entre la digue et le début du système d'atténuation. Nous proposons l'implantation ci-dessous afin d'atténuer le clapot en se focalisant sur la panne la plus à l'ouest. Ci-dessous est représenté l'atténuation théorique :

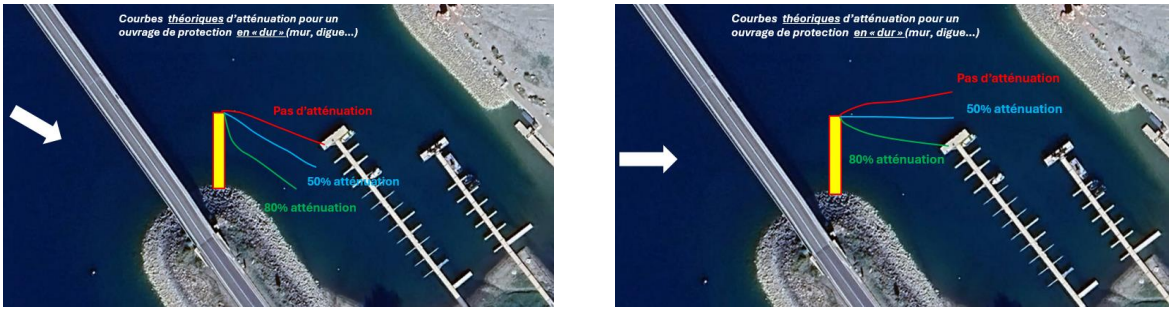


Figure 23 – Implantation sur le lac - 1

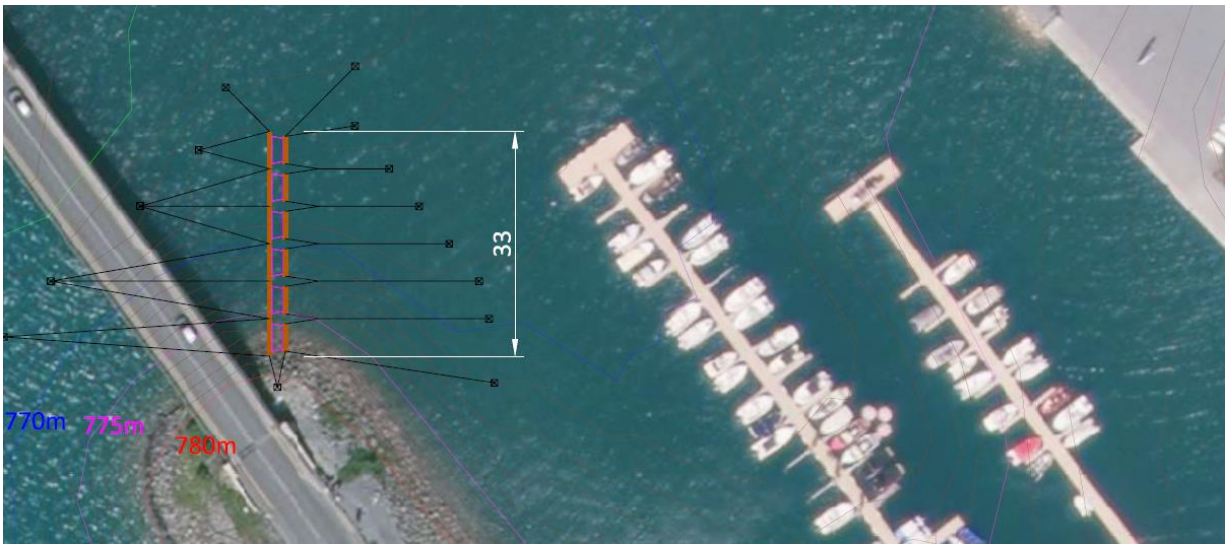


Figure 24 – Implantation sur le lac – 2 (voir annexe B)

7.3.5 Ancrage de l'atténuateur

Le système d'ancrage préconisé pour l'ancrage des structures flottantes est de type souple : chaînes et corps morts.

Quelques généralités :

- Il est évité d'implanter des corps morts sur le talus du pont (trop pentu, risque de détérioration, etc…)
- Dimensionnement des corps morts : Pas de distinction entre la partie Est et la partie Ouest, l'effort max considéré (cas tempête 30ans NE) est appliqué aussi pour les corps morts situés à l'Ouest – Choix conservatif ;
- Coefficient de frottement utilisé sur le sol : 0.5 valeur représentative d'un sol sablo-vaseux. En cas de pose sur sol rocheux ou caillouteux, ce coefficient est susceptible d'évoluer et de nécessiter d'augmenter la masse des CM ;
- Masse volumique du béton : 2300 kg/m3 ;
- Ancrage à l'enracinement du brise-clapot (Sud) sur le talus du pont : à déterminer avec le SMADESEP pour définir la connexion est la plus adaptée : corps mort, pieux, autre ;
- Le brise-clapot, en particulier à son extrémité Nord, bougera sur le plan horizontal de plusieurs mètres en fonction du vent et clapot. En particulier pour les niveaux d'eau intermédiaires puisque les lignes d'ancrage seront relativement tendues (en fonction de l'ajustement initial) au niveau d'eau haut et relâchées le reste du temps.
  Deux modifications peuvent permettre de limiter ces mouvements (options envisageables) :
  - L'utilisation de lignes élastomères
  - La mise en place de masses intermédiaires sur les lignes

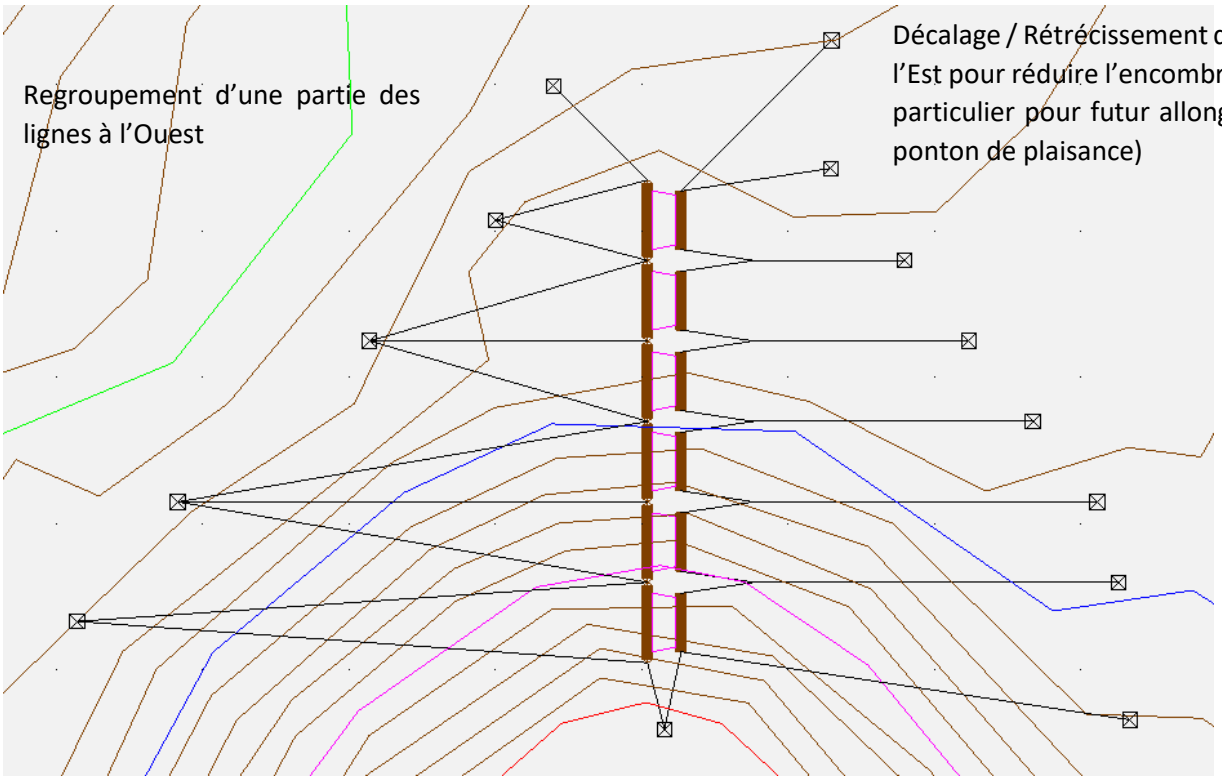
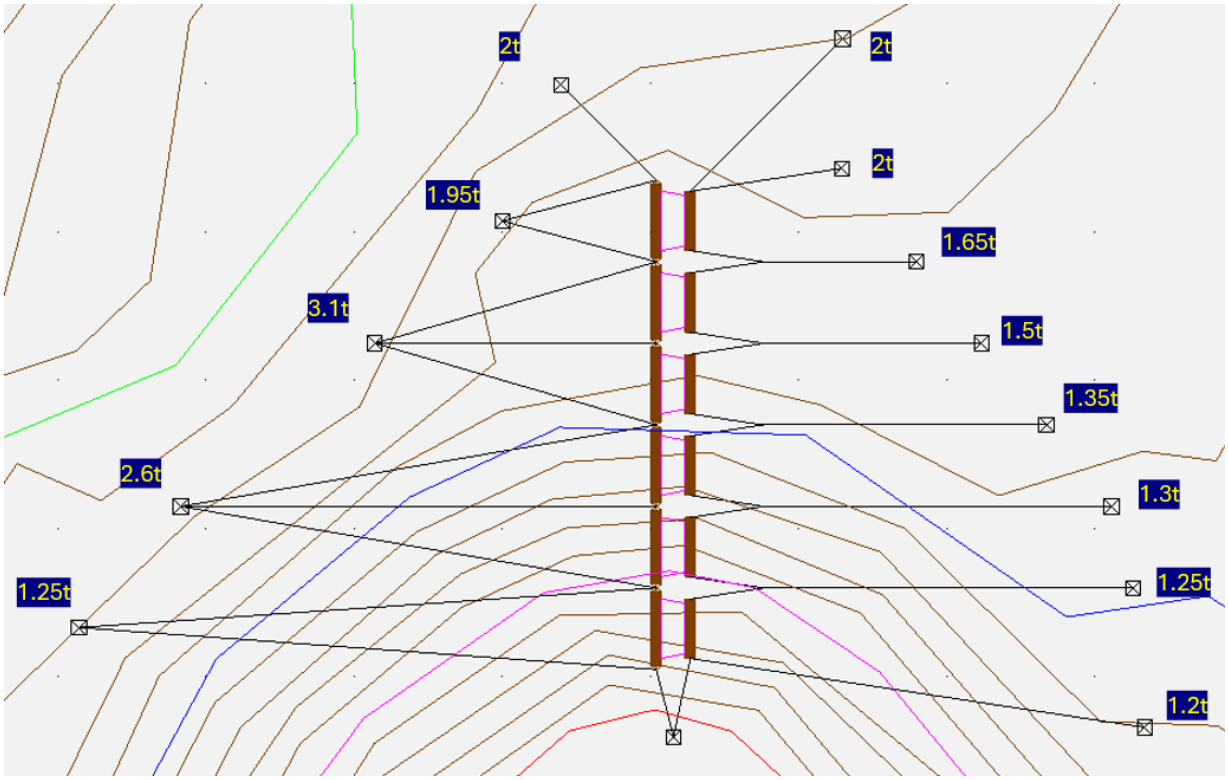


Schéma des lignes d'ancrages préconisées



Masse des corps morts (en air)

7.3.6 Préconisations de mesures

<u>Nombre de bouées</u> :
A minima, il faudrait disposer de 2 bouées de mesure.
Si le budget le permet, il peut être intéressant d'en ajouter d'autres.
Les 2 bouées permettraient d'évaluer le coefficient d'atténuation, mais pas l'ampleur de la zone protégée.

<u>Positionnement</u> :
Une bouée en amont de l'ouvrage (Ouest) : 1.5 x la longueur d'onde locale (HYDRALAB et Goda), donc environ 15m devant le brise-clapot et pas dans une zone d'influence d'une pile du pont.

Une bouée en aval (Est) : à environ 5m / 10m de l'atténuateur pour pouvoir mesurer le clapot transmis. Une réflexion est nécessaire pour prendre en considération les mouvements réciproques du brise-clapot et de la bouée en fonction de leurs ancrages.

<u>Bouées de mesure des vagues</u> :
Les fournisseurs auront la capacité de proposer une solution adaptée au besoin, les mesures attendues sont les suivantes :

- Hauteur de vague
- Période
- Direction (corrélé avec le vent, mais il est préférable de mesurer la direction du clapot qui peut localement se réorienter)

Les dispositifs de mesure peuvent aussi être de type ADCP installés au fond (mesure de la houle et du courant en général).

7.3.7 Budgétisation du concept

APPROCHE BUDGETAIRE ATTENUATEUR DE 30.00M	PRIX HT
Fourniture et livraison des structures en aluminium et des liaisons inter-structures	36 000 €
Fourniture et livraison des tubes PEHD, des bouchons	48 000 €
Fourniture et livraison de chaines ø8mm + manilles + émerillons	6 800 €
Supervision de l'installation par 1 personne pendant 4 jours	4 500 €
Transport	4 500 €
Etudes de PRO + EXE	22 175 €
TOTAL HT	**121 975 €**

APPROCHE BUDGETAIRE ATTENUATEUR DE 25.00M	PRIX HT
Fourniture et livraison des structures en aluminium et des liaisons inter-structures	30 000 €
Fourniture et livraison des tubes PEHD, des bouchons	40 000 €
Fourniture et livraison de chaines ø8mm + manilles + émerillons	5 800 €
Supervision de l'installation par 1 personne pendant 4 jours	4 500 €
Transport	4 500 €
Etudes de PRO + EXE	22 175 €
TOTAL HT	**106 975 €**

Eléments non prévus au budget à prévoir par le SMADESEP :

- Equipe de pose pour l'installation sur l'eau de l'atténuateur de vagues
- Equipement de déchargement de camions et moyen de levage pour mise à l'eau
- Système de mesure des vagues, budget similaire a ce qui est évoqué dans le budget barrière flottante en PE → confirmer en phase EXE quel système serait le plus pertinent
- Fourniture et pose des corps morts (données estimatives dans le chapitre « Ancrage de l'atténuateur »

7.3.8 Conclusion sur le dispositif expérimental

Il apparait clair que ce dernier dispositif étudié pourrait permettre de répondre à l'ensemble des besoins du SMADESEP, à savoir :

- Un système échouable et non sujet a dégradation (casse) lors de la baisse des niveaux d'eau du lac

- Une solution d'ancrage perrerine ne nécessitant pas d'ajustements a répétition durant les phases de montée et descente des niveaux d'eau
- Un niveau d'atténuation théorique permettant de tranquilliser le bassin et en prévoir donc son extension
- Un système facilement adaptable (catamaran 2 x 2 tubes) au vu des fonctionnalités attendues pour la Baie Saint-Vincent, notamment la partie amarrage temporaire de bateaux et adaptation de platelage pour la circulation des plaisanciers.

---------- Fin du Rapport ----------