



Quantification de la dissipation de la houle au-dessus d'un réseau de structures biomimétiques souples artificielles

Garance MARLIER^{1,3,4}, Jean-Yves JOUVENEL⁴, Samuel MEULE^{1,2,3}, Frédéric BOUCHETTE^{1,3}

1. Géosciences Montpellier, Univ. Montpellier, CNRS, place Eugène Bataillon, 34090 Montpellier, France.

garance.marlier@umontpellier.fr, frederic.bouchette@umontpellier.fr

2. CEREGE, Univ. Aix-Marseille, CNRS, IRD, Technopôle de l'Arbois-Méditerranée, 13545 Aix-En-Provence, France.

meule@cerege.fr

3. Institut des plages GLADYS, Univ. Montpellier, Le Grau-du-Roi, France.

4. P2A Développement, 87 avenue Ferdinand de Lesseps, 34 110 Frontignan, France.

jouvenel@p2adev.com

Résumé :

Cette étude évalue la dissipation de la houle engendrée par un réseau de structures biomimétiques artificielles souples. Les structures sont pensées comme des solutions de contrôle de l'hydrodynamisme et indirectement du transport sédimentaire. Les structures biomimétiques sont généralement de formes complexes et la physique de leur effet dissipatif sur les vagues n'est pas directement intégrable dans les modèles numériques existants. Des modèles analytiques décrivant la dissipation de la houle présents dans la littérature scientifique sont testés sur le dispositif considéré. Ces formulations se basent sur l'hypothèse selon laquelle la structure est représentée par un ensemble d'éléments cylindriques rigides. Pour quantifier la dissipation réelle induite par cette solution, une campagne de mesure a été effectuée en juillet 2021 à Palavas-Les-Flots (Hérault, France). Le réseau déployé comprenait 16 structures souples réparties sur une surface totale de 16 m². Pour tous les forçages de houle enregistrés, l'analyse des données montre que la dissipation moyenne mesurée est de 12,1%. Pour des conditions de forçage similaires, la valeur de dissipation moyenne obtenue à partir des différentes formulations théoriques est de l'ordre de 1,5%. Ce premier résultat montre que les modèles analytiques existants sous-estiment l'atténuation de la houle au-dessus du réseau de structures souples et sont totalement inadaptés. Il est donc envisagé de développer des formulations analytiques plus adaptées à la solution de protection étudiée pour permettre sa meilleure prise en compte dans les modèles numériques traditionnels.

Mots-clés :

Biomimétique, Modèle numérique, Dissipation, Énergie.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

1. Introduction

Les structures lourdes (digues, épis) traditionnellement utilisées en génie côtier sont aujourd'hui reconnues pour avoir un impact négatif sur l'environnement et présentent une faible longévité face au changement climatique (SUTTON-GRIER *et al.*, 2015). Les solutions basées sur la nature sont une première alternative. Elles ont pour objectifs de protéger, gérer et restaurer les écosystèmes, tout en offrant des services bénéfiques à l'homme et à la biodiversité (COHEN-SCHACHAM *et al.*, 2016). Cependant, il peut être difficile de les mettre en œuvre dans des zones fortement urbanisées où les écosystèmes sensibles (herbiers, mangroves, dunes) sont très exposés. Une autre alternative est de mettre en œuvre des solutions biomimétiques; dans le cas qui nous intéresse, ce terme fait référence au fait que la solution créée s'inspire des propriétés physiques et de la capacité des structures naturelles à contrôler l'hydrodynamique. Mais la complexité structurelle (géométrie, tortuosité, flexibilité, dynamique en temps) de ce type de solutions reposant souvent sur des matériaux mous n'est pas facilement intégrable ni dans les modèles numériques existants ni dans des lois analytiques décrivant précisément leur effet.

La végétation aquatique contribue à la protection des côtes en atténuant la houle incidente et les courants, sans les aspects négatifs des structures lourdes (ZHU *et al.*, 2022). Elle se développe sous de nombreuses formes plus ou moins complexes, du rigide (mangrove) au flexible (herbier) (MULLARNEY & HENDERSON, 2018). L'atténuation de la houle par la végétation aquatique a été étudiée en laboratoire (KOBAYASHI *et al.*, 1993) et sur le terrain (BRADLEY & HOUSER, 2009). Les premiers modèles analytiques (DALRYMPLE *et al.*, 1984 ; KOBAYASHI *et al.*, 1993) ont représenté la végétation comme des cylindres rigides. Afin d'incorporer les effets du mouvement, diverses méthodes ont été employées comme l'utilisation d'un coefficient de traînée global défini expérimentalement (MENDEZ & LOSADA, 2004). Une autre stratégie est l'emploi d'une longueur effective l_e (LUHAR & NEPF, 2016) représentant la longueur que devrait avoir un cylindre rigide pour dissiper la même quantité d'énergie qu'un cylindre flexible.

Cette étude a pour objectif de quantifier l'impact d'une solution construite à partir de matériaux souples sur la dissipation de la houle. La démarche repose sur des mesures in-situ qui sont comparées aux résultats des modèles analytiques présents dans la littérature scientifique. Les modèles testés se basent sur l'hypothèse selon laquelle la houle est dissipée par des structures cylindriques rigides. Cette première approche permettra d'évaluer la pertinence de cette hypothèse sur la solution étudiée.

2. Méthode

2.1 Théorie

Tous les modèles de dissipation de houle au-dessus de la végétation aquatique se basent sur la théorie développée par DALRYMPLE *et al.*, (1984). La dissipation est définie à partir de l'équation de conservation de l'énergie de la houle en théorie linéaire. En

supposant que la houle est uniquement dissipée par des cylindres verticaux rigides, l'évolution de l'énergie le long de l'axe x (horizontal dans l'axe de propagation des vagues) se met sous la forme :

$$\frac{\partial E c_g}{\partial x} = -\epsilon_v \quad (1)$$

où $E = \frac{1}{8} \rho g H_s^2$ est la densité d'énergie de la houle, ρ la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur et H_s la hauteur significative de la houle. $c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$ est la vitesse de groupe, où $c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}$ est la célérité de la houle, k le nombre d'onde et h la profondeur. Le taux de dissipation par unité de surface horizontale moyennée sur une période de houle ϵ_v est défini par :

$$\epsilon_v = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{z=0}^{l_s} F_D u dz dt \quad (2)$$

où $F_D = \frac{1}{2} \rho D C_D |u|u$ est la force de traînée, D le diamètre de la structure, C_D le coefficient de traînée et u la vitesse horizontale. T est la période de la houle et l_s est la longueur de la structure. En supposant que la profondeur reste constante, c_g est constante. En combinant l'équation (1) et (2), la solution de l'équation différentielle résultante peut se mettre sous la forme :

$$\frac{H_s}{H_{s0}} = \frac{1}{1 + K_D H_0 x} \quad (3)$$

où H_{s0} est la hauteur significative en $x = 0$ et K_D est le coefficient d'atténuation de la houle. La forme de l'équation (3) dépend des hypothèses physiques posées. Ici, on considère un problème à fond constant, dans le cadre de la théorie linéaire, pour une houle régulière. Dans ce contexte, le tableau 1 reprend la forme du coefficient K_D selon qu'on base la caractérisation des cylindres sur la densité, l'espacement et/ou d'autres caractéristiques géométriques. Ces différents coefficients sont testés sur les mesures in-situ dans la section résultats et discussion.

Tableau 1. Synthèse des coefficients de dissipation utilisés par différents auteurs. b est l'espace entre 2 structures, N le nombre de structures par unité de surface, b_v l'aire d'une structure par unité de hauteur et β est un coefficient géométrique défini dans LOWE et al., (2005).

Auteurs	Coefficient K_D	Caractéristique
<i>DALRYMPLE et al., 1984</i>	$\frac{4}{9\pi} C_D k \frac{D}{b^2} \frac{\sinh^3(kl_s) + 3\sinh(kl_s)}{\sinh(kh)[\sinh(2kh) + 2kh]}$	<i>Espacement</i>
<i>MENDEZ & LOSADA, 2004</i>	$\frac{4}{9\pi} C_D k N b_v \frac{\sinh^3(kl_s) + 3\sinh(kl_s)}{\sinh(kh)[\sinh(2kh) + 2kh]}$	<i>Densité</i>
<i>LEI & NEPF, 2019</i>	$\frac{4}{9\pi} C_D k N b_v \beta \frac{\sinh^3(kl_s) + 3\sinh(kl_s)}{\sinh(kh)[\sinh(2kh) + 2kh]}$	<i>Coefficient géométrique (β)</i>

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

2.2 Campagne de mesures et caractérisation de la structure souple

La campagne de mesure a été menée entre juillet et août 2021 à Palavas-les-Flots sur la façade méditerranéenne du Sud de la France. Trois capteurs de pression (RBR) ont été déployés avec une fréquence d'échantillonnage continue de 4Hz. Les capteurs ont été positionnés en amont (RBR_C), au milieu (RBR_B) et en aval (RBR_A) d'un réseau de 16 structures espacées de 1 m formant un carré de 4x4 m. À cause d'un problème technique, les RBR_A et RBR_C ont cessé de fonctionner dans la nuit du 3 juillet. La figure 1 représente la zone de plantation de ces structures par rapport à l'embouchure du fleuve Lez. Le capteur amont était distant de 3,1 m du capteur situé au centre des structures, le capteur aval lui-même distant de 3,8 m de ce dernier. La structure étudiée imite la géométrie du varech grâce à un agencement complexe de cordages et est ancrée dans le sable grâce à une lance étroite propulsant de l'eau à forte pression. Chaque structure a un diamètre total de 80 cm. Elles sont maintenues en position verticale dans la colonne d'eau grâce à un flotteur. La hauteur totale des structures est d'environ 2,5 m. La profondeur d'eau entre les points de mesure est constante et égale à 2,7 m.

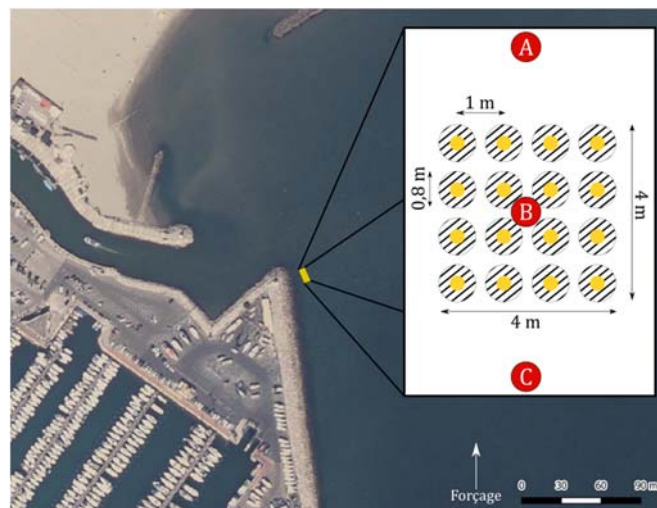


Figure 1. Schéma de la zone d'instrumentation de Palavas-les-Flots. Les points A, B et C matérialisent les capteurs de pression.

Tableau 2. Synthèse des informations liées aux caractéristiques de la structure.

	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
Hauteur (m)	l_s	2,5
Diamètre (m)	D	0,8
Espacement (m)	b	1
Densité (nbr/m ²)	N	1
Profondeur (m)	h	2,7
Surface par unité de hauteur d'une structure perpendiculaire au sens de l'écoulement (m)	b_v	0,8

2.3 Analyse des données

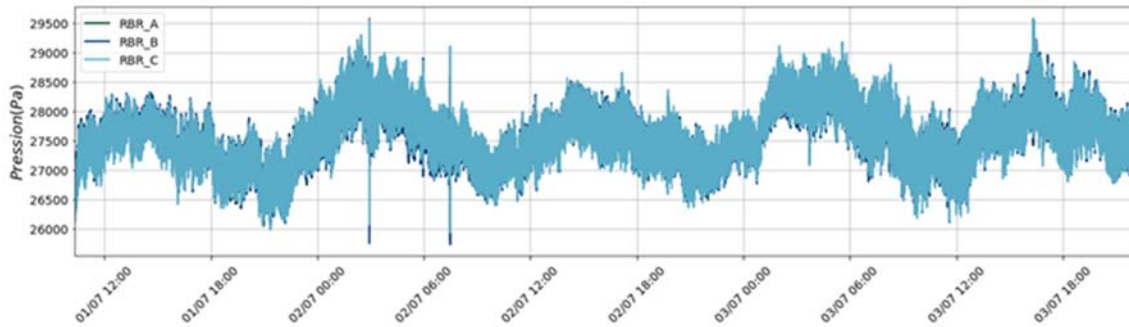


Figure 2. Données de pression enregistrées pour chaque RBR.

Les mesures de pression ont d'abord été corrigées en retirant la pression atmosphérique enregistrée à la station météorologique de Montpellier puis toutes alignées comme si chaque mesure avait été effectuée à la profondeur moyenne du RBR_C (figure 2). Chaque signal est coupé en intervalles de 20 min avec un recouvrement de 50%. Une analyse spectrale par transformée de Fourier discrète est appliquée sur chacun des intervalles. L'effet de dissipation des vagues avec la profondeur sur le spectre de densité d'énergie $E(f)$ obtenu est corrigé en redressant le signal de pression avec la théorie linéaire. La fréquence de coupure à partir de laquelle les oscillations du plan d'eau ne sont plus considérées est posée à 0,3 Hz. Elle correspond à la fréquence au-delà de laquelle le signal de hauteur d'eau corrigé par théorie linéaire et celui calculé en faisant une hypothèse hydrostatique pure divergent de manière significative. La hauteur significative H_s et la période moyenne de la houle T_{moy} sur chacun des intervalles sont calculées à partir des équations suivantes :

$$H_s = 4 \sqrt{\int_0^{f=0,4Hz} E(f) df} \quad (4)$$

$$T_{moy} = \sqrt{\frac{\int_0^{f=0,4Hz} E(f) df}{\int_0^{f=0,4Hz} E(f) f^2 df}} \quad (5)$$

3. Résultats et discussions

3.1 Caractérisations des conditions incidentes

Les données hydrodynamiques du centre d'archivage national des données de houle in-situ (CANDHIS, <https://candhis.cerema.fr/>) ont été utilisées pour caractériser le forçage au large. Les hauteurs significatives et la période moyenne des houlographes de Sète et de l'Espiguette ont été traitées. Les données sont enregistrées en continu à une fréquence d'échantillonnage de 30 min. Sur la période de déploiement, le H_s moyen enregistré à l'Espiguette est de 0,27 m pour une période moyenne de 3,13 s. À Sète, le H_s est de 0,22 m pour une période moyenne de 3,12 s. Le RBR C amont enregistre un H_s moyen de 0,04

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

m et une période moyenne de 5,4 s. Sur la période d'étude, la houle provenait du Sud et du Sud-Sud-Ouest. La présence de la digue de Palavas-les-Flots et son orientation (Nord-Sud) explique la forte réduction des conditions de houle au large devant la structure étudiée.

3.2 Dissipation de la houle sur le transect étudié

L'analyse des données montre que la dissipation moyenne le long du transect étudié (7 m) est de 12,1%. Une diminution moyenne de 6,1% de la hauteur significative est mesurée au centre du réseau, au niveau du RBR_B (figure 3). Pour pouvoir comparer la dissipation moyenne mesurée à la dissipation moyenne théorique de chaque modèle, le coefficient de traînée C_D doit être fixé. Comme la structure est supposée cylindrique rigide, la figure n°11 de KEULEGAN & CARPENTER (1958) est utilisée pour fixer cette valeur. Cette figure représente la valeur du coefficient de traînée en fonction du nombre de Keulegan-Carpenter $KC = uT_{moy}/D$. Durant la période de déploiement, le KC moyen est de 0,21. Le coefficient de traînée est posé à 1 (et une variation de l'ordre de 30 % sur cette valeur ne change pas fondamentalement l'interprétation qui suit). Après calcul, les modèles théoriques du Tableau 1 donnent une dissipation moyenne de 1,5%. D'après la littérature (VAN VEELLEN *et al.*, 2021), on s'attend à ce que la dissipation par cylindre rigide (calculée) soit plus forte que celle sur structure molles (mesurée). Or, on observe l'inverse, avec un rapport de 1 à 10 entre les dissipations calculées et mesurées. Cette différence résulte d'une mauvaise description des structures déployées dans les modèles analytiques. Par exemple, la structure modélisée est vue comme un cylindre unique par unité de surface ($N=1$). Or, la géométrie de la structure déployée (cordelettes mises de part et d'autre d'un cordage central maintenu à la verticale par un flotteur) pourrait être mieux décrit par un nombre n de petites cordes verticales ($N \gg 1$).

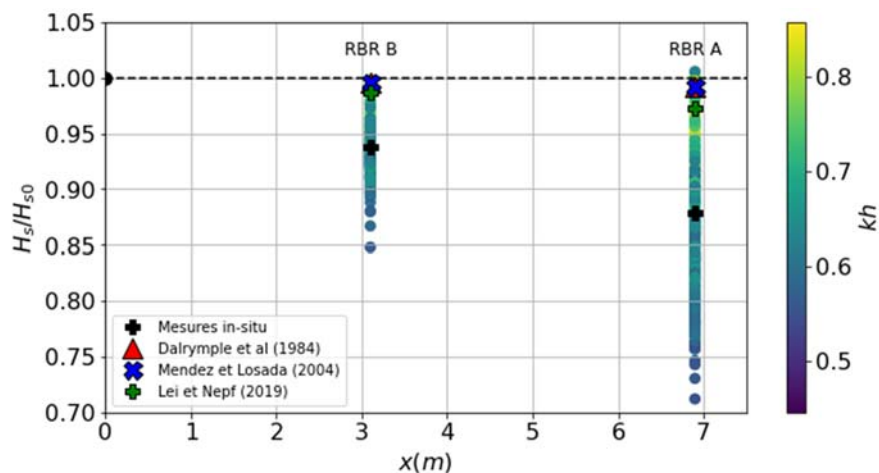


Figure 3. Taux de dissipation obtenus en fonction de kh avec mise en évidence des moyennes des taux de dissipation obtenus.

La variation de l'effet dissipatif du réseau de structures selon le régime de houle n'est pas connue. On utilise la valeur kh pour discriminer les conditions de vagues en faible profondeur ($kh < 0,3$), en eau profonde ($kh > 3,1$) ou en eau intermédiaire. La figure 3 montre le taux de dissipation associé aux valeurs kh observées pour chaque burst. Les résultats révèlent une corrélation au premier ordre entre le taux de dissipation instantané et le caractère faible profondeur relatif des vagues. En outre, ils montrent que la solution déployée est toujours exposée à des conditions de profondeur intermédiaire pour de faibles forçages énergétiques.

4. Conclusion

Cette étude évalue la dissipation de la houle engendrée par un réseau de solutions souples basées sur la nature. Les mesures in-situ collectées à Palavas-les-Flots au mois de juillet 2021 ont été comparées à différentes formules du coefficient de dissipation K_D présentes dans la littérature scientifique. La dissipation moyenne mesurée est de 12,1%. Les différentes valeurs théoriques obtenues sous-estiment grandement l'impact de cette solution sur la dissipation de la houle, malgré l'hypothèse que les structures sont rigides et cylindriques et donc supposées augmenter la dissipation au-dessus de structures souples comme la végétation aquatique. D'autre part aucune certitude n'existe sur la capacité des structures à atténuer des houles énergétiques puisque les conditions expérimentales in-situ testées ne l'ont pas permis. Les premiers résultats de cette étude mettent en lumière l'importance de définir des formulations spécifiques pour décrire les effets dissipatifs induits par ces nouvelles solutions souples. D'autre part, de nouvelles mesures sont prévues au cours de l'année 2022 sur une plus grande période afin d'obtenir des données sur des conditions énergétiques plus variées.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent à l'entreprise P2A Développement qui nous permet d'instrumenter leur solution en cours de développement dans le cadre de différents projets régionaux, notamment le projet Avenir Littoral 2021. Nous remercions également le réseau GLADYS (www.gladys-littoral.org) pour les équipements, workshop et les conditions de travail offertes par ce réseau.

5. Références bibliographiques

- BRADLEY K., HOUSER C. (2009). *Relative velocity of seagrass blades : Implication for wave attenuation in low-energy environments*. Journal of Geophysical Research : Earth Surface, Vol. 114. <https://doi.org/10.1029/2007JF000951>
- COHEN-SCHACHAM E., WALTERS G., JANZEN C., MAGINNIS S. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN: Gland, Switzerland, Vol. 97, pp. 2016-036. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

- DALRYMPLE R.A., KIRBY J.T., HWANG P.A. (1984). *Wave diffraction due to areas of energy dissipation*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 110(1), pp. 67-79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1984\)110:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1984)110:1(67))
- KEULEGAN G.H., CARPENTER L.H. (1958). *Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid*. Journal of research of the National Bureau of Standards, Vol. 60(5), pp. 423-440. <https://doi.org/10.1017/S0022112085001562>
- KOBAYASHI N., RAICHLER A. W., ASANO T. (1993). *Wave attenuation by vegetation*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 119(1), pp. 30-48. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1993\)119:1\(30\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:1(30))
- LEI J., NEPF H. (2019). *Wave damping by flexible vegetation: Connecting individual blade dynamics to the meadow scale*. Coastal Engineering, vol. 147, pp. 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.01.008>
- LOWE R. J., KOSEFF J. R., MONISMITH S. G. (2005). *Oscillatory flow through submerged canopies: I. Velocity structure*. Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 110(C10). <https://doi.org/10.1029/2004JC002788>
- LUHAR M., NEPF H. (2016). *Wave-induced dynamics of flexible blades*. Journal of Fluids and Structures, Vol. 61, pp. 20-41. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.11.007>
- MENDEZ F.J., LOSADA I.J. (2004). *An empirical model to estimate the propagation of random breaking and non-breaking waves over vegetation fields*. Coastal Engineering, Vol. 51(2), pp. 103-118. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.11.003>
- MULLARNEY J., HENDERSON S. (2018). *Flows within marine vegetation canopies*. Advanced in Coastal Hydraulics, World Scientific, pp. 1-46. https://doi.org/10.1142/9789813231283_0001
- SUTTON-GRIER A.E., WOWK K., BAMFORD H. (2015). *Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems*. Environmental Science & Policy, Vol. 51, pp. 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006>
- VAN VEELLEN T. J., KARUNARATHNA H., REEVE D. E. (2021). *Modeling wave attenuation by quasi-flexible coastal vegetation*, Coastal Engineering, vol. 164, pp. 103820, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103820>
- ZHU L., HUGUENARD K., FREDRIKSSON D.W., LEI J. (2022). *Wave attenuation by flexible vegetation (and suspended kelp) with blade motion: Analytical solutions*. Advanced in Water Resources, Vol. 162, pp. 104148. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104148>