



## Etude en laboratoire de l'hydrodynamique des vagues dans la zone de déferlement en présence de macro-rugosités

Solène DEALBERA <sup>1</sup>, Damien SOUS <sup>1,2</sup>, Héroïse MICHAUD <sup>3</sup>,  
Denis MORICHON <sup>1</sup>

1. Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S-UPPA, SIAME, Anglet, France.  
*solene.dealbera@univ-pau.fr, denis.morichon@univ-pau.fr*
2. Université de Toulon, AMU, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM AMU 110, Toulon, France.  
*damien.sous@univ-tln.fr*
3. Shom, Antenne de Toulouse, BP 45017, 31032 Toulouse, France.  
*heloise.michaud@shom.fr*

### Résumé :

L'étude, la compréhension et la modélisation des processus physiques marins sont des facteurs-clés pour anticiper les risques de submersion du littoral. L'hydrodynamique des vagues n'est pas encore complètement, appréhendée et modélisée sur les fonds rugueux et/ou à forte pente, notamment l'effet des macro-rugosités sur la dissipation par frottement. Une série d'expériences en canal à houle a été menée afin d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques et de connecter l'hydrodynamique à la bathymétrie du fond en pente en comparant un fond lisse de référence et un fond présentant des macro-rugosités. Après avoir extrait la composante incidente de la houle à partir des données d'élévation de la surface libre le long du profil de plage, la dissipation d'énergie est estimée à partir du gradient de flux d'énergie. Sur le fond lisse de référence, les paramètres d'un modèle de déferlement classique ont été optimisés pour chaque cas de houle irrégulière et réutilisés pour estimer la dissipation par déferlement sur le fond rugueux. Ceci nous permet de séparer les contributions du déferlement et du frottement en utilisant la rugosité hydraulique comme paramètre de calibrage sur les données expérimentales. Les résultats obtenus nous permettent de discuter le lien entre rugosité hydraulique et géométrie du fond, ainsi que la validité du modèle de frottement à des rugosités plus importantes.

### Mots-clés :

Hydrodynamique, Vague, Zone de déferlement, Macro-rugosité.

# Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

## 1. Introduction

Dans un contexte de pression anthropique croissante sur les littoraux, les modèles de prévision des vagues sont de plus en plus utilisés pour prévenir les risques d'érosion et de submersion. Historiquement, les études se sont surtout focalisées sur les plages sableuses, généralement sur des fonds lisse et/ou à faible pente, sur lesquelles les modèles donnent globalement de bons résultats en accord avec les observations. Pour mieux prendre en compte la diversité des littoraux, un effort de recherche a été engagé ces dernières années pour documenter les plateformes rocheuses (POATE *et al.*, 2018 ; GON *et al.*, 2020) ou les récifs coralliens (LOWE *et al.*, 2005a ; MONISMITH *et al.*, 2015), complétées par des expériences en laboratoire s'intéressant uniquement à l'effet du frottement des platiers récifaux sur l'hydrodynamique des vagues, avec des structures géométriques idéalisées (LOWE *et al.*, 2005b ; BUCKLEY *et al.*, 2016). Dans ces cas, les modèles de frottement connus sont utilisés dans leurs domaines de validité, i.e. avec des rugosités occupant une petite partie de la colonne d'eau ou des structures végétales émergentes. Pour l'instant, ils n'ont pas encore été appliqués sur des fonds à forte pente présentant des structures émergentes influençant l'écoulement au-delà de la couche limite du fond, que l'on désigne ici sous le terme de macro-rugosités. Dans cette catégorie, les îles bretonnes de Sein et Banneg font l'objet d'une étude centrée sur l'effet des falaises et des amas de blocs rocheux sur les processus hydrodynamiques (FILIPOT *et al.*, 2013 ; DODET *et al.*, 2018). L'intérêt d'une étude expérimentale en laboratoire avec un canal à houle nous permet de contrôler les paramètres du milieu (types de vagues et configuration du fond) et de discriminer les différents effets engendrés par le passage des vagues déferlantes sur un fond rugueux (levage, dissipation, et éventuellement réflexion). Dans un premier temps, on se focalise sur une analyse de la transformation des vagues en présence de macro-rugosités modélisées par des blocs émergents dans la zone de déferlement sur le fond en pente du canal. Une fois la dissipation d'énergie calculée et la dissipation par déferlement extraite, on s'intéresse à la paramétrisation d'un modèle de frottement proposé par PEQUIGNET *et al.* (2011), valable sur les petites rugosités n'influençant pas l'écoulement au-dessus de la couche limite des vagues, ce qui nous permet d'en déduire une rugosité hydraulique optimisée et de discuter la validité du modèle de frottement aux macro-rugosités.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1 Mise en place des expériences

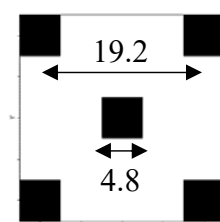
Les expériences ont été réalisées dans le canal CASH de l'école d'ingénieurs Seatech à Toulon, long de 6 m, large de 0.5 m et profond de 0.22 m, dans lequel une pente linéaire de 1/20 recouverte de plaques en inox a été installée. Un batteur hydraulique permet de simuler des houles irrégulières sur le fond plat avant la pente, avec un système absorbant à l'arrière. On part sur des houles irrégulières dont on fait varier la hauteur significative

et la période pic à partir d'un spectre de JONSWAP. Sept cas sont retenus et durent chacun 5 minutes, présentés dans le tableau 1 ci-dessous.

*Tableau 1. Synthèse des caractéristiques des cas de houle.*

<i>Cas de houle</i>	<i>Période pic (s)</i>	<i>Hauteur significative (m)</i>
W1	0.8	0.060
W2	1.0	0.046
W3	1.0	0.065
W4	1.0	0.075
W5	1.2	0.047
W6	1.2	0.061
W7	1.2	0.071

La configuration du fond la plus simple est réalisée sur les plaques en inox, qui modélise un fond lisse en pente et sert de référence pour la suite. 26 autres types de fonds sont créés à partir de blocs Lego sur ces plaques en faisant varier la taille et l'espace des blocs de rugosité. Dans cette étude, on s'intéresse à la disposition en « quinconce » (voir figure 1) des blocs qui permet d'obtenir une répartition isotrope longitudinale et transversale. Les blocs sont pris cubiques avec une hauteur suffisamment importante pour qu'ils émergent de l'eau dans la zone de déferlement, modélisant ainsi les macro-rugosités. La hauteur retenue est 4.8cm et les blocs sont espacés de 19.2cm. Cette configuration retenue est désignée par QC4cm8 dans la suite.



*Figure 1. Schéma de la disposition en quinconce des blocs de rugosité.*

Des sondes résistives plongées dans le canal permettent de mesurer l'élévation de la surface libre. Les sondes sont déployées sur trois alignements : un alignement central dans l'axe du canal où sont réparties 20 sondes tous les 17cm environ et deux alignements secondaires, parallèles au premier et placés à 12.5 cm de part et d'autre de celui-ci, avec une sonde sur 4, qui permet de compléter les mesures et de supprimer les éventuels effets d'ombre géométrique (voir figure 2). Au niveau de la zone de jet de rive, une sonde « runup » est mise en place. La fréquence d'acquisition est de 100Hz. Deux courantomètres Vectrino complètent l'instrumentation.

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

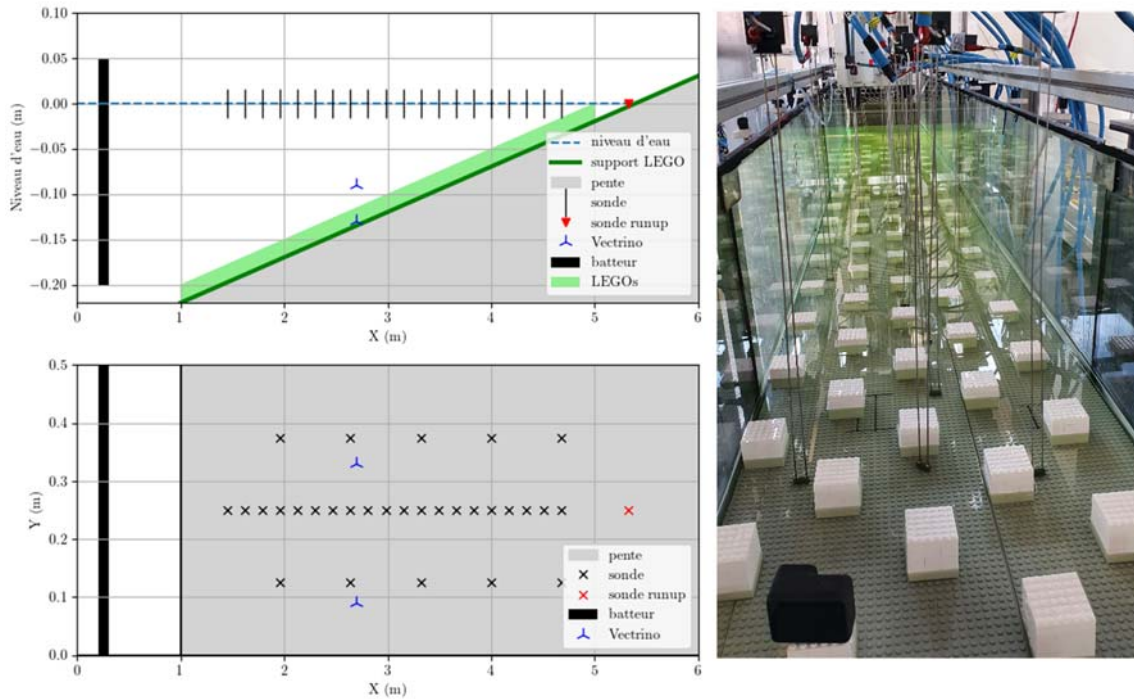


Figure 2. Schéma et photographie de l'instrumentation dans le canal à houle.

### 2.2 Extraction de la dissipation

A partir des signaux d'élévation de surface libre, les amplitudes spectrales sont calculées et la vitesse de groupe associée à la période pic du signal est obtenue avec la relation de dispersion. La réflexion est prise en compte en appliquant de la méthode à 3 sondes (DREVARD *et al.*, 2009) pour séparer composantes incidente et réfléchie, avec une extension permettant d'intégrer les effets de la dissipation. On en déduit la dissipation totale incidente mesurée  $\bar{\varepsilon}_t$  du signal sur tout le profil avec le gradient du flux d'énergie appliqué à la théorie linéaire :

$$\bar{\varepsilon}_t = \frac{\rho g}{8} \frac{\partial H_{rms}^2 C_g}{\partial x} \quad (1)$$

où :  $\rho$  est la masse volumique de l'eau,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $H_{rms}$  la hauteur moyenne quadratique des vagues incidentes,  $x$  la coordonnée le long du profil,  $C_g$  la vitesse de groupe des vagues définie par la théorie linéaire :

$$C_g = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kD}{\sinh(2kD)} \right) \frac{\omega}{k} \quad (2)$$

où  $k$  est le nombre d'onde associé à la période pic des vagues,  $D$  est la profondeur d'eau et  $\omega$  la fréquence angulaire associée à la période pic.

Dans le cas lisse de référence, on suppose que cette dissipation est uniquement liée au déferlement tandis que dans le cas des macro-rugosités, on suppose que la dissipation est la superposition de la contribution du déferlement et du frottement.

### 2.3 Modélisation de la dissipation par déferlement

La dissipation par déferlement  $\bar{\epsilon}_b$  est modélisée par le modèle de THORNTON & GUZA, (1983) (ci-nommé TG83) que l'on paramètre sur le fond lisse de référence. On travaille avec l'approche intégrée donnée par l'équation 24 de TG83 :

$$\bar{\epsilon}_b = \frac{B^3}{4} \rho g \frac{f_p}{D} \int_0^\infty P(H) \left( \frac{H_{rms}}{\gamma D} \right)^n \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{H}{\gamma D} \right)^2 \right) \right] H^3 dH \quad (3)$$

où  $B$  est un coefficient de déferlement,  $f_p$  la fréquence pic des vagues,  $P(H)$  la fonction de densité de la probabilité de la hauteur des vagues,  $\gamma$  un paramètre de déferlement et  $n$  une variable que l'on prendra égale à 2 comme suggéré dans TG83.

Pour modéliser  $P(H)$ , on utilise une distribution de Rayleigh modifiée pour prendre en compte les statistiques observées dans notre canal, avec une probabilité plus importante de hautes vagues dans la zone de déferlement. Le premier paramètre ajustable  $\gamma$  est estimé à partir de la relation linéaire en zone interne de déferlement :  $H_{rms} \approx \gamma D$ . Le deuxième paramètre ajustable  $B$  est optimisé en minimisant le RMSE et en maximisant l'indice de Willmott par comparaison entre la dissipation mesurée et la dissipation modélisée. Ces deux paramètres sont estimés pour chaque cas de houle et réutilisés sur le fond rugueux QC4cm8 pour extraire la dissipation par déferlement.

### 2.4 Modélisation de la dissipation par frottement

Sur le fond rugueux QC4cm8, on utilise la version intégrée du modèle de MADSEN (1994) proposée par PEQUIGNET *et al.*, 2011 (ci-nommé PBMB11) donnée par l'équation 4 :

$$\bar{\epsilon}_f = \frac{\rho}{4\sqrt{\pi}} \exp \left( a_1 \left( \frac{A_o}{k_r} \right)^{a_2} + a_3 \right) \left[ \frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} \sinh(kD)} \right]^3 \quad (4)$$

où  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  sont des constantes empiriques adimensionnelles prises égales à 5.5, -0.2 et 6.3 (NIELSEN, 1992),  $k_r$  la rugosité hydraulique et  $A_o$  l'excursion orbitale des vagues au fond telle que  $A_o = u_o/\omega$  avec  $u_o$  la vitesse orbitale des vagues au fond donnée par la théorie linéaire :

$$u_o = \frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} \sinh(kD)} \quad (5)$$

où  $k$  est le nombre d'onde associé à  $T_{m01}$  la période moyenne des vagues.

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

Pour l'ensemble des cas de houle, on détermine une unique valeur du paramètre de rugosité hydraulique  $k_r$  par optimisation de la superposition de la dissipation par déferlement et de la dissipation par frottement  $\bar{\epsilon}_b + \bar{\epsilon}_f(k_r)$  sur la dissipation totale mesurée  $\bar{\epsilon}_t$  (voir équation 1). La hauteur  $H_{rms}$  des vagues est alors reconstruite le long du profil à partir de la superposition des modèles de déferlement et de frottement.

### 3. Résultats

#### 3.1 Transformation des vagues

Sur le fond lisse de référence, on n'observe que très peu de levage avant le point de déferlement qui se situe 1 à 2 m après le début de la pente selon les cas de houle. Sur la première partie du profil, la hauteur  $H_{rms}$  reste constante, jusqu'au point de déferlement où il commence à diminuer, montrant la transition entre des eaux intermédiaires et peu profondes (voir figure 3). Plus la hauteur  $H_{rms}$  au large est importante, plus le point de déferlement se rapproche du batteur comme le montre la figure 3. On remarque que la pente de la hauteur  $H_{rms}$  dans la zone interne de déferlement varie d'un cas de houle à l'autre et devient plus importante avec la hauteur  $H_{rms}$  au large.

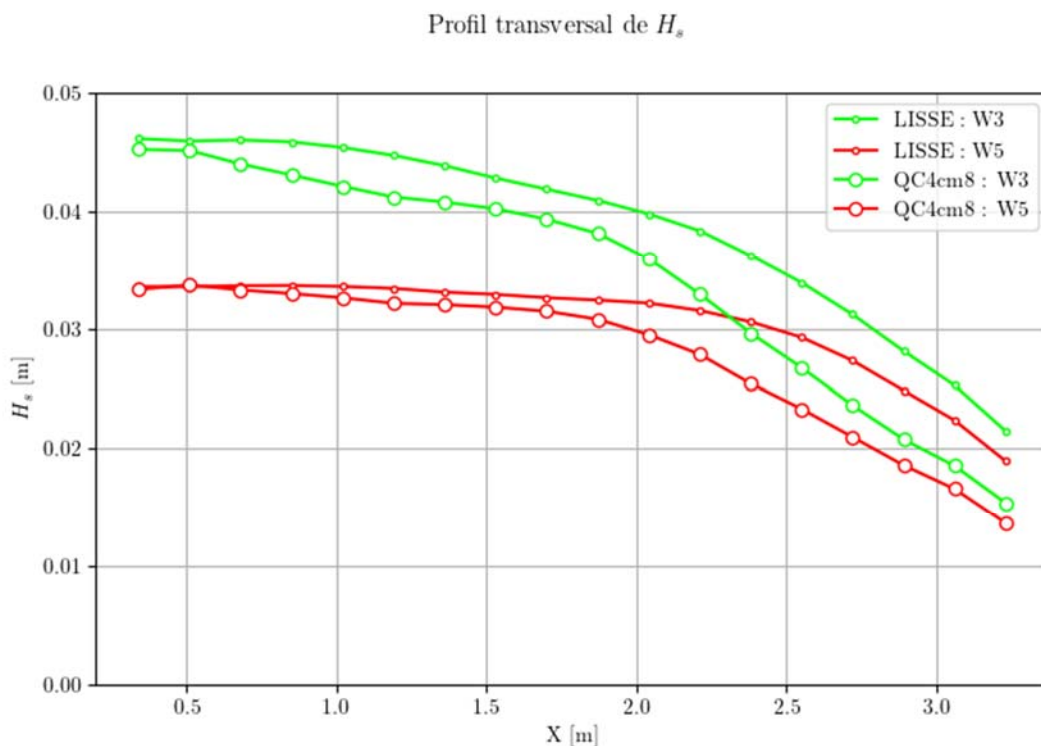


Figure 3. Profil transversal de la hauteur moyenne quadratique des vagues pour deux cas de houle : en vert W3, en rouge W5, pour le cas LISSE (point) et le cas QC4cm8 (cercle).

Sur le fond macro-rugueux QC4cm8, on observe un décalage du point d'inflexion vers le large par rapport au cas lisse, bien que ce soit très faiblement marqué pour certains cas de houle, par exemple W3 comme montré figure 3. La hauteur des vagues sur le rivage est donc plus faible en présence de macro-rugosités.

### 3.2 Paramétrage du modèle de déferlement

A partir de la pente de la hauteur  $H_{rms}$  dans la zone interne de déferlement, on en déduit différentes valeurs de  $\gamma$  pour chaque cas de houle, variant de 0.26 pour W2 à 0.45 pour W7. Les valeurs de  $B$  sont comprises entre 0.63 pour W2 et 0.90 pour W7.

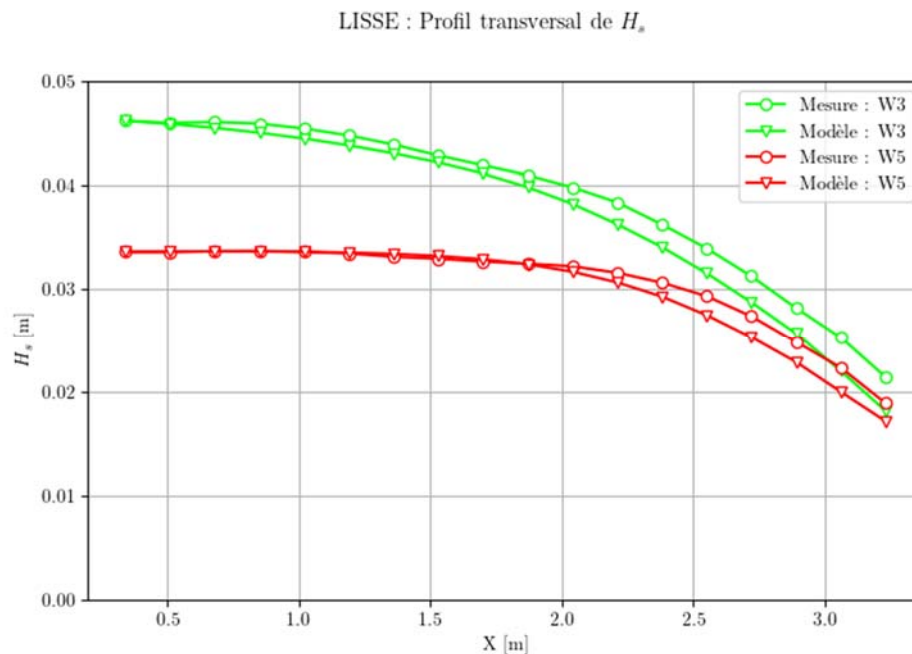


Figure 4. Profil transversal de la hauteur moyenne quadratique des vagues sur fond lisse pour deux cas de houle : en vert W3, en rouge W5, en comparant les valeurs mesurées (cercles) et estimées à partir du modèle de déferlement (triangles).

Le modèle de déferlement TG83 donne une reconstruction de la hauteur  $H_{rms}$  cohérente avec le profil mesuré, bien que la position du point de déferlement soit légèrement décalée vers le large, induisant un déferlement prématuré par rapport aux observations et une plus faible hauteur des vagues au rivage (2 mm environ, voir figure 4). Les performances du modèle varient d'un cas de houle à l'autre, avec un RMSE minimum de 0.001 m pour W6 et maximum de 0.003 m pour W1 et un indice de Willmott maximum de 0.995 pour W7 (meilleure performance) et minimum de 0.968 pour W1 (moins bonne performance).

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

### 3.3 Estimation de la rugosité hydrodynamique

Sur les sept cas de houle retenus, une unique valeur de la rugosité  $k_r$  de PBMB11 est estimée et vaut 4.4cm, ce qui est cohérent avec les ordres de grandeur des macro-rugosités (4.8cm).

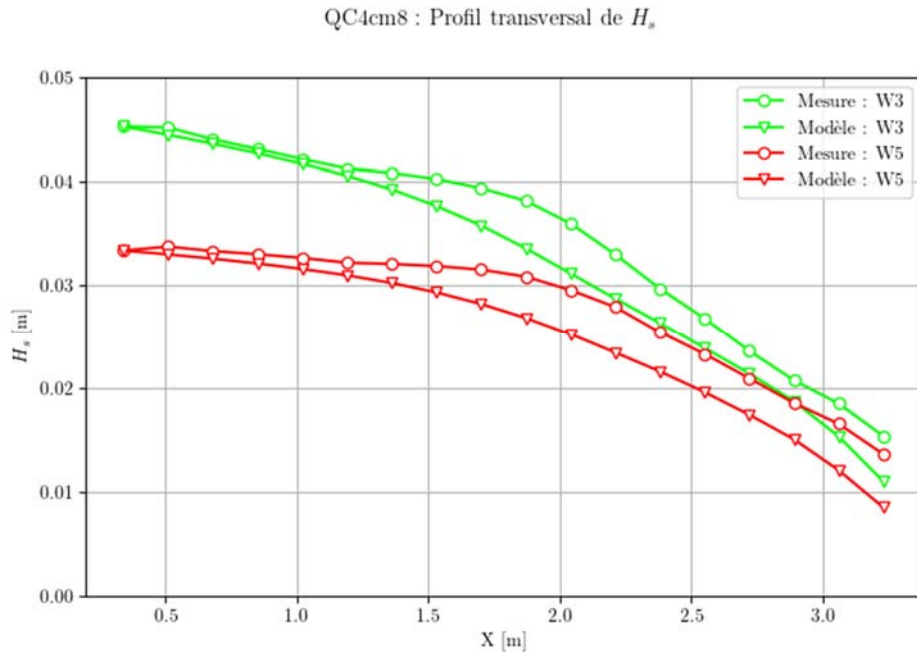


Figure 5. Profil transversal de la hauteur moyenne quadratique des vagues en présence de macro-rugosités pour deux cas de houle : en vert W3, en rouge W5, en comparant les valeurs mesurées (cercles) et estimées à partir de la superposition des modèles de déferlement et de frottement (triangles).

La reconstruction de la hauteur  $H_{rms}$  reproduit assez fidèlement les mesures, bien que la courbe au niveau du point d'inflexion soit plus lissée que dans la réalité et qu'en eau peu profonde, les valeurs soient sous-estimées (voir figure 5). Les performances du modèle varient d'un cas de houle à l'autre, avec un RMSE minimum de 0.002 m pour W4 et maximum de 0.005 m pour W1 et un indice de Willmott maximum de 0.992 pour W4 (meilleure performance) et minimum de 0.849 pour W2 (moins bonne performance). L'hypothèse de la séparation des contributions du déferlement et du frottement semble donner des résultats corrects.

## 4. Conclusions

Les expériences menées dans le canal à houle de Seatech nous permettent d'étudier dans un environnement dont les paramètres sont contrôlés la transformation des vagues sur une large gamme de fonds rugueux. Dans cette première analyse, on s'intéresse à l'influence des macro-rugosités sur la transformation du fond et notamment à la paramétrisation du



modèle de frottement de PBMB11. La valeur de la rugosité hydraulique estimée est cohérente avec les ordres de grandeur des macro-rugosités, ce qui laisse supposer qu'une extension de l'approche frottement mise en place par le modèle peut s'appliquer à des rugosités fortes, au-delà du cadre théorique habituel. La poursuite de l'analyse des résultats permettra de confirmer ces hypothèses.

## 5. Références bibliographiques

- BUCKLEY M., LOWE R., HANSEN J., VAN DONGEREN A. (2016). *Wave setup over a fringing reef with large bottom roughness*. Journal of Physical Oceanography, Vol. 46, pp 2317-2333. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0148.1>
- DODET G., LECKLER F., SOUS D., ARDHIN F., FILIPOT J.F., SUANEZ S. (2018). *Wave runup over steep rocky cliffs*. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 123, pp 7185-7205. <https://doi.org/10.1029/2018JC013967>
- DREVAR D., REY V., FRAUNIE P. (2009). *Partially standing wave measurement in the presence of steady current by use of coincident velocity and/or pressure Data*. Coastal Engineering, Vol. 56, pp 992-1001. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.06.002>
- FILIPOT J.F., ROEBER V., BOUTET M., ODY C., LATHUILIERE C., LOUAZEL S., SCHMITT T., ARDHUIN F., LUSVEN A., OUTRÉ M., et al (2013). *nearshore wave processes in the Iroise Sea: Field measurements and modelling*. Coastal Dynamics, Vol. 11, pp 605-614.
- GON C., MACMAHAN J., THORNTON E., DENNY M. (2020). *wave dissipation by bottom friction on the inner shelf of a rocky shore*. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 125. <https://doi.org/10.1029/2019JC015963>
- LOWE R., FALTER J., BANDET M., PAWLAK G., ATKINSON M., MONISMITH S., KOSEFF J. (2005a). *Spectral wave dissipation over a barrier reef*. Journal of Geophysical Research, Vol. 110, pp C04001. <https://doi.org/10.1029/2004JC002711>
- LOWE R., KOSEFF J., MONISMITH S. (2005b). *oscillatory flow through submerged canopies: 1. Velocity structure*. Journal of Geophysical Research, Vol. 110, pp C10016. <https://doi.org/10.1029/2004JC002788>
- MADSEN O. (1995). *Spectral wave-current bottom boundary layer flows*. 24th International Conference on Coastal Engineering, Kobe, pp 384-98. <https://doi.org/10.1061/9780784400890.030>
- MONISMITH S., ROGERS J., KOWEEK D., DUNBAR R. (2015). *frictional wave dissipation on a remarkably rough reef*. Geophysical Research Letters, Vol. 42, pp 4063-4071. <https://doi.org/10.1002/2015GL063804>
- NIELSEN P. (1992). *Coastal bottom boundary layers and sediment transport*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 4. <https://doi.org/10.1142/1269>
- PEQUIGNET A.C., BECKER J, MERRIFIELD M, BOC S. (2011). *The dissipation of wind wave energy across a fringing reef at Ipan, Guam*. Coral Reefs, Vol. 30, pp 71-82. <http://dx.doi.org/10.1007/s00338-011-0719-5>

## *Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière*

POATE T., MASSELINK G., AUSTIN M., DICKSON M., MCCALL R. (2018). *The role of bed roughness in wave transformation across sloping rock shore platforms*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Vol. 123, pp 97-123. <https://doi.org/10.1002/2017JF004277>

THORNTON E., GUZA R. (1983). *Transformation of wave height distribution*. Journal of Geophysical Research, Vol. 88, pp 5925. <http://dx.doi.org/10.1029/JC088iC10p05925>