



## Etude numérique d'un écoulement à travers un réseau de cylindres

Adrien POUPARDIN <sup>1</sup>, Kilesh JAUNKEYPERSAD <sup>1</sup>, Jena JEONG <sup>1</sup>, Philippe HEINRICH <sup>2</sup>

1. Université Paris-Est, Institute de Recherche, ESTP, 28 Av. du Président Wilson, 94234 Cachan, France.

*apoupardin@estp.fr*

2. Commissariat à l'Energie Atomique, DAM, DIF, Arpajon, 91290, France.

*philippe.heinrich@cea.fr*

### Résumé:

Nous avons testé l'impact de la densité d'un réseau de cylindres sur l'atténuation d'une vague de tsunami en maintenant une porosité du réseau constante.

Le code utilisé considère la méthode des différences finies et les équations, deux dimensions, de Saint-Venant. Il a été développé de manière à traiter les cylindres du réseau comme des obstacles notamment en considérant des vitesses nulles aux interfaces solide/liquide. Des tests de validation sont présentés dans le cadre de cette étude.

Les premiers résultats ont montré qu'une augmentation de la densité du réseau de cylindres pouvait induire une atténuation de 90 % sur la hauteur de run-up et un retard de 0.03 s.

Les phénomènes turbulents ont aussi été caractérisés et semblent jouer un rôle dans cette atténuation.

Ces résultats seront prochainement vérifiés grâce à la réalisation d'essais en laboratoire.

### Mots-clefs :

Tsunamis, Simulation numérique, Réseau de cylindres, Turbulence.

### 1. Introduction

Les tsunamis représentent un risque pour de nombreuses localités situées à des côtes altimétriques basses. En effet, dans ces zones, ils peuvent être responsables d'inondations et de dégâts importants pour de hautes valeurs de run-up correspondant à de grandes profondeurs d'inondation.

Pour se prémunir de ces catastrophes naturelles, il existe différentes solutions parmi lesquelles des solutions basées sur la nature. Parmi ces dernières, les récifs coralliens et les mangroves impactent la propagation des tsunamis en réfléchissant une partie de l'énergie et en en dissipant une seconde partie.

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

Dans le cas des récifs coralliens, les tsunamis sont impactés par la friction basale (ROSMAN & HENCH, 2011 ; KAISER *et al.*, 2011) qui peut être prise en compte dans la simulation à travers l'utilisation de coefficients de Manning ou de trainée.

Les récifs coralliens peuvent aussi être reproduits expérimentalement via un réseau de tiges de porosité contrôlée (FERNANDO *et al.*, 2008). Tout comme il est possible de simuler numériquement l'impact d'une mangrove en intégrant un coefficient de friction dans les équations de conservation de mouvement (MAGDALENA *et al.*, 2021).

Des études traitant de l'impact d'un réseau de cylindres sur la propagation d'une vague ont déjà été traités numériquement via l'utilisation d'un code CFD en trois dimensions (JIANG *et al.*, 2019). Néanmoins, ces approches sont très coûteuses en temps de calcul lorsque l'on cherche à simuler la propagation de tsunamis.

Dans le cadre de cette étude, nous proposons de simuler numériquement l'impact d'un réseau de cylindres sur la propagation d'un tsunami en résolvant les équations de Saint-Venant. Cela permet de simuler le sillage turbulent du réseau apparaissant lors de l'interaction liquide/solide et ainsi de mieux reproduire les différents phénomènes physiques se manifestant lors de cette interaction. Nous ferons notamment varier le diamètre des cylindres pour estimer l'impact de ce paramètre sur la propagation des tsunamis.

### 2. Méthodologie

Les simulations ont été réalisées en considérant le système d'équations de Saint-Venant (1), (2) et (3).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (3)$$

Ce système d'équations est résolu en considérant un schéma numérique d'ordre 2 en espace (les surélévations sont calculées au centre des mailles et les vitesses sur leurs frontières) et, dans un premier temps, d'ordre 1 en temps.

Les résultats numériques seront confrontés à des essais en canal permettant de valider notre modèle.

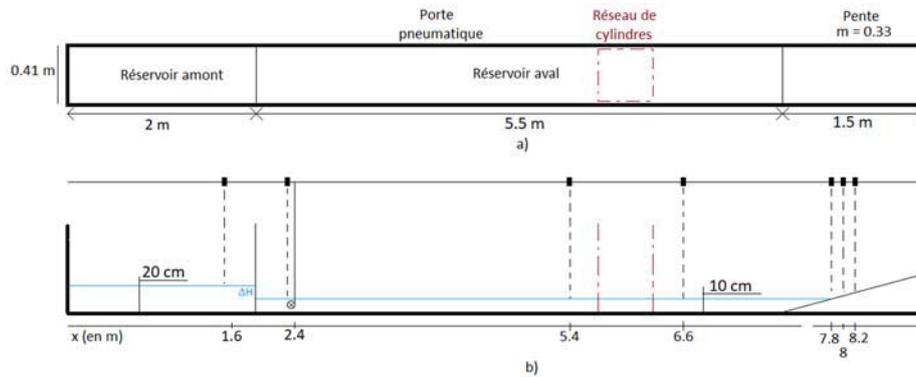


Figure 1. Dispositif expérimental : les jauges synthétiques sont numérotées de 1 à 7 de gauche à droite.

Nous utilisons un système de rupture de barrage pour générer un front d'onde se propageant de l'amont vers l'aval. La porte, permettant de stocker de l'eau dans le compartiment amont, est située à 2 m de l'extrémité aval du canal hydraulique (voir Figure 1). Les profondeurs d'eau amont et aval sont de 20 et 10 cm respectivement, au début de l'essai. Le fond du canal remonte régulièrement selon une pente de  $m = 0.33$  à partir de  $x = 7.5$  m.

Un ensemble de capteurs de niveau d'eau permet de suivre la propagation de la vague de tsunami en différentes positions (voir Figure 1). Un anémomètre permet de suivre la vitesse induite par le passage de la vague à l'initiation.

Les quatre réseaux de cylindres testés sont répartis dans un domaine de  $0.41 \times 0.41$  m<sup>2</sup>. Afin de caractériser les effets turbulents, nous avons considéré une porosité constante de 73%. Ces porosités varient très légèrement lors de l'étape de discrétisation mais ces variations restent inférieures à 0.67%. Les surfaces spécifiques des réseaux de cylindres sont, quant à elles, différentes les unes des autres et augmentent au fur et à mesure que la densité du réseau augmente. Les caractéristiques des quatre cas testés sont listées dans la Table I. La Figure 2 montre une représentation des réseaux de cylindres dans les quatre configurations.

Table 1. Caractéristiques des réseaux de cylindres.

Cas	Résolution du maillage (mm)	Nombre cylindres $N$	Diamètre $D$ (cm)	Surface spécifique (m <sup>2</sup> )	$Re$
1	8	9	8	0.226	32000
2	8	16	6	0.301	24000
3	6	25	4.48	0.377	17920
4	6	36	4	0.452	16000

Les nombres de Reynolds caractéristiques de l'écoulement sont précisés Table I. La vitesse utilisée pour ces calculs ( $u = 0.4$  m/s) est issue des simulations.

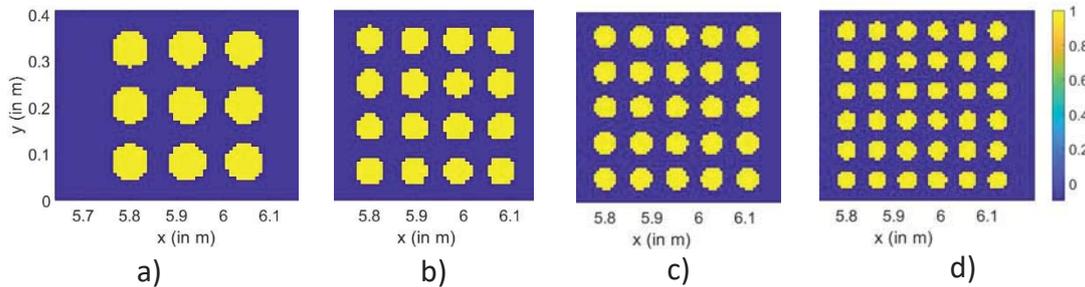


Figure 2. Réseaux de cylindres testés : a) 9 cylindres de 8 cm ; b) 16 cylindres de 6 cm ; c) 25 cylindres de 4.8 cm ; d) 36 cylindres de 4 cm.

Les simulations ont été réalisées en considérant des résolutions de maillage différentes (6 ou 8 mm) pour permettre de simuler l'écoulement entre les cylindres sur un nombre suffisant de mailles.

### 3. Validation du modèle

Avant d'utiliser ce modèle sur notre réseau de cylindres, nous avons effectué plusieurs tests préalables pour vérifier : son axisymétrie, la forme du signal en sortie de barrage, la conservation du volume.

#### 3.1 Test d'axisymétrie

Pour passer le test d'axisymétrie, nous avons considéré la surélévation d'un plan d'eau selon une gaussienne en deux dimensions (4) centrée sur le point de coordonnées (0.25 m 0.25 m). Le domaine considéré pour passer cette simulation est de forme carrée et de taille (0.5 m 0.5 m) et la profondeur  $d = 0.0015$  m est constante.

$$\eta(x, y, t = 0) = 0,0005 \exp(1000 [-(x - 0,25)^2 - (y - 0,25)^2]) \quad (4)$$

4 jauges ont été positionnées à une distance de 5.2 cm de la source, dans quatre directions (45°, 135°, 225° et 315°). Les résultats de ce cas test sont présentés Figure 3. Cette figure montre que les signaux sont identiques quelle que soit la direction de propagation. L'onde de surface se propage de 5.2 cm en 0.5 s, puis elle est réfléchiée sur les bords du domaine (considérés comme des murs) pour revenir vers le centre.

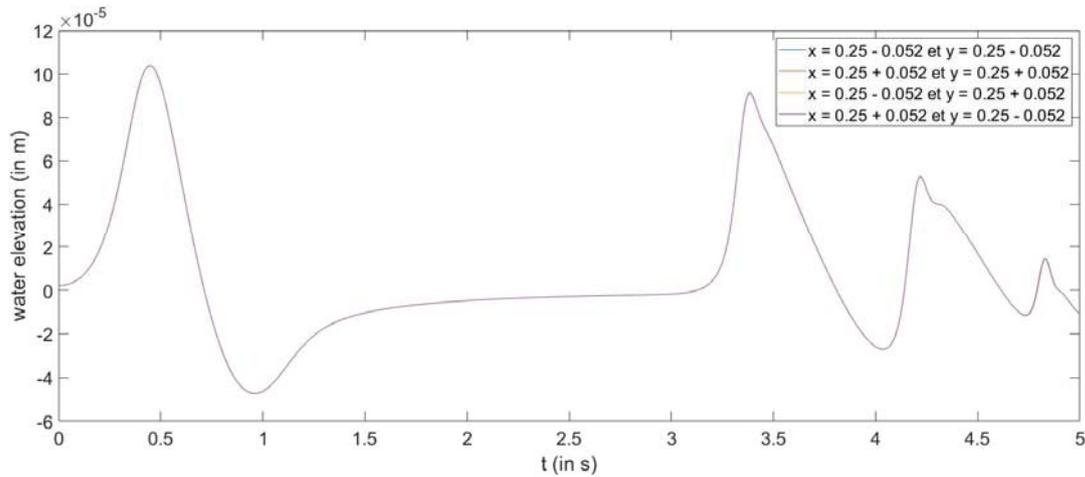


Figure 3. Signaux obtenus suite à la propagation d'une gaussienne (4) en quatre jauges synthétiques positionnées à 5.2 cm de la source dans quatre directions ( $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  et  $315^\circ$ ).

### 3.2 Test d'une rupture de barrage

La vérification de la forme du front d'onde est validée en comparant les résultats du code 2D appliqué au cas d'une rupture de barrage avec une solution analytique donnée par SWASHES (DELESTRE *et al.*, 2013).

Pour cette simulation, un canal numérique de longueur 0.5 m a été utilisé. Le barrage est positionné à 0.1 m de l'extrémité amont du domaine et les conditions aux limites sont fermées (murs). Les hauteurs d'eau en amont et en aval du barrage sont de 0.002 et 0.0015 m respectivement. Les résultats de ces simulations sont représentés à la Figure 4.

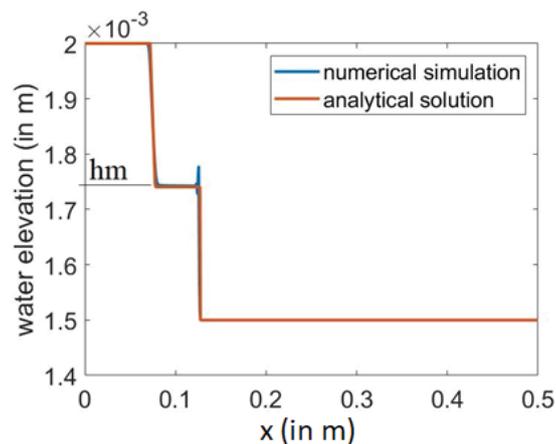


Figure 4. Profil longitudinal de la hauteur d'eau à  $t = 0.2$  s de simulation.

### 3.3 Test de conservation du volume

Le test de conservation du volume nous permet de pouvoir vérifier que tout se passe bien à l'interface avec les cylindres. Le schéma numérique étant d'ordre 2 en espace, cela nous

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

permet d'annuler les vitesses perpendiculaires à l'interface solide/liquide. Pour le calcul des surélévations, nous résolvons le système d'équation {(1), (2) et (3)} en considérant des dérivées décentrées pour ne considérer que des mailles mouillées dans le calcul.

Pour ce test, nous avons simulé une vague de 10 cm sur une distance de 10 cm dans un domaine rectangulaire de longueur 1 m, de largeur 0.41 m et de profondeur 10 cm. Un cylindre de diamètre 8 cm est positionné au centre du domaine (0.5, 0.5). La figure 5 montre les surélévations induites par l'interaction entre le front d'onde et le cylindre à  $t=0.6$  s. Nous avons vérifié que le volume d'eau dans le domaine se conservait, sur toute la durée de la simulation, avec quelques légères oscillations, inférieures à 5%, autour de sa position d'équilibre.

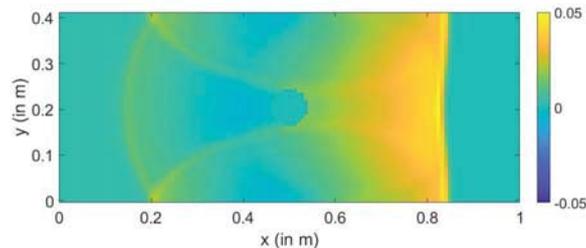
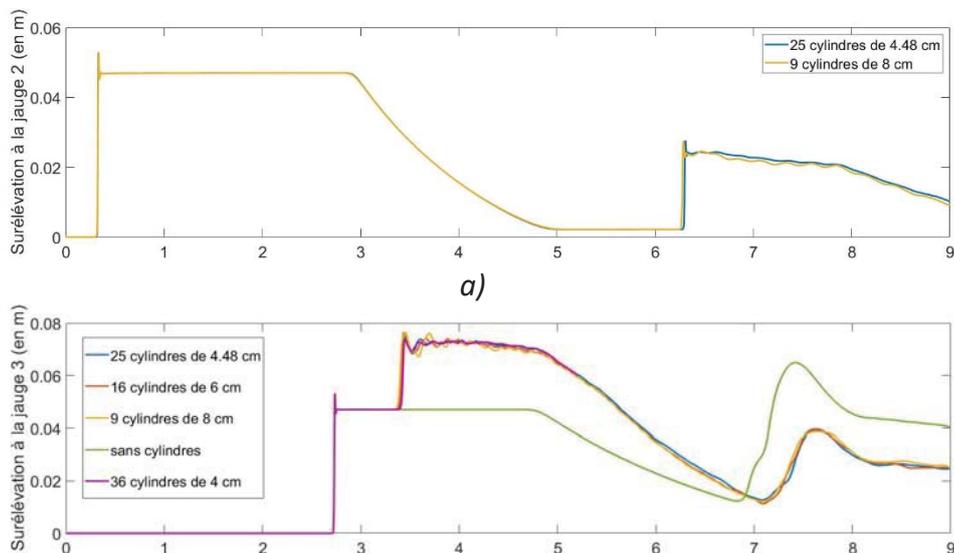


Figure 5. Test de conservation du volume : interaction entre le front d'onde et un cylindre de 8 cm à  $t = 0.6$  s.

### 4. Résultats et discussion

La figure 6a montre le signal d'entrée de notre modèle en aval du dispositif de rupture de barrage. L'usage de deux résolutions différentes (voir Table I) induit une dispersion numérique très légèrement différente à l'initiation (Figure 6a). Ce phénomène induit un retard inférieur à 0.0025 s (en amont du réseau de cylindre : Figure 6b) du maximum énergétique dont la valeur n'est pas affectée.



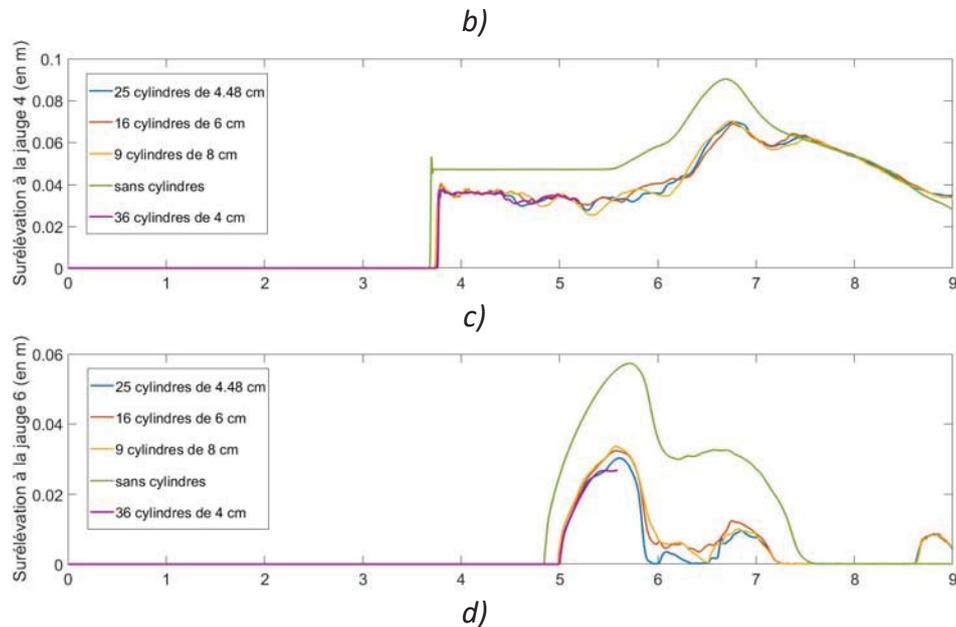


Figure 6. Signaux de surélévations : a) à l'initiation (jauge synthétique 2) ; b) et c) en amont (jauge synthétique 3) et en aval (jauge synthétique 4) du réseau de cylindres respectivement ; d) run-up : jauge synthétique 6 (à une côte de +6.27 cm).

Les figures 6b et 6c montrent les surélévations en entrée et en sortie des réseaux de cylindres respectivement (le cas sans cylindres est représenté à titre indicatif). Les surélévations sont légèrement supérieures dans le cas des réseaux de 9 et 16 cylindres avec des variations de hauteur plus importantes.

Cette constatation est confirmée par les résultats de run-up (Figure 6d) qui montrent un impact notable du réseau de cylindres sur la propagation. Ainsi, plus le réseau est dense, plus la surface spécifique augmente et plus le front d'onde est retardé (retard maximum de 0.03 s entre les réseaux de 9 et 36 cylindres) et atténué (90 % d'atténuation maximum entre les réseaux de 9 et 25 cylindres). Dans tous les cas simulés, avec cylindres, la profondeur d'inondation était d'environ 70 cm. La densité du réseau de cylindre ne semble pas avoir joué un rôle significatif sur ce paramètre de sortie.

Afin de caractériser les tourbillons de sillage, nous avons également représenté les champs de vorticités pour chacun des cas testés au temps  $t = 5$  s (Figure 7).

La vorticités moyenne derrière le réseau de cylindre varie légèrement en fonction des différents cas. Elle est de 9.26, 11.76, 11.8 et  $12 \text{ s}^{-1}$  pour les réseaux de 9, 16, 25 et 36 cylindres respectivement. Cela signifie que les réseaux les plus denses induisent davantage de turbulence, ce qui semble impacter la hauteur de run-up sur la pente en aval des réseaux de cylindres.

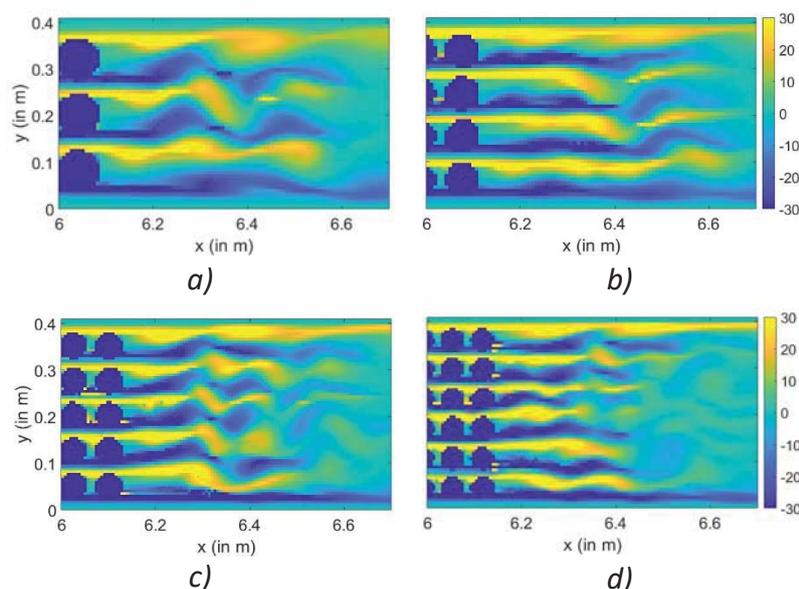


Figure 7. Champs de vorticité en aval du réseau de cylindres à  $t = 5$  s.

## 5. Conclusion et perspectives

Cette étude montre qu'un réseau de cylindre plus dense impacte significativement la propagation d'un tsunami. Les hauteurs de run-up sont atténuées de 90% en passant d'un réseau de 9 à 35 cylindres, en conservant une porosité constante.

Les turbulences induites par le réseau de cylindres semblent également jouer un rôle sur ces phénomènes d'atténuation.

En perspectives, nous envisageons d'intégrer un terme de dissipation turbulente dans notre modèle, grâce à la réalisation d'essais en laboratoire. Les effets 3D pourront aussi être appréhendés dans le cadre de ces essais.

Pour les simulations, il serait aussi nécessaire d'améliorer la résolution de la grille. Pour cela, il pourrait être opportun d'utiliser un système de grilles imbriquées pour mieux reproduire les petits cylindres. Ainsi, nous pourrions simuler des réseaux de cylindres encore plus denses et de diamètres plus petits afin de se rapprocher davantage des grandeurs caractéristiques des mangroves.

## 6. Références

DELESTRE O., LUCAS C., KSINANT P.-A., DARBOUX F., LAGUERRE C., VO T.-N.-T., JAMES F., CORDIER S. (2013). *SWASHES: a compilation of shallow water analytic solutions for hydraulic and environmental studies*. Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 72, pp. 269–300. <https://doi.org/10.1002/flid.3741>

FERNANDO H.J.S., SAMARAWICKRAMA S.P., BALASUBRAMANIAN S., HETTIARACHCHI, S.S., VOROPAYEV L. (2008). *Effects of porous barriers such as*

*coral reefs on coastal wave propagation.* Journal of Hydro-environment Research, Vol. 1, pp. 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2007.12.003>

JIANG C., LIU X., YAO Y., DENG B. (2019). *Numerical investigation of solitary wave interaction with a row of vertical slotted piles on a sloping beach.* International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 11, pp. 530-541. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.09.007>

KAISER G., SCHEELE L., KORTENHAUS A., LOVHOLT F., ROMER H., LESCHKA S. (2011). *The influence of land cover roughness on the results of high-resolution tsunami inundation modeling.* Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 11, pp. 2521–2540. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2521-2011>

MAGDALENA I., LA'LANG R., MENDOZA R. (2021). *Quantification of wave attenuation in mangroves in Manila Bay using nonlinear shallow water equations.* Results in App. Math., 12, 100191, <https://doi.org/10.1016/j.rinam.2021.100191>

ROSMAN J.H., HENCH J.L. (2011). *A framework for understanding drag parameterizations for coral reefs.* J Geophys Res Ocean, Vol. 116, Issue C08, C08025, <https://doi.org/10.1029/2010JC006892>

*Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière*