



# Étude des forces d'impact d'un écoulement de nappe sur un mur vertical

Mohamed ROZKI<sup>1</sup>, Stéphane ABADIE<sup>1</sup>, Denis MORICHON<sup>1</sup>

1. Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, SIAME, Allée du parc Montaury, 64600 Anglet, France.

[mohamed.rozki@univ-pau.fr](mailto:mohamed.rozki@univ-pau.fr); [stephane.abadie@univ-pau.fr](mailto:stephane.abadie@univ-pau.fr);

[denis.morichon@univ-pau.fr](mailto:denis.morichon@univ-pau.fr)

## Résumé :

Dans cet article, on étudie l'impact d'un écoulement de nappe, censé représenter un jet de rive, sur un mur vertical avec le solveur *interFoam* d'OpenFoam. La première étape a consisté à valider le modèle dans la configuration numérique utilisée ultérieurement en simulant l'expérience de rupture de barrage décrite dans LOBOVSKY *et al.*, (2014). Il est ainsi démontré qu'*interFoam* reproduit avec précision la dynamique de l'impact. On observe dans cette validation, comme dans les simulations ultérieures, l'apparition de deux pics de force. On émet l'hypothèse que le premier pic correspond à la surpression locale due à l'impact du jet et le second, à la surpression plus globale due à la compression d'un volume d'air emprisonné. La comparaison entre les modélisations 2D et 3D montre que la première surestime le second pic, en comparaison de l'expérience, dû à un confinement complet de l'air. En revanche, la simulation 3D présente une dynamique plus fidèle à la mesure. Une analyse plus systématique révèle enfin l'influence du niveau de remplissage amont du barrage sur la prédominance relative d'un pic sur l'autre.

## Mots-clés:

Écoulement de nappe, Force, impact, Cavité, InterFoam

## 1. Introduction

L'interaction des écoulements d'eau à surface libre et des structures constitue une problématique majeure en hydraulique et en génie côtier. Les littoraux atlantiques d'Europe sont ainsi souvent dotés de promenades côtières surélevées, formant un muret de protection contre les vagues. Ce dispositif assure à la fois la circulation des piétons et la protection des infrastructures situées en aval. Lors d'événements tempétueux, ces murets sont soumis à de violentes forces d'impact qui sont l'objet de la présente étude.

Le phénomène d'impact de nappe d'eau peut être généré artificiellement et de manière contrôlée par le biais d'une rupture de barrage (LOBOVSKY *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2022). Si de nombreuses études ont examiné la phase impulsive de ces impacts (CROSS, 1967; KIHARA *et al.*, 2016), les effets liés à la retombée du jet réfléchi par le mur sont

## Thème 6 – Risques côtiers

moins connus. Certains travaux ont néanmoins déjà observé l'émergence d'un second pic de pression (ZHOU *et al.*, 1999) ou de force (LIU *et al.*, 2022), concomitant à l'emprisonnement d'une cavité d'air. Néanmoins, aucune analyse particulière n'a été réalisée sur ce phénomène jusqu'à présent. Ce second pic peut pourtant revêtir une grande importance car il surpasse parfois le premier pic de force. Dans cet article, nous présentons une validation de notre approche numérique pour le calcul de la force d'impact et procédons ensuite à l'analyse de la sensibilité de ce second pic de force à différents paramètres.

### 2. Matériel et méthode

#### 2.1 Équations gouvernantes du solveur *interFoam*

Dans ce travail, nous utilisons le solveur Navier-Stokes diphasique d'OpenFOAM, nommé *interFoam*, appliqué en général aux interactions eau-air. Il met en œuvre la méthode des volumes finis associée à la technique Volume Of Fluid (VOF) pour simuler les écoulements à deux phases non miscibles et incompressibles. Dans ce modèle, de manière classique, la conservation de la masse et de la quantité de mouvement, s'écrivent:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$
$$\rho(\partial \mathbf{u} / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \sigma \kappa \nabla \alpha \tag{2}$$

avec  $\rho$  est la densité locale du fluide,  $\mathbf{u}$  le vecteur vitesse,  $p$  la pression,  $\mathbf{g}$  le vecteur d'accélération gravitationnelle,  $\mu$  la viscosité dynamique locale et  $\sigma$  le coefficient de tension de surface. La courbure moyenne de l'interface,  $\kappa$ , est approchée par  $\nabla \cdot (\nabla \alpha / |\nabla \alpha|)$ , où  $\alpha$  désigne la fraction volumique liquide dans la méthode VOF.

Cette étude considère à la fois l'eau et l'air comme incompressibles. Un examen de l'influence de la compressibilité de l'air et de l'eau sur les pressions et forces d'impact est prévu dans une publication future.

La turbulence est modélisée par une approche de type Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Les équations RANS, introduisent de nouvelles inconnues, notamment les contraintes de Reynolds. Pour résoudre le système, on recourt à des équations de transport additionnelles. Ces dernières varient d'un modèle simple à un modèle multi variables. Le modèle  $k-\varepsilon$ , utilisé dans cette étude, résout deux équations supplémentaires, une pour l'énergie cinétique turbulente  $k$  et l'autre pour la dissipation turbulente  $\varepsilon$ . Différents maillages ont été testés dans des travaux préliminaires. Ici les résultats sont présentés pour un maillage vérifiant  $\Delta x = \Delta y = 4 \text{ mm}$  et  $\Delta z = 1 \text{ cm}$  (où  $z$  est la dimension latérale).

## 2.2 Traitement de l'interface eau-air

L'atout majeur des techniques VOF réside dans leur aptitude à traiter les problèmes d'interface avec reconnexion grâce à une approche basée sur la fraction volumique du liquide. Initialement distribuée dans l'ensemble du domaine de calcul, cette fraction est advectée par le champ de vitesse. Le problème de ces approches est la diffusion numérique de l'interface. Dans *interFoam*, un terme anti diffusif est introduit dans l'équation d'advection pure. En complément, l'emploi de la méthode MULES accentue cette stratégie, en assurant une séparation claire entre les phases eau et air.

## 3. Résultats

### 3.1 Validation du modèle: expérience de LOBOVSKY *et al.*, (2014)

L'étude de LOBOVSKY *et al.*, (2014) fournit des données expérimentales pour valider le modèle *interFoam*. Dans ce travail, l'impact d'un écoulement de nappe généré par une rupture de barrage sur fond sec, sur un mur vertical, est étudié. Le dispositif expérimental comprend un canal de 1.61 m de longueur, 0.15 m de largeur, et 0.6 m de hauteur. Le réservoir amont, rempli d'eau à hauteur de 30 cm, occupe une longueur de 60 cm à partir de l'extrémité amont du canal. Des capteurs de pression, numérotés par ordre croissant du bas vers le haut, enregistrent l'évolution de la pression à différentes hauteurs (3 mm, 15 mm, 30 mm et 80 mm) le long de l'axe central du mur. Un capteur excentré complémentaire évalue les variations spatiales de pression et les phénomènes tridimensionnels. La fréquence d'échantillonnage de ces capteurs est réglée à 20 kHz.

La Figure 1 décrit l'évolution de la pression adimensionnée par le terme hydrostatique ( $\rho gH$ , où  $H$  est la hauteur d'eau initiale du réservoir). Le premier pic de pression calculé par *interFoam* coïncide bien en temps avec le premier pic expérimental, bien qu'il soit inférieur de 27,8 % en intensité. Les pics impulsifs sont en revanche fidèlement reproduits aux capteurs 2 et 3, avec des écarts de 7,1 % et 15,6 %, respectivement. Le quatrième capteur n'enregistre pas une montée de pression aussi significative que les autres capteurs. La reproduction de ce phénomène par le modèle est assez satisfaisante.

Un deuxième pic léger est mesuré à  $t^* = 6$  par tous les capteurs, avec une amplitude similaire. Ce pic est le phénomène qui nous intéresse dans ce papier. Dans les mesures, il est suivi d'oscillations d'amplitude réduite ( $P^*$  aux alentours de 0,05). Ces oscillations sont absentes dans la simulation numérique où la courbe de pression demeure lisse. Quant à son amplitude, le deuxième pic calculé numériquement surpasse légèrement le pic expérimental aux capteurs 1, 2, et 4, et se trouve un peu en dessous de celui mesuré au capteur 3. Dans l'ensemble, le modèle reproduit correctement ces pics ainsi que leur dynamique entre  $t^* = 6$  et  $t^* = 6.3$ . On note néanmoins une sous-évaluation du modèle entre  $t^* = 6.3$  et  $t^* = 6.7$ .

## Thème 6 – Risques côtiers

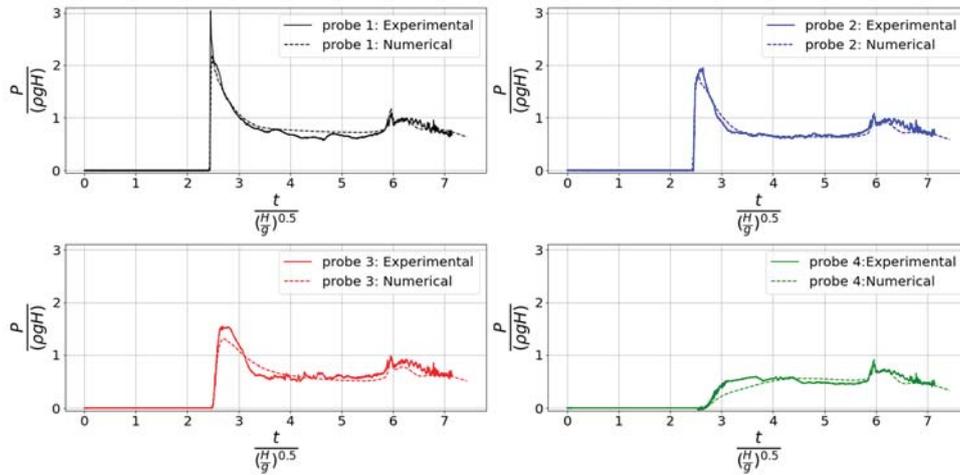


Figure 1. Pressions normalisées expérimentales (ligne pleine) d'après l'étude de LOBOVSKY et al., (2014) et pressions normalisées calculées par *interFoam* en 3D (ligne en pointillés).

Pour estimer la force d'impact, la pression est intégrée spatialement. Le résultat est présenté en Figure 2. Cette figure révèle deux pics prononcés de force, le deuxième étant plus accentué que le premier. C'est en cela que le phénomène est intéressant. Les seconds pics de pressions sont relativement faibles, mais comme ils interviennent simultanément en tous points, le pic de force associé est important. Les résultats simulés par *interFoam* sont synchronisés avec les observations expérimentales. On observe néanmoins une légère tendance du modèle à sous-évaluer la force d'impact dans les phases initiales ( $2.35 < t^* < 3.2$ ) et finales ( $6.3 < t^* < 6.7$ ). Hors de ces intervalles, *interFoam* parvient à saisir fidèlement l'évolution temporelle de la force, en particulier pour le second pic. Le second pic mesuré dépasse de 8.3 % le premier sur la Figure 2. Cette différence est plus prononcée dans les simulations.

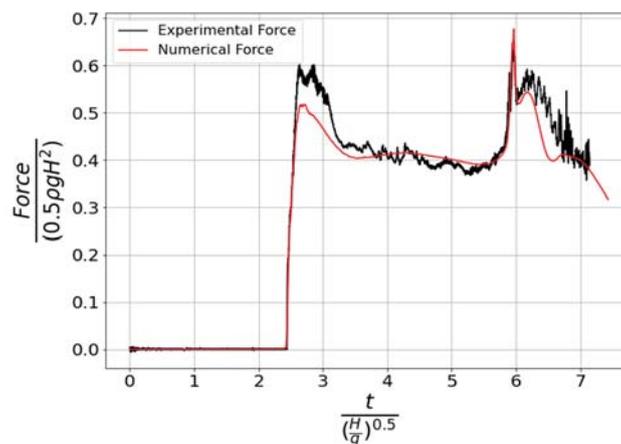


Figure 2. Évolution de la force normalisée expérimentale (en noir) et numérique (en rouge) pour l'expérience de LOBOVSKY et al., (2014).

Du point de vue phénoménologique, l'impact de l'écoulement de nappe sur le mur provoque une hausse rapide de la pression au bas du mur, menant à l'apparition d'un premier pic de force, illustré sur la Figure 2. Cette augmentation de pression a été largement explorée (CROSS, 1967; KIHARA *et al.*, 2016). CROSS (1967) avait établi un lien entre la force générée et l'inclinaison du front de l'écoulement, notant une valeur maximale pour les fronts les plus pentus. Ce résultat a été soutenu par des formules paramétriques, validées plus tard par des travaux expérimentaux (RAMSDEN, 1996, KIHARA *et al.*, 2016).

Comme illustré dans nos résultats, le second pic de force, peut parfois être plus important que le premier. Ce second pic survient toujours (voir par exemple ZHOU *et al.*, 1999 ou LIU *et al.*, 2022) à l'instant d'emprisonnement de l'air, consécutif à la déflexion de l'écoulement, suivi de la reconnexion de sa lèvre frontale. On suppose que l'augmentation globale de pression conduisant à ce pic est dû à un phénomène de piston généré par le renfermement de la lèvre d'eau sur le volume d'air (voir par exemple Figure 3). L'augmentation est soudaine et globale et se traduit à l'eau puis au mur. On suppose également que l'intensité de ce pic dépend fortement de la propension de l'air à s'échapper facilement ou non de la cavité durant cette phase de l'écoulement. Cette hypothèse est examinée dans la partie suivante.

### 3.2 Forces d'impact calculées par *interFoam* en 2D et 3D

On réalise ainsi des simulations 2D et 3D dont les résultats sont illustrés Figure 3. Les sous-Figures 3.1 et 3.5 présentent l'évolution des forces d'impact calculées par *interFoam* pour les 2 types de simulations. Ces figures montrent deux pics de forces de magnitudes très différentes. Le premier pic survient autour de  $t^* = 2.5$ , affichant une valeur proche de 0.5, tant en 2D qu'en 3D. La différence intervient sur le second pic. En 2D, le pic simulé est deux fois plus élevé que dans les résultats expérimentaux de LOBOVSKY *et al.*, (2014). En contraste, comme déjà présenté dans la partie précédente, la simulation 3D reproduit avec précision la magnitude du second pic observé expérimentalement.

En terme temporel, il existe un léger décalage entre le second pic de force simulé en 2D et le pic expérimental, alors qu'une concordance presque parfaite est observée avec les résultats 3D. Vers  $t^* = 6$ , le jet, en se défléctant contre le mur, crée une cavité d'air (sous-Figures 3.3 et 3.7). La forme de cette cavité varie entre les simulations 2D et 3D. En 2D, le volume d'air de la cavité est complètement emprisonné. À l'inverse, en 3D, la configuration du jet permet à l'air de s'échapper par une ouverture centrale. Cela conduit à un volume d'air emprisonné réduit par rapport à la version 2D. Cette dynamique est mise en évidence par les vecteurs vitesse, indiquant que l'air s'échappe à travers l'ouverture centrale de la zone emprisonnée (sous-Figures 3.2 et 3.3). Cela atténue fortement l'effet piston de la poche d'air emprisonnée. En revanche, en 2D, la cavité d'air est parfaitement confinée. Cela signifie que la quantité de mouvement du volume d'eau au-dessus de la cavité est complètement transmise à celle-ci. Ceci se traduit par une augmentation de la

## Thème 6 – Risques côtiers

pression le long du mur et, par conséquent, par l'apparition d'un second pic de force considérablement plus important.

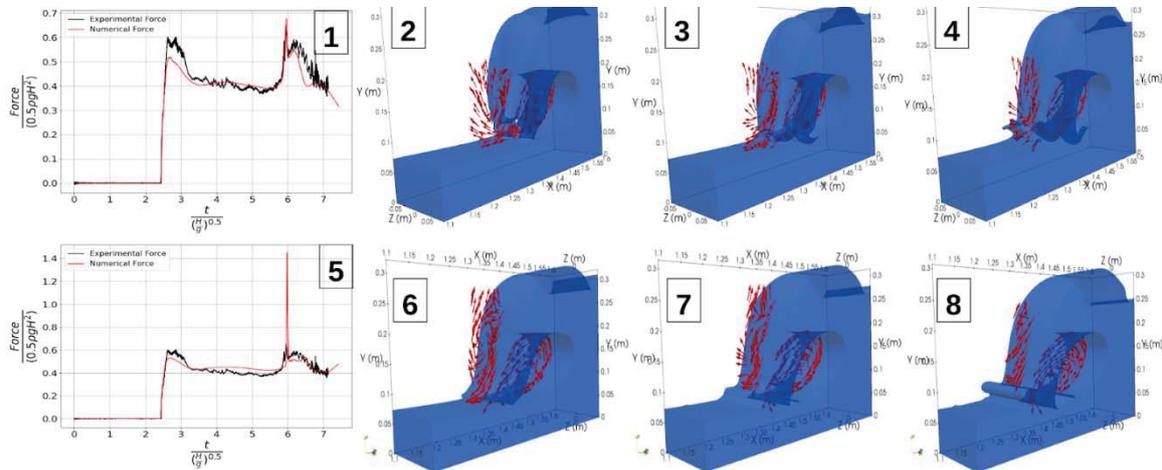


Figure 3. Évolution temporelle des forces d'impact en 3D (1) et 2D (5). Clichés des interfaces eau/air et des vecteurs vitesses autour de la cavité en 3D au moment de la fermeture de la cavité (3), 0.015 s avant cette fermeture (2) et 0.015 s après (4); et en 2D au moment de la fermeture de la cavité (7), 0.015 s avant cette fermeture (6) et 0.015 s après (8).

### 3.3 Sensibilité du deuxième pic de force au remplissage du réservoir

On s'intéresse maintenant à l'influence de l'augmentation du niveau de remplissage du réservoir sur le poids relatif des deux pics de forces d'impact. Les résultats sont présentés dans la Figure 4. Aux faibles niveaux de remplissage, le second pic prédomine sur le premier. À un niveau de remplissage de 35 cm, les deux pics présentent des valeurs équivalentes, alors que pour des niveaux plus élevés, le premier pic devient prépondérant.

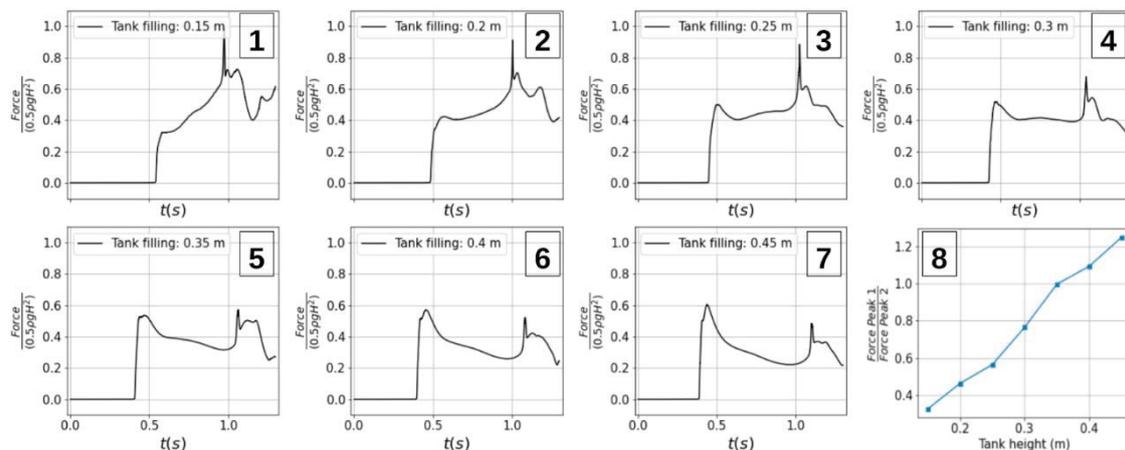


Figure 4. Évolution des forces d'impact pour différentes hauteurs de remplissage du réservoir (1 à 7) et ratio des deux pics de force (8) pour chaque hauteur de remplissage.

Cette tendance est clairement montrée par la sous-Figure 4.8, indiquant un rapport du premier au second pic inférieur à 1 pour les niveaux jusqu'à 35 cm, et supérieur à 1 pour les niveaux au-delà de ce seuil.

En non dimensionnel, on observe une augmentation des pics de force avec le niveau de remplissage. Le premier pic passe ainsi graduellement de 150 à 600 N/m pour 15 et 45 cm de hauteur d'eau dans le réservoir. Cette augmentation est vraisemblablement due à l'augmentation associée de la hauteur de la nappe et de sa vitesse avant l'impact (par exemple 2.5 m/s et 3.53 m/s, respectivement, pour 25 et 45 cm d'eau) mais aussi au redressement progressif du front de la nappe (pente de 9% et 24% respectivement, pour 25 et 45 cm d'eau). Ces résultats sont en accord avec l'étude de MOKRANI & ABADIE (2016) qui établit un lien direct entre ces variables et l'intensité du pic de pression. Le second pic de force augmente aussi graduellement avec la hauteur de réservoir (de 110 à 500 N/m pour 15 et 45 cm de hauteur d'eau dans le réservoir). On imagine que cette augmentation est à relier à l'augmentation progressive de l'inertie de la lèvres d'eau qui s'abat sur le volume d'air et le comprime avec la hauteur d'eau dans le réservoir.

#### 4. Conclusions

Dans cette étude, l'impact d'un écoulement de nappe contre un mur vertical est analysé en utilisant le solveur *interFoam* d'OpenFoam. Nous avons dans un premier temps validé le modèle en reproduisant l'expérience de rupture de barrage sur fond sec de LOBOVSKY *et al.*, (2014). Cette étape a confirmé la capacité d'*interFoam* à fidèlement simuler la dynamique de l'impact mesurée, incluant le pic impulsif résultant de l'impact du front et le second pic induit par l'emprisonnement d'une cavité d'air. La simulation 2D surévalue considérablement le deuxième pic de force en comparaison de l'expérimental en raison d'un emprisonnement total de l'air. Par contraste, la simulation 3D offre une représentation plus fidèle de la mesure, en permettant à l'air de s'échapper plus facilement. Nous avons enfin montré la sensibilité du poids relatif des 2 pics au niveau de remplissage du réservoir de rupture de barrage. Ainsi, pour des remplissages inférieurs à 35 cm, le second pic domine, tandis que pour des niveaux supérieurs, c'est le premier pic qui devient prépondérant.

#### Remerciements

Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention Marie Skłodowska-Curie n° 945416 et du programme européen POCTEFA MARLIT EFA344/19.

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du laboratoire commun KOSTARISK, qui fait partie du programme E2S UPPA géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-16-IDEX-0002) et soutenu par les Investissements d'Avenir (PIA) du gouvernement français. Le laboratoire commun KOSTARISK est cofinancé par E2S UPPA, la Fondation AZTI et le centre Rivages Pro Tech de SUEZ.

### 5. Références bibliographiques

- CROSS R. H. (1967). *Tsunami surge forces*. Journal of the Waterways and Harbors Division, 93 (4), 201-231.
- KIHARA N., NIIDA Y., TAKABATAKE D., KAIDA H., SHIBAYAMA A., MIYAGAWA Y. (2015). *Large-scale experiments on tsunami-induced pressure on a vertical tide wall*. Coastal Engineering, 99, 46-63, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.03.004>
- LIU S., NISTOR I., MOHAMMADIAN A., AZIMI A.H. (2022). *Experimental and numerical investigation of beach slope effects on the hydrodynamic loading of tsunami-like surges on a vertical wall*. Journal of Marine Science and Engineering, 10(11), 1580. <https://doi.org/10.3390/jmse10111580>
- LOBOVSKÝ L., BOTIA-VERA E., CASTELLANA F., MAS-SOLER J., SOUTO-IGLESIAS A. (2014). *Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break*, Journal of Fluids & Structures, 48, 407-434. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.009>
- MOKRANI C., ABADIE S. (2016). *Conditions for peak pressure stability in VOF simulations of dam break flow impact*. Journal of Fluids & Structures, 62, 86-103. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.12.007>
- RAMSDEN J.D. (1996). *Forces on a vertical wall due to long waves, bores, and dry-bed surges*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 122(3), 134-141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1996\)122:3\(134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1996)122:3(134))
- ZHOU Z.Q., DE KAT J.O., BUCHNER B. (1999). *A nonlinear 3-D approach to simulate green water dynamics on deck*. In Proceedings of the seventh international conference on numerical ship hydrodynamics, Nantes, France, 1-15.