
Calculs CFD de propagation et d'impact de vague en zone côtière

Projet TANDEM

Pons Kévin^{1,2}, Journeau Camille¹, Marcer Richard¹ et Golay Frédéric².

¹ Principia S.A.S., Zone Athélia 1, 215 voie Ariane, 13705 La Ciotat cedex, France

kevin.pons@principia.fr, camille.journeau@principia.fr, richard.marcer@principia.fr

² Université de Toulon, IMATH, EA 2134, 83957 La Garde cedex, France

frederic.golay@univ-tln.fr

RÉSUMÉ. Dans le cadre du projet TANDEM -Tsunamis en Atlantique et MaNche : Définition des Effets par Modélisation- une première phase de l'étude a pour but (pour Principia) de qualifier différents modèles CFD (Computational Fluid Dynamics) 3D pour la simulation de tsunamis. Un premier modèle (code EOLE) résout un écoulement bi-fluide 3D couplé avec une méthode de reconstruction de type VOF, sur des maillages structurés multi-blocs. Un autre modèle (code EOLENS) basé sur une approche de capture d'interface, utilise des maillages non-structurés. Cet article présente, pour différents cas tests académiques de propagation de vagues et d'inondation en zone côtière, des comparaisons entre simulations et données expérimentales. Les résultats obtenus sur ces cas-tests sont dans l'ensemble satisfaisants et démontrent tout le potentiel de ces deux codes pour simuler en situation réelle l'impact côtier 3D d'un tsunami.

ABSTRACT. Into the frame of the TANDEM project -Tsunamis in the Atlantic and the English ChaNnel : Definition of the Effects through numerical Modeling- a first step of the study aims for Principia to qualify different 3D CFD (Computational Fluid Dynamics) models for the simulation of tsunamis. The EOLE code solves a 3D bi-fluid flow on multi-structures meshes coupled with a free surface tracking VOF model, whereas the EOLENS code is based on an interface capturing method using unstructured meshes. This paper presents simulations / measurements comparisons for academic test cases of wave propagation and run-up. On the whole, the results are satisfactory showing the high potential of both codes to simulate tsunamis propagation and impact.

MOTS-CLÉS: tsunami, simulations CFD, qualification sur tests académiques.

KEY WORDS: tsunami, CFD simulations, validation on academic test cases

1. Introduction

Le projet TANDEM qui a démarré au début de l'année 2014, a pour objectif d'évaluer l'impact de vagues de tsunami sur les côtes françaises. Une première phase de ce projet est dédiée à la réalisation de benchmarks de modèles numériques sur des cas-tests académiques de propagation de vagues et d'inondation en zone côtière.

Les quatre cas tests ici considérés disposent d'un référentiel expérimental permettant la comparaison et la qualification des modèles numériques utilisés.

Il s'agit pour le premier d'un cas de propagation d'une vague sur un récif 2D. Il permet de représenter différents phénomènes tels que le déferlement ou la réflexion d'onde sur le récif. Le second est un cas 3D de propagation et de submersion sur un fond complexe en présence d'une île conique. Le troisième est un cas 3D de rupture de barrage en présence d'obstacle dans lequel la surface libre de la vague subit de grandes déformations. Enfin, le dernier cas concerne le déferlement d'une vague 2D sur un fond à pente constante.

Les outils numériques utilisés dans cette étude sont les deux codes CFD multiphasiques EOLE et EOLENS développés par Principia et l'Institut de Mathématiques de Toulon.

Après une brève présentation des codes utilisés, l'article présente les comparaisons entre les résultats numériques obtenus et les données expérimentales pour les quatre cas tests introduits ci-dessus.

2. Présentation des codes de calcul

2.1. EOLE

Le code EOLE, développé à Principia depuis 1990, est un modèle URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) multi-phases incompressible ou compressible qui résout les équations sur un maillage curviligne multi-block structuré (pouvant être mobile et déformable). L'algorithme d'intégration s'appuie sur une méthode de pseudo compressibilité à deux niveaux d'itérations (dual time stepping) et d'un schéma numérique aux volumes finis du second ordre. Le code présente 2 niveaux de parallélisation en MPI et OpenMP.

Le mouvement de l'interface entre les phases est simulé par une méthode implicite de type VOF sans contrainte sur le nombre CFL. Le transport de l'interface peut être réalisé à partir de la résolution d'une équation eulérienne classique, ou par une technique améliorée eulérienne-lagrangienne développée par Principia [GUI 01], [BIA 04].

D'autre part, un modèle de turbulence de type $k - \varepsilon$ avec loi de paroi, est ici utilisé.

2.2. EOLENS

Le code EOLENS résout les équations d'Euler bi-fluides en 3D sur maillage non structuré. La résolution est effectuée par une approche en volume finis. La condition d'incompressibilité est relaxée par une approche faible Mach [GOL 07]. Dans les cas isothermes, la pression est calculée explicitement via une loi d'état artificielle permettant de s'affranchir en partie des conditions de CFL [HEL 05]. Contrairement au code EOLE, ce modèle ne s'appuie pas sur une technique de reconstruction d'interface. La diffusion de l'interface inhérente au modèle peut être limitée par l'utilisation d'une méthode de raidissement d'interface [SAM 11].

La résolution numérique des équations est effectuée avec un schéma de Godunov d'ordre 2 en espace (MUSCL) et en temps (Runge-Kutta ou Adams Bashfort). Une gestion locale des pas de temps avec la méthode d'Adams Bashfort permet des gains conséquents en temps de calcul. Pour finir, ce code est parallélisé en MPI.

3. Les cas tests

3.1. Propagation d'une vague sur un récif 2D

Cette expérience a été effectuée à l'Université d'Oregon [ROE 12]. Elle permet de représenter divers phénomènes tels que le déferlement ou la réflexion d'une onde solitaire de grande amplitude sur un récif en deux dimensions. Les données disponibles sont des élévations de la vague à des positions données. La hauteur d'eau

au repos est de 2.5m et l'amplitude du soliton étudié est de 0.75m. La vague est initialisée par une onde solitaire de Boussinesq du 3^{ème} ordre (solution analytique de l'équation de Korteweg-De Vries [DEA 84]).

Le calcul est effectué avec le code EOLE. Le maillage est uniforme avec des mailles de 5cm de côté (soit 335000 mailles pour le domaine de calcul).

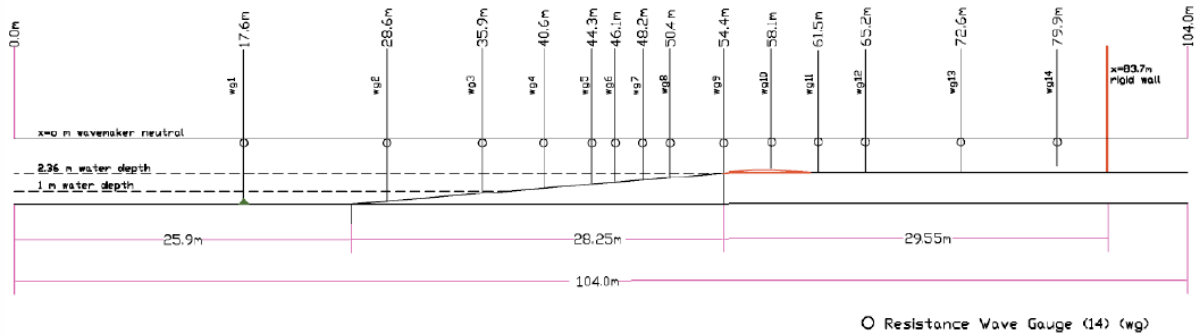


Figure 1. Dispositif expérimental

La figure 2 ci-dessous présente des comparaisons simulation / expérience du profil de la surface libre à des instants donnés.

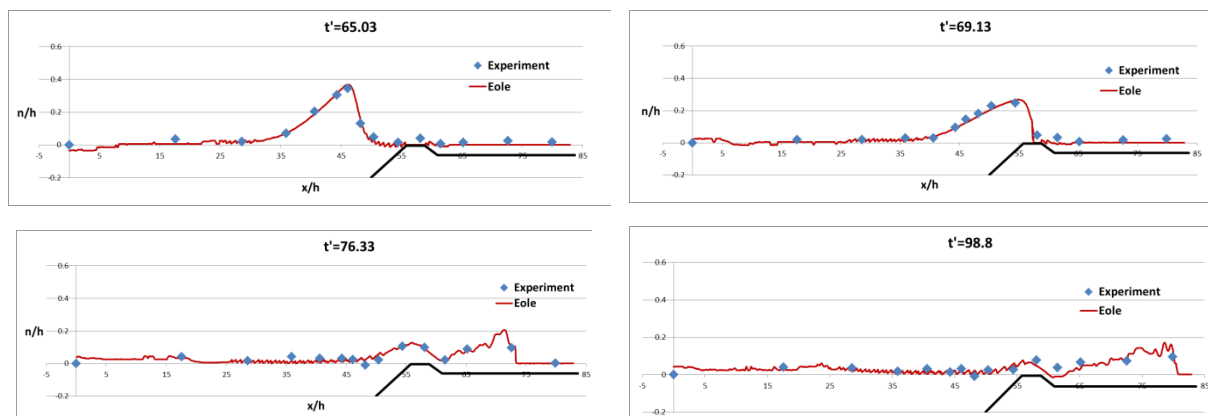


Figure 2. Profils de surface libre en fonction de la position à quatre instants différents

Les profils de surface libre sont bien reproduits par EOLE, notamment la formation du ressaut hydraulique ($t'=76$), sa propagation et son étalement ($t'=99$).

La figure 3 ci-dessous présente des comparaisons du profil de la surface libre pour deux capteurs WG2 et WG13. Les profils d'élévation obtenus sont très satisfaisants tant sur la position que sur les amplitudes des pics. Le capteur WG13 montre toutefois une légère surestimation de la hauteur d'eau après déferlement.

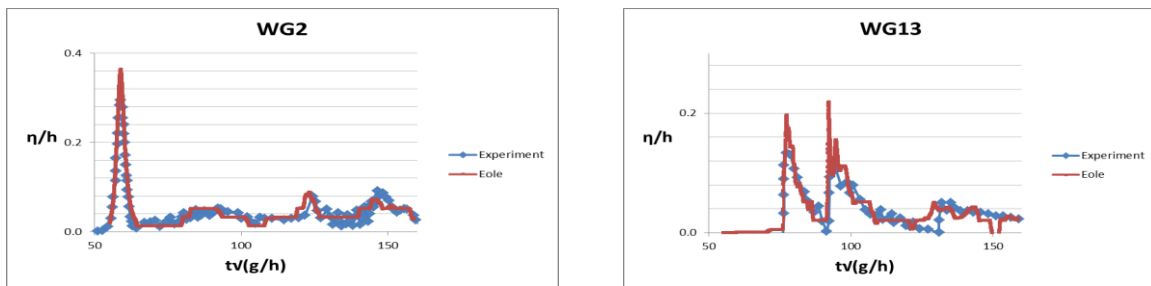


Figure 3. Profils de surface libre en fonction du temps à deux positions différentes

3.2. Propagation 3D d'une vague sur bathymétrie complexe avec une île conique

Cette expérience a été également effectuée en grand bassin de l'Université de l'Oregon [LYN 10]. Elle comprend une bathymétrie complexe constituée d'une plage inclinée, d'un plateau, et d'une île conique (figure 4). Les ondes solitaires sont générées du côté gauche par un système à piston. Des relevés de hauteur d'eau en fonction du temps à différentes positions sont disponibles (sondes G1-9 sur figure 4). La hauteur d'eau au repos est de 0.78m et l'amplitude initiale de la vague est de 0.39m. L'onde est initialisée par une solution de Boussinesq.

Le calcul est réalisé avec le code EOLE. Le maillage est non uniforme avec des tailles de maille comprises entre 2mm et 1cm (soit 3.4 millions de mailles pour le domaine de calcul).

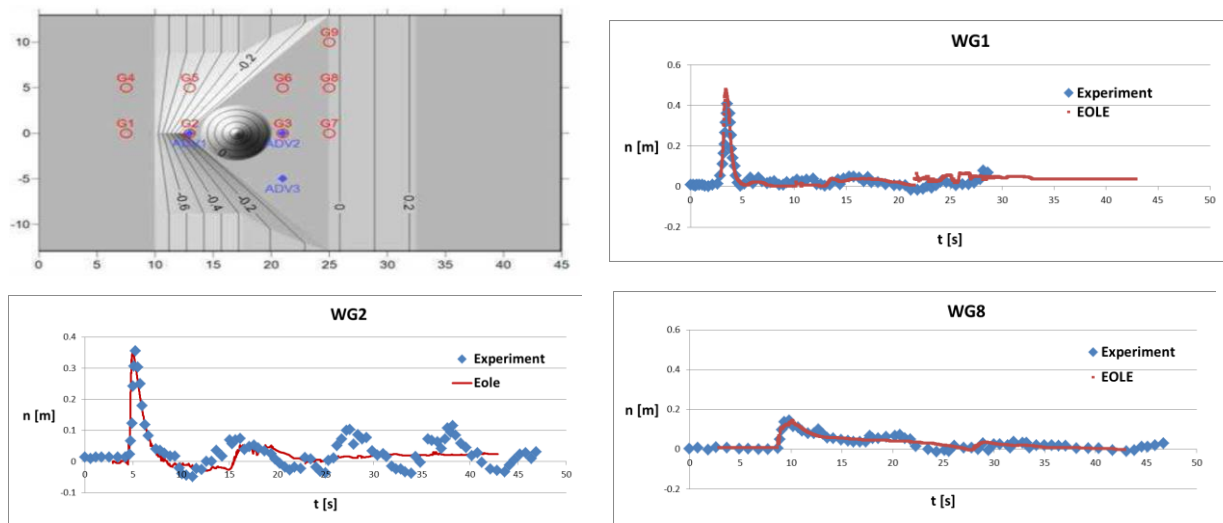


Figure 4. Dispositif expérimental et profils de surface libre en fonction du temps pour trois positions différentes

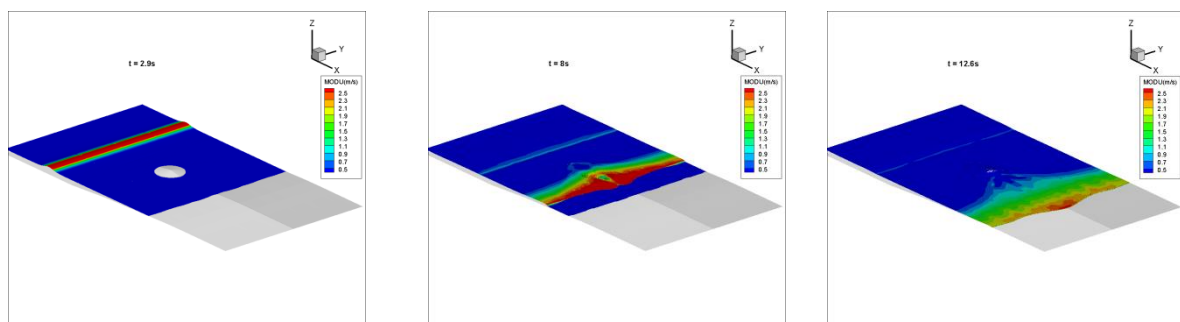


Figure 5. Visualisations de la propagation de la vague au cours du temps

Les profils d'élévation sont correctement prédits dans l'ensemble, plus particulièrement sur la sonde WG08 qui est dans une zone complexe où la vague a été diffractée par la présence de l'île en amont (Figure 4). On note par contre une différence de comportement, après 20s, sur la sonde WG02 située juste en amont de l'île. Les mesures montrent des oscillations, vraisemblablement liées à des réflexions multiples de la vague entre le batteur en amont et l'île, qui sont atténuées pour le calcul du fait probablement d'une condition limite non optimale en amont du domaine. Ce point sera investigué ultérieurement.

3.3. Rupture de barrage

L'expérience a été effectuée au MARIN (MARitime Research Institute Netherlands) [KLE 05]. Le système permet de relâcher quasiment instantanément un volume conséquent d'eau qui va impacter un obstacle. Cette expérience peut être assimilée à une rupture de barrage. Les données disponibles sont des relevés de pression (P1-8) sur deux faces (amont et supérieure) de l'obstacle et des relevés d'élévation de la surface libre à diverses positions H1-4 (Figure 6). L'expérience montre des déformées complexes de la vague au cours du temps qu'il est particulièrement difficile à reproduire numériquement.

Le calcul est effectué avec le code EOLENS sur un maillage assez grossier d'environ 680000 cellules. Deux simulations sont présentées, sans et avec modélisation de la compression d'interface.

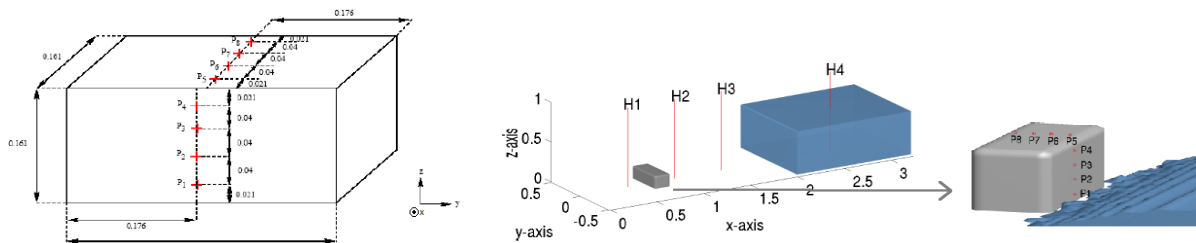


Figure 6. Dispositif expérimental

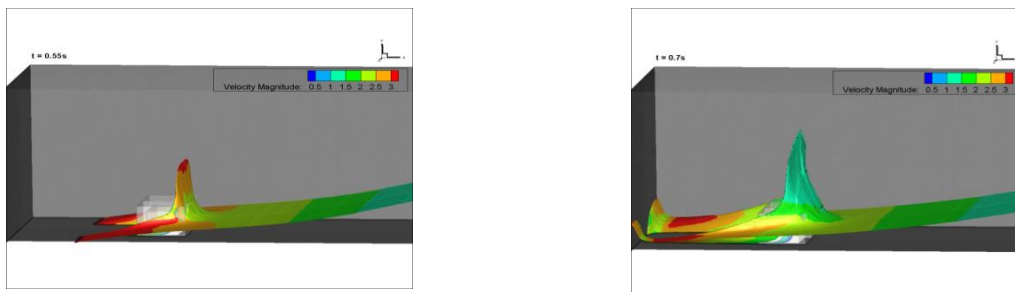


Figure 7. Exemple de visualisations de l'écoulement à deux instants

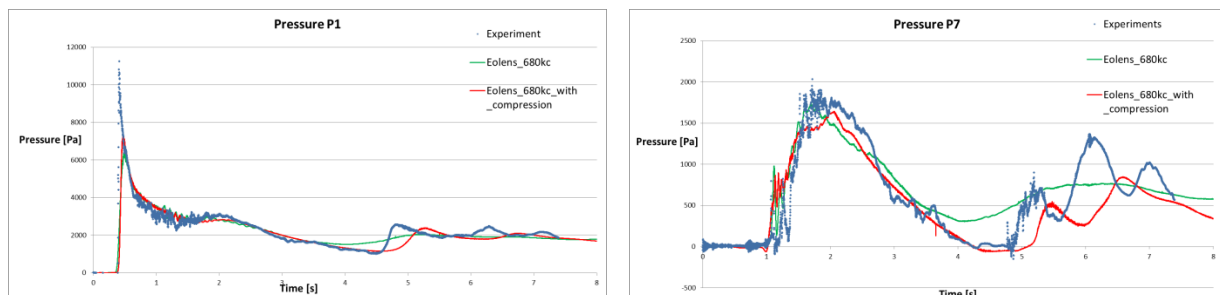


Figure 8. Comparaisons des profils de pression en fonction du temps pour le capteur P1 en face frontale (à gauche) et le capteur P7 en face supérieure de l'obstacle (à droite)

La Figure 8 présente les comparaisons simulation / expérience sur deux capteurs de pression situés en face frontale et en face supérieure de l'obstacle. Les deux modélisations, sans et avec compression de l'interface, sont ici représentées. Exceptée la valeur de la pression d'impact en début de phénomène (vers $t=0.5s$), qui reste sous-estimée d'environ 30% dans les deux calculs, la compression de l'interface permet un gain de précision important et reproduit notamment les oscillations du plan d'eau au cours du phénomène. Sans compression les signaux sont par contre rapidement atténués.

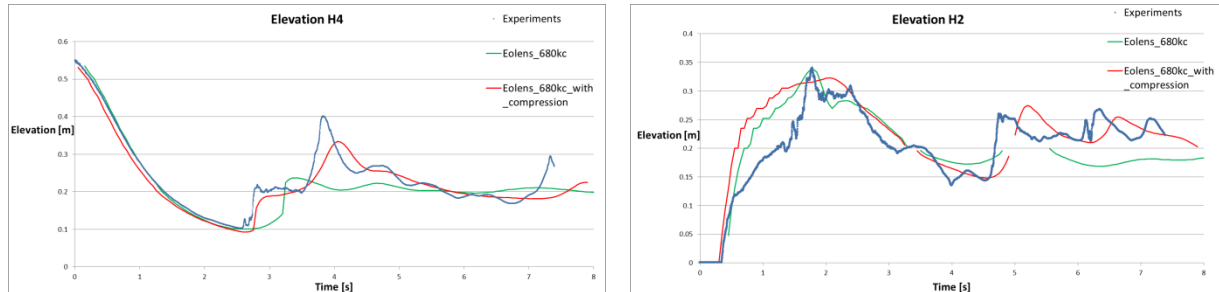
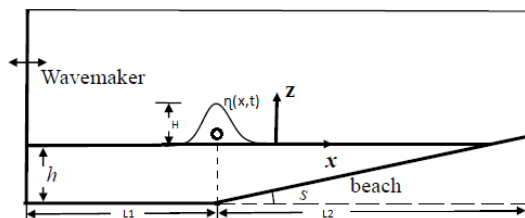


Figure 9. Comparaisons des élévations pour un capteur en amont de l'obstacle (H4) et un capteur en aval (H2)

La Figure 9 présente des comparaisons d'élévation sur deux sondes. Comme pour les signaux de pression, le modèle avec compression d'interface améliore les résultats et permet de mieux reproduire les oscillations de la surface libre au cours du phénomène.

3.4. Déferlement d'un soliton 2D sur une plage inclinée

L'expérience a été effectuée au California Institute of Technology [LI 98]. Le système est composé d'un batteur permettant de générer un soliton qui se propage en premier lieu sur une zone plate puis sur un plan incliné. Les données disponibles sont la forme de la surface libre à différents instants du déferlement. Ce cas permet d'évaluer la capacité des modèles à simuler un déferlement plongeant. La Figure 10 décrit le système expérimental et les caractéristiques de la vague.



$$\text{Avec } \begin{cases} L_1 = 3m \\ L_2 = 10m \\ \tan(s) = \frac{1}{15} \\ h = 0.3048m \\ H/h = 0.45 \end{cases}$$

Figure 10. Dispositif expérimental

La vague est initialisée par une onde solitaire de Boussinesq du 1^{er} ordre (solution analytique de l'équation de Korteweg-De Vries [DEA 84]).

Ce cas est résolu avec les deux codes. Pour la simulation avec EOLENS une méthode BB-AMR (Block Based Adaptive Mesh Refinement) a été utilisée. Cette technique permet d'adapter le maillage au cours de la simulation : raffinement près de la surface libre et dans les zones de forts gradients, et inversement dans des zones de plus faible dynamique. Des précisions sur la méthode AMR intégrée dans EOLENS sont données dans [GOL 15].

Pour le maillage adaptatif les calculs ont été effectués avec des mailles variant entre 2cm et 1.5mm. Le rapport entre deux niveaux de raffinement est limité à deux. Le nombre de mailles varie ainsi entre 380000 et 720000 cellules. Dans la simulation effectuée avec EOLE, le maillage comporte un million de cellules.

La figure 11 montre un exemple de déferlement plongeant, avec rebonds, simulé par EOLE et par EOLENS.

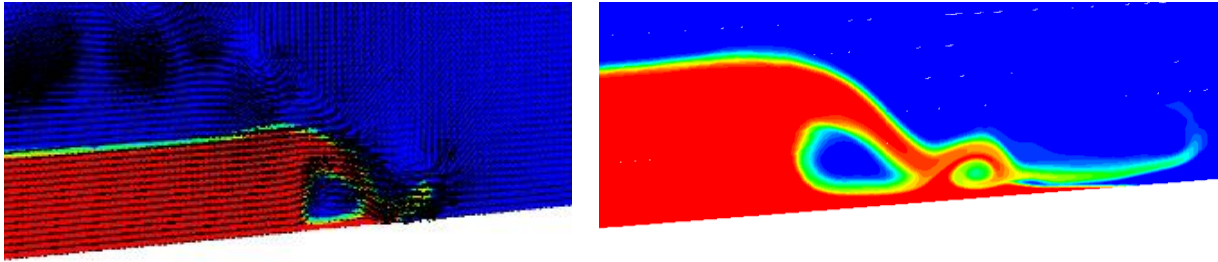


Figure 11. Exemples de visualisations de la vague simulée avec EOLE (à gauche) et EOLENS (à droite)

La Figure 12 ci-dessous présente à différents instants des comparaisons quantitatives de la forme de la surface libre obtenues avec EOLENS et EOLE.

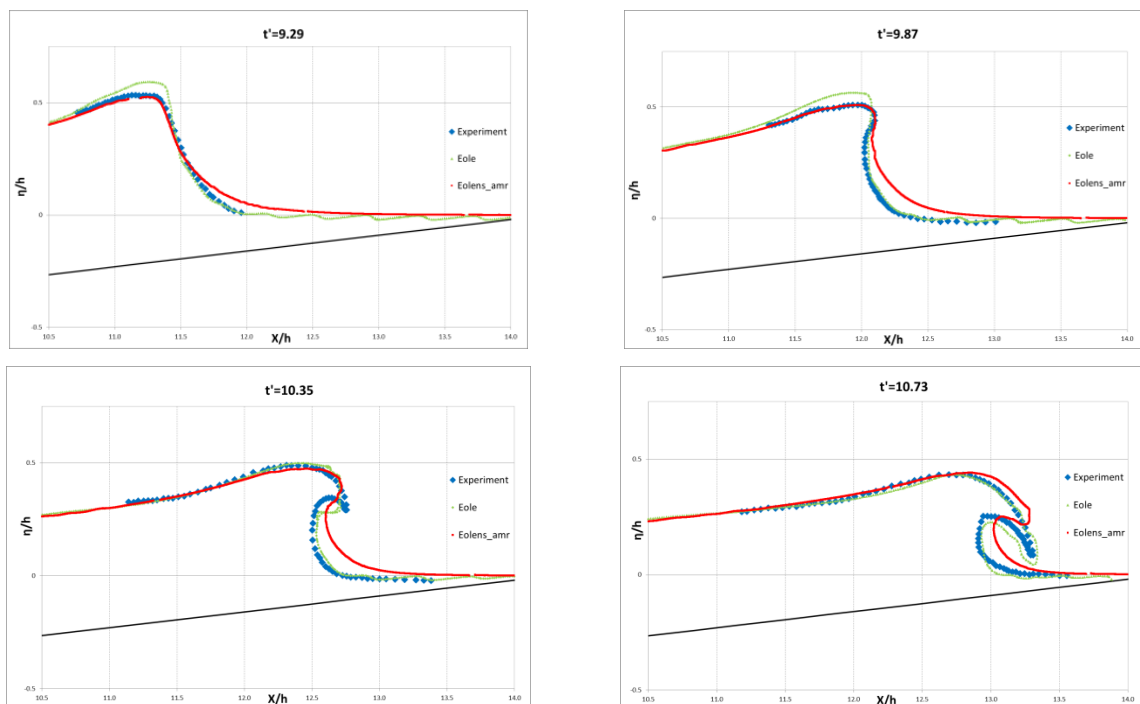


Figure 12. Comparaison des profils de surface libre à différents instants

Les résultats obtenus avec les deux codes sont dans l'ensemble très satisfaisants tant sur la forme de la vague que sur le phasage des phénomènes. Tout juste peut-il être noté un très léger retard du déferlement pour EOLENS.

4. Conclusions

Deux codes CFD diphasiques aux caractéristiques très différentes ont été testés pour la simulation de la propagation, du déferlement et de l'impact côtier de vagues.

Les résultats obtenus sur des cas-tests académiques documentés sont dans l'ensemble très satisfaisants et montrent globalement un bon accord avec les différents résultats expérimentaux. Les deux approches de modélisation démontrent donc tout leur potentiel pour une utilisation future en mode prédictif sur la problématique tsunami.

Des améliorations des modèles sont également en perspective, plus particulièrement le couplage dans EOLENS entre la méthode de raffinement local de maillage et la technique de compression de l'interface.

5. Bibliographie

- [GUI 01] Guignard S., Marcer R., Rey V., Kharif C., Fraunié P., Solitary wave breaking on sloping beaches : “2D two phase flow numerical simulation by SL-VOF method”, *Eur. J. Mech. B, Fluids*, 2001, 20, 57-74.
- [BIA 04] Biaisser B., Marcer R., Guignard S., Fraunié P., “3-D two phase flows numerical simulations by SL-VOF method”, *Int. J. For Num. Meth. Fluids*, 2004, 45: 581-604.
- [GOL 07] Golay F. and Helluy P., “Numerical schemes for low Mach wave breaking”, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2007, 21(2): 69-86.
- [HEL 05] Helluy P., Golay F., Caltagirone J.P., Lubin P., Vincent S., Drevrard D., Marcer R. et al., “Numerical simulation of wave breaking”, *M2AN*, 2005, 39(3): 591-607.
- [SAM 11] Sambe A. N., Développement d’un modèle de simulation 3D d’impact de vagues en zones côtières et offshores, Thèse de doctorat, Université de Toulon, 2011.
- [ROE 12] Roeber, V., Cheung K.F., “Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments”, *Coast. Eng.*, 2012, 70:1–20.
- [DEA 84] Dean, R. G. & Dalrymple, R. A., “Water wave mechanics for engineers and scientists”, *Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall*, 1984, Sec. 11.4.
- [LYN 10] Lynett P., Swigler D., Son S., Bryant D., Socolofsky S., “Experimental study of solitary wave evolution over a 3D shallow shelf”, *Proc. 32th Conf. Coast. Engng.*, 2010, p. 813.
- [KLE 05] Kleefsman K.M.T., Fekken G., Veldman A.E.P., Iwanowski B. and Buchner B., “A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems”, *Journal of Computational Physics*, 2005, 206 (1): 363-393.
- [LI 98] Li Y., Raichlen F., “(Discussion) Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes”, *J. Waterway, Port, Coast. Ocean Engng.* 1998, 124(6): 329–333.
- [GOL 15] Golay F., Ersoy M., Yushchenko L. and Sous D., “Block-Based Adaptive Mesh Refinement scheme using numerical density of entropy production for three-dimensional two-fluid flows”, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2015.

Projet TANDEM = Tsunamis en Atlantique et MaNche : Définition des Effets par Modélisation.

Le projet est porté par l’ANR dans le cadre d’un PIA Recherches en matière de Sûreté Nucléaire et Radioprospection.