



16^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique

27-29 novembre 2018 - Marseille



UN CAS-TEST DISCRIMINANT POUR LA SIMULATION DE LA PROPAGATION ET DU RUN-UP DE TRAINS DE VAGUES DE TYPE TSUNAMI

A DISCRIMINATING TEST-CASE FOR THE SIMULATION OF THE PROPAGATION AND RUN-UP OF TSUNAMI-TYPE WAVE TRAINS

M. Benoit^(1, 2), F. Dias⁽³⁾, J. Herterich⁽³⁾, Y.-M. Scolan⁽⁴⁾

benoit@irphe.univ-mrs.fr ; frederic.dias@ucd.ie ; james.herterich@ucd.ie ;
yves-marie.scolan@ensta-bretagne.fr

- ⁽¹⁾ Aix-Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (Irphé), UMR 7342, Marseille, France
- ⁽²⁾ École Centrale de Marseille, Marseille, France
- ⁽³⁾ School of Mathematical Sciences, University College Dublin, Ireland
- ⁽⁴⁾ ENSTA Bretagne, Brest, France

Résumé

Un nouveau cas-test pour les codes de simulation d'ondes de surface de type tsunami est proposé, combinant plusieurs phases de la dynamique d'un train d'ondes de type tsunami : propagation sur une distance relativement importante, shoaling sur une pente de valeur constante à l'approche d'un plateau continental, puis run-up sur une paroi verticale. Il a été construit spécifiquement dans le cadre du projet TANDEM. Des résultats de référence ont été obtenus en utilisant de façon indépendante deux codes potentiels complètement non-linéaires. 11 codes de calcul ont été appliqués sur ce cas, allant des modèles de type Saint-Venant à des modèles résolvant les équations d'Euler complètes en passant par des modèles de type Boussinesq ou Green-Naghdi d'ordres plus ou moins élevés. La présente contribution présente les résultats des comparaisons portant sur la dynamique du train d'onde au cours de sa propagation et sur les valeurs des run-ups sur les deux parois verticales du domaine, montrant des écarts importants entre les codes considérés.

Summary

A new benchmark for tsunami-type surface wave simulation codes is proposed, combining several phases of the dynamics of a tsunami-type wave train: propagation over a relatively long distance, shoaling on a slope of constant value when approaching a continental shelf, and then run-up on a vertical wall. It was built specifically as part of the TANDEM project. Reference results were obtained by independently using two completely nonlinear potential codes. 11 computational codes were applied to this case, ranging from Saint-Venant (nonlinear shallow water equations) type models to models solving the complete Euler equations, including a variety of Boussinesq or Green-Naghdi models of different orders. The present contribution presents the results of the comparisons concerning the dynamics of the wave train during its propagation and the values of the run-ups on the two vertical walls of the domain, showing significant differences between the codes considered.

I – Introduction et objectifs de l'étude

Dans le cadre du projet ANR-PIA TANDEM (Tsunamis en Atlantique et MaNche : Définition des Effets par Modélisation ; <http://www-tandem.cea.fr/>) sur les tsunamis, qui a été réalisé sur la période 2014-2017), plusieurs cas-tests ont été considérés et simulés par les participants au projet à l'aide de différents codes de calcul reposant sur des modélisations mathématiques différentes et utilisant des méthodes numériques différents (voir par exemple Violeau *et al.*, 2016 [13]).

Durant ce projet TANDEM, un nouveau cas-test (appelé **P04**) a été créé, spécifiquement dans le but d'apprécier la précision de différents codes de calcul utilisés pour la simulation de la propagation de trains d'ondes de type tsunami, et leur run-up sur des protections côtières verticales. Ce cas-test vient compléter la panoplie des cas existants, en combinant plusieurs étapes de l'évolution d'un train d'ondes de type tsunami, à savoir :

1. la formation, puis la propagation sur une grande distance d'un train d'ondes de type « ressaut ondulé » avec des effets dispersifs significatifs,
2. le shoaling sur une bathymétrie proche côtière, avec des effets d'amplification des ondes induits par la remontée des fonds,
3. et enfin le run-up sur une paroi verticale représentant une protection côtière.

Sur ce cas-test, les effets non-linéaires et dispersifs jouent tous deux un rôle important, sans pour autant atteindre le déferlement, et ce qui permet d'apprécier et de discriminer les capacités dispersives et non-linéaires des codes de calcul mis en œuvre.

Par ailleurs, les caractéristiques de ce cas-test ont été définies de façon à ce qu'il puisse être simulé par *a priori* la plupart des codes de calcul en hydraulique à surface libre, allant des modèles fondés sur les équations de Saint-Venant (« *nonlinear shallow-water equations* ») aux modèles résolvant les équations complètes de Navier-Stokes ou d'Euler, en passant par les modèles de type Boussinesq, Serre et Green-Naghdi.

Dans le cadre du projet TANDEM, 10 codes de calcul différents ont été mis en œuvre sur ce cas-test, montrant des résultats assez largement différents. Ce cas-test est présenté pour servir plus largement au sein de la communauté scientifique comme cas de référence pour évaluer les capacités et limitations de codes numériques de simulation.

La partie II présente en détail le cas-test proposé et ses conditions de mise en œuvre. La partie III présente les deux codes de calcul utilisés pour obtenir une solution de référence sur ce cas. La partie IV présente une partie des résultats (notamment, élévation de surface libre et signaux de run-up sur les parois) obtenus par une sélection des modèles numériques inter-comparés sur ce cas dans le cadre du projet TANDEM. Certaines analyses (pression et efforts sur les parois) sont en cours. Les conclusions principales sont synthétisées dans la section V.

II – Description du cas-test TANDEM-P04

II – 1 Hypothèses générales

La situation modélisée considère les hypothèses générales suivantes :

- le fluide est supposé avoir une masse volumique homogène et constante ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$),
- les effets de viscosité sont négligés (hypothèse de fluide parfait),
- la pression atmosphérique à la surface libre est homogène et constante, et prise nulle par convention,
- les effets de tension superficielle sont négligés,
- le fluide est soumis à l'action de la gravité, et on considère $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

II – 2 Géométrie et bathymétrie du domaine

Le domaine est bidimensionnel dans le plan vertical (x, z), avec hypothèse d'uniformité de l'écoulement dans la direction y perpendiculaire à ce plan. Ce choix permet d'inclure dans la

comparaison aussi bien des codes tridimensionnels (utilisés alors avec une seule maille dans la direction y par exemple) que des codes bidimensionnels (1DH ou 2DV). L'origine de l'axe z est prise au niveau de la surface libre au repos, et l'axe x est dirigé vers la droite, avec une origine fixée sur la limite gauche du domaine de calcul.

La longueur totale du domaine est $L_x = 30$ km. Il est composé d'une première section de 25 km de long où la profondeur d'eau est constante $h = 50$ m, suivie d'une pente plane de 1:125 sur une distance de 4 km, qui permet d'atteindre un plateau continental où la profondeur d'eau est à nouveau constante et vaut $h_1 = 18$ m sur une distance de 1 km, avant d'atteindre la frontière droite du domaine correspondant à une structure côtière imperméable (voir figure 1).

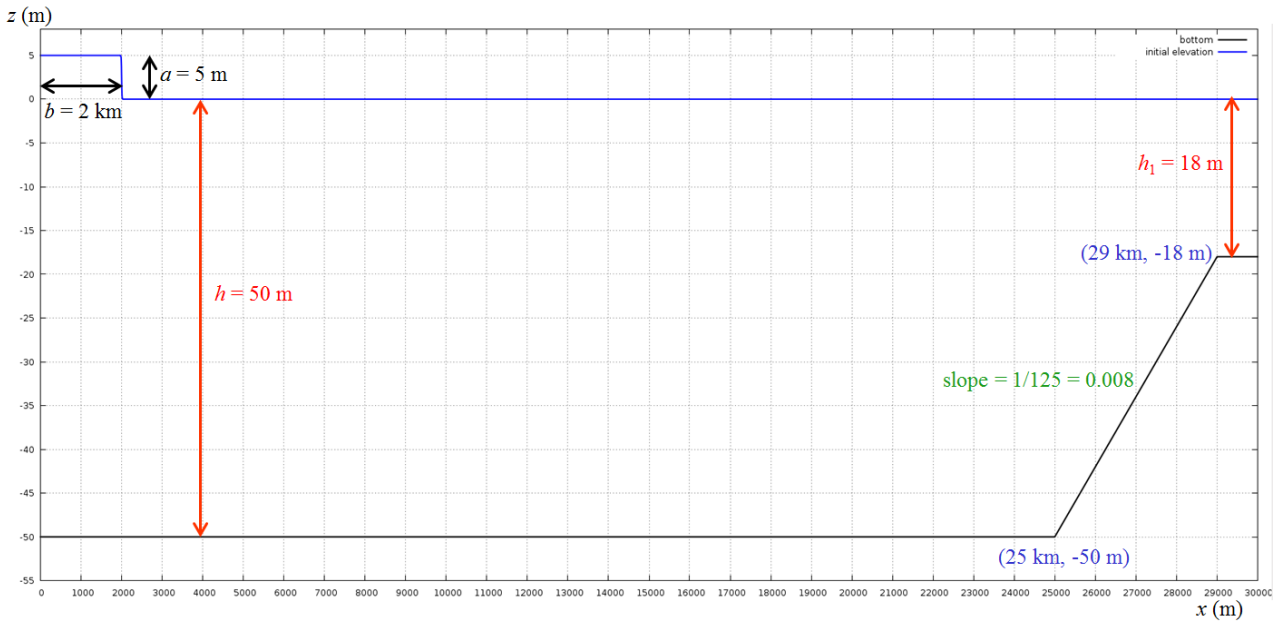


Figure 1. Géométrie du domaine de calcul pour le cas-test, avec représentation de la déformation initiale de surface libre (NB : les axes horizontal et vertical ne sont pas à la même échelle).

II – 3 Conditions aux limites

Le fond marin et les parois verticales à gauche et à droite sont des frontières imperméables avec une condition de glissement (vitesse normale nulle sur ces frontières). On suppose notamment que les frontières latérales sont infiniment hautes, de façon à obtenir le run-up maximum des ondes sur ces parois.

II – 4 Conditions initiales

A l'instant initial, la vitesse est nulle en tout point du domaine fluide.

L'élévation de surface libre initiale correspond à une marche rectangulaire de hauteur 5 m sur les 2 premiers kilomètres du domaine, avec une transition adoucie, définie analytiquement par :

$$\begin{aligned}
 h(x) &= 5 \text{ m} && \text{si } 0 \leq x < 1\,900 \text{ m} \\
 h(x) &= 2.5 (1 - \tanh(\Delta(x/2000 - 1))) && \text{avec } \Delta = 229.756 \quad \text{si } 1\,900 \text{ m} \leq x \leq 2\,100 \text{ m} \\
 h(x) &= 0 && \text{si } 2\,100 \text{ m} < x \leq 30\,000 \text{ m}
 \end{aligned}$$

II – 5 Durée de la simulation

La durée de la simulation est de 1 h de temps physique, ce qui permet au train d'ondes principal de faire plus d'un aller-retour sur le domaine de calcul.

II – 6 Durée de la simulation

Le choix des pas de discrétisation en espace et en temps était laissé libre à chaque participant réalisant le cas-test ; les valeurs utilisées devant être indiquées avec les résultats remis.

III – Obtention des résultats de référence

III – 1 Cadre de modélisation mathématique

Dans le cadre des hypothèses données au § II-1, l'écoulement est décrit par les équations d'Euler avec conditions non-linéaires de surface libre. Par ailleurs, l'écoulement étant initialement irrotationnel (fluide au repos), il le reste durant la simulation d'après le théorème de Kelvin, sous réserve que les vagues ne déferlent pas en cours de simulation. Une reformulation potentielle des équations peut donc être employée pour obtenir la solution de référence.

Dans le but d'obtenir des résultats de référence, deux modèles numériques indépendants, résolvant les équations d'Euler complètement non-linéaires en formulation potentielle ont été mis en œuvre, avec, dans chaque cas, une étude de convergence sur les paramètres de discrétisation spatio-temporels. Ces modèles sont présentés brièvement ci-après. Leurs résultats sont quasi-confondus, une fois la convergence atteinte (par exemple, écarts sur les élévations de surface libre et run-up de l'ordre du mm au maximum). De ce fait, un seul résultat « référence » sera retenu pour les comparaisons de la section IV.

III – 2 Simulation avec un code potentiel « transformation conforme »

La méthode numérique de type transformation conforme pour résoudre les équations d'Euler en présence de surface libre donne des équations d'évolution en temps pour la surface libre et le potentiel des vitesses évalué sur la surface libre. La géométrie du fond peut être arbitraire. La technique consiste à trouver une transformation entre le domaine physique et le domaine conforme. Le domaine conforme est défini par une bande arbitraire d'épaisseur constante. La surface libre et le potentiel des vitesses sont écrits sous forme de séries. La transformée de Hilbert permet de transformer les paires conjuguées dans l'espace conforme.

Le système d'équations dans l'espace conforme est résolu par une méthode pseudo-spectrale, avec l'utilisation des FFT pour les transformations. La discrétisation correspondante du système suit une procédure classique. Le traitement anti-repliement (« *dealiasing* ») est effectué après toute opération non-linéaire. L'intégration en temps se fait par un solveur d'équations différentielles ordinaires (EDO) adaptatif. Voir Viotti & Dias (2014) [14] et Viotti *et al.* (2014) [15] pour plus de détails sur ce code, et des cas de validation.

Avec ce code, implémenté sous MATLAB®, le nombre de modes suivant la direction horizontale a été progressivement augmenté jusqu'à $N = 2^{19} = 524\,288$ modes pour obtenir des résultats convergés pour le run-up sur la paroi droite du domaine (cf. figure 2).

III – 3 Simulation avec le code FSID

Le code FSID (pour « *Free Surface Identification* ») a été initialement développé dans le cadre du projet SLOSHEL (voir Brosset *et al.*, 2009 [3]). Il a pour vocation initiale d'étudier le ballotement (« *sloshing* ») dans les cuves. Les équations non-linéaires de surface libre sont résolues en théorie potentielle. Le code permet de simuler des phénomènes fortement non-linéaires, comme le déferlement d'une vague produit par le mouvement forcé du réservoir (voir Scolan, 2010 [7] ; Scolan *et al.*, 2007 [8], 2016 [9] ; Scolan & Brosset, 2017 [10]).

L'écoulement est décrit par un potentiel des vitesses. Dans les pas de Tuck (1998) [12], on utilise une désingularisation du potentiel en plaçant des singularités de type source en dehors du domaine fluide et dans un proche voisinage de la surface libre.

L'emploi de transformations conformes permet de résoudre les équations dans un domaine fluide défini dans un demi-plan. Par conséquent, on s'affranchit des conditions aux limites sur les frontières autres que la surface libre. En pratique, l'algorithme se résume à une boucle temporelle dans laquelle on résout les équations de transport Lagrangien des marqueurs et du potentiel à la surface libre. Le schéma d'intégration en temps est de type Runge-Kutta d'ordre 4.

Dans la plupart des simulations réalisées dans le cadre de cette étude, on dispose 2500 marqueurs à la surface libre. Cela signifie que l'on résout 4 systèmes linéaires (matrice pleine) de rang 2500 par

pas de temps. Le code tourne actuellement sur les calculateurs Datarmor de l'Ifremer (en version monoprocasseur). Un calcul standard de matrice et son inversion coûte environ 1 minute en temps CPU. Aucune optimisation de l'algorithme n'a été envisagée à ce jour. Il est clair que les marges d'amélioration sont considérables, non seulement en termes de parallélisation du calcul des coefficients des matrices que de la résolution des systèmes linéaires. Il est à noter que la robustesse des algorithmes (pour l'application envisagée ici notamment) permet d'éviter l'apparition d'instabilités classiques dites en "dent de scie". Il n'est donc pas nécessaire de procéder à un remaillage systématique ou intermittent. La seule vraie contrainte est plus contingente car les limitations imposées par les gestionnaires des moyens de calcul, forcent à procéder par reprises successives des calculs (*restarts*). L'analyse de la conservation de la masse et de l'énergie est en accord avec la précision des schémas d'intégration temporelle.

Avec ce code, une étude de convergence a également été menée pour choisir les discrétisations en espace et en temps (résultat convergé présenté également sur la figure 2).

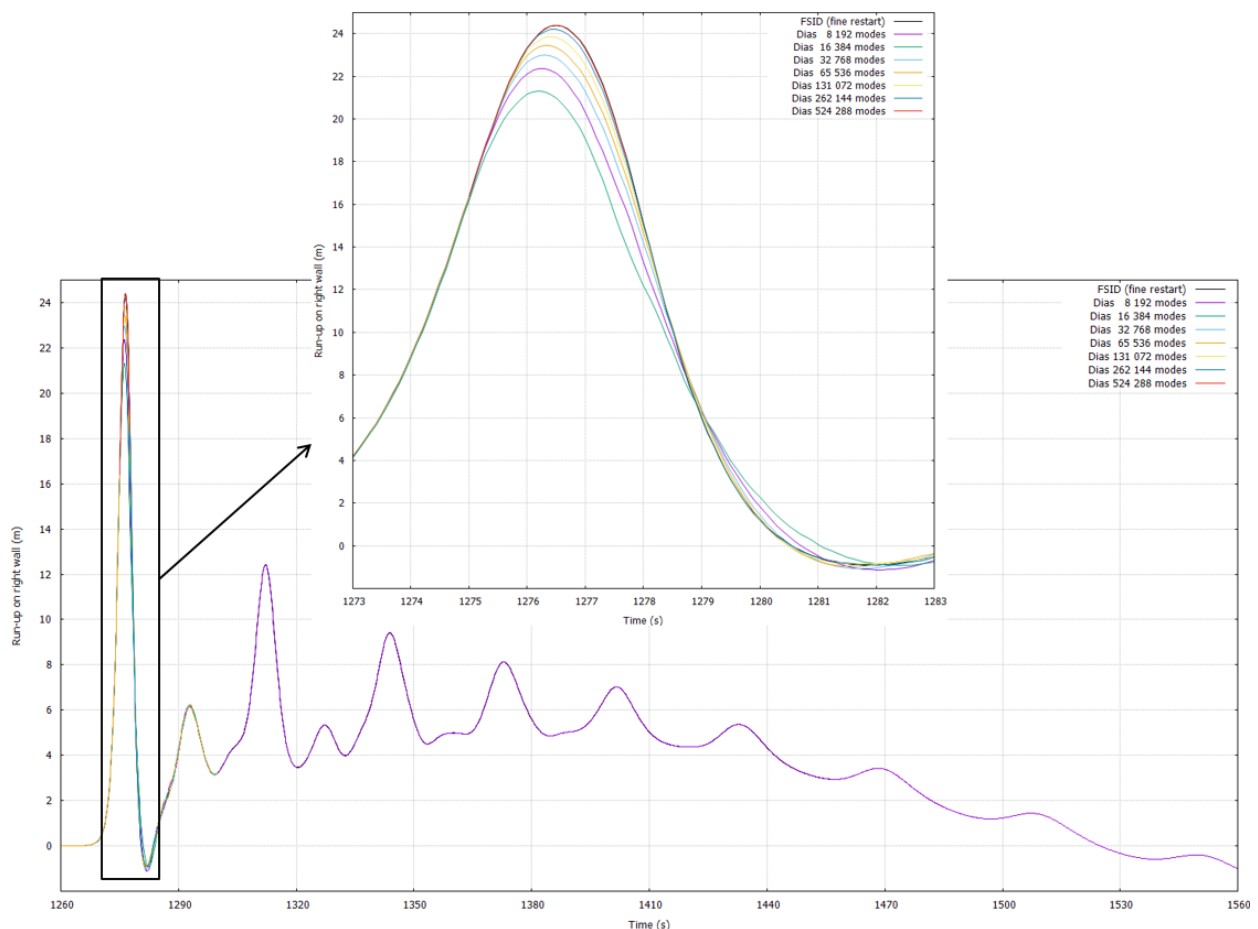


Figure 2. Extrait de la série temporelle de run-up sur la paroi droite obtenus par les codes de référence (figure principale de $t = 21$ min à 24 min, et zoom autour du pic de run-up sur une durée de 10 s)

IV – Résultats sélectionnés et discussion

IV – 1 Introduction à l'inter-comparaison de codes

Plusieurs types de résultats ont été obtenus et comparés aux résultats des simulations de référence :

1. profils spatiaux de surface libre sur le domaine de calcul à différents instants,
2. séries temporelles de run-up sur les deux parois verticales,
3. distribution verticale de pression sur ces deux parois, ainsi que les efforts horizontaux totaux sur ces parois.

Les conservations du volume fluide et de l'énergie mécanique totale sont également examinées, lorsque ces informations sont disponibles en sortie des codes utilisés.

Au total, 10 codes ont été mis en œuvre par les partenaires du projet TANDEM. Ceux-ci peuvent être classés en trois grandes sous-familles :

- A. Codes fondés sur les équations de Saint-Venant. Le modèle mathématique est non-linéaire, mais n’inclut aucun effet de dispersion. Deux codes de cette famille ont été utilisés :
 - A.1 **EoleNS Saint-Venant**, développé et mis en œuvre par Principia,
 - A.2 **Telemac-2D Saint-Venant**, développé et mis en œuvre par EDF R&D.
- B. Codes fondés sur les équations de Boussinesq et Green-Naghdi. Les modèles mathématiques sont partiellement dispersifs et partiellement non-linéaires, avec des degrés variables suivant les équations utilisées. 6 codes de ce type ont été utilisés :
 - B.1 **Calypso**, développé et mis en œuvre par le CEA.
 - B.2 **TUCwave**, fondé sur les équations de Nwogu (1993) [5], développé à l’Univ. Technique de Crète (GR) par Kazolea & Delis (2013) [4], et mis en œuvre par INRIA Bordeaux,
 - B.3 **Telemac-2D Boussinesq**, développé et mis en œuvre par EDF R&D,
 - B.4 **SLOWS-GN**, résolvant les équations Green-Naghdi, développé et mis en œuvre par INRIA Bordeaux,
 - B.5 **Funwave-TVD**, développé à l’Univ. de Delaware (USA) par Shi *et al.* (2012) [11] et mis en œuvre par le BGRM,
 - B.6 **Boussinesq-ECM**, fondé sur le modèle de Boussinesq d’ordre élève de Bingham *et al.* (2009) [2], développé et mis en œuvre par Irphé-ECM.
- C. Codes fondés sur les équations d’Euler potentielles ou de Navier-Stokes (mais sans effets visqueux). Ces modèles mathématiques sont *a priori* complètement dispersifs et complètement non-linéaires :
 - C.1 **whispers3D**, développé et mis en œuvre par Irphé-ECM, suivant Yates et Benoit (2015) [16] et Raoult *et al.* (2016) [6].
 - C.2 **code_Saturne**, développé par EDF R&D et mis en œuvre par ENPC.

En complément à ces codes, nous avons également testé une simulation potentielle linéaire (i.e. sans aucun effet non-linéaire, mais complètement dispersive), en utilisant la version linéarisée du code whispers3D (voir Benoit *et al.* (2017) [1]).

Les analyses et comparaisons des résultats étant encore en cours, nous ne présentons ici qu’une partie des résultats, afin d’illustrer les caractéristiques principales des familles de codes considérées. L’ensemble des résultats sera présenté dans un article spécifique. Nous donnons dans le tableau 1 les principaux paramètres de discrétisation employés par les codes dont nous présentons des résultats ci-après, en rappelant que le choix de ces paramètres était laissé à l’appréciation de chaque utilisateur.

Code	Participant	Maillage horizontal	Δx (m)	Δt (s)	Remarques
EoleNS Saint-Venant	Principia	1DH Δx constant	10 m	Variable ~0.005 s	
SLOWS-GN	INRIA Bordeaux	1DH Δx constant	2 m		
Funwave-TVD	BRGM	1DH Δx constant	2 m	variable ~0.008 s	
Bous-ECM	Irphé-ECM	1DH Δx constant	1.5 m	0.034 s	
whispers3D (idem pour version linéaire)	Irphé-ECM	1DH Δx constant	2.5 m	0.125 s	Utilise $N_T = 7$ pour l’approximation spectrale du potentiel en vertical.
code_Saturne	ENPC	2DH Δx constant, avec 1 seule cellule dans la direction y.	1 m	0.02 s	10 niveaux sur la verticale. Viscosité cinématique fixée à 10^{-12} m ² /s.

Tableau 1. Principaux paramètres de discrétisation des codes dont on présente ci-après quelques résultats.

IV – 2 Dynamique générale du train de vagues

A partir de l'instant initial, caractérisé par une déformation de surface libre sans vitesse initiale, la simulation de référence montre dans les premiers instants la formation d'un train d'ondes de type « ressaut ondulé » ou « onde de choc dispersive » se déplaçant vers la droite (cf. figure 3, montrant les profils de surface libre à $t = 30$ s). Le caractère ondulé de l'onde est, au moins pour la première ondulation, bien reproduit par les différents modèles des familles B et C, à l'exception des modèles de la famille A (éq. de Saint-Venant), qui ne montrent aucune ondulation (du fait de l'absence de dispersion). On note que le modèle potentiel linéaire produit une forme correcte de l'onde, mais avec un léger retard par rapport à la solution de référence.

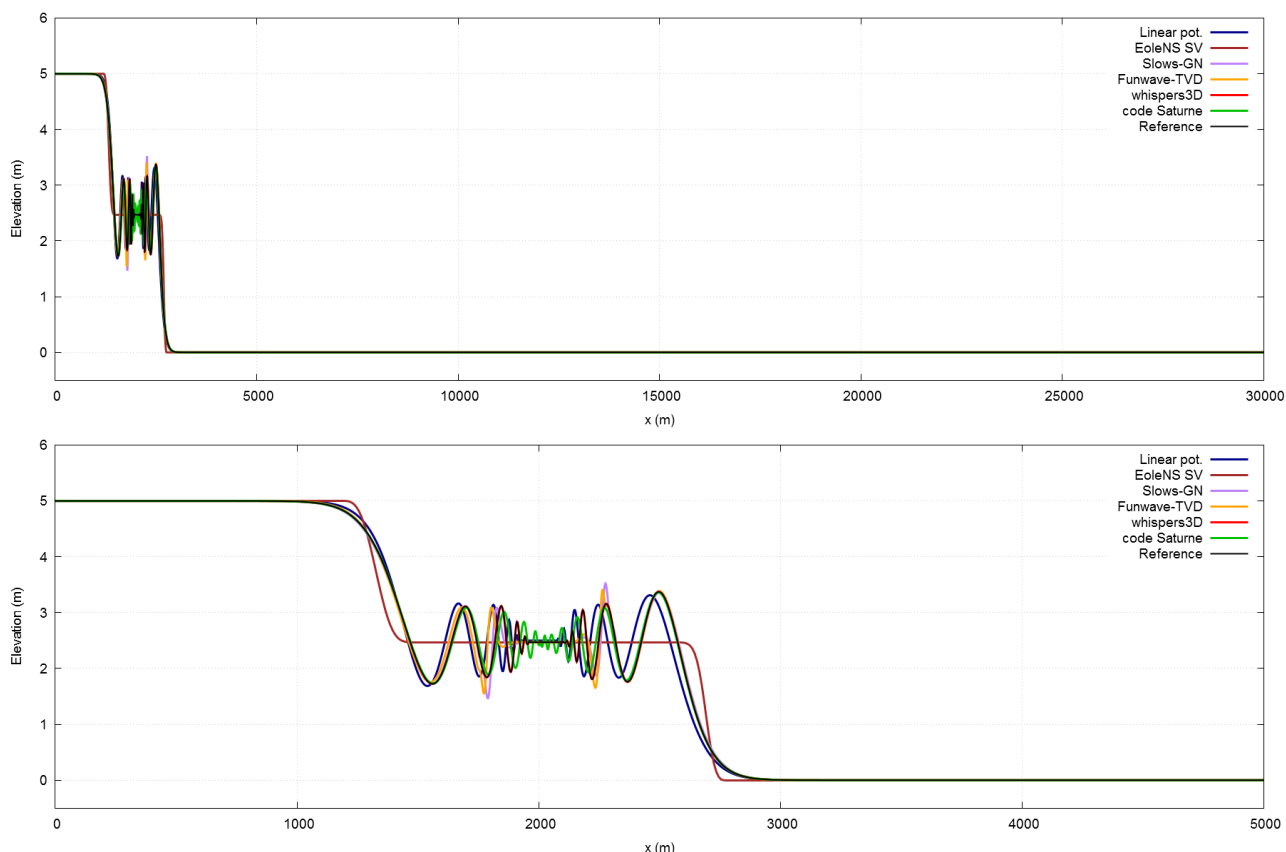


Figure 3. Profils spatiaux de surface libre à $t = 30$ s. En haut : vue sur l'ensemble du domaine ; en bas : zoom sur les 5 premiers km du domaine.

On retrouve ces comportements lors de la phase de propagation du train d'ondes, illustrés ici aux instants $t = 5$ min (figure 4) et $t = 15$ min (figure 5). La surface libre calculée par les modèles de la famille A présente un front raide et une crête longue et plate, tandis que la solution de référence et les autres modèles des familles B et C montrent des oscillations autour d'une valeur moyenne qui semble proche des résultats des modèles de Saint-Venant. On observe que le caractère ondulé de l'onde est par contre bien présent dans le résultat de la simulation linéaire, mais le train d'ondes se déplace nettement moins vite que la solution de référence (cf. figure 5-bas).

Les modèles des familles B et C sont relativement proches à $t = 5$ min, notamment au niveau de la tête du train d'ondes, mais à $t = 15$ min, on distingue nettement des différences entre ces modèles. La première vague du code SLOWS-GN est légèrement plus haute et un peu en avance par rapport à la solution de référence, et il en est de même dans une moindre mesure pour les résultats de Funwave-TVD, tandis que l'onde calculée par code_Saturne accuse un très léger retard, et une petite sous-estimation par rapport à la solution de référence. Les résultats des codes Boussinesq-ECM (non-tracé ici) et whispers3D sont graphiquement superposés à la solution de référence. Plus on s'éloigne de la tête de l'onde, plus les différences sont marquées entre les différents modèles pour les vagues de plus petite amplitude, progressivement à partir de la deuxième ondulation.

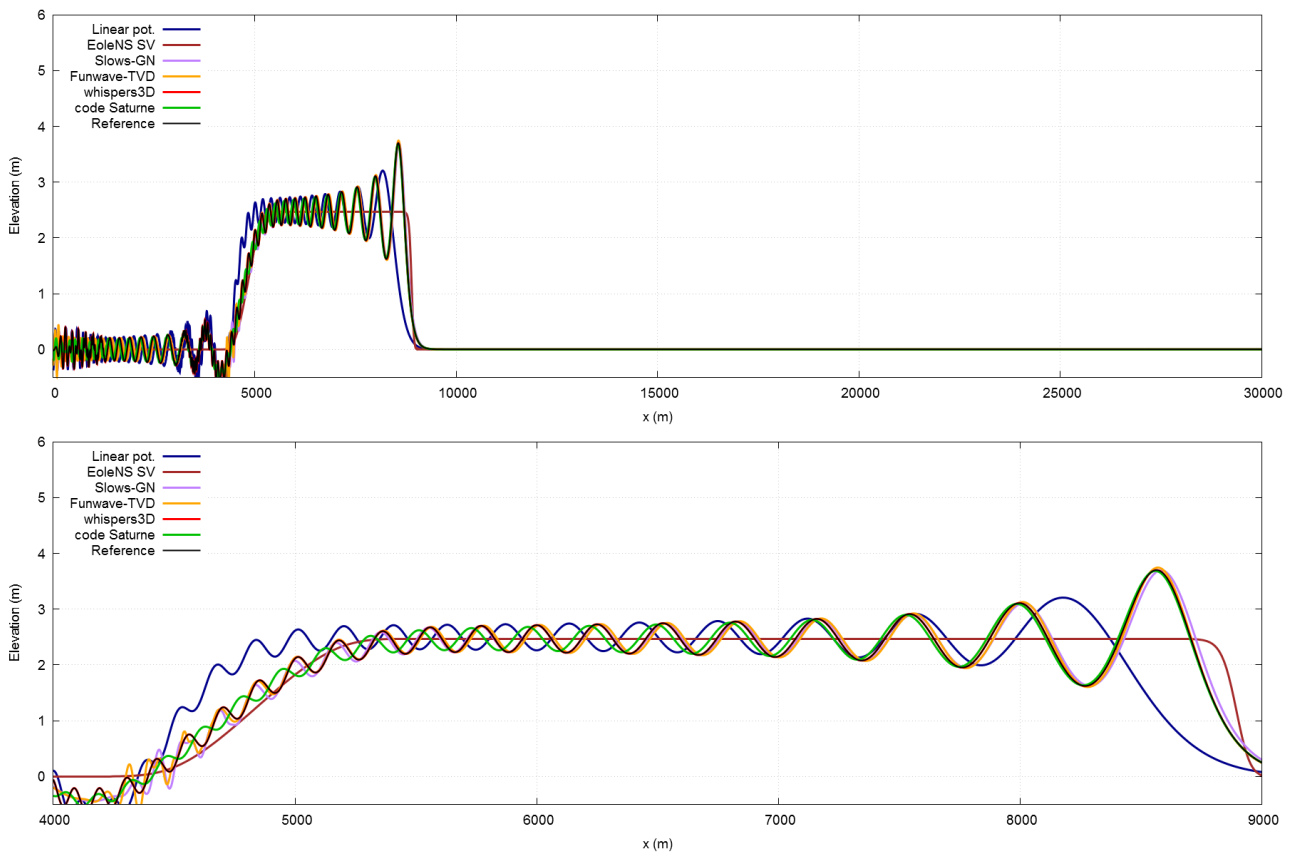


Figure 4. Profils spatiaux de surface libre à $t = 5$ min. En haut : vue sur l'ensemble du domaine ; en bas : zoom sur une distance de 5 km autour du front du train d'ondes.

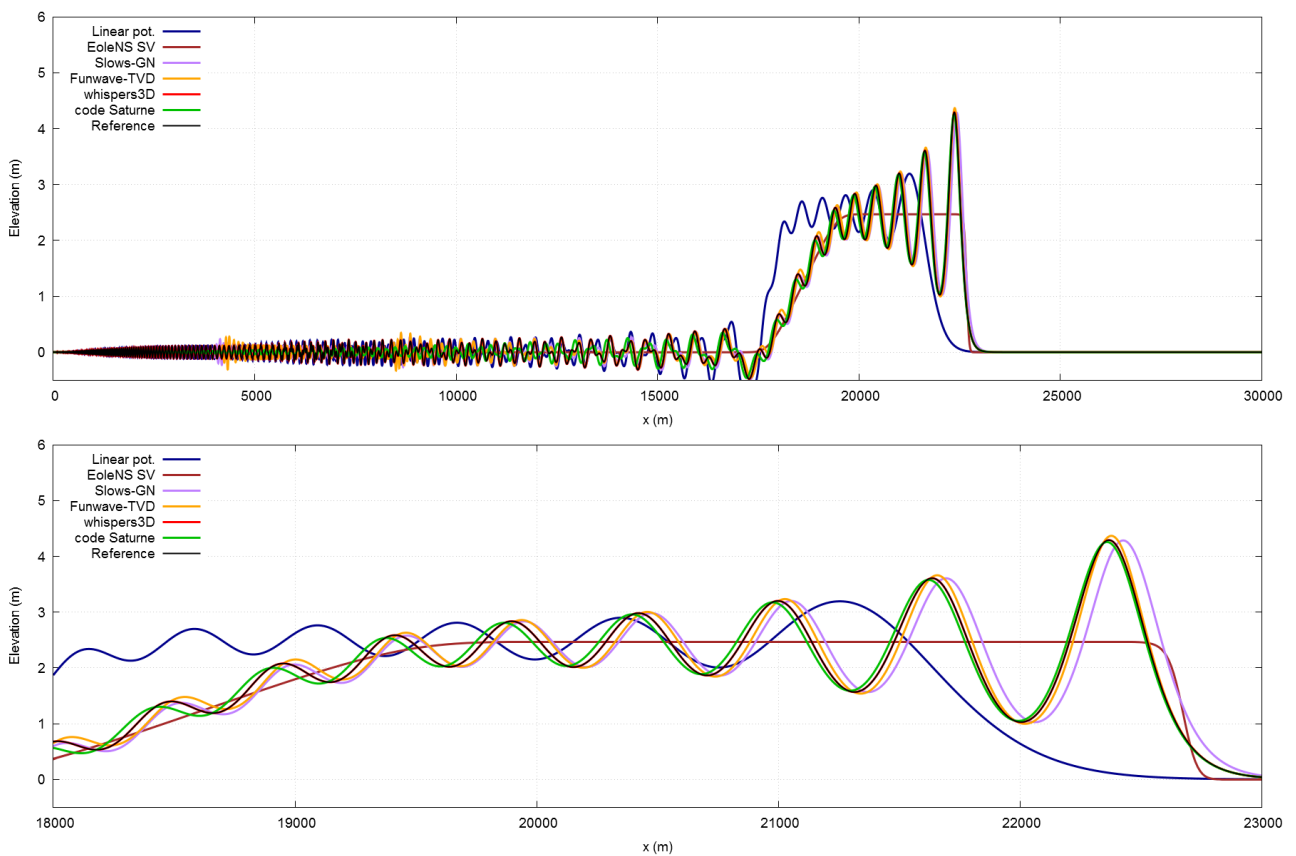


Figure 5. Profils spatiaux de surface libre à $t = 15$ min. En haut : vue sur l'ensemble du domaine ; en bas : zoom sur une distance de 5 km autour du front du train d'ondes.

A partir de $t = 17$ min environ, le train d'ondes commence à se propager sur la pente, et des effets de shoaling se manifestent. On présente sur la figure 6 les profils de surface libre à l'instant $t = 21$ m, lorsque la première vague est sur la partie plane de profondeur $h_1 = 18$ m, avant l'arrivée sur la paroi droite. A cet instant, la première vague a quasiment atteint une forme d'onde solitaire se détachant du train d'ondes, avec une crête culminant à 9.5 m environ. Hormis les codes Boussinesq-ECM et whispers3D qui restent quasiment confondus avec le résultat de référence, tous les autres codes donnent des résultats différents pour la tête de l'onde. La première vague de SLOWS-GN est nettement en avance et d'amplitude inférieure de 0.5 m environ, tandis que l'onde calculée par Funwave-TVD, également en avance, est trop haute de plus de 1 m. L'onde calculée par code_Saturne est un peu en retard et inférieure d'environ 0.5 m en hauteur. L'onde calculé par les codes Saint-Venant reste de forme rectangulaire, son front est en retard et surtout elle culmine à une élévation de 3 m seulement. La solution linéaire est très en retard. Sa première ondulation culmine à 4 m environ (mais la phase de shoaling n'est pas encore achevée pour ce modèle à cette date).

A cet instant, on peut clairement identifier les effets induits lors des phases de propagation et de shoaling par les capacités dispersives et non-linéaires différentes des modèles de la famille B.

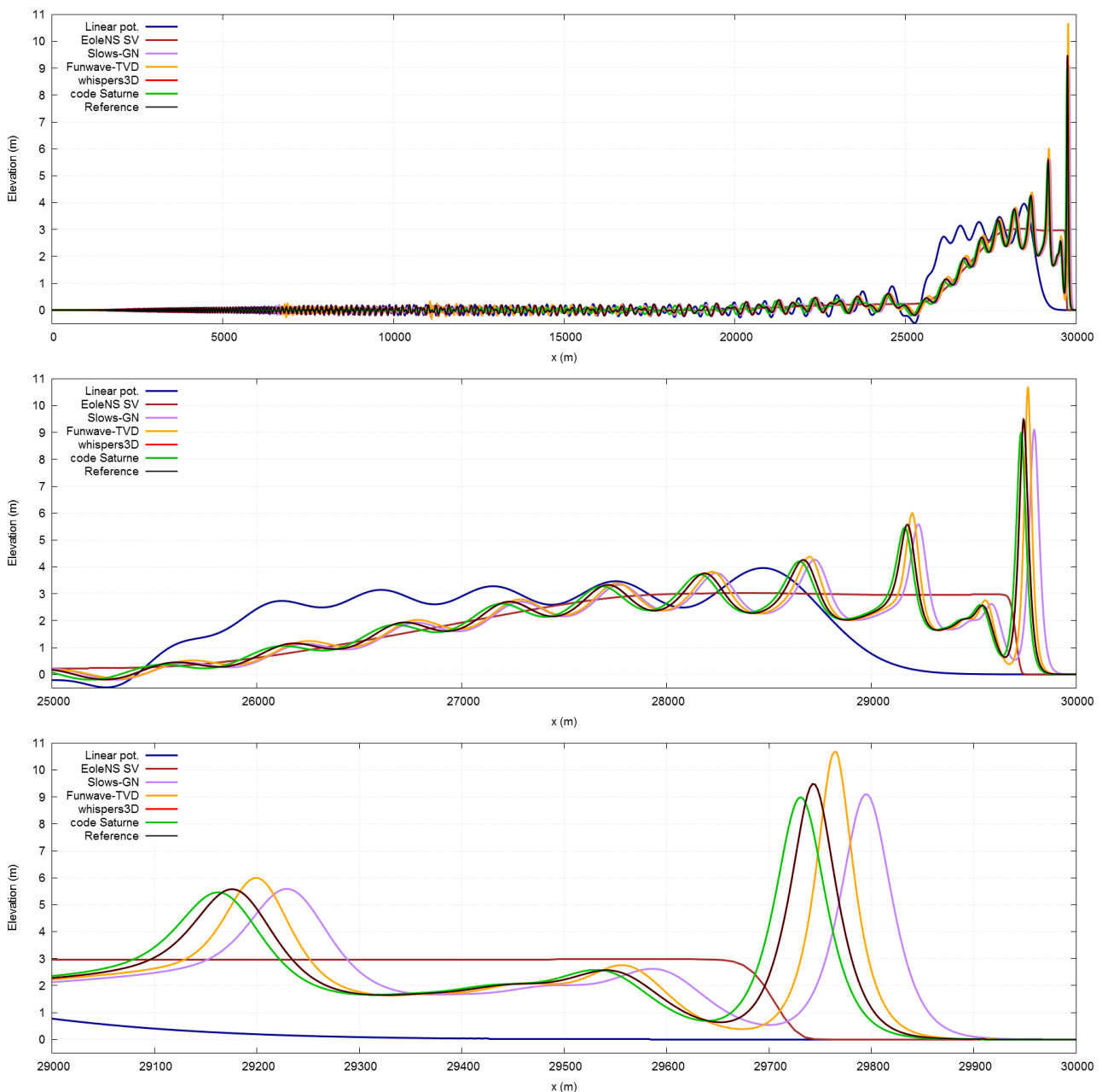


Figure 6. Profils spatiaux de surface libre à $t = 21$ min. En haut : vue sur l'ensemble du domaine ; au milieu : zoom sur les 5 derniers km du domaine ; en bas : zoom sur le dernier km du domaine.

IV – 3 Run-up sur la paroi droite

Sur ce cas-test, un paramètre d'intérêt particulier est le run-up maximum atteint sur le mur droit (peu après 21 min 16 s), pour lequel les simulations de référence donnent une valeur maximale de 24.40 m environ, ce qui représente une amplification d'un facteur 4.88 par rapport à l'amplitude de la déformation initiale. Suivant les codes utilisés, de grandes différences sont observées, et ce run-up maximum peut être sous-estimé d'un facteur pouvant aller jusqu'à 4, ...ou légèrement surestimé, comme illustré sur les différents graphes de la figure 7.

En particulier, les modèles de Saint-Venant de la famille A (non dispersifs) produisent un run-up avec une forme de plateau restant approximativement constant pendant environ 2 min et une valeur maximale légèrement supérieure à 6 m. Au contraire, les résultats des modèles des familles B et C présentent une forme composée de plusieurs pics successifs, de durées plus courtes avec des hauteurs décroissantes au cours du temps. Le premier pic (qui est le plus élevé) survient plus tôt que dans les modèles de Saint-Venant. Les valeurs de run-up données par les dix modèles (arrondis ici à une précision de 1 cm) sont résumées dans le tableau 2, ce qui permet d'obtenir une évaluation quantitative de leurs performances sur ce cas.

	Run-up maximum sur le mur droit (m)	Ecart avec le run-up de référence (m)	Différence relative (%)
Potentiel linéaire	8,20	-16,20	-63,40%
A.1 EoleNS Saint-Venant	6,17	-18,23	-74,71%
A.2 Telemac-2D Saint-Venant	6,29	-18,11	-74,22%
B.1 Calypso	20,43	-3,97	-16,27%
B.2 TUCwave	17,52	-6,88	-28,20%
B.3 Telemac-2D Boussinesq	12,34	-12,06	-49,43%
B.4 SLOWS-GN	19,58	-4,82	-19,75%
B.5 Funwave-TVD	21,23	-3,17	-12,99%
B.6 Boussinesq-ECM	24,67	0,27	1,11%
C.1 whispers3D	24,41	0,01	0,04%
C.2 code_Saturne	21,37	-3,03	-12,42%

Tableau 2. Comparaison des run-up maximums calculés sur la paroi verticale par les 11 codes de calcul, et écarts par rapport au résultat de la simulation de référence.

Ces valeurs confirment les piètres performances des modèles de la famille A sur ce cas, avec des sous-estimations de l'ordre de 75 %. Le modèle potentiel linéaire est moins en écart avec un run-up maximum de 8.20 m, mais le run-up maximum survient avec un retard très significatif. Les modèles de la famille B apportent clairement une amélioration, en reproduisant au moins qualitativement la forme attendue du signal de run-up. Le run-up maximum est cependant sous-estimé par 5 des 6 codes de cette famille, entre -50 % environ (Telemac-2D Boussinesq) et Funwave-TVD (-13 %). SLOWS-GN donne une sous-estimation de -20% environ, toutefois l'instant de run-up maximum est correctement estimé par ce code. Les meilleurs résultats de cette famille de codes sont obtenus avec le modèle d'ordre élevé Boussinesq-ECM, qui produit un signal en phase avec la simulation de référence et un maximum légèrement surestimé de 0.27 m (+1.1 %).

Pour les modèles de la famille C, whispers3D, utilisé avec une résolution intermédiaire ($\Delta x = 2.5$ m ; $\Delta t = 0.125$ s ; $N_T = 7$ pour l'approximation spectrale du potentiel en vertical) reproduit quasi parfaitement le signal de run-up, avec un écart sur la valeur maximum inférieur au cm, et sans aucun déphasage. Code_saturne, bien que mis en œuvre avec une résolution très fine ($\Delta x = 1$ m ; $\Delta t = 0.02$ s ; 10 niveaux en z), ne parvient pas à estimer précisément le run-up, donnant une amplitude voisine de Funwave-TVD pour le run-up maximum (sous-estimation de 3 m environ, soit -12.5 %), avec un léger retard par rapport à la simulation de référence.

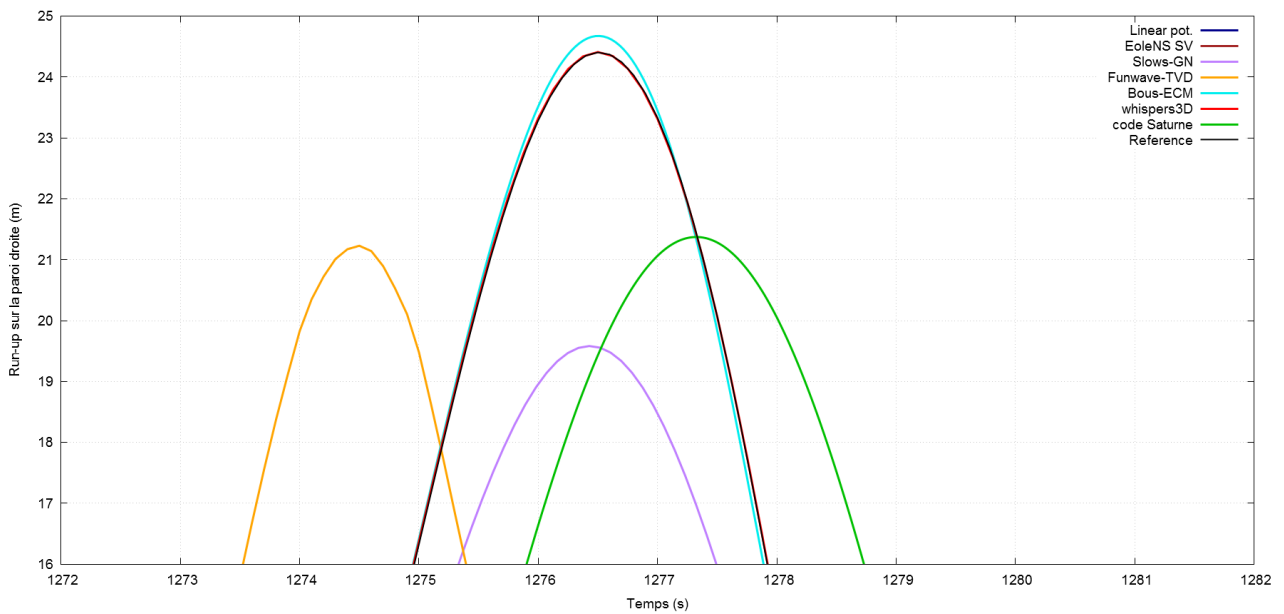
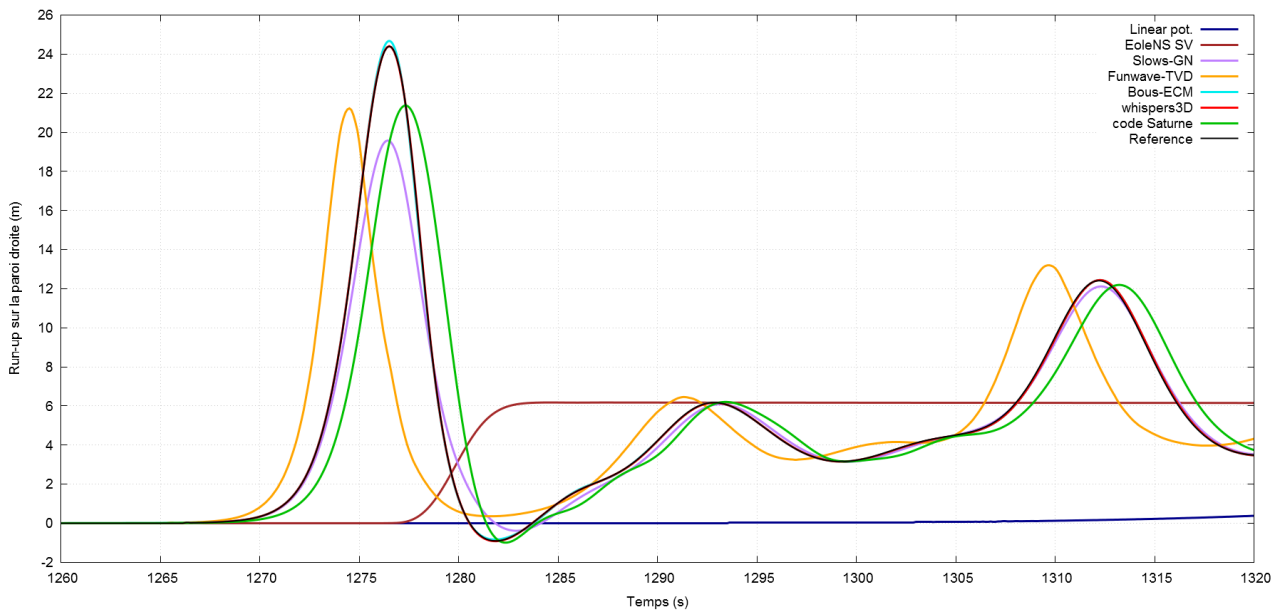
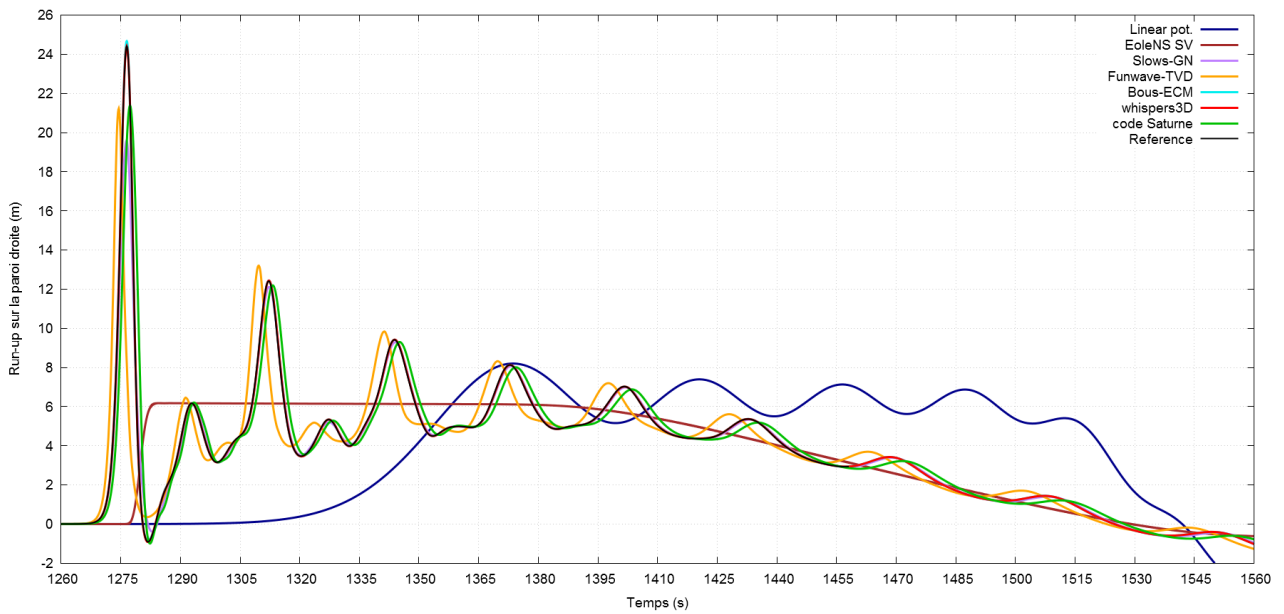


Figure 7. Comparaison des séries temporelles de run-up sur la paroi droite obtenues par 7 codes (en haut : vue sur 5 min à partir de $t = 21$ min ; au milieu : vue sur 1 min à partir de $t = 21$ min ; en bas : zoom sur 10 s autour du pic de run-up)

IV – 4 Run-up sur la paroi gauche

Finalement, on présente sur la figure 8 la comparaison des run-ups sur la paroi de gauche, après que le train d'onde a fait un aller-retour sur le domaine de calcul. De grandes différences sont à nouveau observées entre les différents codes, même si les écarts entre modèles des familles B et C sont moins importants que pour le run-up sur le mur de droite. Les résultats des modèles de la famille A montrent toujours un signal de run-up moins haut et sans oscillations, tandis que le modèle potentiel linéaire donne un run-up plus élevé, mais se produisant bien plus tard. Sur les résultats de référence, on peut observer sur ce mur que (i) le run-up le plus élevé n'est pas produit par la première vague mais par les suivantes, et (ii) les vagues 2 à 4 donnent des valeurs de run-up assez similaires: deuxième vague: 7.54 m, troisième vague: 7.55 m, quatrième vague: 7.50 m. Peu de codes sont capables de reproduire cette caractéristique, à savoir Funwave-TVD, Slows-GN, Boussinesq-ECM et whispers3D. Ici encore, les résultats les plus précis sont obtenus avec whispers3D et Boussinesq-ECM, suivis de Slows-GN.

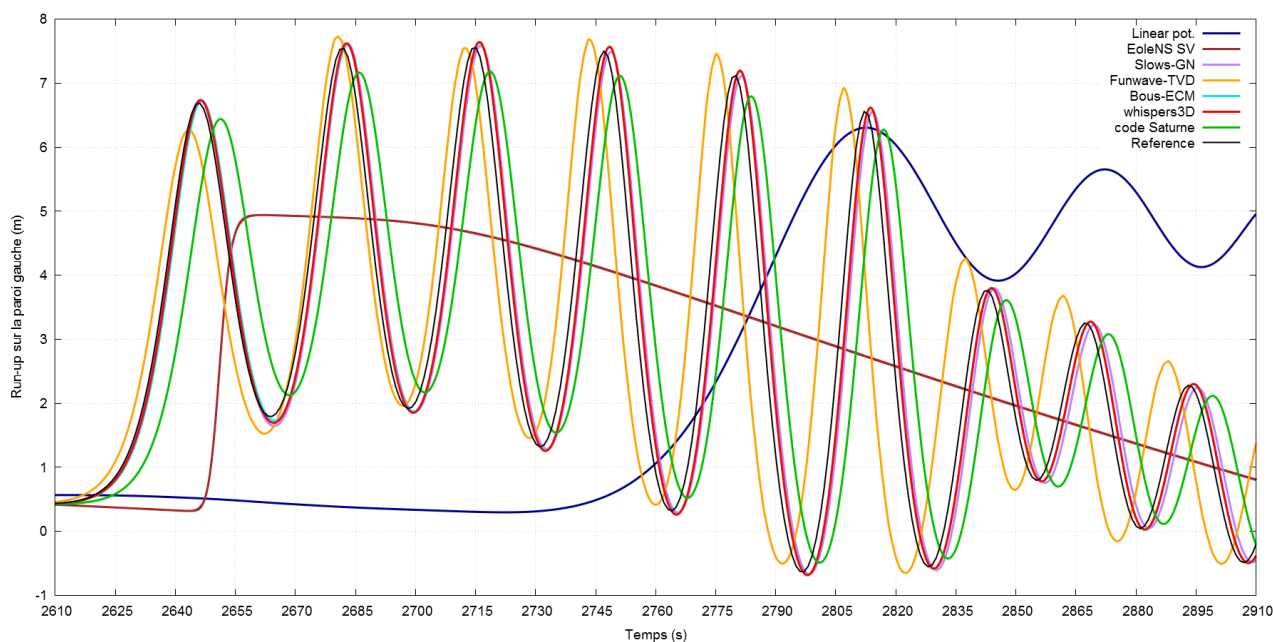


Figure 8. Comparaison des séries temporelles de run-up sur la paroi gauche obtenues par 7 codes
Vue sur une durée de 5 min à partir de $t = 43.5$ min.

V – Conclusions et perspectives

Un nouveau cas-test pour les codes de simulation d'ondes de surface de type tsunami a été bâti spécifiquement dans le cadre du projet TANDEM. Il combine plusieurs phases de la dynamique d'un tel train d'ondes : propagation sur une distance relativement importante, shoaling sur une pente de valeur constante à l'approche d'un plateau continental, puis run-up sur une paroi verticale. Des résultats de référence ont été obtenus en utilisant de façon indépendante deux codes potentiels complètement non-linéaires. La configuration du cas-test met en jeu à la fois des effets dispersifs et non-linéaires importants, avec la formation d'un train d'ondes de type onde de choc dispersive.

11 codes de calcul ont tourné sur ce cas dans le cadre du projet TANDEM, et leurs résultats sont en cours d'analyse. Ce cas-test met clairement en évidence les fortes limitations d'une part des modèles non-dispersifs (fondés sur les équations de Saint-Venant), qui sous-estiment notamment le run-up maximum d'un facteur de l'ordre de 4, et d'autre part d'une approche purement linéaire, qui sous-estime moins le run-up (d'un facteur 3 tout de même) mais produit un train d'ondes en retard par rapport au calcul de référence. Les codes de type Boussinesq ou Green-Naghdi donnent une meilleure description de la dynamique du train d'ondes, mais leurs résultats sont assez variables en fonction de l'ordre des termes conservés dans ces modèles et des méthodes numériques employées.

Hormis le code Boussinesq-ECM, fondé sur le modèle d'ordre élevé de Bingham *et al.* [2] qui donne d'excellents résultats (avec une légère surestimation du run-up maximum sur le mur droit de 0.27 m), les autres modèles de cette famille sous-estiment ce run-maximum avec de valeurs variant entre -3.17 m soit -13 % (Funwave-TVD) et -12.06 m soit -49.4 % (Telemac-2D Boussinesq), et présentent également un déphasage temporel plus ou moins important (à l'exception du code SLOWS-GN). La simulation réalisée avec code_saturne donne des résultats qualitativement corrects, mais avec un run-up maximum sur le mur droit également sous-estimé, de -3 m environ soit -12.4 %. C'est le code potentiel non-linéaire whispers3D qui donne les meilleurs résultats, quasiment confondus avec ceux des simulations de référence, présentant des écarts inférieurs au cm pour le run-up sur le mur droit et aucun déphasage en temps, suivi par le code Boussinesq-ECM.

Comme attendu, ce cas-test se révèle discriminant, en permettant de visualiser et quantifier les erreurs associées à différents codes de calcul, fondés sur des modèles mathématiques plus ou moins approchés et des méthodes numériques différentes. D'autres analyses sont actuellement en cours, se focalisant sur les chargements exercés sur les deux parois au cours du temps (profil vertical de pression, effort horizontal, moment de renversement) et seront publiées prochainement.

Remerciements

Les auteurs, et notamment M. Benoit responsable de ce cas-test au sein du projet TANDEM, remercient les participants à l'exercice d'inter-comparaison, et notamment K. Pons et R. Marcer (Principia), R. Ata (EDF R&D), M. Kazolea et M. Ricchiuto (INRIA Bordeaux), Ph. Heinrich (CEA), S. Le Roy (BRGM), J. Harris (ENPC), et O. Kimmoun (Irphe-ECM).

Ce travail a été mené dans le cadre du lot 1 du projet TANDEM sur les tsunamis sélectionné dans le cadre des Projets Investissements d'Avenir « Recherches en matière de Sécurité Nucléaire et Radioprotection » (PIA RSNR), sous la référence 11-RSNR-0023 (<http://www-tandem.cea.fr/>).

Références

- [1] M. Benoit, C. Raoult, & M.L. Yates. Analysis of the linear version of a highly dispersive potential water wave model using a spectral approach in the vertical. *Wave Motion*, 74, 159-181, 2017.
- [2] H.B. Bingham, P. A. Madsen, & D.R. Fuhrman. Velocity potential formulations of highly accurate Boussinesq-type models. *Coastal Engineering*, 56(4), 467-478, 2009.
- [3] L. Brosset, Z. Mrava, M. Kaminski, S. Collins & T. Finnigan. Overview of SLOSH project. *Proc. 19th Int. Ocean and Polar Eng. Conf. (ISOPE'2009)*, paper ISOPE-I-09-037, 21-26 July 2009, Osaka (Japan), 2009.
- [4] M. Kazolea, & A.I. Delis. A well-balanced shock-capturing hybrid finite volume-finite difference numerical scheme for extended 1D Boussinesq models. *Appl. Num. Math.*, 67, 167-186, 2013.
- [5] O. Nwogu. Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(3), 618-638, 1993.
- [6] C. Raoult, M. Benoit, & M.L. Yates. Validation of a fully nonlinear and dispersive wave model with laboratory non-breaking experiments. *Coastal Engineering*, 114, 194-207, 2016.
- [7] Y.-M. Scolan. Some aspects of the flip-through phenomenon: A numerical study based on the desingularized technique. *Journal of Fluids and Structures*, 26(6): 918-953, 2010.
- [8] Y.-M. Scolan, O. Kimmoun, H. Branger, & F. Remy. Surface libre non linéaire au droit d'un mur vertical. Effet d'une bathymétrie locale. *Actes des 11èmes Journées de l'Hydrodynamique*, Brest (France), 2007.

- [9] Y.-M. Scolan, & L. Brosset. Numerical simulation of highly nonlinear sloshing in a tank due to forced motion. *Proc. 26th Int. Ocean and Polar Eng. Conf. (ISOPE'2016)*, paper ISOPE-I-16-551, 26 June-2 July 2016, Rhodes (Greece), 2016.
- [10] Y.-M. Scolan, & L. Brosset. Numerical Simulation of highly nonlinear sloshing in a tank due to forced motion. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 27(1), 11-17, 2017.
- [11] F. Shi, J.T. Kirby, J.C. Harris, J.D. Geiman, & S.T. Grilli. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Modelling*, 43-44, 36-51, 2012.
- [12] E.O. Tuck. Solution of Nonlinear Free-Surface Problems by Boundary and Desingularised Integral Equation Techniques. *CTAC'97*, Singapore, 11-26, 1998.
- [13] D. Violeau, R. Ata, M. Benoit, A. Joly, S. Abadie, L. Clous, M. Martin Medina, D. Morichon, J. Chicheportiche., M. Le Gal, A. Gailler, H. Hébert., D. Imbert, M. Kazolea, M. Ricchiuto, S. Le Roy, R. Pedreros, M. Rousseau, K. Pons, R. Marcer, C. Journeau, & R. Silva Jacinto. A database of validation cases for tsunami numerical modelling. *Proc. 4th IAHR Europe Congress*, 27-29 July 2016, Liège (Belgium), 2016.
- [14] C. Viotti & F. Dias. Extreme waves induced by strong depth transitions: Fully nonlinear results. *Physics of Fluids*, 26:051705, 2014.
- [15] C. Viotti, D. Dutykh, & F. Dias. The conformal-mapping method for surface gravity waves in the presence of variable bathymetry and mean current. *Procedia IUTAM*, 11:110-118, 2014.
- [16] M.L. Yates, & M. Benoit. Accuracy and efficiency of two numerical methods of solving the potential flow problem for highly nonlinear and dispersive water waves. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 77, 616-640, 2015.