

## Simulation des Grandes Echelles de l'hydrodynamique générée par le déferlement d'une houle régulière

Houssen Ali<sup>1</sup>, Pierre Lubin<sup>1</sup>, Olivier Kimmoun<sup>2</sup> et Hubert Branger<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Bordeaux 1  
TREFLE-ENSCPB UMR CNRS 8508  
16 avenue Pey-Berland, 33607 Pessac Cedex  
lubin@enscpb.fr

<sup>2</sup>Ecole Centrale de Marseille  
LRD  
38 rue Joliot Curie, 13451 Marseille Cedex 20

<sup>3</sup>Aix-Marseille Université  
IRPHE UMR CNRS 6594  
49 rue Joliot Curie, B.P. 146, 13384 Marseille Cedex 13

### Résumé :

L'objectif de ce travail est de présenter les résultats de simulations bi- et tridimensionnelles d'une houle régulière se propageant et déferlant sur une plage en pente. Un outil de simulation des équations de Navier-Stokes est utilisé pour traiter ce problème d'écoulement turbulent de deux fluides non-miscibles, l'air et l'eau. L'intérêt est d'accéder à une description complète et précise de l'écoulement, devant nous conduire à une meilleure compréhension des mécanismes complexes intervenant lors du déferlement des vagues. Des comparaisons sont faites avec des résultats issus d'expériences réalisées dans un canal à houle, long de 17 m et large de 65 cm. La plage de pente 1/15 est longue de 13 m. La hauteur de crête à creux de la houle étudiée est de 11,38 cm, dans une profondeur moyenne fixée à 70,5 cm. La période de la houle est de 1,275 s. Les différentes étapes du déferlement seront présentées et discutées.

### Abstract :

The scope of this paper is to show the results obtained for the Large Eddy Simulations (LES) of three-dimensional regular waves shoaling and breaking over a sloping beach, by solving the Navier-Stokes equations in air and water. The interest of this approach is to provide a complete and accurate description of free surface and velocity evolutions in the two phases, which must lead to the understanding of energy dissipation and turbulent flow structures thanks to the introduction of a turbulence model (Large Eddy Simulation – LES). The breaking processes including shoaling, overturning, splash-up and air entrainment, will be presented and discussed.

### Mots-clefs :

**Simulation numérique, déferlement, turbulence.**

## 1 Introduction

Des progrès significatifs ont été apportés à la compréhension générale de l'hydrodynamique de la zone de surf, très largement affectée par le déferlement des vagues (Peregrine 1983, Christensen et al. 2002). Cependant, la nature turbulente de l'écoulement rend toujours très difficile son étude. L'intérêt de l'approche numérique réside donc dans la possibilité d'apporter une description complète des évolutions de la surface libre et du champ de

vitesse, à la fois dans l'air et dans l'eau, durant le processus du déferlement des vagues. Ce travail vise à mieux détailler les mécanismes de dissipation de l'énergie et la génération des structures tourbillonnaires. Sur la base de travaux numériques (Lubin *et al.* 2006) et expérimentaux (Kimmoun *et al.* 2004, 2006), une étude numérique du déferlement de houle régulière sur plage est présentée. La Simulation des Grandes Echelles (SGE) a déjà été présentée comme étant une méthode fiable et précise pour la simulation des équations de Navier-Stokes dans le cadre d'écoulements instationnaires tel que le déferlement des vagues. (Watanabe *et al.* 2005, Christensen 2006).

## 2 Méthodes numériques

Le problème considéré est l'écoulement de deux fluides incompressibles non miscibles. Pour un maillage structuré fixe non conforme à l'interface, la formulation eulérienne régissant l'écoulement diphasique est composée des équations de Navier-Stokes (Eqs. 2), couplées avec la condition d'incompressibilité (Eq. 1) :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \left( (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + \nabla' \mathbf{u}) \right) + \mathbf{F} - \frac{\mu}{K} \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_1 \text{ et } \mu = \mu_1 \text{ si } C \geq 0.5 \\ \rho &= \rho_2 \text{ et } \mu = \mu_2 \text{ si } C < 0.5 \end{aligned} \quad (4)$$

avec  $\mathbf{u}$  le vecteur vitesse et  $p$  la pression,  $\mathbf{g}$  le vecteur gravité,  $\rho$  la masse volumique,  $\mu$  la viscosité,  $\mu_T$  la viscosité turbulente,  $t$  le temps,  $\mathbf{F}$  la force volumique de tension superficielle,  $K$  le coefficient de perméabilité permettant la prise en compte d'obstacles solides dans l'écoulement. Les densités et viscosités, considérées comme constantes dans chacune des deux phases, sont des fonctions du point, que l'on détermine à partir de la position de l'interface entre les deux fluides. Celle-ci est décrite par une fonction binaire  $C$  traduisant le coefficient de remplissage de l'eau dans chaque volume de discrétisation. On définit ainsi  $C$ , telle que  $C = 1$  si le point est dans l'eau, et  $C = 0$  si le point est dans l'air. L'interface est alors considérée comme étant représentée par l'iso valeur  $C = 0,5$ . La valeur moyenne de la fonction  $C$  sur un volume de contrôle représente donc la fraction volumique d'eau présente dans ce volume. L'interface étant une surface matérielle et  $C$  une fonction caractéristique de cette interface, l'équation d'évolution temporelle de  $C$  est décrite par une équation d'advection (Eq. 3). L'ensemble des méthodes numériques est détaillé par Vincent *et al.* (2003). Cet outil numérique a déjà prouvé sa capacité à traiter des problèmes d'écoulements côtiers, tels que le déferlement d'une onde solitaire sur un récif immergé (Lubin 2004, Lubin *et al.* 2004, Helluy *et al.* 2005).

## 3 Configuration expérimentale

Les expériences ont été réalisées à l'Ecole Centrale de Marseille. Le canal à houle est présenté dans la figure 1. Le canal est long de 17 m et large de 0.65 m. La profondeur initiale a

été fixée à  $d = 0.735$  m. La plage de pente 1/15 est longue d'environ 13 m, débutant à environ 4 m du batteur à houle. La longueur de la zone de surf est d'environ 3 m. Des mesures PIV ont été réalisées en douze endroits différents du canal, du début du déferlement jusqu'à la zone de swash. Une houle régulière de Stokes au 5<sup>ème</sup> ordre a été générée, correspondant aux développements analytiques de Fenton (1985). La période de la houle est  $T = 1.3$  s et l'amplitude sur fond plat est  $a = 0.07$  m. La longueur d'onde de la houle est  $L = 2.5$  m. Les vagues commencent à déferler à environ 2.65 m de la ligne du rivage, ou 12.375 m du batteur à houle. Un exemple d'une séquence de déferlement est présenté dans la figure 2. Dans le bassin nous avons mesuré l'évolution spatio-temporelle des hauteurs de vagues par caméra vidéo et sondes à vagues, et le champ de vitesse dans l'eau par imagerie de particules PIV. Une estimation de la fraction volumique d'air contenue dans l'eau a été estimée en combinant l'imagerie vidéo, les champs de vitesse et les propriétés de conservation de la masse. Tous les détails sur les techniques expérimentales ont été détaillés par Kimmoun et al. (2004) et Kimmoun & Branger (2006).

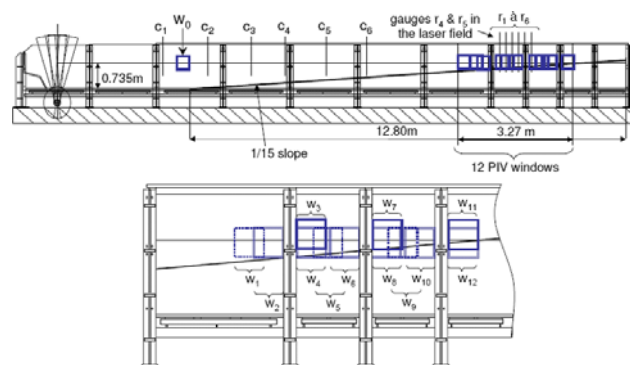


FIG. 1 – Le canal à houle expérimental.

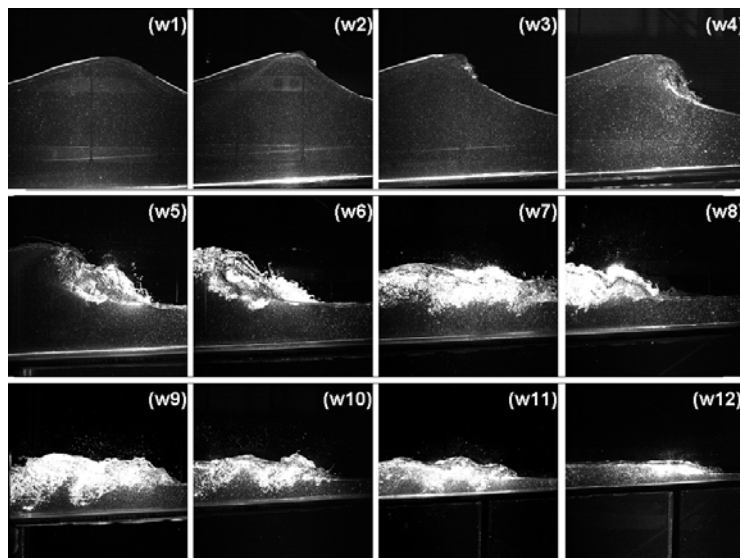


FIG. 2 – Déferlement d'une vague observé dans les douze fenêtres d'acquisition.

## 4 Résultats numériques

La génération numérique de la houle est réalisée grâce à une méthode développée par Lin and Liu (1999) pour des cas d'ondes régulières ou irrégulières. Un terme source dépendant du temps est ajoutée à l'équation de conservation de la masse (Eq. 1), calculé sur un certain nombre de cellules du domaine numérique. La surface libre se déforme alors sous l'effet de cet apport (ou retrait) de masse, le terme source agissant comme une pompe. Les développements analytiques de Fenton (1985) ont été adaptés et validés pour le calcul du terme source, afin de générer une houle correspondant aux conditions expérimentales.

Une première étude bidimensionnelle a été réalisée avec un domaine numérique de 20 m de long et 1.2 m de hauteur. Le pied de la plage débute à  $x = 7$  m. Le pas d'espace est régulier suivant la direction de propagation de la houle ( $\Delta x = 5.10^{-3}$  m), et irrégulier suivant la hauteur, le pas minimum étant  $\Delta z = 1.25.10^{-3}$  m. Les résultats obtenus ont été comparés aux images expérimentales, suite à la génération d'une vingtaine de vagues. Une étude tridimensionnelle a ensuite été réalisée, le domaine numérique étant étendu suivant la largeur de 30 cm. La longueur du domaine a été raccourcie afin de conserver un temps de calcul raisonnable (15.5 m). Le pas d'espace est régulier suivant la direction de propagation de la houle ( $\Delta x = 1.4.10^{-2}$  m), et irrégulier suivant la hauteur, le pas minimum étant  $\Delta z = 4.2.10^{-3}$  m. Un pas constant est utilisé suivant la largeur ( $\Delta y = 7.5.10^{-3}$  m). Une quinzaine de vagues a été simulée. Une séquence correspondant au déferlement d'une vague est présentée dans la figure 3.

Une fois que le front de l'onde est vertical, la vague déferle, un jet étant éjecté de la crête. Ce jet vient impacter la face avant de la vague et génère un cycle de splash-ups, créant à leur tour une série de structures tourbillonnaires. Nous observons qu'une quantité importante d'air est piégée et entraînée dans l'eau. Une fois que la vague a déferlé, l'écoulement turbulent se propage vers le haut de plage. L'interface est très déformée et l'écoulement très dynamique.

Les différences entre les résultats numériques et expérimentaux sont notamment dues à la faible résolution des maillages utilisés, ne permettant pas de simuler la dislocation des grandes poches d'air en bulles, même si les zones aérées simulées numériquement correspondent bien à des zones de mélange observées expérimentalement. La production de turbulence est très largement associée au processus d'entraînement d'air lors du déferlement. Les expériences montrent que les bulles d'air sont mises en rotation, transportées vers le fond, avant de remonter à la surface. Le taux de dissipation de l'énergie de la vague est accrue si de grandes quantités de bulles sont générées et entraînées vers le fond, ainsi que par les fortes fluctuations qu'elles génèrent dans l'écoulement lorsqu'elles remontent.

Toutes ces observations sont en accord avec les différentes sources de la littérature (Miller 1976, Sakai et al. 1986, Bonmarin 1989, par exemple).

## 4 Conclusions

Les résultats numériques présentés dans cet article sont relatifs à des quantités instantanées 3D de déferlement de vagues sur une plage en pente. Des simulations sont en cours afin d'évaluer des quantités moyennées par phase et des quantités fluctuantes. La turbulence sera alors étudiée quantitativement et comparée aux résultats expérimentaux. L'outil numérique a permis une description correcte et précise de l'écoulement des deux phases mises en interaction lors du déferlement, l'air et l'eau. Le processus du déferlement, en terme de retournement de l'onde et de génération de splash-ups, est décrit en accord avec les résultats expérimentaux,



FIG. 3 – Résultat numérique du déferlement 3D d'une vague.

ainsi que les différentes observations de la littérature. L'entraînement de l'air dans l'eau est reproduit numériquement de manière satisfaisante, ce qui est un point très important pour les études futures de la turbulence. Un effort reste à fournir en terme de précision de la description des poches d'air en 3D. Cependant, les simulations tridimensionnelles restent encore très

coûteuses en terme de temps de calcul. Des travaux sont actuellement en cours afin d'élaborer des modèles de turbulence permettant une description précise de la turbulence au voisinage d'une interface (Labourasse *et al.* 2007).

#### 4 Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du programme national INSU - CNRS IDAO (« Interactions et Dynamique de l'Atmosphère et de l'Océan »). Les simulations ont été effectuées grâce au soutien de l'IDRIS - CNRS et du CINES sous l'intitulé « ter 2237 ».

#### Références

- Bonmarin, P. 1989. Geometric properties of deep-water breaking waves. *J. Fluid Mech.*, 209, 405-433.
- Christensen, E. D., D. J. Walstra, and N. Emarat. 2002. Vertical variation of the flow across the surf zone. *Coastal Engineering*, **45**, 169-198.
- Christensen, E. D. 2006. Large eddy simulation of spilling and plunging breakers. *Coastal Engineering*, **53**, 463- 485.
- Fenton, J. D. 1985. A fifth-order Stokes theory for steady waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **111**, 216-234.
- Helluy, P., F. Gollay, S. T. Grilli, N. Seguin, P. Lubin, J.-P. Caltagirone, S. Vincent, D. Drevard and R. Marcer. 2005. Numerical simulations of wave breaking. *Mathematical Modelling and Numerical Analysis Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, **39** (3), 591-608.
- Kimmoun O., H. Branger and B. Zucchini. 2004. Laboratory PIV measurements of wave breaking on a beach. *Proceedings of 14<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, **3**, 293-298.
- Kimmoun K. and H. Branger. 2006. A PIV investigation on laboratory surf-zone breaking waves over a sloping beach. *Corrected and submitted to J. Fluid Mech.*
- Labourasse, E., D. Lacanette, A. Toutant, P. Lubin, S. Vincent, O. Lebaigue, J.-P. Caltagirone, P. Sagaut. 2007. Towards Large Eddy Simulation of isothermal two-phase flows: governing equations and a priori tests. *International Journal of Multiphase Flow*, **33** (1), pp 1-39.
- Lin P. and P. L.-F. Liu. 1999. Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **125**, 322-330.
- Lubin, P. 2004. *Large eddy simulation of plunging breaking waves*, PhD thesis (in English), University of Bordeaux.
- Lubin, P., S. Vincent, J.-P. Caltagirone and S. Abadie. 2004. Three-dimensional large eddy simulation of vortices induced by plunging breaking waves. *Proceedings of 29<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 344-356.
- Lubin, P., S. Vincent, S. Abadie and J.-P. Caltagirone. 2006. Three-dimensional Large Eddy Simulation of air entrainment under plunging breaking waves. *Coastal Engineering*, **53**, 631-655.
- Miller, R. L. 1976. Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces, Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ., **24**, Ed. R. A. Davis, R. L. Ethington, 92-114.
- Peregrine, D. H. 1983. Breaking waves on beaches. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **15**, 149-178.
- Sakai, T., T. Mizutani, H. Tanaka and Y. Tada. 1986. Vortex formation in plunging breaker. *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 711-723.
- Vincent, S., J.-P. Caltagirone, P. Lubin and T. N. Randrianarivelo. 2003. An adaptative augmented Lagrangian method for three-dimensional multi-material flows. *Computers and Fluids*, **33**, 1273-1289.
- Watanabe, Y., H. Saeki and R. J. Hosking. 2005. Three-dimensional vortex structures under breaking waves. *J. Fluid Mech.*, **545**, 291-328.