



**HAL**  
open science

## **Simulations numériques de l'impact de la houle sur une paroi verticale par la méthode SPH**

Xuezhou Lu, Jean-Marc Cherfils, Grégory Pinon, Elie Rivoalen, Jérôme Brossard

### ► **To cite this version:**

Xuezhou Lu, Jean-Marc Cherfils, Grégory Pinon, Elie Rivoalen, Jérôme Brossard. Simulations numériques de l'impact de la houle sur une paroi verticale par la méthode SPH. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. <hal-03439804>

**HAL Id: hal-03439804**

**<https://hal.science/hal-03439804v1>**

Submitted on 22 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Simulations numériques de l'impact de la houle sur une paroi verticale par la méthode SPH

X.Z. Lu<sup>a</sup>, J.-M. Cherfils<sup>a</sup>, G. Pinon<sup>a</sup>, E. Rivoalen<sup>a,b</sup>, J. Brossard<sup>a</sup>

a. *Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, LOMC UMR 6294 CNRS-Université du Havre, 53 rue de Prony, 76058 Le Havre*

b. *Laboratoire d'Optimisation et Fiabilité en Mécanique des Structures, EA 3828, INSA de Rouen, Avenue de l'Université, BP 08, 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray*

## Résumé :

*Notre étude s'inscrit dans le cadre de l'interaction hydrodynamique entre la houle et des ouvrages côtiers munis de récupérateurs d'énergie marine. Nous avons commencé notre travail par le développement d'un code SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) nommé JOSEPHINE [2] dans le but de modéliser l'impact de vagues sur l'ouvrage. Dans cette étude, nous présentons dans un premier temps l'utilisation du code SPH en canal à houle, ainsi que la validation sur la propagation de houles régulières générées par un batteur piston. Ensuite, nous présentons nos objectifs de modélisation d'écoulements-types sur une paroi verticale représentant un ouvrage modèle. Les deux cas traités sont : l'impact d'un jet triangulaire et l'impact d'une onde solitaire.*

## Abstract :

*Our study is within the context of the hydrodynamic interaction between waves and coastal structures equipped with marine energy recovery. We have begun our work with developing a code SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) named JOSEPHINE [2] with the purpose of modelling the wave impacts on a coastal structure. Firstly, we will present the usage of the code SPH for the wave flume and the validation of the propagation of waves generated by a regular piston-type wave-maker. Secondly, we will present the future modelling of flows on a vertical wall which represent a model of the structure. The two cases treated will be : the impact of a triangular jet and the impact of a solitary wave.*

**Mots clefs :** Simulations numériques ; Impact de vagues ; Smoothed Particle Hydrodynamics

## 1 Introduction

La méthode SPH a initialement été développée pour la simulation de systèmes gravitaires en astrophysique [5, 8]. Une extension de la méthode à l'hydrodynamique a été proposée par Monaghan [11]. Elle a ensuite été appliquée à un grand nombre de problèmes différents. Par sa nature lagrangienne et sans maillage, SPH est particulièrement adaptée aux simulation en domaine ouvert. L'état du système est représenté par un ensemble de particules possédant leurs propres propriétés physiques et se déplaçant selon un système d'équations de conservation établi. On obtient alors une approximation numérique de la solution de ce système.

L'application initiale du modèle SPH concerne l'action de la houle sur des ouvrages marins. La propagation de la houle dans un canal de longueur finie équipé d'un batteur plan est d'abord analysée. Ensuite nous présentons la modélisation d'écoulements types sur une paroi solide pour trois cas d'impacts différents.

## 2 Méthode de SPH

### 2.1 Schéma d'interpolation

La méthode SPH s'appuie sur la notion d'opérateur-intégrale, permettant l'interpolation d'un champ scalaire, à partir de données connues :

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(y) \eta_{\epsilon}^0(y-x) dy, \quad \text{avec} \quad \eta_{\epsilon}^0(x) = \frac{e^{-\left(\frac{|x|}{\epsilon}\right)^2} - e^{-9}}{2\pi \int_0^{3\epsilon} s(e^{-\left(\frac{|s|}{\epsilon}\right)^2} - e^{-9}) ds} \quad (1)$$

$\eta_{\epsilon}^0(x)$  est une fonction gaussienne tronquée (eq. (1)), qui tend vers la mesure de Dirac quand  $\epsilon$ , son pas d'interpolation, tend vers zéro. Cette fonction est de plus à symétrie radiale et est modifiée afin de permettre une coupure au-delà d'une distance de  $3\epsilon$ , dans le but de n'exploiter que les interactions locales pour l'approximation [3, 2].

$$\langle f(x) \rangle = \sum_j \eta_{\epsilon}^0(x_i - x_j) V_j \quad \text{et} \quad \langle \nabla f(x) \rangle = \sum_j \nabla \eta_{\epsilon}^0(x_i - x_j) V_j, \quad (2)$$

On peut alors définir un opérateur-intégrale discret pour l'interpolation du champ (eq. (2)), l'intégrale continue étant transformée en une somme sur un ensemble de particules de position  $x_j$  et de volume  $V_j = \frac{m_j}{\rho_j}$ , avec  $m_j$  et  $\rho_j$  respectivement la masse et la masse volumique de la particule. En dérivant l'équation (eq. 1), on peut aussi obtenir une approximation de sa dérivée comme le présente l'équation (2).

Ces deux opérateurs peuvent être appliqués à de nombreux systèmes d'équations aux dérivées partielles régissant le comportement du milieu. Dans le cas d'écoulements à surface libre, ces équations sont les équations d'Euler pour un fluide faiblement compressible et non-visqueux auxquelles on ajoute une équation d'état (équation de Tait) permettant, avec des conditions aux limites, de clore le système (eq. 3) :

$$\begin{aligned} \frac{Dx}{Dt} &= u & \implies & \frac{Dx_i}{Dt} = u_i \\ \frac{Du}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \nabla P + g & \implies & \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho_i} \sum_j (P_i + P_j) \nabla \eta_{\epsilon}^0(x_{ij}) \frac{m_i}{\rho_j} + g \\ \frac{D\rho}{Dt} &= -\rho \nabla \cdot u & \implies & \frac{D\rho_i}{Dt} = -\rho_i \sum_j (u_{ij} + \underbrace{n_{ij} \left( \frac{c_{ij}}{\rho_i} (\rho_j - \rho_j) \right)}_{\text{Flux Rusanov}}) \cdot \nabla \eta_{\epsilon}^0(x_{ij}) \frac{m_i}{\rho_j} \end{aligned} \quad (3)$$

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2}{7} \left( \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^7 - 1 \right) \implies P_i = \frac{\rho_0 c_0^2}{7} \left( \left( \frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^7 - 1 \right)$$

où  $c_0$  est la vitesse du son,  $P$  la pression et  $g$  la gravité. Pour réduire les temps de calcul, la valeur de  $c_0$  est choisie inférieure à la réalité, mais au moins 10 fois supérieure à la vitesse maximale  $u$  attendue dans le fluide. Nous avons ajouté le flux Rusanov dans l'équation de conservation de la masse [4] pour stabiliser le schéma. Dans le code JOSEPHINE [2], une méthode de parallélisation MPI est implémentée, utilisant une décomposition de domaine. Par ailleurs, les conditions aux limites de type glissement sont imposées à l'aide de particules fantômes créées à chaque itération, par symétrie des particules fluides par rapport aux parois. La surface libre, quant à elle, ne requiert aucun traitement spécifique, en partie grâce à la représentation lagrangienne de l'écoulement et au fait que nous utilisons une formulation faiblement compressible, comme le prouve l'équation d'état dans le système (3).

### 3 Applications sur des cas d'impact de la houle sur les ouvrages

L'objectif de ce travail est l'interaction hydrodynamique entre la houle et des ouvrages côtiers munis de récupérateurs d'énergie marine. Nous allons traiter ce problème en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous allons montrer dans ce papier que le canal à houle numérique simulé par JOSEPHINE [1, 2] propage correctement une houle régulière. Dans un second temps, et suite aux développements numériques encore en cours, nous souhaitons vérifier si la méthode SPH est capable de traiter correctement des cas d'impacts idéalisés : nous pensons notamment à l'impact d'un jet triangulaire. Une fois les simulations réalisées, nous comparerons nos résultats avec ceux obtenus par Mokrani *et al.* [9, 10], par exemple. Enfin dans un troisième temps, nous nous focaliserons sur l'impact d'une onde solitaire sur une paroi verticale, qui est en quelque sorte une synthèse des deux cas précédents.

#### 3.1 Propagation d'ondes de gravité en canal à houle

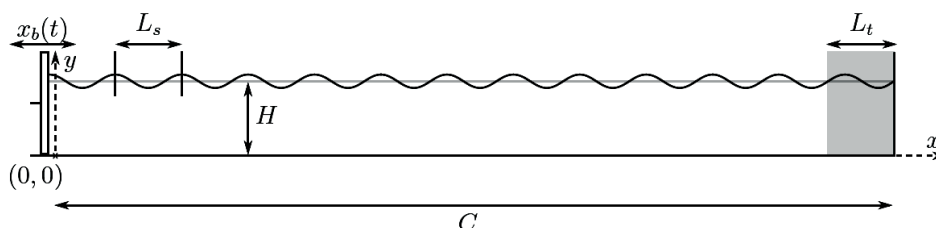


FIGURE 1 – Vue schématique du canal à houle de longueur  $C$ , rempli d'eau jusqu'à la hauteur  $H$ .

Le domaine de calcul considéré est un canal à houle ouvert (Figure 1). Nous étudions l'évolution d'une onde de gravité dans ce canal à houle et l'effet d'une plage d'amortissement numérique sur sa réflexion. À l'extrémité gauche du canal, un batteur-piston permet de générer une houle régulière. Le déplacement  $x_b(t)$  du batteur est imposé. À l'extrémité droite du canal, la houle est amortie par annulation des accélérations des particules sur une zone qui correspond à une longueur d'onde  $L_t$  de la houle simulée [1]. Cette approche permet d'assurer une réflexion de la houle inférieure à 5%.

Le tableau de Figure 2 présente le résultat de 4 simulations pour lesquelles 4 longueurs d'onde théoriques ont été imposées. La longueur d'onde de houle obtenue  $L_s$  a été capturée et comparée aux valeurs théoriques issues des équations de dispersion des modèles de Stokes au second (eq. 4) et troisième ordre (eq. 5) :

$$L_{t,2} = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{H}{2L_{t,2}}\right), \quad (4)$$

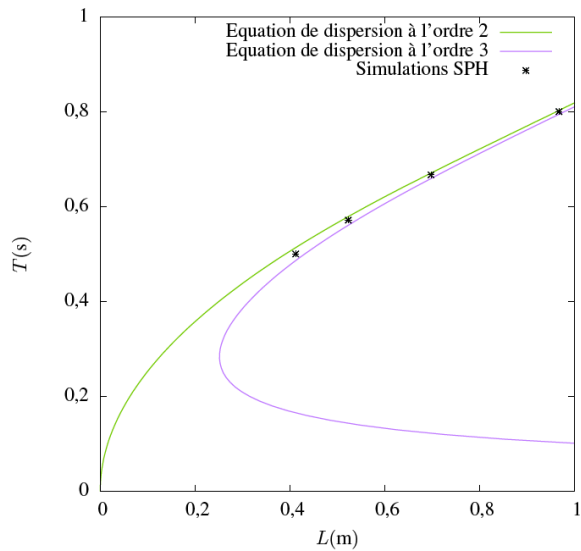
$$L_{t,3} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{H}{L_{t,3}} \left[1 + \left(\frac{2\pi a_h}{L_{t,3}}\right)^2 \frac{9 + 8 \cosh^4\left(2\pi \frac{H}{L_{t,3}}\right) - 8 \cosh^2\left(2\pi \frac{H}{L_{t,3}}\right)}{8 \sinh^4\left(2\pi \frac{H}{L_{t,3}}\right)}\right]\right), \quad (5)$$

où  $T$  est la période de houle,  $a_h$  est l'amplitude de la houle émise.

Le modèle SPH suit l'équation de dispersion au second ordre, mais s'en écarte progressivement quand la longueur d'onde simulée diminue, en raison de l'augmentation de la cambrure (Figure 2). Le modèle de Stokes au troisième ordre est dans ce cas plus pertinent. L'ensemble de ces résultats et une analyse plus fine et détaillée sont disponibles dans la référence [1].

#### 3.2 L'impact d'un jet triangulaire

Le cas précédent montre que le code SPH développé propage correctement une houle régulière. Néanmoins, le but est de reproduire les pressions d'impact sur un mur vertical. À l'instar de Mokrani *et*



| $f$     | $L_s$   | $L_t$   | $L_{t,3}$ | $\frac{L_s - L_t}{L_t}$ | $\frac{L_s - L_{t,3}}{L_{t,3}}$ | $\frac{a_h}{L_s}$ |
|---------|---------|---------|-----------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1,25 Hz | 0,967 m | 0,962 m | 0,978 m   | 0,6 %                   | -1,2 %                          | 0,021             |
| 1,5 Hz  | 0,697 m | 0,689 m | 0,711 m   | 1,1 %                   | -2 %                            | 0,029             |
| 1,75 Hz | 0,523 m | 0,509 m | 0,54 m    | 2,7 %                   | -3,2 %                          | 0,038             |
| 2 Hz    | 0,412 m | 0,39 m  | 0,431 m   | 5,6 %                   | -4,4 %                          | 0,049             |

FIGURE 2 – Comparaison entre les équations de dispersion de la houle de Stokes au second ordre et au troisième ordre ( $a_h = 0,02m$ ) et les longueurs d'ondes obtenues par le modèle SPH (à gauche). Longueurs d'ondes théoriques ( $L_{t,2}$ ,  $L_{t,3}$ ) et simulées  $L_s$ , erreurs par rapport aux longueurs d'ondes théoriques et cambrure ( $a_h = 0,02m$ ) (à droite).

al. [9, 10], nous nous proposons d'étudier le lien entre la forme locale de la surface libre et les pressions d'impact sur un ouvrage. Nous nous inspirons d'un de leur cas d'étude, l'impact d'un jet triangulaire. La Figure 3 présente un schéma de ce cas d'étude [10]. Le jet triangulaire, qui forme un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale, se déplace à une vitesse constante  $V_0$  suivant l'axe  $x$ . Après l'impact, le profil de pression sur la paroi évolue comme le présente la Figure 3 à droite. Nous nous focaliserons sur la reproduction et l'estimation des pics de pression sur le mur (à droite).

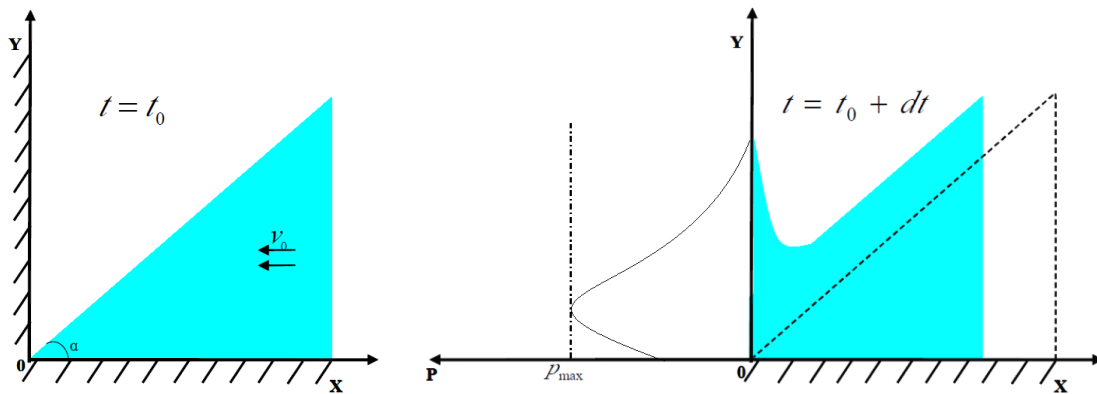


FIGURE 3 – Schéma de cas d'impact d'un jet triangulaire inspiré de Mokrani *et al.* [9, 10]. A gauche, à l'instant  $t = t_0$  et à droite, à l'instant  $t = t_0 + dt$ , où la déformée de la surface libre et la forme de la répartition de pression sur la paroi sont schématisées.

Mokrani *et al.* [9, 10] montrent que l'estimation des pics est précise pour des angles  $\alpha$  inférieurs ou égaux à  $70^\circ$  mais que l'erreur devient significative au delà de cette valeur. Différentes simulations seront effectuées en faisant varier l'angle d'impact  $\alpha$  ainsi que d'autres paramètres numériques et physiques, pour estimer le domaine de validité de JOSEPHINE sur ce cas test.

### 3.3 L'impact d'une onde solitaire

Nous proposons enfin d'étudier le cas d'une onde solitaire se propageant sur un fond plat et venant heurter un mur vertical. Pour ce troisième cas test, nous reprenons le canal à houle numérique présenté sur la Figure 1, pour lequel nous remplaçons la zone d'amortissement (zone  $L_t$  à droite) par une paroi verticale. Dans un premier temps, nous allons utiliser l'étude théorique de Grilli & Svendsen [6] pour modéliser le mouvement du batteur afin de générer une onde solitaire. Puis, une fois la génération et la propagation de cette onde solitaire validées, nous souhaitons focaliser plusieurs ondes solitaires dans le but d'obtenir une vague déferlante. Cette approche est très similaire à l'étude expérimentale de Hofland *et al.* [7] pour laquelle des pics de pression en fonction de la hauteur de vagues sont donnés. De plus, différents types d'impacts sont traités : *slosh impact*, *flip through*, *air pocket* ou encore *aerated impacts*. Différentes simulations seront réalisées en faisant varier les paramètres, par exemple la hauteur de vague, la position relative de focalisation par rapport au mur, etc.

## 4 Conclusions et perspectives

Un schéma de méthode SPH a été présenté pour simuler dans un premier temps la propagation d'ondes en canal à houle, puis l'impact de la houle sur les ouvrages. La première partie du travail a montré que le canal à houle numérique développé sur ce schéma permet bien de générer et propager une houle régulière. Les résultats sont en accord avec l'équation de dispersion au second et au troisième ordre. Ensuite, nous avons proposé deux cas test qui consistent à étudier l'impact de vagues et plus particulièrement à reproduire les pics de pression sur les ouvrages. Les développements numériques sont encore en cours. Une fois réalisées, nos simulations numériques seront comparées avec d'autres méthodes numériques ainsi qu'avec des résultats expérimentaux afin de valider la capacité de la méthode SPH à traiter les cas d'impacts.

## Références

- [1] Cherfils J.M 2011 Developpements et applications de la méthode SPH aux écoulements visqueux à surface libre. *Thèse de doctorat, Université du Havre.*
- [2] Cherfils J.M, Pinon G. et Rivoalen E. 2012 JOSEPHINE : A parallel SPH code for free-surface flows. *Computer Physics Communications* **183** 1468-1480
- [3] Colagrossi A. et Landrini M. 2003 Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, **191(2)** 448-475
- [4] Ferrari A., Dumbser M., Toro E. F. et Armanini A. 2009 A new 3d parallel sph scheme for free surface flows. *Computers and Fluids*, **38(6)** 1203-1217
- [5] Gingold R. et Monaghan J.J. 1997 Smoothed particle hydrodynamics : Theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices Royal Astronomy Society*. **181** 375-389
- [6] Grilli S. et Svendsen I.A. 1990 Computation of nonlinear wave kinematics during propagation and runup on a slope. *University of Delaware.*
- [7] Hofland B., Kaminski M. et Wolters G. 2010 Large scale wave impacts on a vertical wall *Coastal Engineering Conference 2010*
- [8] Lucy L. 1977 A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*. **82** 1013-1024
- [9] Mokrani C. et Abadies S. 2012 On the influence of the wave shape on high impact pressures. *13ème Journées de l'hydrodynamique.*
- [10] Mokrani C. 2012 Impacts de vagues déferlantes sur un obstacle vertical. Modèle théorique et estimation numérique des pics de pression. *Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.*
- [11] Monaghan J.J. 1994 Simulating Free-Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*. **110** pp. 399-406
- [12] Synolakis, I.A. et Justesen P. 1984 Forces on Slender Cylinders from Very High and Spilling Breakers. *Proc.Symp*