



## **COMPARAISON SPH/VOF DANS LE CAS D'UN IMPACT HYDRODYNAMIQUE**

### ***SPH/VOF COMPARISON OF A HYDRODYNAMIC IMPACT***

**J.-B. DEUFF<sup>\*</sup>, G. OGER<sup>\*\*</sup>, M. DE LEFFE<sup>\*\*\*</sup>, P.-M. GUILCHER<sup>\*\*\*</sup>**

<sup>\*</sup> DGA Techniques hydrodynamiques

<sup>\*\*</sup> Ecole Centrale de Nantes, LHEEA

<sup>\*\*\*</sup> HydrOcean

#### **Résumé**

L'objectif de cet article est de montrer les capacités numériques de deux codes différents dans le cas d'un impact hydrodynamique de navire. Le premier solveur utilisé dans cette étude est le code SPH-Flow, développé conjointement par le LHEEA de l'Ecole Centrale de Nantes et HydrOcean. SPH-Flow s'appuie sur une approche particulière Lagrangienne SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), épargnant naturellement le besoin de discrétiser les termes convectifs et de recourir à un algorithme de traitement de la surface libre. Le second solveur mis en œuvre est le logiciel Fluent, utilisé depuis maintenant 20 ans à DGA Techniques Hydrodynamiques. Fluent est basé sur une approche Eulérienne Volumes-Finis, s'appuyant sur la méthode VOF pour traiter l'interface air/eau. Les deux solveurs sont donc basés sur des méthodes très différentes. Leurs particularités respectives impliquent des avantages et inconvénients particuliers. Ceux-ci sont discutés dans une première partie, plus particulièrement dans le cadre de l'étude d'impact de corps à la surface libre. La seconde partie de ce papier traite de la simulation 2D d'un impact sur une surface libre initialement au repos. La forme retenue pour cet impact concerne la tranche 2D d'un navire. Cette première étape avant la simulation 3D finale permet de mettre en place la simulation, en particulier de tester l'influence de différents paramètres. Notamment, les effets de l'air sur les efforts globaux ainsi que sur les pressions locales sont étudiés. Deux simulations SPH, l'une monophasique (l'air n'est pas modélisée), la seconde bi-phasique, sont réalisées et comparées à la solution VOF. Finalement, les simulations VOF et SPH de l'impact 3D d'un navire sont réalisées et discutées. Les résultats des simulations sont systématiquement comparés à des données expérimentales, notamment les pressions locales en différents points de la coque ainsi que les efforts globaux, permettant de disposer d'une référence absolue.

## Summary

This paper aims at showing the numerical capabilities of different solvers in the application case of a ship hydrodynamic impact. The first solver used in this study is the academic solver SPH-Flow, conjintly developed by the LHEEA laboratory of Ecole Centrale Nantes, et the company HydrOcean. SPH-Flow is based on a Lagrangian particle approach SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), avoiding naturally the need for discretizing the convective terms and capturing the free surface. The second solver is the software Fluent, used for 20 years at DGA Techniques Hydrodynamiques. Fluent is based on an Eulerian Finite-Volume approach, based on the VOF method for treating air/water interfaces. Therefore, these two solvers are based on distinct numerical methods. Their respective features imply specific advantages and disadvantages. This is discussed in the first part of this paper, in the context of free surface impacts. The second part of this paper focuses on the 2D simulation of an impact on the free surface initially at rest. The shape used for this impact is a 2D slice of a ship. This first step before the final 3D simulation allows to set up the simulation and especially to test the influence of various parameters. The effects of the air on global forces and local pressures are particularly discussed. Two SPH simulations, one dedicated to the single-phase (water) free surface impact, the other to the two-fluid impact with an air/water interface, are performed and compared with the VOF solution. Finally, VOF and SPH simulations of the 3D impact of the ship having a complex geometry are performed and discussed. The simulation results are systematically compared with experimental data, including local pressure on various locations of the hull and global forces, in order to validate this approach.

## **I – Introduction**

L'impact à surface libre est un problème classique de la mécanique des fluides. Son étude débute dans les années 1930 avec Von Karman [18] et Wagner [19] par la proposition d'une résolution analytique du problème. Plus tard de nouvelles méthodes telles que la BEM (Boundary Element Method) ont été appliquées avec succès à la simulation de ce type d'écoulement (voir par exemple Zhao & Faltinsen [20]). L'augmentation de la puissance de calcul et l'avènement du HPC (High Performance Computing) permettent aujourd'hui de s'appuyer sur des méthodes de résolution directe des équations de Navier-Stokes pour simuler ces écoulements. Deux approches différentes peuvent être employées dans ce type de résolution. Les méthodes Eulériennes d'une part, basées sur un maillage fixe, et les méthodes Lagrangiennes d'autre part, pouvant être basées sur un maillage déformable au cours du temps ou bien sur une approche particulière sans maillage.

Parmi les méthodes Eulériennes, on peut citer notamment la méthode VOF issue des travaux de Hirt & Nichols [21]. Cette méthode a ensuite été améliorée, notamment pour traiter de l'impact hydrodynamique [8]. La méthode VOF présente l'avantage de multiples schémas qui peuvent être utilisés en fonction du problème. Ces schémas sont en général implicites ce qui permet l'utilisation de pas de temps relativement grand (non basés sur une condition CFL). La difficulté dans l'utilisation de cette méthode réside alors dans la gestion des corps mobiles qui est en général gérée par l'utilisateur (comme c'est le cas ici). Une deuxième difficulté tient à la précision du suivi d'interface qui nécessite des maillages dont les tailles peuvent être importantes.

Parmi les méthodes Lagrangiennes, on peut citer la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), basée sur une approche purement particulière sans maillage. Par sa flexibilité et sa robustesse, cette méthode s'est finalement avérée être un outil particulièrement intéressant pour la résolution d'écoulements à surface libre [12][15]. Son intérêt principal réside dans le fait qu'aucun traitement particulier n'est nécessaire pour traiter la déformation de la surface libre, y compris dans les cas de larges déformations comme ceux rencontrés lors de déferlement ou de génération de jets. De même, cette méthode permet de contourner les divers problèmes liés à l'adaptation de maillage autour de corps en déplacements au sein du fluide. En contrepartie, cette méthode est en général plus coûteuse en temps de calcul que les méthodes traditionnelles. Cet inconvénient peut être limité par l'usage d'architectures parallèles sur lesquelles peut être portée la méthode avec une très bonne efficacité. Un autre défaut de cette méthode concerne sa faible vitesse de convergence. La méthode sera en revanche particulièrement précise dès les discrétisations grossières sur des problèmes exploitant ses atouts, notamment pour les interfaces complexes.

Dans ce papier, le principe des méthodes VOF et SPH sont tout d'abord rappelés succinctement. Leur application au cas d'impact d'un navire de forme complexe à la surface de l'eau est ensuite abordée. Une première étude consiste à simuler l'impact d'une tranche 2D du navire avec ces deux méthodes. La méthode VOF est ici uniquement bi-fluide, et les résultats d'efforts globaux verticaux et de pressions locales obtenus sont comparés aux solutions SPH monophasique et bi-fluide. Ceci permet d'étudier les grandes tendances de l'écoulement, d'observer le comportement des deux méthodes pour ce type de problème, ainsi que d'estimer l'importance des effets de coussin d'air sur ce cas de slamming. Enfin l'impact 3D du navire à la surface de l'eau est simulé en bi-fluide et en monophasique avec la méthode VOF et SPH respectivement.

Les auteurs de cet article tiennent à remercier la compagnie STX Europe © pour l'utilisation et la publication des résultats d'essais.

## **II – Présentation des méthodes et solveurs**

### **II – 1 Méthode particulière SPH**

La méthode SPH opère sur un nuage de points d'interpolation choisis dans le domaine fluide à modéliser. Par le biais d'un noyau régularisant à support compact, ces points peuvent être utilisés pour discrétiser un système d'équations aux dérivées partielles en s'affranchissant

de l'utilisation d'un maillage. Ainsi, le gradient d'un champ  $f$  en un point  $i$  est obtenu en appliquant la somme suivante sur ces points  $j$  voisins :

$$\bar{\nabla} f_i = \sum_{j \in P} f_j \bar{\nabla} W(\bar{r}_{ij}, R) \omega_j \quad (1)$$

où  $W$  est le noyau régularisant,  $R$  le rayon du support de ce noyau, et  $\omega_j$  le volume d'une particule  $j$ . Les simulations SPH présentées dans cet article s'appuient sur la résolution des équations d'Euler compressible en l'absence de viscosité. Des améliorations récentes du schéma SPH [6][17], notamment l'introduction des solveurs de Riemann, ont permis d'augmenter la stabilité et la précision de la méthode. Ainsi, les équations d'Euler discrètes s'écrivent finalement

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega \nabla \cdot \bar{v} \quad (2)$$

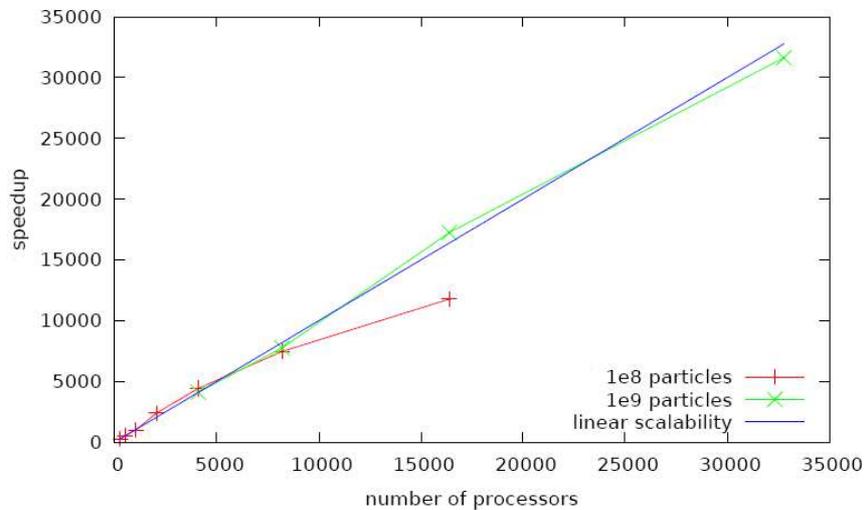
$$\frac{d\rho_i \omega_i}{dt} = -\omega_i \sum_{j \in P} \omega_j 2\rho_E (\bar{v}_E - \bar{v}(x_{ij})) \bar{\nabla} W(\bar{r}_{ij}, R) \quad (3)$$

$$\frac{d\rho_i \omega_i \bar{v}_i}{dt} = \rho_i \omega_i \bar{g} - \omega_i \sum_{j \in P} \omega_j 2(\rho_E \bar{v}_E \otimes (\bar{v}_E - \bar{v}(x_{ij})) + p_E \bar{1}) \bar{\nabla} W(\bar{r}_{ij}, R) \quad (4)$$

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (5)$$

où  $\rho$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $\gamma$  sont respectivement la masse volumique, la vitesse, la pression et la constante polytropique du fluide considéré. Les indices  $E$  réfèrent aux valeurs solution du problème de Riemann entre les états gauche et droite formés par une paire de particules  $i-j$ .  $c_0$  et  $\rho_0$  sont respectivement la masse volumique et la vitesse du son nominales (à pression nulle) du fluide. Le système compressible est en effet fermé par la loi d'état (5), adaptée de l'équation de Laplace pour les gaz en transformation adiabatique. L'utilisation de cette forme compressible permet d'obtenir une résolution explicite et d'éviter la résolution de l'équation de Poisson. Les écoulements incompressibles sont donc obtenus en les considérant faiblement compressibles: La vitesse du son est choisie de telle manière que le nombre de Mach (défini comme le rapport entre la vitesse maximum dans l'écoulement et la vitesse du son) demeure inférieure à 0.1 durant toute la simulation. Les effets compressibles peuvent alors être négligés.

Ce schéma SPH est implémenté dans le code SPH-Flow utilisé dans cette étude. SPH-Flow est développé conjointement par le LHEEA de l'Ecole Centrale de Nantes et la société HydrOcean. Ce code SPH débuté il y a quatorze ans est aujourd'hui adapté à des simulations massives exécutables sur plusieurs dizaines de milliers de cœurs (cf. courbes d'accélération de la Figure 1).



**Figure 1** Courbe d'accélération de SPH-Flow obtenues avec  $10^8$  et  $10^9$  particules et jusqu'à 32768 cœurs sur un cas test d'effondrement d'une colonne d'eau en 3D.

SPH-Flow compte d'autres variantes compressibles de la méthode SPH telles que  $\delta$ -SPH [1], ou le schéma à viscosité artificielle [11], ainsi qu'un formalisme Euler-Lagrange arbitraire (ALE). Un modèle incompressible (ISPH [2]) y est également disponible. Différentes corrections permettent par ailleurs une montée en ordre du schéma (Shepard, Renormalisation). Ce code peut prendre en compte des géométries 3D complexes au sein du fluide, grâce à l'implémentation de conditions aux limites basées sur les particules fantômes [15] ou bien une méthode à flux caractéristiques (NFM) [9][10]. Enfin, il est orienté vers les couplages multi-physiques, notamment les écoulements multi-fluides [7] ou encore le couplage fluide-structure [3][5].

## II – 2 Méthode volumes-finis

Le code Fluent © est utilisé depuis 20 ans à DGA Techniques hydrodynamiques. Dédié à l'origine à la conception des propulseurs, il a prouvé sa précision et sa robustesse dans de nombreuses applications dont la dynamique rapide dont il est question ici. On utilise ici une modélisation Volume Of Fluid (VOF) qui permet au travers de l'équation de la fraction de volume :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}) = \rho_q S \alpha_q \quad (1)$$

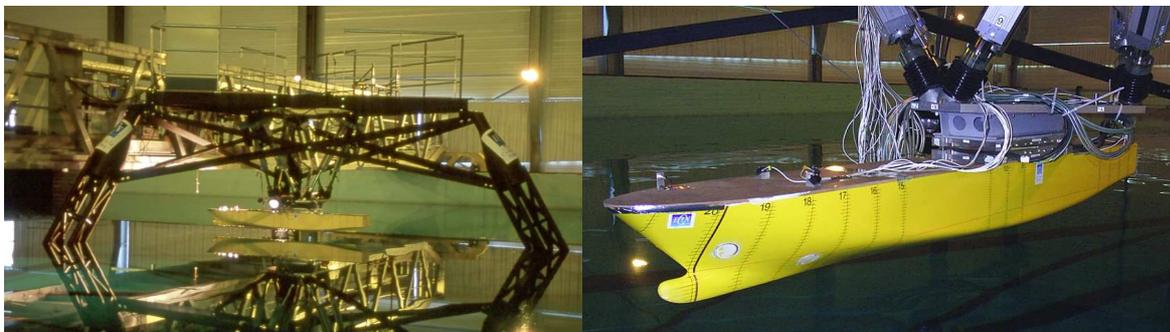
de traquer la surface libre. Cette équation est couplée avec l'équation classique de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu \left( \nabla \vec{v} + \vec{v}^T \right) \right] + \rho \vec{g} \quad (2)$$

où  $\alpha_q$  est la fraction de volume de la  $q$ ième phase,  $\rho_q$  la masse volumique de la  $q$ ième phase,  $p$  la pression,  $v$  la vitesse et  $g$  l'accélération de la gravité. Une fermeture turbulente de type k- $\epsilon$  RNG est utilisé. Les calculs sont ici réalisés sous fluent v13.0.0.

## III – Présentation du cas d'impact expérimental

Le cas étudié dans cet article concerne l'impact de la maquette d'un navire 3D à la surface libre initialement au repos. Cette maquette est initialement placée au-dessus de la surface libre, et est entraînée à une vitesse verticale imposée de 0.6 m/s. Tous les autres degrés de libertés sont bloqués dans cet essai. Cette expérience s'intéresse plus particulièrement à l'impact de la voûte. Ainsi, la maquette est inclinée d'un angle de 4° vers la voûte. Les expériences relatives à ce cas d'impact ont été menées dans le bassin de houle (50m x 30m x 5m) du LHEEA de l'Ecole Centrale de Nantes. La Figure 2 présente le dispositif expérimental employé pour la réalisation de cette expérience.

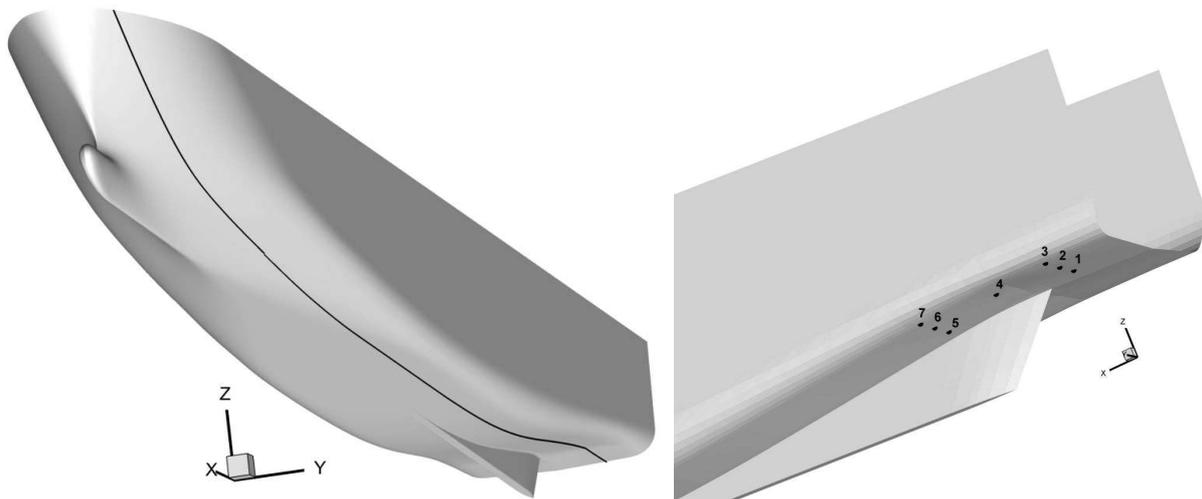


**Figure 2** Tripode équipé du montage expérimental, et placé dans le bassin de houle du LHEEA (à gauche). Maquette instrumentée et reliée à l'Hexapode (à droite).

Le mouvement forcé est généré par le biais d'un Hexapode (6 degrés de liberté) placé au-dessus de la surface de l'eau. L'Hexapode est composé de 6 vérins électriques asservis avec un contrôle par PC. Initialement conçu pour réaliser des essais de cuves en cavement, l'Hexapode a été ici placé tête-bêche et relié à une plate-forme soutenue par trois pylônes (appelée « Tripode ») disposée sur le fond du bassin. L'ensemble a été dimensionné de sorte qu'une raideur suffisante soit obtenue, résultant finalement en une fréquence du premier mode propre mesurée à 6 Hz. Les forces globales exercées par l'eau sur le navire au cours de l'impact sont mesurées par le biais de capteurs dynamométriques (piézo-électriques) placés à l'interface entre l'Hexapode et la maquette. Afin de mesurer les pressions locales exercées sur la voûte, 7 capteurs de pression miniatures y ont été disposés (cf. Figure 3).

#### **IV – Mises en œuvre numériques**

La Figure 3 présente une vue 3D de la maquette utilisée dans les simulations d'impact. La ligne de coupe permettant d'obtenir la géométrie retenue pour l'impact 2D (plan  $y=0.08$  m) est représentée à gauche de cette figure. Cette ligne passe par les capteurs de pression 2, 4 et 6.



**Figure 3 A gauche : vue globale de la maquette, la ligne noire montre le plan  $y=0.08$  m choisi pour les simulations 2D. A droite : zoom sur la voûte avec les 7 capteurs de pression locale.**

#### **Mise en œuvre des simulations SPH**

Les simulations SPH 2D et 3D s'appuient sur une résolution particulière variable en espace (schéma dit H-variable [4][13][17]). La Figure 4 illustre la répartition initiale des particules dans l'espace pour les deux cas.

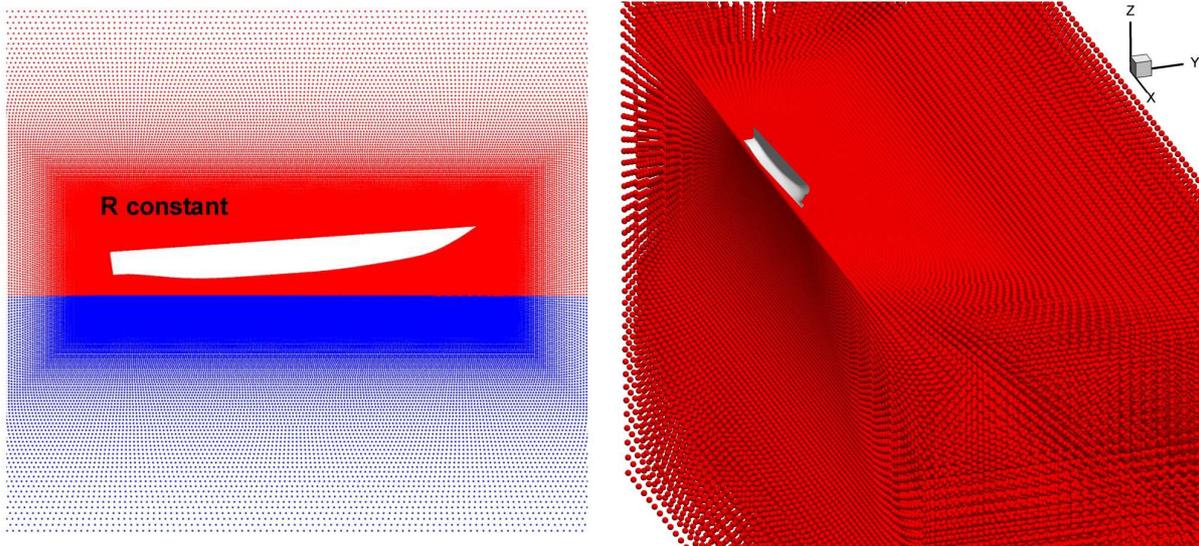


Figure 4 Vue de la répartition initiale H-variable des particules en 2D (à gauche) et en 3D (à droite).

Ainsi, toute la précision est concentrée dans la zone d'impact par utilisation d'un rayon  $R$  (rayon du support du noyau d'interpolation) constant. La résolution spatiale est dégradée ( $R$  augmente) progressivement au-delà de cette zone, jusqu'à atteindre la paroi de la cuve. La masse volumique nominale prise pour l'eau et l'air est respectivement  $\rho_{0\text{ eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$  et  $\rho_{0\text{ air}} = 1 \text{ kg/m}^3$ , et la vitesse du son nominale retenue est  $c_{0\text{ eau}} = 70 \text{ m/s}$  (afin de respecter un nombre de Mach  $Ma < 0.1$  pour l'eau) et  $c_{0\text{ air}} = 340 \text{ m/s}$  (vitesse du son physique pour l'air).

En notant  $\Delta x$  l'espace inter-particulaire, le rayon du support du noyau est choisi comme  $R/\Delta x = 4$  en 2D et  $R/\Delta x = 3$  en 3D. Ce ratio détermine le nombre de particules voisines de chaque particule, c'est pourquoi un ratio plus faible a été choisi pour le cas 3D, afin de limiter les coûts CPU tout en maintenant une précision acceptable.

Pour le cas diphasique, le champ de vitesse dans l'air étant initialisé comme nul, une rampe linéaire est imposée sur le mouvement vertical du navire, faisant passer sa vitesse de descente de 0 à 0.6 m/s en 0.15 secondes, la vitesse étant ensuite maintenue à 0.6 m/s comme imposé dans les expérimentations. Cette rampe permet la mise en mouvement progressive de l'air au-dessus de l'interface.

Dans ce papier, le cas 3D simulé par SPH est exclusivement réalisé en monophasique. Par ailleurs, la propriété de symétrie du problème est exploitée, de sorte que seul le demi-domaine ayant pour symétrie le plan XZ est simulé (comme visible à droite de la Figure 4). Les efforts verticaux obtenus sont donc doublés pour permettre la comparaison avec l'expérience.

### Mise en œuvre des simulations VOF

Le maillage est réalisé grâce au mailleur Icem © v14.5. Ce mailleur permet de réaliser un maillage de type structuré par bloc. Ce type de maillage permet d'obtenir une précision importante avec des volumes de maillage modérés. Une vue des maillages utilisés lors de cette étude est donné Figure 5. Sur ces vues on observe les maillages 2D et 3D :

- Calcul sur un demi-modèle
- Pas de bulbe
- Le skeg a été supprimé.

Ces éléments ont été supprimés pour obtenir une bonne qualité de maillage. La suppression du bulbe est légitime car il se trouve loin de la zone d'intérêt. La suppression du skeg est, elle, légitime car le mouvement du bateau étant verticale, l'influence de ce voile est donc négligeable devant la carène. Ceci est d'ailleurs retrouvé numériquement. Concernant le mouvement du bateau, il est mis instantanément en mouvement à  $t=0s$  d'une hauteur de 0.15m.

Le maillage retenu est assez fin puisque les cellules mesurent 5mm dans la zone d'intérêt (la maquette fait 3m de long).

Cas	Taille du maillage	Pas de temps	Temps de calcul (sur un cœur)	$\Delta x$ d'une cellule
2D	35k	$5^e-4s$	14h	5mm
3D	2.8M	$5^e-4s$	55j (10h sur 128cœurs)	5mm

Tableau 1 Caractéristiques des maillages/calculs

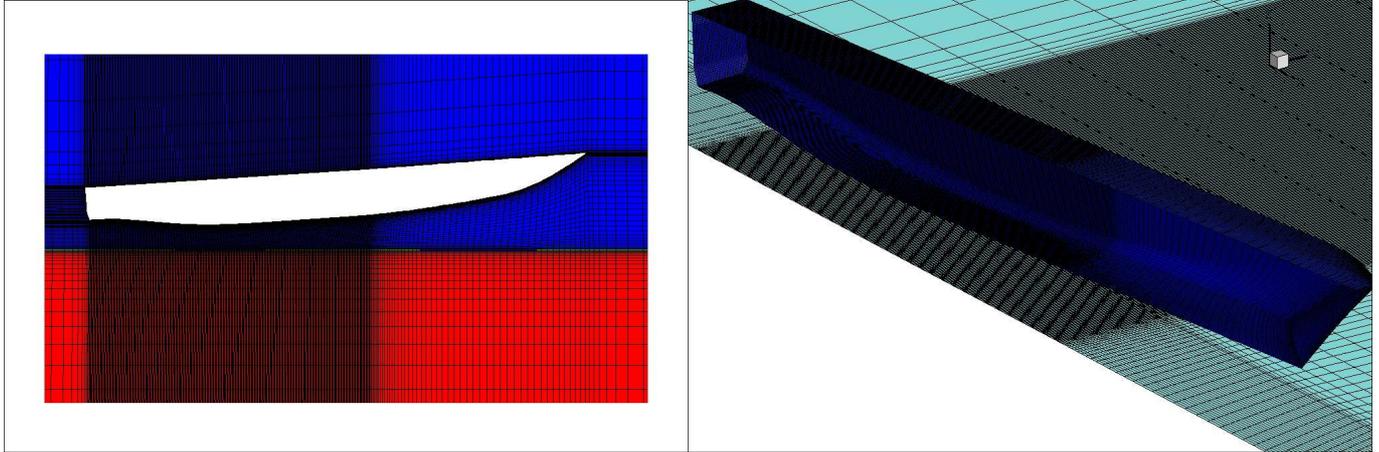
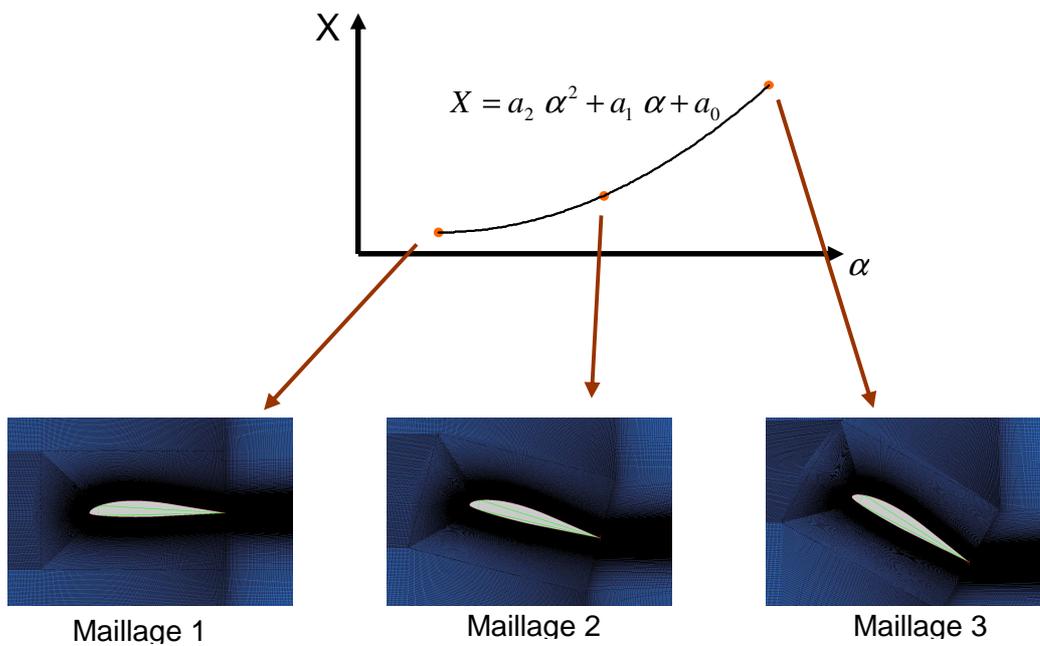


Figure 5 Vue des maillages utilisés dans cette étude (maillage 2D à gauche, 3D à droite).

#### Développement particulier

Fluent est un code « ouvert » permettant l'implémentation de modules (appelé User Defined Function ou UDF) codé en C pour des besoins spécifiques. C'est ici le cas puisque le mouvement de chute du navire ne peut être traité facilement sous fluent. On a donc recours à une routine d'interpolation de maillage. Cela signifie que 3 maillages sont réalisés (dans notre cas, l'altitude du bateau est de 0.15m, 0m, -0.15m) et que on vient, **à chaque pas de temps**, interpoler le maillage. On utilise une interpolation quadratique pour déterminer en fonction de l'altitude du bateau la position des mailles dans les trois directions X, Y, Z.



## V – Simulations 2D

Le cas 2D d'impact d'une tranche de navire permet de mettre en place les simulations et de définir les différents paramètres de calcul. Ce cas académique permet notamment d'étudier en détail les influences de l'air sur la solution, ainsi que la convergence de la solution sur l'historique des pressions locales et la composante verticale des forces de pressions.

### V – 1 Résultat monophasique SPH

La première simulation réalisée en SPH est monophasique, et adopte une résolution  $\Delta x = 0.005$  m dans la zone à rayon constant (région de l'impact). La Figure 6 présente la solution obtenue pour les historiques de pression P2 et de vitesse verticale locale V2z prises au niveau du capteur 2.

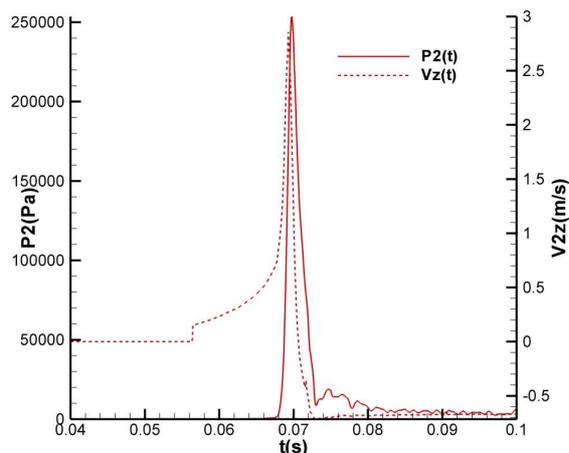
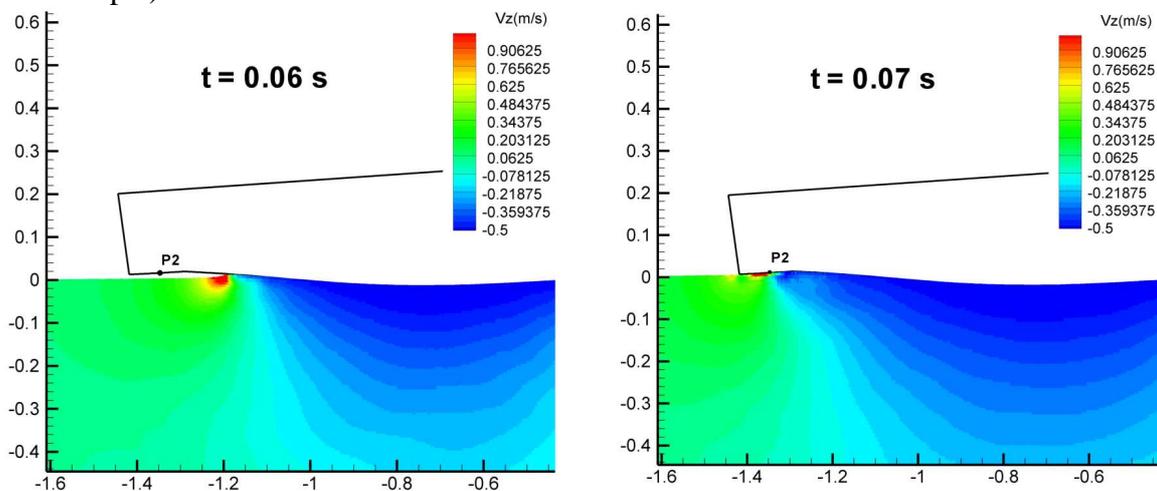


Figure 6 Solution SPH monophasique de l'évolution de la pression P2 et de la vitesse verticale locale V2z prises au niveau du capteur 2.

On trouve une évolution de pic « acoustique » en  $P = \rho c v$  (où  $\rho$  est la masse volumique,  $c$  la vitesse du son et  $v$  la vitesse du fluide locales), typique d'un impact « à plat ». La Figure 6 montre une brusque variation de la vitesse verticale V2z, passant de 3 m/s à -0.6 m/s (vitesse imposée de la paroi) en environ 3 millièmes de seconde, soit une vitesse relative fluide/paroi  $v \sim 3.6$  m/s. Le caractère faiblement compressible de la simulation garantie  $\rho \sim 1000$  kg/m<sup>3</sup> et  $c \sim 70$  m/s (vitesse du son nominale dans ce calcul), or le pic atteint présente en effet une pression de 250 000 Pa. La Figure 7 illustre cet impact « à plat » en présentant les champs de vitesse verticale et de pression aux instants  $t = 0.06$  s (précédent le pic de pression) et  $t = 0.07$  s (instant du pic).



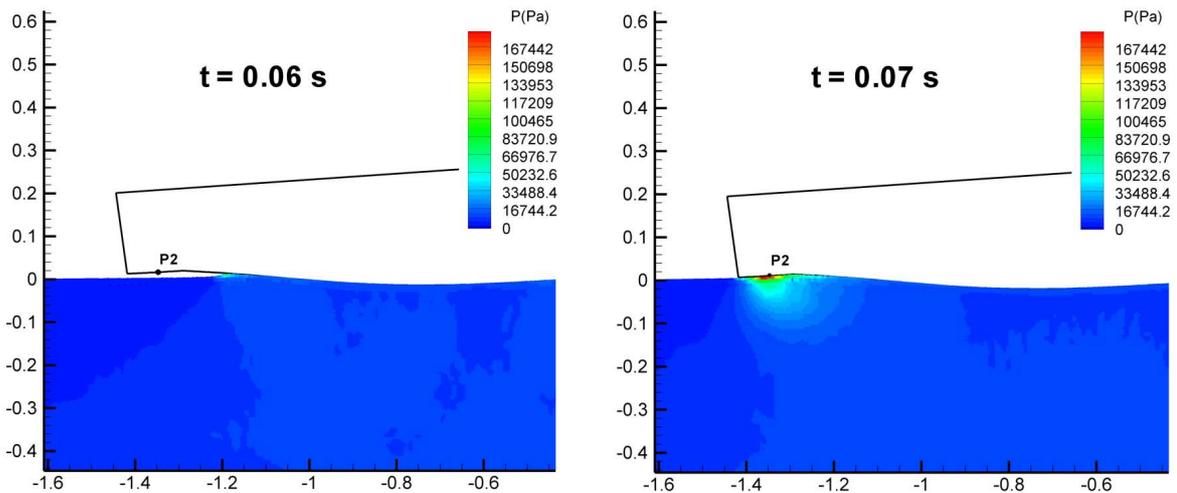
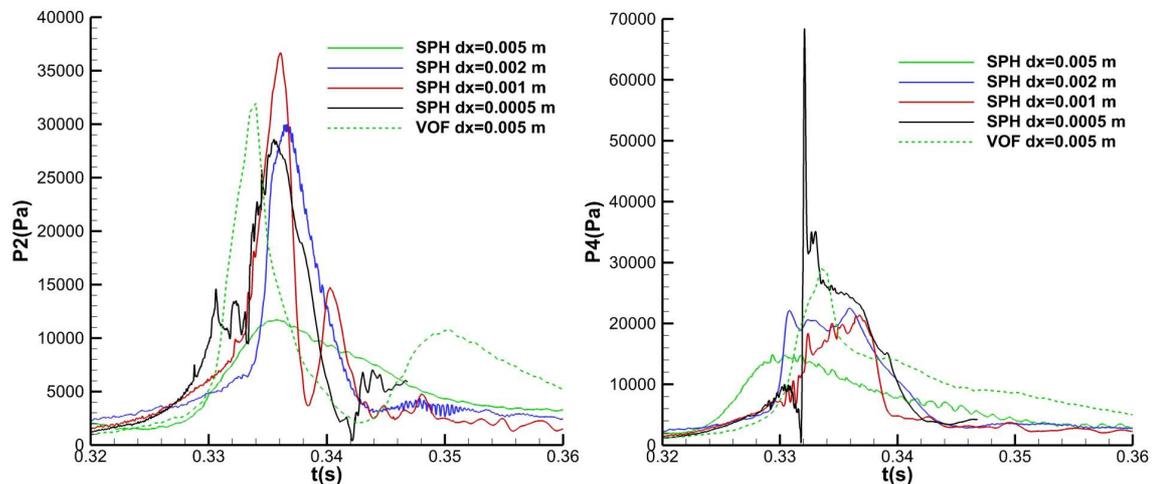


Figure 7 Pression et vitesse verticale locales autour de P2 aux instants  $t=0.06$  s (précédent le pic) et  $t=0.07$  s (instant du pic), calculées avec la méthode SPH.

Les effets de l'air sont très importants pour un tel impact « à plat », de sorte que la physique obtenue dans cette simulation monophasique diffère inévitablement très fortement de celle attendue en biphase, l'air appliquant un effet de freinage des vitesses de jet de surface libre (effet ici absent). Ceci concerne notamment l'évolution et l'amplitude des pressions locales sur la voûte. Les résultats de calculs biphases présentés dans la suite (pour lesquels les gammes de pression locale obtenues sont plutôt de l'ordre de 70000 Pa) confirment cette observation.

## V – 2 Résultats biphases SPH et VOF

Ce même cas a été simulé en biphase, en VOF avec une résolution  $\Delta x = 0.005$  m (dans la zone raffinée), et en SPH pour différentes discrétisations :  $\Delta x = 0.005$  m,  $\Delta x = 0.002$  m,  $\Delta x = 0.001$  m et  $\Delta x = 0.0005$  m. Ces différentes résolutions permettent d'étudier la convergence de la solution obtenue pour les historiques de pressions locales et de force de pression verticale sur cette tranche de navire. La Figure 8 présente une superposition des différents historiques obtenus.



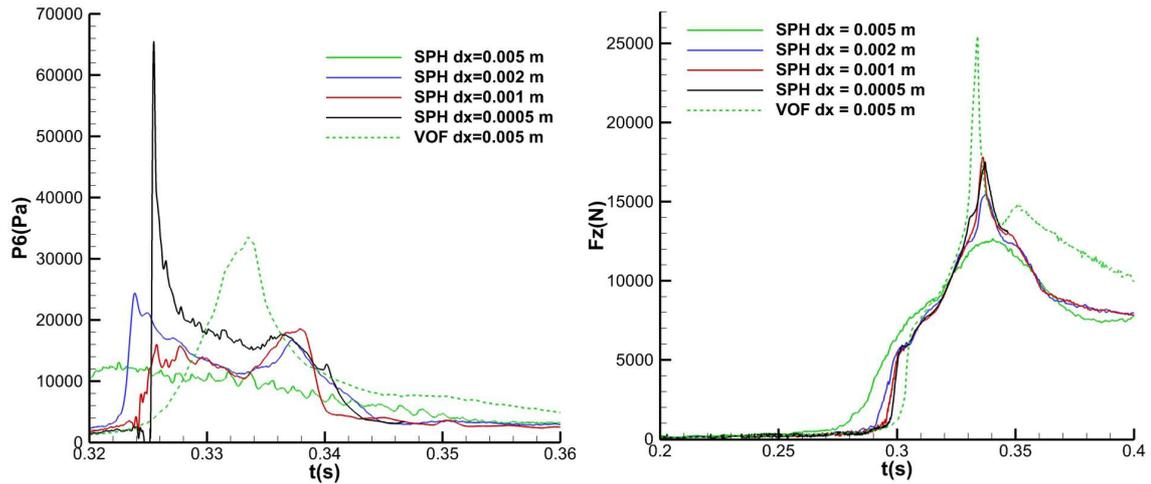


Figure 8 Pressions P2, P4 et P6 et force verticale Fz obtenues avec différentes résolutions.

L'impact de cette tranche 2D du navire à la surface libre se traduit par une augmentation progressive de l'effort  $F_z$ , lié à la pénétration du solide dans l'eau, suivie d'un pic correspondant à l'impact de la voûte. La Figure 9 illustre cet effet. Deux zones de surpression distinctes apparaissent au cours de l'impact : l'une se déplaçant vers l'avant du navire, l'autre vers l'arrière. En se déplaçant vers l'arrière du navire, la surface libre se trouve en effet piégée par la voûte, expliquant le pic d'effort observé.

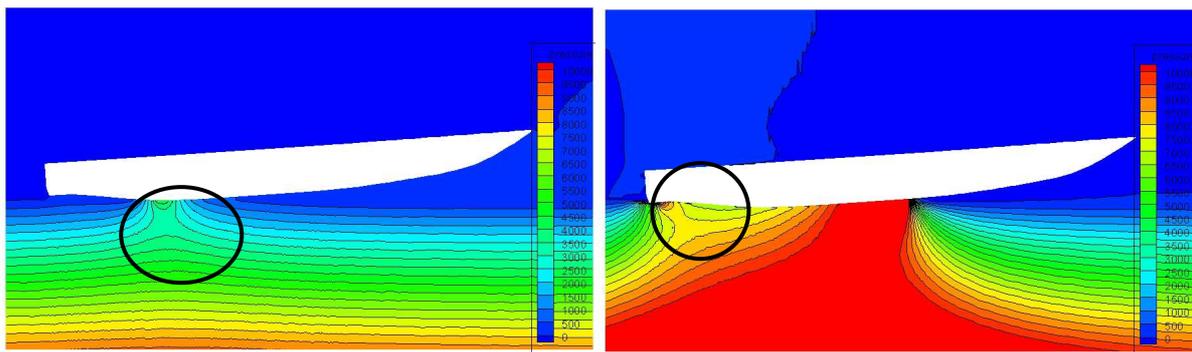


Figure 9 Vue de la répartition de pression à l'instant des pics d'effort.

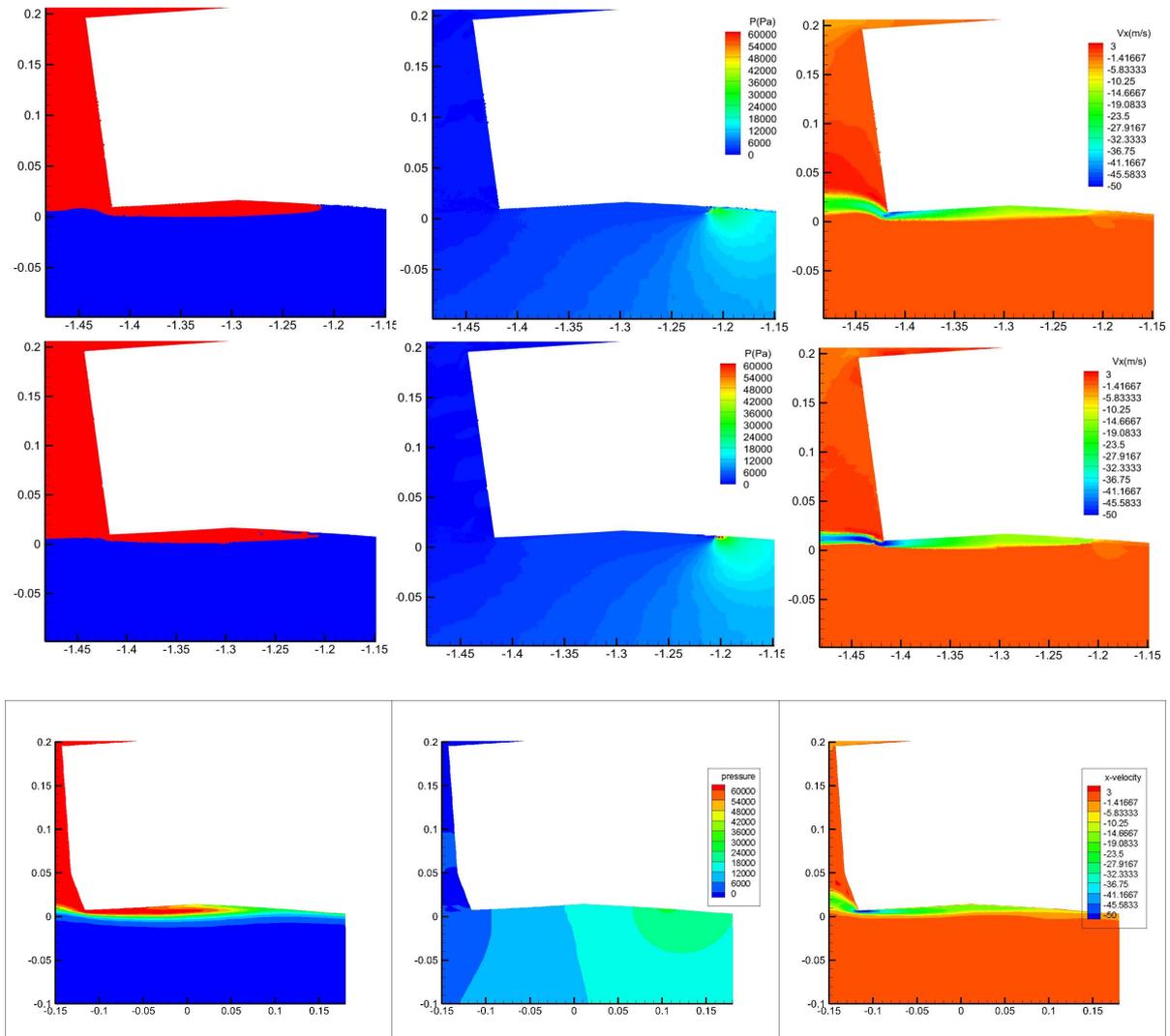
Les mises en œuvre des simulations VOF et SPH étant différentes, les historiques de la solution VOF ont dû être synchronisés a posteriori avec ceux des solutions SPH (le décalage effectué étant bien sûr le même pour P2, P4, P6 et  $F_z$ ).

La Figure 8 fournit un grand nombre d'informations intéressantes. En premier lieu, on constate que la convergence sur l'effort vertical est obtenue beaucoup plus aisément que celle relative aux pressions locales. Ceci est tout à fait logique et attendu, puisque l'effort  $F_z$  est une donnée globale issue de l'intégration des pressions sur le navire. Ainsi, les tendances observées avec les solutions SPH et VOF de l'historique d'effort  $F_z$  sont relativement similaires, et seule la solution SPH avec  $\Delta x = 0.005$  m souffre d'une résolution trop grossière pour capturer correctement cet effort. La solution VOF présente un maximum 1.5 fois plus important que les solutions SPH. Ce facteur en amplitude doit cependant être analysé avec précaution, puisque la lecture des résultats de pressions locales P2, P4 et P6 montre que SPH obtient des pressions plus fortes localement alors que l'effort global est plus faible.

Les courbes de pression montrent que seule la solution SPH à résolution  $\Delta x = 0.0005$  m (discrétisation la plus fine de toutes) parvient à capturer des pics de pression « francs ». Ceci est particulièrement net pour les capteurs P4 et P6 au niveau des pics à environ 70000 Pa, et moins évident pour le capteur P2 pour lequel des résolutions plus faibles permettent une capture

acceptable de cet historique de pression, présentant une forme de signal moins impulsionnelle et avec un maximum à environ 30000 Pa.

Le besoin d'une telle finesse de résolution souligne la complexité de l'écoulement autour de la voûte. Afin de mieux comprendre les raisons de cette complexité, la Figure 10 présente une vue zoomée de l'écoulement simulé par SPH à l'instant du pic de P6 ( $t = 0.325$  s), respectivement avec  $\Delta x = 0.001$  m (résolution encore insuffisante) et  $\Delta x = 0.0005$  m et en VOF avec une discrétisation de  $\Delta x = 0.005$  m.

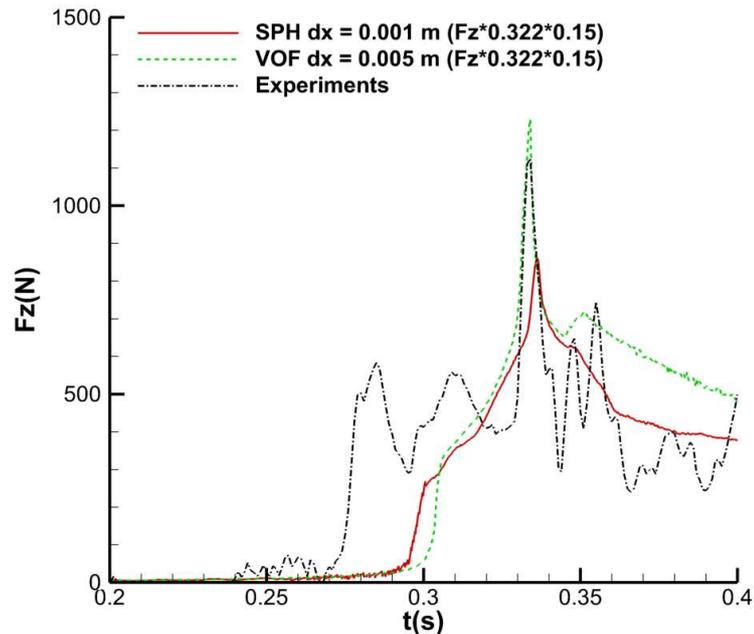


**Figure 10** Champs d'espèce (à gauche), de pression (au centre) et de vitesse horizontale (à droite) obtenues avec SPH pour une résolution  $\Delta x = 0.001$  m (en haut) et  $\Delta x = 0.0005$  m (au milieu) et VOF  $\Delta x = 0.005$  m (en bas)

Dans cette figure, les champs de pression, de vitesse horizontale et de phase sont présentés. On constate qu'autour de cet instant une mince couche d'air coincée entre la voûte et la surface libre est chassée à haute vitesse, de l'ordre de 50 à 60 m/s en pointe (par striction de la section d'échappement, formant un effet Venturi). Cette couche d'air tend ainsi à disparaître rapidement, mais sa faible épaisseur à l'instant de l'impact du jet de surface libre explique le besoin d'une forte résolution pour simuler correctement l'interaction air/eau à cet endroit. Par ailleurs, le jet de surface libre porteur du pic de pression est lui aussi très mince, et requière donc également une forte discrétisation. Par comparaison entre les résolutions  $\Delta x = 0.001$  m et  $\Delta x = 0.0005$  m, la Figure 10 illustre parfaitement ce pré-requis.

### V – 3 Comparaisons entre les simulations 2D et l'expérience

La largeur de la maquette utilisée dans lors des essais est de 0.322 m. La Figure 11 présente une comparaison des historiques d'effort vertical obtenus dans ces simulations 2D avec celui de l'expérience. L'effort 2D calculé a été multiplié par ce facteur 0.322 d'une part, et par 0.15 d'autre part. En effet, les efforts issus des simulations 2D présentent des gammes d'amplitude très différentes de celles de l'effort expérimental. Ce facteur 0.15 est la valeur nécessaire pour obtenir des gammes d'amplitude similaires entre cas 2D et 3D.



**Figure 11** Comparaison de l'effort vertical obtenu en essai (en noir) et en calcul (en rouge).

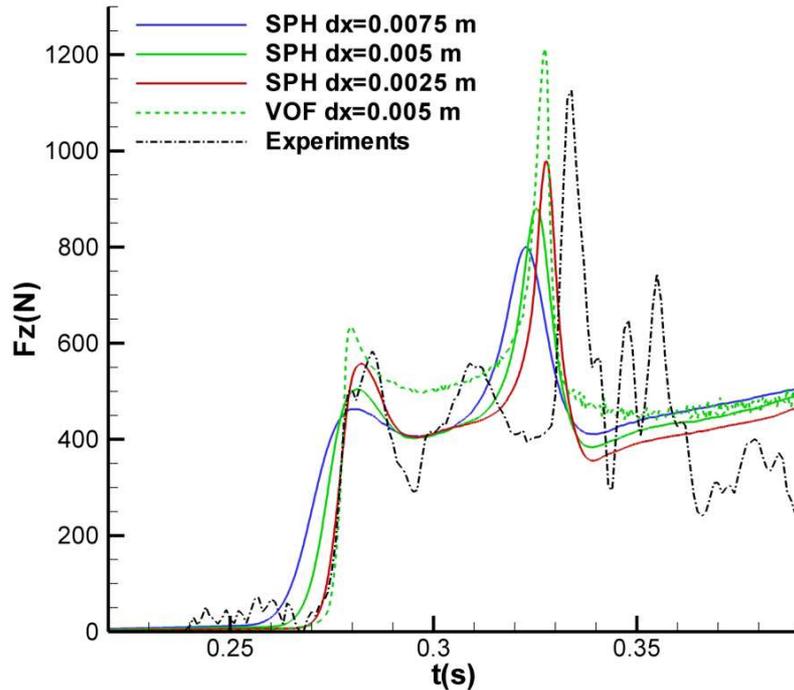
Il est classiquement admis qu'une correction de l'ordre de 10 à 20% peut être appliquée pour réaliser une extrapolation 2D-3D lorsque les effets 3D sont suffisamment faibles. Or la Figure 11 montre qu'une correction de 85% est nécessaire pour obtenir des gammes d'amplitude similaires. Ainsi, ce cas 2D montre que les effets 3D transverses (dans la direction  $y$ ) ont une grande importance sur l'écoulement. Il en va de même pour les effets de l'air (à plus forte raison), puisque sa masse volumique est très faible comparée à celle de l'eau. Nous pouvons finalement affirmer que les effets de l'air sur le cas 3D sont a priori tout à fait négligeables.

## VI – Simulations 3D

Ce cas 2D apparaît ainsi très éloigné du cas 3D, et ne permet pas une extrapolation directe 2D-3D. Néanmoins, il a permis de mettre en place les simulations, et d'analyser la physique de l'écoulement dans une coupe longitudinale du navire. Pour le cas 3D, le même type d'écoulement est attendu, mais avec des gammes d'amplitudes diminuées par des effets transverses importants.

### VI – 1 Analyse des résultats

Ce cas 3D a été simulé en VOF avec une résolution  $\Delta x = 0.005$  m (dans la zone raffinée), et avec SPH pour les résolutions :  $\Delta x = 0.0075$  m,  $\Delta x = 0.005$  m et  $\Delta x = 0.0025$  m, afin d'étudier comme précédemment la convergence de la solution obtenue pour les historiques de pressions locales et de force verticale sur le navire. Ici, les simulations SPH sont effectuées exclusivement en monophasique, les effets de l'air étant négligeables pour ce cas 3D. La Figure 12 présente une superposition des différents historiques d'effort vertical obtenus.



**Figure 12 Comparaison des efforts verticaux entre essai et calculs.**

La figure ci-dessus présente une comparaison entre l'historique calculé et expérimental de l'effort global vertical sur la carène. Cette comparaison montre une bonne capture des tendances globales d'évolution de cet effort au cours du temps. Cependant, les différentes discrétisations SPH montrent que la résolution importe beaucoup, notamment concernant la capture de l'amplitude et de l'instant des maxima d'effort.

Les simulations mettent clairement en évidence la présence de deux pics d'efforts successifs. Le premier pic, apparaissant à l'instant  $t = 0.28$  s, correspond à l'impact de la ligne de quille. Le deuxième pic, apparaissant à  $t = 0.33$  s, correspond à l'impact de la voûte, et affiche l'amplitude la plus élevée du signal. Ces deux pics apparaissent également sur le signal expérimental, et les amplitudes calculées présentent un accord acceptable avec l'expérience. De fortes perturbations apparaissent dans le signal expérimental, notamment suite à chacun des deux pics. Ces bruits sont imputables aux vibrations de la structure faisant suite à ces impulsions, et ne peuvent bien sûr pas être capturées par le calcul. On note enfin un écart entre les instants expérimentaux et calculés pour la montée du second pic. Le pic calculé est en effet en avance de 0.01 seconde par rapport à son équivalent expérimental. On observe cependant que cet écart diminue avec l'augmentation de la résolution, montrant que les résultats ne sont malheureusement pas encore pleinement convergés pour  $\Delta x = 0.0025$  m en SPH ou  $\Delta x = 0.005$  m en VOF.

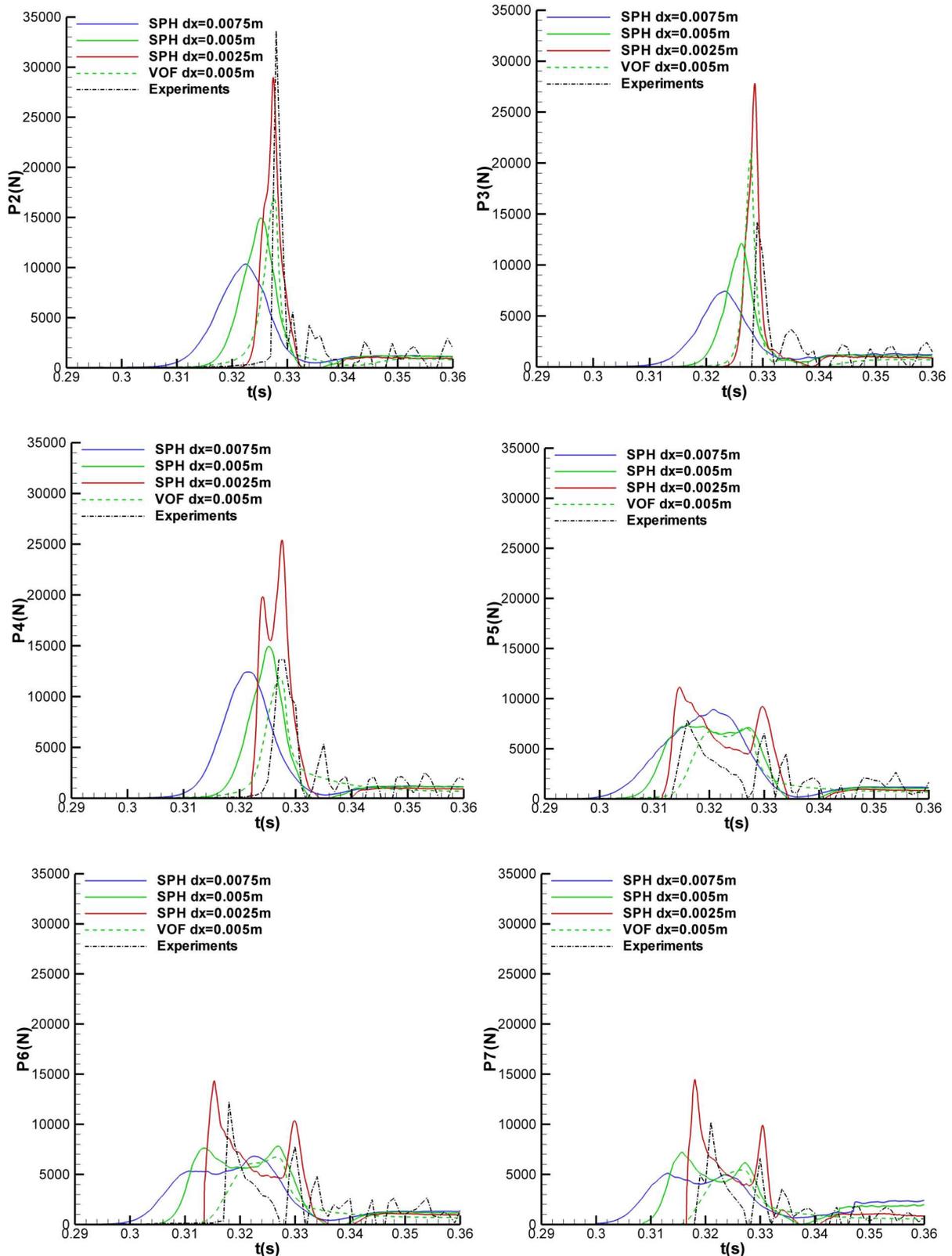
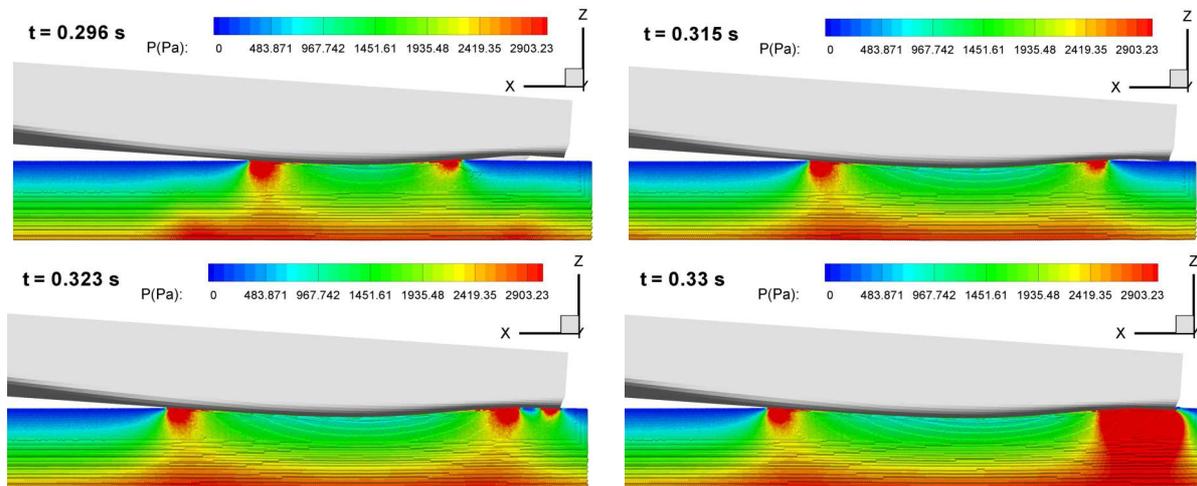


Figure 13 Comparaison des pressions P2 à P7 entre essai et calculs.

La Figure 13 présente une comparaison des historiques de pression calculés et expérimentaux pour les capteurs présentant les signaux les plus pertinents. Les tendances observées précédemment à partir du signal d'effort se retrouvent sur les signaux des capteurs P2 à P7, disposés sur la voûte. Compte tenu de la forme de la voûte et de la position des

capteurs, P5, P6 et P7 sont les premiers à toucher l'eau, suivis du capteur P4, puis des capteurs P1, P2 et P3.

Les capteurs P5, P6 et P7 présentent la particularité d'afficher un double pic. Ce double pic est très bien capturé par la simulation SPH à résolution  $\Delta x = 0.0025$  m, et présente un accord correct avec l'expérience (avec malgré tout un écart temporel comme précédemment discuté sur le signal d'effort vertical et dû à une résolution encore insuffisante). Les résolutions plus faibles en SPH ne parviennent pas à capturer aussi clairement ce double pic, et la simulation VOF à  $\Delta x = 0.005$  m ne le capture pas du tout (hormis au niveau du capteur P5 où deux extrema peuvent être discernés). L'évolution spatio-temporelle des pressions locales au cours de cet impact est particulièrement complexe. Par ailleurs, elle varie très fortement en quelques millièmes de seconde, et mérite donc une analyse plus poussée. La Figure 14 présente une visualisation du champ de pression SPH (pour la résolution  $\Delta x = 0.0025$  m) dans la tranche 2D passant par les capteurs P2, P4 et P6 aux instants  $t=0.296$  s,  $t=0.315$  s,  $t=0.323$  s et  $t=0.33$  s. Ces instants sont choisis de façon à décomposer finement les différentes phases d'évolution de la pression locale, notamment au niveau du capteur P6. L'instant  $t=0.296$  s est choisi de sorte qu'il précède le premier pic de pression, qui apparaît à l'instant  $t=0.315$  s. L'instant  $t=0.323$  s tombe entre les deux pics, et enfin  $t=0.33$  s correspond à l'instant du second pic.



**Figure 14** Visualisation du champ de pression SPH ( $\Delta x = 0.0025$  m) dans la tranche 2D passant par les capteurs P2, P4 et P6 aux instants  $t=0.296$  s,  $t=0.315$  s,  $t=0.323$  s et  $t=0.33$  s.

Tout comme dans le cas 2D (la tranche choisie ici est d'ailleurs la même), on constate la présence de deux patches de pression à  $t=0.296$  s : l'un se déplaçant vers l'avant du navire, l'autre vers l'arrière. A  $t=0.315$  s, ce deuxième patch de pression est localisé exactement à l'abscisse de P5, P6, P7, expliquant le premier pic. L'instant le plus intéressant est certainement  $t=0.323$  s (instant situé entre les deux pics de pression), pour lequel on voit apparaître un troisième patch de pression généré par l'impact de l'extrémité de la voûte, et se propageant vers l'avant du navire. Ainsi, les deux patches sous la voûte se propagent en directions opposées, et finissent par se rencontrer. L'instant  $t=0.33$  s illustre cette focalisation de pression. Ce deuxième pic de pression se retrouve donc sur tous les capteurs à cet instant, qui correspond par ailleurs naturellement avec l'instant d'apparition du second pic d'effort discuté précédemment. L'abscisse de P5, P6, P7 étant relativement éloignées de l'extrémité de la voûte, les signaux de pression obtenus présentent les deux pics de pression successifs de façon distincte. Le capteur P4 est quant à lui presque positionné à l'abscisse de focalisation de sorte que les deux pics sont proches d'être confondus, et le maximum de pression obtenu sur ce capteur est donc plus élevé qu'en P5, P6 et P7. Compte tenu de leur abscisse, les capteurs P2 et P3 captent quant à eux uniquement la focalisation, caractérisée par la présence d'un seul pic de pression de forte intensité.

Les signaux de pression calculés en SPH avec  $\Delta x = 0.0025$  m pour les capteurs P2 à P7 présentent un accord acceptable en termes de synchronisation des pics. De façon générale, les tendances globales des signaux expérimentaux et calculés sont en bon accord. En revanche, les amplitudes des pics de maximum diffèrent parfois fortement entre l'expérience et le calcul.

Il est clair que la convergence n'est pas encore obtenue, expliquant les écarts temporels et d'amplitude observés. Mais il est par ailleurs difficile de juger précisément de la précision du calcul, compte tenu de l'importance du bruit présent dans les signaux de pression expérimentaux. En effet, les écarts d'amplitude entre les pics expérimentaux et calculés sont de l'ordre de grandeur de l'amplitude du bruit présent dans le signal expérimental. Par ailleurs, les vibrations apparaissant dans la structure lors des essais peuvent avoir altéré de façon couplée les signaux de pression mesurés.

Enfin, les Figure 15 et Figure 16 présentent une visualisation 3D du champ de pression au cours de l'impact, pour les instants précédemment étudiés.

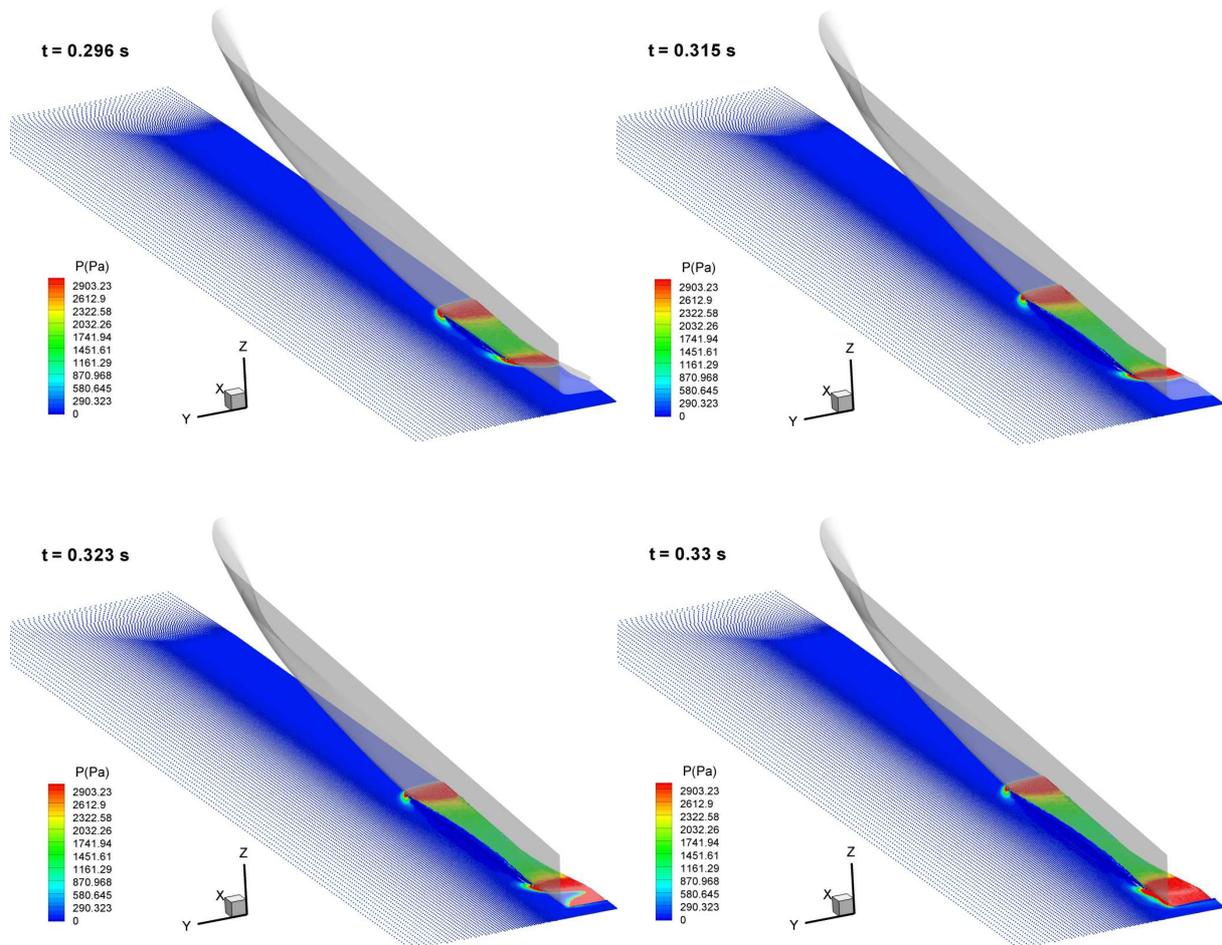


Figure 15 Vue 3D du champ de pression SPH ( $\Delta x = 0.0025 \text{ m}$ ) autour du navire aux instants  $t=0.296 \text{ s}$ ,  $t=0.315 \text{ s}$ ,  $t=0.323 \text{ s}$  et  $t=0.33 \text{ s}$ .

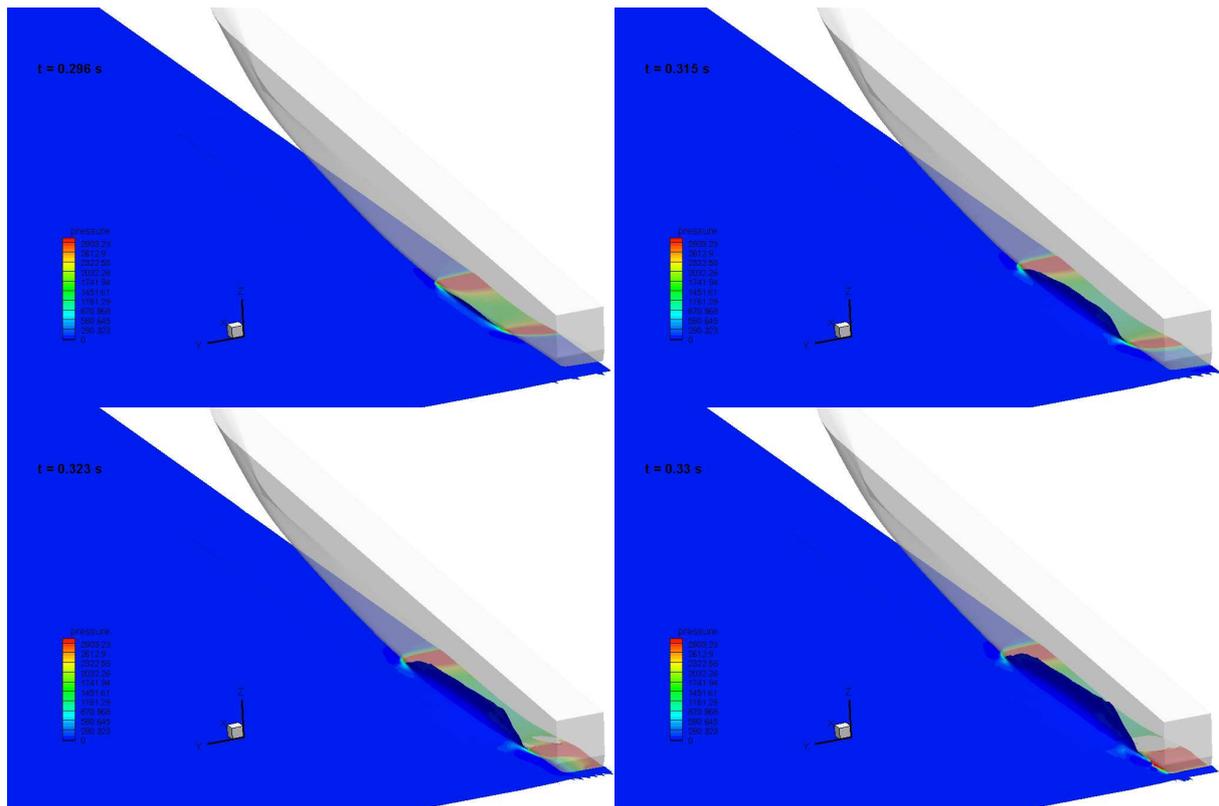


Figure 16 Vue 3D du champ de pression VOF autour du navire aux instants  $t=0.296$  s,  $t=0.315$  s,  $t=0.323$  s et  $t=0.33$  s.

## VII – Conclusion

Dans ce papier, deux méthodes numériques très différentes ont été employées pour simuler l'impact à la surface libre au repos d'un navire de forme complexe. L'une est Eulérienne et basée sur l'utilisation de maillage (VOF), l'autre est Lagrangienne et sans maillage (SPH). Avant de procéder aux simulations 3D de cet impact de navire, la simulation 2D d'une tranche de ce navire a été réalisée. Cette première étude a permis de mettre en place les simulations et de procéder à une analyse en convergence. Il a été observé qu'une résolution très fine est nécessaire pour capturer la physique complexe apparaissant pour ce cas 2D. Les effets de l'air sur l'écoulement sont prépondérants pour ce cas où un coussin d'air très mince se retrouve emprisonné, requérant ainsi des discrétisations très fines. Il a également été montré que ce cas 3D ne peut pas être extrapolé à partir du cas 2D, les effets transverses dans l'écoulement étant très intenses. Les simulations 3D de l'impact du navire incliné de  $4^\circ$  par la voûte ont pu ensuite être réalisées et comparées aux résultats issus d'expériences au bassin d'essai du LHEEA de l'Ecole Centrale de Nantes. Une étude de convergence a également été effectuée sur ce cas 3D. En dépit du fait que les résultats présentés ne sont pas pleinement convergés, les simulations ont permis de prédire et de comprendre avec une précision correcte l'écoulement mis en jeu. Cette étude a permis de commencer la comparaison entre les méthodes VOF et SPH sur des cas d'impact, et ces travaux seront poursuivis prochainement afin de compléter l'analyse. En outre, cette étude souligne l'intérêt évident d'utiliser la simulation numérique pour analyser et comprendre finement certains phénomènes complexes apparaissant au cours d'une expérience, et pour compléter leur interprétation. C'est notamment le cas pour l'interprétation des évolutions spatio-temporelles des pressions locales mesurées, où la simulation numérique complète la compréhension fine de la physique mise en jeu.

## Références

- [1] Antuono, M., Colagrossi, A., Marrone, S. and Molteni, D., 'Free-surface flows solved by means of SPH schemes with numerical diffusive terms', *Computer Physics Communications*, Vol. 181, pp. 532-549, 2010.
- [2] D. A. Barcarolo, Amélioration de la précision et de l'efficacité de la méthode SPH: étude théorique et numérique, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France, 2013.
- [3] J.-B. Deuff, Extrapolation au Réel des Mesures de Pressions Obtenues sur des Cuves Modèle Réduit, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes/GTT, 2007.
- [4] M. Doring, Développement d'une méthode SPH pour les applications à surface libre en hydrodynamique, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2005.
- [5] G. Fourey, Développement d'une méthode de couplage fluide-structure SPH-Eléments Finis en vue de son application à l'hydrodynamique navale, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2012.
- [6] P.-M. Guilcher, Contribution au développement d'une méthode SPH pour la simulation numérique des interactions houle-structure, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2008.
- [7] N. Grenier, Modélisation numérique par la méthode SPH de la séparation eau-huile dans les séparateurs gravitaires, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2009.
- [8] A. Hay, A. Leroyer et M. Visonneau, Simulation d'écoulements à surface libre autour de corps en mouvement avec adaptation locale de maillage. 10<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique, 2005.
- [9] M. de Lefte. Modélisation d'écoulements visqueux par la méthode SPH en vue d'application à l'hydrodynamique navale. Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2011.
- [10] J.-C. Marongiu, Méthode numérique lagrangienne pour la simulation d'écoulements à surface libre - Application à la turbine Pelton. PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon, 2007.
- [11] J.J. Monaghan, Smoothed Particle Hydrodynamics, *Annual Review in Astronomy and Astrophysics*, Vol. 30, pp. 543-574, 1992.
- [12] J.J. Monaghan, Simulating free surface flows with SPH, *Journal of Computational Physics*, Vol. 110, pp. 399-406, 1994.
- [13] G. Oger, Aspects théoriques de la méthode SPH et applications à l'hydrodynamique à surface libre, PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2006.
- [14] G. Oger, M. Doring, B. Alessandrini and P. Ferrant. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 213, pp. 803-822, 2006.
- [15] G. Oger, M. Doring, B. Alessandrini et P. Ferrant. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries, *Journal of Computational Physics*, 2005.
- [16] B. Van Leer, Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second order sequel to Godunov's methods, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 101-136, 1979.
- [17] J.-P. Vila, On Particle Weighted Methods and Smooth Particle Hydrodynamics, *Mathematical Models and Methods in Applied Science*, Vol 9, pp 161-209, 1999.
- [18] T. Von Karman, The impact on seaplane floats during landing, National Advisory Committee for Aeronautics, 1929.
- [19] H. Wagner, Uber Stoss und gleitvorgange an der oberflache von Flussigkeiten, *Zeitschrift fur angewandte mathematik und mechanik*, 1932.
- [20] R. Zhao et O. Faltinsen, Water entry of two-dimensional bodies, *Journal of Fluid Mechanics*, 1993.

[21] C. Hirt et B. D. Nichols, Volume Of Fluid VOF Method for the dynamic of free boundaries, Journal of Computational Physics, Vol 39, pages 201-225.