

Simulation de l'endommagement d'une paroi induit par le collapse d'une bulle avec couplage partitionné et méthode de pénalisation

L. Ménez¹, M. Beringhier¹, P. Parnaudeau¹, E. Goncalves¹

Institut Pprime, UPR 3346 CNRS, ISAE-ENSMA

Université de Poitiers 86961 Chasseneuil cedex, France

lucas.menez@ensma.fr, marianne.beringhier@ensma.fr, philippe.parnaudeau@univ-poitiers.fr, eric.goncalves@ensma.fr

Résumé — Des simulations numériques de l'endommagement d'une paroi induit par le collapse d'une bulle isolée sont réalisées à l'aide d'une stratégie de couplage partitionné basée sur l'utilisation de solveurs volumes finis et éléments finis. L'interface mobile fluide-solide est gérée par une méthode de pénalisation. La déformation du matériau est tout d'abord caractérisée dans le régime élastodynamique, puis une loi de comportement élastoplastique sera intégrée au sein du solveur solide. Une étude paramétrique sera menée afin de déterminer l'influence de la distance bulle/paroi sur l'endommagement du matériau.

Mots clés — Érosion de cavitation, couplage fluide-structure, pénalisation.

1 Introduction

L'érosion de cavitation est un problème majeur pour les applications hydrauliques et marines. Ce phénomène se produit lorsque des structures cavitantes collapent à proximité de parois solides, pouvant entraîner l'endommagement des surfaces et l'usure prématurée des composants. Afin de clarifier les principaux mécanismes physiques mis en jeu, de nombreuses études expérimentales et numériques du collapse d'une bulle induit par une onde de choc normale incidente ont été proposées [1, 2]. Les caractéristiques du collapse de la bulle, à savoir la génération et l'interférence d'ondes de pression de forte amplitude (pouvant dépasser le gigapascal) et la formation de jets à grande vitesse, ont été minutieusement étudiées. L'impact successif des ondes de pression générées par les collapses est considéré comme le mécanisme fondamental responsable de l'érosion. De plus, le phénomène dépend fortement de la distribution granulométrique des bulles, de leur distance à la paroi et des caractéristiques du solide. Cependant, peu d'études numériques couplées fluide-structure ont été menées sur l'endommagement d'une paroi déformable induit par le collapse d'une bulle [3, 4]. Dans la présente étude, des simulations de la déformation de la paroi induite par le collapse d'une bulle isolée sont réalisées. Afin de résoudre le problème d'interaction fluide-structure, une approche de couplage partitionné est adoptée.

2 Méthodes numériques

La présente stratégie de couplage partitionné repose sur un participant fluide, un participant solide et la librairie de couplage preCICE [5] pour faire le lien entre les deux solveurs. La simulation de l'écoulement diphasique compressible est obtenue par résolution d'une formulation aux interfaces diffuses basée sur un modèle à quatre équations discretisé avec la méthode des volumes finis [6]. Afin de simuler le collapse de bulle à proximité d'une paroi déformable tout en éliminant le besoin de remaillage, deux variantes de la méthode de pénalisation sont développées pour les écoulements diphasiques compressibles [7, 8]. Le corps solide est modélisé comme un milieu poreux dont la perméabilité tend vers zéro et est localisé par une fonction masque égale à un dans le solide et zéro ailleurs. Les conditions aux limites à l'interface fluide-solide ne sont pas directement imposées, mais modélisées par l'ajout d'un terme source au sein des équations régissant la dynamique du fluide. La différence entre les deux méthodes de pénalisation réside dans le terme de pénalisation sur l'équation de conservation de la masse. La première, appelée méthode de l'impédance dans la présente étude, est utilisée pour imposer une condition de Dirichlet sur la masse volumique dans la zone pénalisée. Elle vise à contrôler l'impédance acoustique du milieu afin de simuler avec une meilleure précision la réflexion et la transmission des ondes

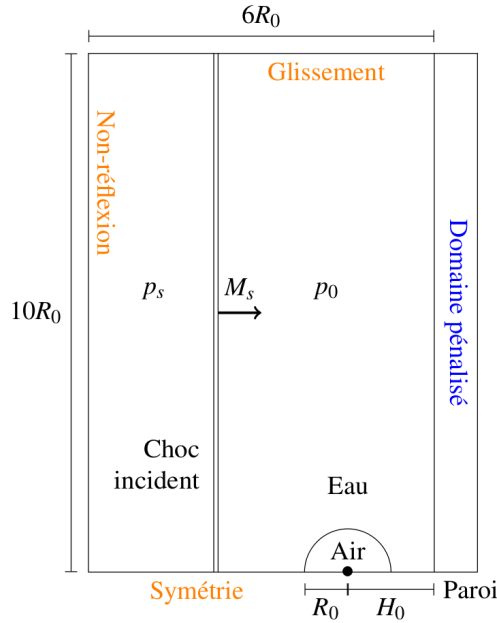


FIGURE 1 – Configuration initiale pour le participant fluide.

à l’interface fluide-solide. La seconde, appelée méthode T –neutral ici, est la méthode de pénalisation classique pour les écoulements compressibles sans traitement spécifique de la masse volumique. Pour le participant solide, l’intégration de l’équation de l’élastodynamique (ou de l’élastoplasticité) est réalisée avec FEniCS, un solveur éléments finis open source. Un couplage Dirichlet-Neumann partitionné est considéré : le participant fluide communique la force pariétale au participant solide, qui renvoie le déplacement de l’interface couplée au participant fluide afin de mettre à jour la position de l’interface, ainsi que la fonction masque de la méthode de pénalisation.

3 Collapse de bulle au voisinage d’une paroi déformable

Le problème étudié ici est similaire au cas du collapse de bulle présenté par Paquette et al. [3]. Une bulle d’air, de rayon initial $R_0 = 0.05$ mm, est immergée dans de l’eau liquide au repos avec les conditions initiales $p_0 = 10^5$ Pa et $T_0 = 298$ K. Le collapse de la bulle est induit par une onde de choc normale incidente se déplaçant à un nombre de Mach $M_s = 1.04$, correspondant à une amplitude $p_s = 120$ MPa. La configuration initiale du participant fluide est illustrée sur la Figure 1. Seulement la moitié du domaine est simulée et une condition de symétrie est appliquée en $y/R_0 = 0$, afin d’exploiter l’hypothèse de symétrie de l’écoulement. Tout d’abord, la distance entre le centre de la bulle et la paroi est fixée à $H_0 = 2R_0$.

Dans un premier temps, le problème est simulé dans le cas d’une paroi rigide avec les deux méthodes de pénalisation sur une grille cartésienne uniforme de 700×1000 cellules. Des visualisations instantanées du gradient de la masse volumique (en haut) et des champs de pression (en bas) sont présentées sur la Figure 2. En raison de la différence de pression induite par le choc incident, la bulle se contracte de manière asymétrique et génère un jet d’eau le long de l’axe de symétrie. Lorsque ce jet frappe l’interface opposée de la bulle, une onde de choc intense se forme, générant une zone de haute pression. Les fronts se propagent ensuite radialement. Le front droit de l’onde percute la paroi et s’y réfléchit, provoquant un pic de pression susceptible d’endommager le matériau. La Figure 3 montre l’évolution temporelle de la pression pariétale sur l’axe de symétrie. Un bon accord est observé entre les résultats obtenus avec pénalisation et ceux obtenus sur maillage conforme (*body-fitted*), ainsi qu’avec la solution de Paquette et al. [3]. Cependant, le modèle d’impédance reproduit plus fidèlement le pic de pression, par rapport au modèle T –neutral. Ceci est dû au fait qu’une partie de l’onde de choc incidente est transmise au domaine pénalisé au lieu d’être réfléchi lorsque l’impédance acoustique de la zone pénalisée n’est pas imposée.

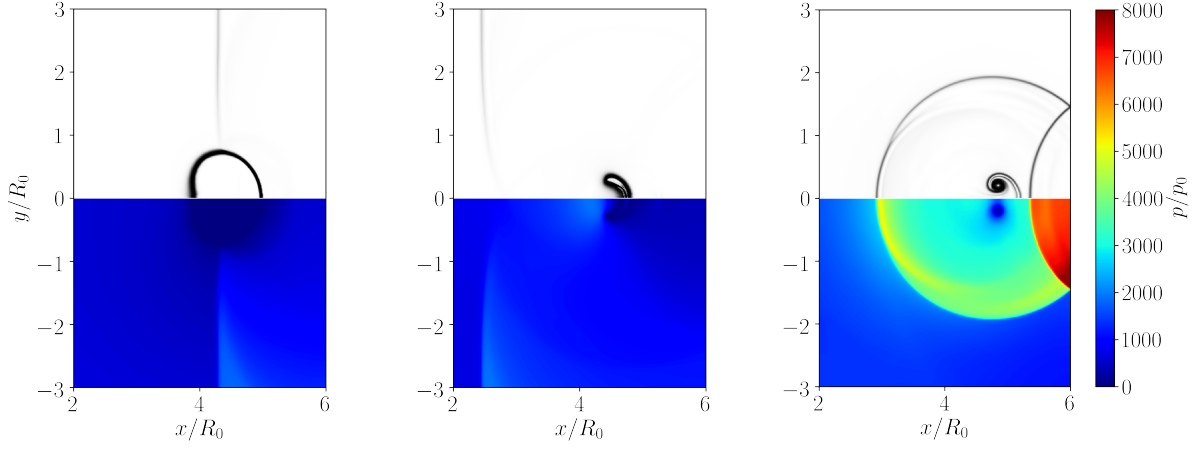


FIGURE 2 – Collapse de bulle au voisinage d’une paroi rigide : visualisations instantanées du gradient de la masse volumique (en haut) et des champs de pression (en bas). La paroi est située en $x/R_0 = 6$.

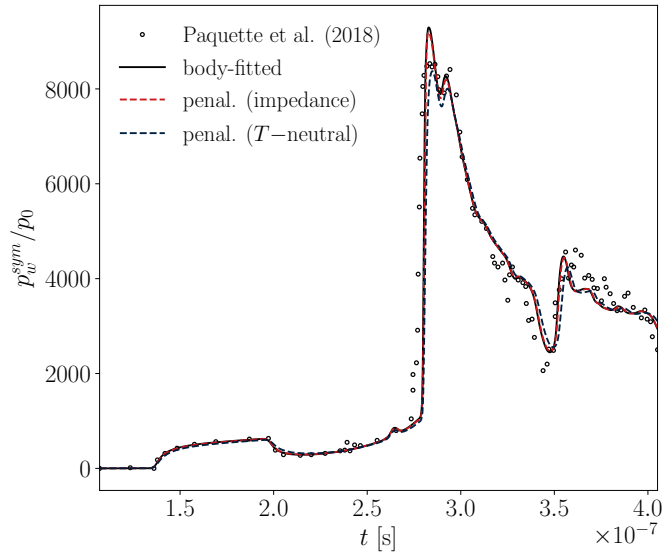


FIGURE 3 – Évolution temporelle de la pression pariétale sur l’axe de symétrie.

Le cas précédent est maintenant étudié en considérant une paroi déformable et un problème d’élastodynamique linéaire, composé d’une équation d’équilibre de la quantité de mouvement :

$$\rho_s \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma, \quad (1)$$

et de la loi de Hooke pour un matériau isotrope :

$$\sigma = \lambda_s \text{tr}(\epsilon) \mathbf{I}_d + 2\mu_s \epsilon. \quad (2)$$

avec ξ le vecteur des déplacements, σ le tenseur des contraintes et ϵ le tenseur des déformations. On se place sous l’hypothèse de contraintes planes, les coefficients de Lamé sont exprimés tels que :

$$\lambda_s = \frac{E\nu_s}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \quad ; \quad \mu_s = \frac{E}{2(1+\nu_s)}. \quad (3)$$

Le matériau est constitué d’aluminium de module d’Young $E = 70$ GPa, de masse volumique $\rho_s = 2700$ kg/m³, de coefficient de Poisson $\nu_s = 0.36$ et de limite d’élasticité $\sigma_Y = 500$ MPa. Le domaine de calcul du solide est de même hauteur que le domaine fluide et une condition de symétrie est également appliquée sur le bord bas du domaine. Une première étude est menée en considérant un couplage *I-way* afin de déterminer la longueur du domaine : les efforts du fluide sur le solide sont pris en compte comme une condition de bord, mais la rétroaction du solide sur le fluide n’est pas envisagée. Le domaine doit être

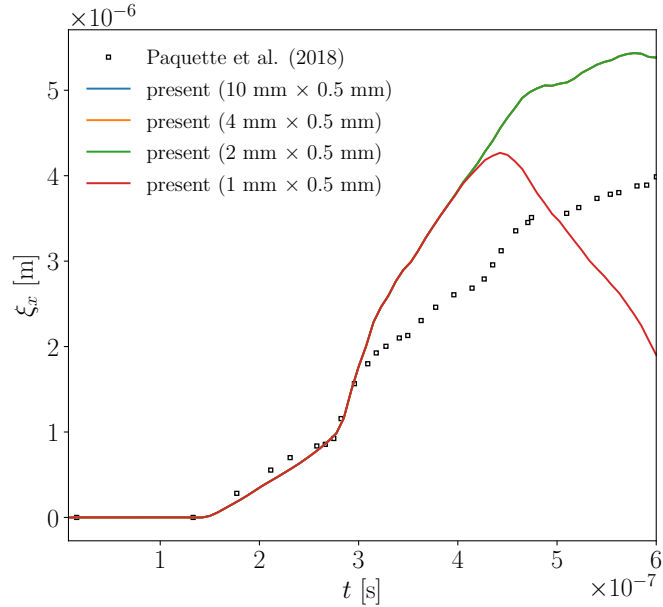


FIGURE 4 – Évolution temporelle du déplacement horizontal de la paroi sur l'axe de symétrie, pour différentes longueurs de domaine.

suffisamment long afin que la réflexion des ondes sur le bord droit n'interfère avec l'interface couplée (bord gauche) au cours de la simulation. Le maillage structuré est constitué de 200×100 points et les éléments finis sont triangulaires avec interpolation quadratique. Il est uniforme suivant l'axe vertical et étiré suivant l'axe horizontal (progression géométrique). L'évolution temporelle du déplacement horizontal de la paroi sur l'axe de symétrie est représentée sur la Figure 4 pour des longueurs du domaine solide $L_x^s = \{1; 2; 4; 10\}$ mm. Pour $L_x^s = 1$ mm, l'onde réfléchie interagit avec l'interface couplée et s'oppose au chargement imposé par le fluide, menant à une chute du déplacement horizontal pour $t > 4 \cdot 10^{-7}$ s. En revanche, aucune différence n'est observée pour $L_x^s = \{2; 4; 10\}$ mm, la suite des calculs sera donc réalisée en considérant un domaine solide de dimensions 2 mm x 0.5 mm. Les présents résultats montrent un bon accord avec ceux de Paquette et al. [3] uniquement pour $t < 3 \cdot 10^{-7}$ s, lorsque la limite d'élasticité du matériau n'est pas dépassée et que, par conséquent, le matériau n'est pas encore entré en plasticité. En effet, aucune loi de comportement élastoplastique n'est considérée dans un premier temps, contrairement à [3].

Ce travail est toujours en cours et des comparaisons de la déformation et de la pression pariétale entre les approches de couplage *1-way* et *2-way* seront effectuées. D'après les calculs *1-way*, l'onde de pression générée par le collapse est suffisamment intense pour provoquer la déformation plastique du matériau, nécessitant l'ajout d'une loi de comportement élastoplastique au sein du solveur solide. Enfin, une étude paramétrique sera réalisée afin de déterminer l'influence de la distance bulle-paroi H_0 sur l'endommagement du matériau.

4 Remerciements

Ce travail est supporté par Labex INTERACTIFS (ANR-11-LABX-0017-01) et l'Agence Innovation Défense (AID).

Références

- [1] N.A. Hawker, Y. Ventikos. *Interaction of a strong shock wave with a gas bubble in a liquid medium : a numerical study*, Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press, 59-97, 2012.
- [2] O. Supponen, D. Obreschkow, P. Kobel, M. Tinguely, N. Dorsaz, M. Farhat. *Shock waves from nonspherical cavitation bubbles*, Physical Review Fluids, American Physical Society, 093601, 2017.
- [3] Y. Paquette, M. Fivel, G. Ghigliotti, E. Johnsen, J-P. Franc. *Fluid-structure interaction in cavitation erosion*, Proceedings of the 10th Int. Symposium on Cavitation, CAV2018, Baltimore, USA, 2018.
- [4] C. Turangan, G. Ball, A. Jamaluddin, T. Leighton. *Numerical studies of cavitation erosion on an elastic-plastic material caused by shock-induced bubble collapse*, Proc. R. Soc. A., Royal Society, 20170315, 2017.
- [5] G. Chourdakis, K. Davis, B. Rodenberg et al. *preCICE v2 : A sustainable and user-friendly coupling library [version 2]*, Open Res Europe, Open Research Europe, 51, 2022.
- [6] R. Dubois, E. Goncalves, P. Parnaudeau. *High performance computing of stiff bubble collapse on CPU-GPU heterogeneous platform*, Comput. Math. Appl., Elsevier, 246–256, 2021.
- [7] L. Ménez, P. Parnaudeau, M. Beringhier, E. Goncalves. *Assessment of volume penalization and immersed boundary methods for compressible flows with various thermal boundary conditions*, Journal of Computational Physics, Elsevier, 112465, 2023.
- [8] L. Ménez, P. Parnaudeau, M. Beringhier, E. Goncalves. *Simulation of bubble collapse near a curved wall using a penalization method*, 11th Int. Conf. on Multiphase Flow, ICMF, Kobe, Japan, 2023.