



HAL
open science

Une modélisation semi-analytique du comportement dynamique de coques élastiques immergées

Jean-François Sigrist, Cédric Leblond, Sergueï Iakovlev

► To cite this version:

Jean-François Sigrist, Cédric Leblond, Sergueï Iakovlev. Une modélisation semi-analytique du comportement dynamique de coques élastiques immergées. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. pp.74H7177P. hal-01413982

HAL Id: hal-01413982

<https://hal.science/hal-01413982>

Submitted on 12 Dec 2016

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Une modélisation semi-analytique du comportement dynamique de coques élastiques immergées

J.F. Sigrist¹, C. Leblond², S. Iakovlev³

¹ DCNS Propulsion (Service Technique et Scientifique)
44620 LA MONTAGNE
jean-francois.sigrist@dcnsgroup.com

^{2,3} Université de La Rochelle
Université Dalhousie Halifax
cedric.leblond@univ-lr.fr, sergei.iakovlev@dal.ca

Résumé – Le présent article propose une modélisation semi-analytique du comportement de coques élastiques immergées ; le problème modèle étudié est celui d'une coque bidimensionnelle assujettie à une onde de choc acoustique et pour laquelle les modèles de coques minces et de coque épaisse sont utilisés. La comparaison proposée permet de mettre en évidence les limites de validité des différents modèles pour la description de la réponse acoustique de coques immergées.

Mots clés – Interactions fluide/structure, propagation d'ondes élasto-acoustiques, méthode semi-analytique, coques immergées.

1 Instructions générales

Le dimensionnement de navires militaires (sous-marins et bâtiment de surface) requiert l'analyse de leur comportement d'ensemble en réponse aux effets d'une explosion non au contact. La simulation numérique s'impose donc de plus en plus dans l'ingénierie navale comme un moyen d'analyse a priori (en phase de dimensionnement) ou a posteriori (en phase d'exploitation) des structures navales ; l'approche industrielle consiste ainsi en une analyse globale (ou *Whole Ship Shock Analysis*, voir Fig. 1) utilisant les possibilités offertes par les « hydro-codes » [7].

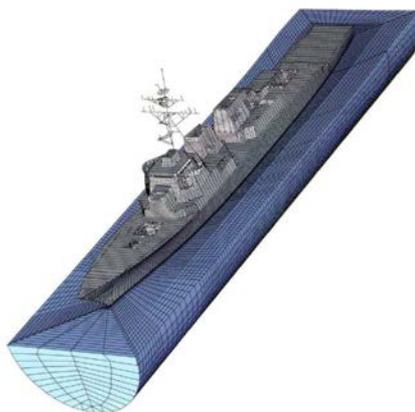


Figure 1 - Analyse de la réponse d'ensemble d'un navire à une explosion sous-marine : modèle éléments finis (Shin, 2004)

Un besoin de validation des modélisations couplées fluide/structure est cependant toujours nécessaire : le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une réflexion académique complémentaire à la pratique industrielle et propose une méthode semi-analytique pour la modélisation du comportement de coques immergées assujetties à une onde incidente [6,10,11].

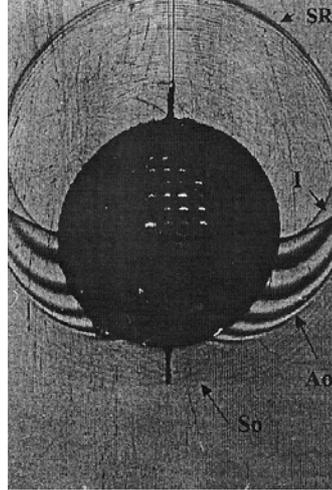


Figure 2 - Observation expérimentale du champ de pression incident, rayonné et réfléchi par une coque élastique immergée et assujettie à une onde incidente [1]

Le problème de l'interaction fluide/structure dans le cas d'une coque circulaire élastique immergée dans un milieu fluide acoustique a fait l'objet d'études dans le domaine fréquentiel [8] en se basant sur une modélisation de comportement élastique de la coque. Des études sur un problème similaire dans le domaine temporel ont été proposées [5] en se basant sur une modélisation de type Love-Kirchhoff pour des coques « minces » ; il est ainsi mis en évidence des différences notables dans le calcul du champ de pression rayonné par la coque, en terme de description des ondes A_0/S_0 , par comparaison aux résultats expérimentaux obtenus sur des problèmes similaires (voir Fig. 2).

Le modèle de coque mince est restreint à la gamme des basses fréquences, alors que l'excitation résultant de l'explosion sous-marine (décrite en première approximation par une onde de choc faible) a un contenu fréquentiel couvrant également la gamme des hautes fréquences ; il est dans ce contexte pertinent d'évaluer l'utilisation d'un modèle de comportement de coques élastiques pour ce problème.

2 Modélisation du comportement dynamique de coques immergées

Le problème considéré est celui d'une coque élastique bidimensionnelle, de rayon extérieur R , d'épaisseur h , de masse volumique μ et caractérisée par les vitesses de propagation d'ondes élastiques longitudinale et transverses λ et τ ; elle est immergée dans un fluide acoustique de masse volumique ρ et caractérisé par la vitesse de propagation d'ondes acoustiques c (voir notations à la Fig. 3).

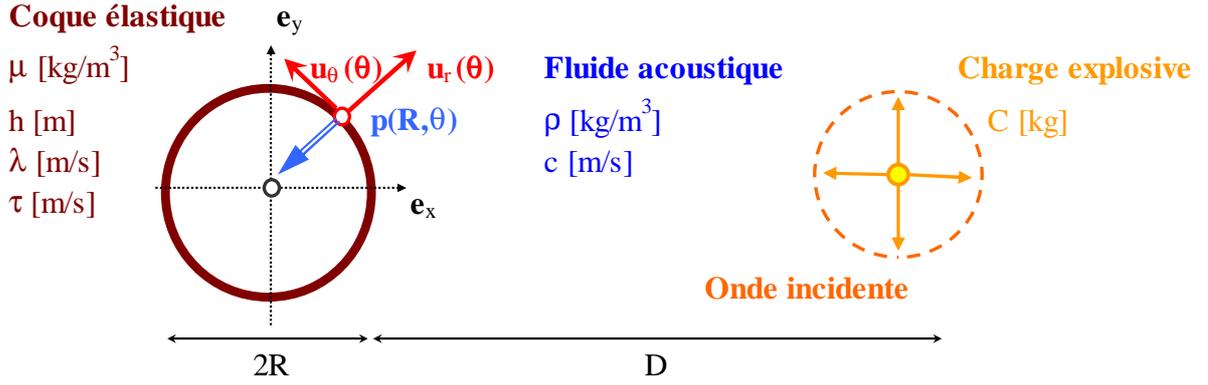


Figure 3 - Coque élastique bidimensionnelle immergée dans un fluide acoustique et assujettie à une onde incidente

Dans ce qui suit, on utilise une écriture adimensionnelle des équations couplées, en prenant R comme longueur de référence, R/c comme temps de référence et ρc^2 comme pression de référence. Le champ de déplacement $\mathbf{U} = \langle u_r, u_\theta \rangle$ dans la coque est calculé en utilisant le modèle de l'élasticité bidimensionnel, i.e. à l'aide des potentiels scalaires ϕ et ψ , tels que $\mathbf{U} = \nabla\phi + \nabla \times (\psi \mathbf{e}_z)$. Les potentiels des déplacements satisfont les équations de propagation suivantes, écrites dans le domaine de Laplace : $\nabla^2 \hat{\phi} - s^2(\lambda/c)^2 \hat{\phi} = 0$ et $\nabla^2 \hat{\psi} - s^2(\tau/c)^2 \hat{\psi} = 0$, où s est la variable de Laplace et $\hat{\bullet}$ désigne la transformé de Laplace de \bullet . En utilisant les développements en série de Fourier suivants,

$$\hat{\phi}(r, \theta, s) = \sum_{n=0}^{n=\infty} \hat{\phi}_n(r, s) \cos(n\theta) \quad [1.a]$$

$$\hat{\psi}(r, \theta, s) = \sum_{n=0}^{n=\infty} \hat{\psi}_n(r, s) \sin(n\theta) \quad [1.b]$$

et en appliquant une méthode de séparation des variables, il est possible d'obtenir l'expression générale des composantes $\hat{\phi}_n(r, s)$ et $\hat{\psi}_n(r, s)$ sous la forme :

$$\hat{\phi}_n(r, s) = A_n(s)J_n(i\lambda r s/c) + B_n(s)Y_n(i\lambda r s/c) \quad [2.a]$$

$$\hat{\psi}_n(r, s) = C_n(s)J_n(i\tau r s/c) + D_n(s)Y_n(i\tau r s/c) \quad [2.b]$$

où J_n et Y_n sont les fonctions de Bessel d'ordre n . Les coefficients A_n , B_n , C_n et D_n sont déterminés à partir des conditions aux limites écrites en contraintes et exprimées ici comme :

$$\hat{\sigma}_{rr}(r=1, \theta, s) = -\hat{p}|_{r=1}, \quad \hat{\sigma}_{r\theta}(1, \theta, s) = 0 \quad [3.a]$$

$$\hat{\sigma}_{rr}(\eta, \theta, s) = 0, \quad \hat{\sigma}_{r\theta}(\eta, \theta, s) = 0 \quad [3.b]$$

avec η le rayon intérieur adimensionnel et p est le champ de pression.

Par linéarité du problème de propagation acoustique, le champ de pression total est calculé comme la somme de trois composantes: le champ de pression incident p_i supposé connu, le champ de pression réfléchi p_d qui équilibre la composante normale de la vitesse de l'onde incidente à la surface extérieure de la coque, $\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{e}_r$, et le champ de pression rayonné p_r , qui décrit l'onde de pression résultat des déformations de la coque immergée. En utilisant les relations classiques de l'élasticité et la décomposition en série de Fourier, les conditions aux limites sont exprimées en fonction des coefficients A_n , B_n , C_n et D_n , qui satisfont ainsi un système algébrique linéaire size 4×4 pour chaque composante de Fourier ; ce système est formellement similaire à celui obtenu par Pathak et Stepanishen [8] pour le problème harmonique.

La solution semi-analytique est alors obtenue après inversion matricielle du système pour tout point de la variable de Laplace s et pour toute composante de Fourier n , puis par inversion numérique de la transformée de Laplace [2] et enfin par recombinaison de Fourier. Une fois le

champ de déplacement dans la coque déterminé, il est possible de déduire le champ de pression dans le fluide, en se basant par exemple sur l'expression analytique de la réponse impulsionnelle pour une coque circulaire [5].

3 Application à un cas élémentaire. Comparaison des modèles

Dans l'application considérée, le champ de pression correspondant à l'onde incidente est décrit en supposant une propagation en champ lointain [4], de sorte que le champ de vitesse correspondant à l'onde incidente est déduit à partir de relations de l'acoustique linéaire ; le profil temporel de l'onde incidente est obtenue à partir de corrélations classiques [3]. La description de l'interaction fluide/structure nécessite le calcul du champ de pression et du champ de vitesse incidents, p_i et v_i , qui sont calculés sur la surface de la coque de façon analytique dans le domaine de Laplace.

Le cas d'une coque d'épaisseur $h/R = 0,06$ (avec les paramètres physiques $\mu = 7800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 5800 \text{ m/s}$, $\tau = 3100 \text{ m/s}$ pour la structure et $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c = 1470 \text{ m/s}$ pour le fluide) soumise à une onde incidente correspondant à l'explosion d'une charge $C = 1 \text{ kg}$ de TNT situé à distance $D/R = 2$, est étudié ici ; le champ de pression résultant est donné par la Fig. 4 ci-dessous, en réalisant un calcul avec le modèle de coque élastique [6] et le modèle de coque mince [5].

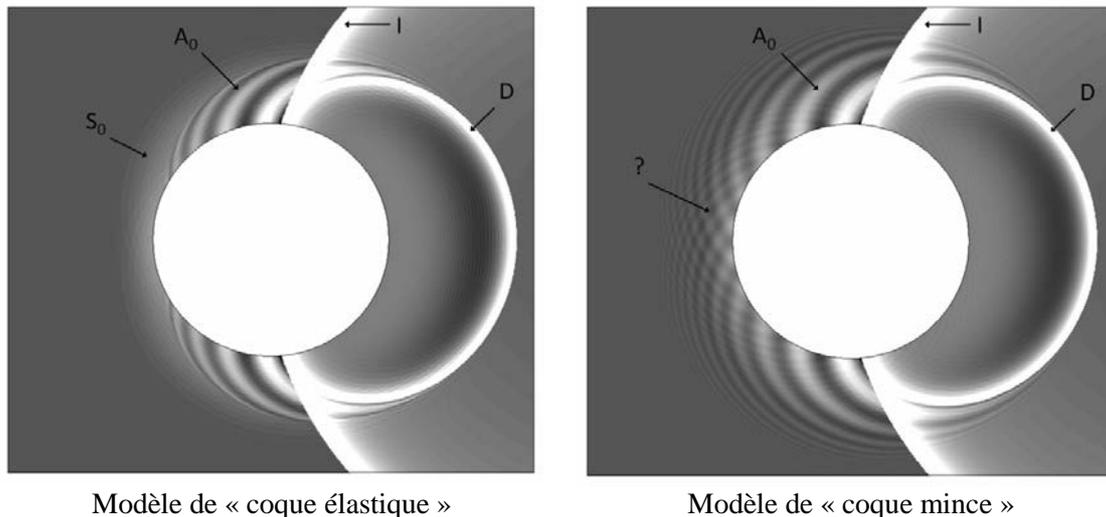


Figure 4 - Coque élastique bidimensionnelle immergée dans un fluide acoustique et assujettie à

Si la prédiction du champ de pression incidente (I) et réfléchi (D) est similaire dans les deux cas étudiés, l'analyse du champ de pression rayonné met en évidence des différences notables entre les deux modélisations adoptées, plus particulièrement en ce qui concerne l'onde de pseudo-Rayleigh (identifiée par A_0) et l'onde de Lamb (identifiée par S_0).

L'utilisation du modèle de coque élastique permet de bien distinguer ces deux ondes et l'allure du champ de pression total (incident, réfléchi et rayonné – ondes A_0 et S_0) est en excellent accord avec les observations expérimentales d'Ahyi *et al.* [1], voir Fig. 2 ci-dessus, alors que l'utilisation du modèle de coque mince ne permet pas d'identifier les ondes S_0 et A_0 , dont la vitesse de phase est surestimée.

4 Conclusion

La modélisation semi-analytique proposée pour le comportement d'une coque immergée assujettie à une onde incidente permet de décrire les effets d'interaction fluide/structure observés expérimentalement, en particulier en ce qui concerne le champ de pression rayonné.

Une extension du travail présenté est en cours et s'intéresse au cas de coques immergées et contenant un fluide, avec présence de structures internes rigides et déformables.

Références

- [1] A.C. Ahyi, P. Pernod, O. Gatti, V. Latard, A. Merlen, H. Uberall. Experimental demonstration of the pseudo-Rayleigh wave. *Journal of the Acoustical Society of America*, **104**, 2727-2732, 1998.
- [2] L. Brancik. Utilization of Matlab in simulation of linear hybrid circuits. *Radioengineering*, **12**, 6-11, 2001.
- [3] R.H. Cole. *Underwater Explosions*. Princeton University Press, 1948.
- [4] K.S. Hunter, T.L. Geers. Pressure and velocity fields produced by an underwater explosion. *Journal of the Acoustical Society of America*, **115**, 1483-1496, 2004.
- [5] S. Iakovlev. Interaction between a submerged evacuated cylindrical shell and a shock wave, Part 1, Diffraction-radiation analysis. *Journal of Fluids and Structures*, **24**, 1077-1097, 2008.
- [6] C. Leblond. *Modélisation de phénomènes fortement instationnaires en milieu couplé. Application au dimensionnement de structures immergées aux explosions sous-marines*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2007.
- [7] H.U. Mair. Review: Hydrocodes for Structural Response to Underwater Explosion. *Shock and Vibration*, **6**, 81-96, 1999.
- [8] A.G. Pathak, P.R. Stepanishen. Acoustic harmonic radiation from fluid-loaded infinite cylindrical elastic shells using elasticity theory. *Journal of the Acoustical Society of America*, **99**, 573-582, 1994.
- [9] Y. Shin. Ship Shock Modelling and Simulation of Far-Field Underwater Explosion. *Computer & Structures*, **82**, 2211-2219, 2004.
- [10] J.F. Sigrist, C. Leblond. *Etude de l'interaction entre une onde de choc et une structure déformable. Application au dimensionnement des coques de navire*. 8^{ième} Colloque national en calcul des structures, Giens, 21-25 mai 2007.
- [11] J.F. Sigrist. *Développement et validation de méthodes numériques pour la simulation de problèmes couplés fluide/structure. Application au dimensionnement d'équipements de propulsion navale*. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université de La Rochelle, 2008.