

Amortissement du ballonnement d'un liquide dans un réservoir élastique

T. Miras¹, J.-S. Schotté¹, R. Ohayon²

¹ ONERA, Département Aéroélasticité et Dynamique des Structures, France, {thomas.miras, jean-sebastien.schotte}@onera.fr

² LMSSC, Conservatoire National des Arts et Métiers, France, roger.ohayon@cnam.fr

Résumé — On présente ici une formulation du problème couplé Fluide - Structure (liquide interne ballonnant dans un réservoir élastique), ainsi qu'une modélisation approchée de l'amortissement permettant de calculer une réponse fréquentielle (ou temporelle linéarisée) du système. Parmi les principales sources d'amortissement, on ne considèrera ici que la dissipation visqueuse dans le volume fluide ainsi que dans la couche limite avec les parois.

Mots clés — Interaction Fluide-Structure, amortissement.

1 Introduction

Les résultats présentés s'inscrivent dans le cadre des travaux effectués dans ce domaine par l'ONERA et le CNAM depuis plusieurs années [4, 7, 8, 9]. Il s'agit dans un premier temps d'introduire un modèle d'amortissement diagonal dans les équations réduites du système conservatif. Puis on calcule les coefficients d'amortissement modaux (correspondant aux différentes sources de dissipation dans le liquide) pour les implémenter dans le modèle couplé.

2 Equations

On considère ici un liquide pesant ballonnant dans un réservoir élastique soumis à un chargement f . On écrit l'équation matricielle de la réponse amortie du fluide à partir de l'équation conservative en introduisant une matrice d'amortissement D_F (équation 1) qui dépend linéairement de la vitesse de déformation du liquide uniquement (On suppose ici que les phénomènes dissipatifs n'entraînent pas de couplage entre la déformation du liquide et celle de la structure). On ne construit pas la matrice D_F en introduisant une modélisation physique de l'amortissement mais en faisant le choix d'un modèle d'amortissement proposé par Caughey [3] qui est une généralisation du modèle d'amortissement de Rayleigh. Ainsi, ce modèle permet, en considérant la base des modes propres réels du système conservatif, de diagonaliser la matrice d'amortissement du fluide. Ce qui revient à considérer l'Hypothèse de Basile (pas de couplage des modes par l'amortissement). On considère pour la structure un comportement viscoélastique (équation 2) :

$$\text{Pour } (\mathbf{U}, \omega) \text{ fixés, } \exists \phi \in C_\phi \quad \{\mathbf{F} + i\omega \mathbf{D}_F - \omega^2 \mathbf{S}\} \phi + {}^t \mathbf{C} \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Pour } (\phi, \omega) \text{ fixés, } \exists \mathbf{U} \in C_u \quad \{\mathbf{K} + i\omega \mathbf{D}_S - \omega^2 \mathbf{M}\} \mathbf{U} + \omega^2 \mathbf{C} \phi = \mathbf{f} \quad (2)$$

où U représente le déplacement de la structure et ϕ le potentiel de déplacement du fluide, F , S et C sont respectivement les matrices des opérateurs associés aux énergies cinétique et potentielle du fluide, et au couplage fluide-structure à l'interface. K , M et D_S représentent la raideur, la masse et l'amortissement de la structure. Enfin, C_u et C_ϕ sont les espaces des solutions cinématiquement admissibles pour ϕ et U .

Les modes de ballonnement ϕ_α sont calculés à partir du système conservatif et forment une base pour la réponse du fluide en cavité rigide [7]. On peut donc approcher la réponse amortie du liquide ϕ^v avec une bonne précision par une combinaison linéaire des modes de ballonnement complétée par ϕ^s , une réponse quasi-statique du liquide à la déformation de la structure :

$$\phi^v = \phi^s + \Phi \kappa^v \quad (3)$$

où Φ est la matrice contenant les N modes de ballonnement ϕ_α retenus. Les termes désignés par un exposant ν dépendent de l'amortissement. En projetant les équations (1) et (2) sur les modes de ballonnement, on peut alors écrire le problème couplé ayant pour inconnue le vecteur $\begin{pmatrix} U \\ \kappa \end{pmatrix}$. En projetant notamment la matrice D_F on fait apparaître une matrice diagonale Z contenant les coefficients d'amortissement modaux $\{\zeta_\alpha\}_{\alpha \in [1..N]}$.

3 Estimation des coefficients d'amortissement modaux

On considère ici une approche MSE (Modal Strain Energy) pour calculer les taux d'amortissement modaux et construire la matrice Z . Cette méthode consiste à supposer que les modes de ballonnement amortis et non amortis ont des formes proches [1], on utilise donc les modes non amortis $(\phi_\alpha, \omega_\alpha)$ pour estimer les coefficients d'amortissement [6]. L'amortissement du ballonnement dépend principalement de quatre phénomènes qui sont, comme le rappellent Henderson et Miles [5] : la dissipation visqueuse au contact des parois du réservoir, dans le volume du liquide et à la surface libre du liquide, ainsi que le frottement du bord de la surface libre du liquide sur la paroi du réservoir (phénomène de mouillage). A partir des hypothèses citées précédemment, on démontre que l'on peut obtenir une relation approchée simple entre le coefficient d'amortissement et la fraction d'énergie dissipée sur une période (ΔE_α) :

$$\zeta_\alpha \simeq \frac{-\Delta E_\alpha}{4\pi E_\alpha} \ll 1 \quad (4)$$

Où E_α est l'énergie totale initiale associée à un mode de ballonnement. Parmi les 4 sources d'amortissement, on ne prendra en compte ici que la dissipation visqueuse dans le volume fluide ΔE_α^Ω et aux parois ΔE_α^Σ . On a donc (dans l'équation 4) : $\Delta E_\alpha = \Delta E_\alpha^\Omega + \Delta E_\alpha^\Sigma$. On présente figure 1 et 2 une comparaison des résultats analytiques donnés dans [2] et des résultats numériques obtenus par cette méthode.

Numéro du mode	Coefficient d'amortissement (10^{-3})	Résultat Analytique (10^{-3})
1-2	5.0	4.9
3-4	6.2	6.1
5	2.9	2.9
6-7	7.1	7.1
8-9	7.8	7.8

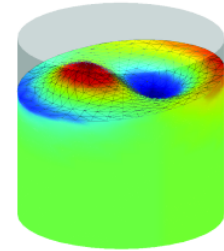


FIG. 1 – Comparaison des résultats analytiques et numérique du calcul des coefficients d'amortissement (test du cylindre de Miles).

FIG. 2 – Exemple de mode propre obtenu.

Références

- [1] L. Anquez *Étude de l'amortissement des vibrations d'un liquide faiblement visqueux contenu dans un réservoir*, 24^e Congrès International d'Astronautique, Bakou, Octobre 1973.
- [2] K. M. Case and W. C. Parkinson *Damping of surface waves in an incompressible liquid*, Journal of Fluid Mechanics, 172-184, 1957.
- [3] T. Caughey *Classical normal modes in damped linear systems*, Journal of Applied Mechanics, 269-271, 1960.
- [4] M. El-Kamali. *Ballonnement des liquides avec tension superficielle : étude statique et dynamique*, PhD Thesis, CNAM Paris, Mars 2010.
- [5] D. M. Henderson, J. W. Miles *Surface-wave damping in a circular cylinder with a fixed contact line*, J. Fluid Mech., 285-299, 1994.
- [6] C. D. Johnson, D. A. Kienholz, L. C. Rogers *Finite element prediction of damping in beams with constrained viscoelastic layers*, Shock and vibration Bulletin, 71-82, 1981.
- [7] H. J.-P. Morand and R. Ohayon. *Fluid Structure Interaction : Applied Numerical Methods*, Wiley, 1995.
- [8] J.-S. Schotté *Vibrations of liquids inside tanks in microgravity*, IV European Conference on Computational Mechanics, Paris, 17-21 Mai 2010.
- [9] J.-S. Schotté. *Influence de la gravité sur les vibrations linéaires d'une structure élastique contenant un liquide incompressible*, PhD Thesis, CNAM Paris, December 2001.