



**HAL**  
open science

# Analyse modale du réacteur RES avec prise en compte du couplage fluide/structure

Jean-François Sigrist, Daniel Broc, Christian Lainé

► **To cite this version:**

Jean-François Sigrist, Daniel Broc, Christian Lainé. Analyse modale du réacteur RES avec prise en compte du couplage fluide/structure. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01813012

**HAL Id: hal-01813012**

**<https://hal.science/hal-01813012>**

Submitted on 12 Jun 2018

**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.

Public Domain

---

# Analyse modale du réacteur RES avec prise en compte du couplage fluide/structure

Jean-François Sigrist\* — Daniel Broc\*\* — Christian Lainé \*

\* *Service Technique et Scientifique*

*DCN Propulsion*

*44620 La Montagne*

*jean-francois.sigrist@dcn.fr, christian.laine@dcn.fr*

\*\* *Laboratoire d'Etude de Mécanique Sismique*

*CEA Saclay*

*91191 Gif-sur-Yvette*

*dbroc@cea.fr*

---

*RÉSUMÉ. Le présent article expose les principes de modélisation et d'analyse sismique d'un réacteur nucléaire avec prise en compte des effets d'interactions fluide/structure. La modélisation du système couplé est réalisée en exploitant l'axi-symétrie de la géométrie et la non axi-symétrie du chargement et en proposant une représentation des inconnues du problème sous forme d'une série de Fourier. La formulation du problème couplé utilise l'approche symétrique  $\mathbf{u}, p, \varphi$ . Les effets de masse et de raideur ajoutées sont étudiés, et des résultats d'analyse sismique temporelle et spectrale sont proposés. L'ensemble des résultats de calcul permet de quantifier l'importance des phénomènes d'interactions fluide/structure pour le cas industriel.*

*ABSTRACT. The present paper deals with a numerical modeling of a nuclear reactor with fluid-structure interaction phenomenon. The coupled system is modeled with an axi-symmetric 2D model; with a Fourier expansion of the problem unknowns. The mathematical formulation lies on the symmetric  $\mathbf{u}, p, \varphi$  approach. Added mass and added stiffness effects are studied and their influence on the system dynamic behavior is underlined. A temporal and spectral seismic analysis is carried out. The numerical results exposed in the study highlight fluid-structure interaction effects in the industrial case.*

*MOTS-CLÉS : Interactions fluide/structure, masse ajoutée, raideur ajoutée, analyse modale, étude sismique.*

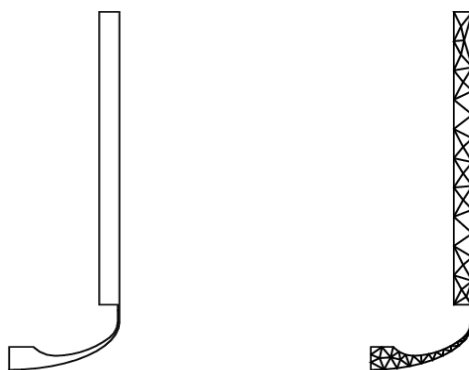
*KEYWORDS: Fluid-structure interaction, added mass, added stiffness, modal analysis, seismic analysis.*

---

## 1. Introduction

La problématique de modélisation et de résolution de problèmes d'interactions fluide/structure a fait l'objet de nombreuses études (Makerle, 1999) et les méthodes numériques de type éléments finis sont maintenant bien formalisées et validées (Morand-Ohayon, 1995). L'application de ces méthodes par l'ingénieur pour des projets industriels en cours reste cependant encore assez rare pour que nous proposons une démarche méthodologique appliquée au projet RES (prototype à terre de réacteur nucléaire de propulsion navale).

Le système étudié est un modèle simplifié de réacteur nucléaire, dont une représentation axi-symétrique est proposée par la figure 1.



**Figure 1.** *Modèle simplifié du réacteur nucléaire et maillage éléments finis*

Le réacteur est composé d'une enveloppe extérieure résistante à la pression (cuve), d'une structure intérieure contenant les éléments combustibles et les internes du réacteur (panier) ; les deux structures sont couplées par le fluide primaire en circulation dans l'espace entre la cuve et la panier<sup>1</sup>. Une première modélisation du problème est proposée par Sigrist et al. (2004) avec le calcul des fréquences et modes propres du système couplé. Nous proposons dans cet article une étude plus exhaustive des interactions fluide/structure en caractérisant les effets de masse et de raideur ajoutées et en évaluant leur importance respective. Nous terminons en présentant des résultats d'analyse sismique dans le cas d'une approche statique et dynamique, avec prise en compte des interactions fluide/structure.

---

<sup>1</sup> L'approche du problème couplé présentée dans le présent article a pour objet l'étude des interactions fluide/structure pour le système étudié, ce qui suppose en particulier le fluide *au repos*.

## 2. Effets du couplage fluide/structure

### 2.1. Effet de masse ajoutée

La modélisation d'ensemble du système couplé fluide/structure utilise une formulation en *déplacement* (inconnue  $\mathbf{u}$ ) pour la structure et *en pression/potentiel des déplacements* (inconnues  $p, \varphi$ ) pour le fluide. Cette formulation permet d'obtenir un problème pour lequel les opérateurs de masse et de raideur sont *symétriques*.

Compte tenu de l'axi-symétrie géométrique du problème étudié et de la non axi-symétrie du chargement sismique, la modélisation mathématique du problème utilise une représentation des inconnues du problème sous la forme d'une série de Fourier<sup>2</sup> (Morand-Ohayon, 1995) :

$$\begin{Bmatrix} u_r(r, \theta, z) \\ u_\theta(r, \theta, z) \\ u_z(r, \theta, z) \\ p(r, \theta, z) \\ \varphi(r, \theta, z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_r^0(r, z) \\ u_\theta^0(r, z) \\ u_z^0(r, z) \\ p^0(r, z) \\ \varphi(r, \theta, z) \end{Bmatrix} + \sum_{s \geq 1} \begin{Bmatrix} u_r^s(r, z) \\ u_\theta^s(r, z) \\ u_z^s(r, z) \\ p^s(r, z) \\ \varphi^s(r, \theta, z) \end{Bmatrix} \cdot \cos(s\theta) + \sum_{a \geq 1} \begin{Bmatrix} u_r^a(r, z) \\ -u_\theta^a(r, z) \\ u_z^a(r, z) \\ p^a(r, z) \\ \varphi^a(r, \theta, z) \end{Bmatrix} \cdot \sin(a\theta) \quad [1]$$

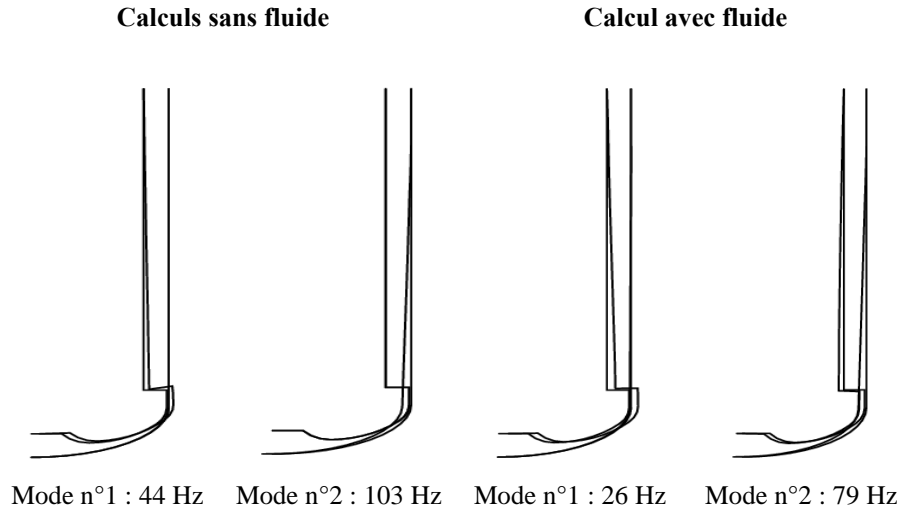
La discrétisation du problème couplé fluide/structure conduit à l'écriture du problème aux valeurs propres suivant :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}'_F & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \mathbf{U}(\omega) \\ \mathbf{P}(\omega) \\ \mathbf{\Phi}(\omega) \end{Bmatrix} = \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{R}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{M}}_F \\ \tilde{\mathbf{R}}^T & \tilde{\mathbf{M}}_F^T & -\mathbf{M}'_F \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \mathbf{U}(\omega) \\ \mathbf{P}(\omega) \\ \mathbf{\Phi}(\omega) \end{Bmatrix} \quad [2]$$

Le calcul des éléments propres (fréquences propres, modes propres) est réalisé avec le code de calcul Castem (Verpeaux et al., 1989). Le problème aux valeurs propres étant symétrique, les modes propres calculés vérifient les conditions d'orthogonalité aux opérateurs de masse et de raideur (Gibert, 1986), ce qui permet de calculer la *masse modale* de chaque mode propre de façon directe. La figure 2 donne une représentation des deux premiers modes propres de la structure non couplée ou non couplée avec le fluide avec le fluide. Le tableau 1 donne les fréquences propres  $f_n$  (en Hz) et les masses modales  $\mu_n$  (en % de la masse totale du système) des premiers modes propres de la structure, par masses modales croissantes

Le premier mode (44 Hz) est un mode de flexion du panier, le second mode (103 Hz) est un mode de flexion de la cuve.

<sup>2</sup> Dans le cas d'une analyse sismique, les modes étudiés sont les modes symétriques d'ordre un ( $s = 1$ ).



**Figure 2.** Représentation des deux premiers modes propres de la structure

Calculs sans fluide			Calcul avec fluide		
$n$	$f_n$ (Hz)	$\mu_n$ (%)	$n$	$f_n$ (Hz)	$\mu_n$ (%)
2	44	39.0	2	79	62.4
3	103	25.0	6	231	13.0
5	141	9.0	4	158	3.7
11	318	6.3	1	26	3.2
4	138	2.0	10	340	2.9

**Tableau 1.** Fréquences propres de la structure avec et sans fluide par masses modales croissantes

Le premier mode couplé est un mode de flexion du panier en présence de fluide, à une fréquence en eau (26 Hz) inférieure à la fréquence propre de flexion dans le vide (44 Hz) : ceci illustre l'effet de *masse ajoutée*, caractéristique des interactions fluide/structure. Le second mode est un mode de flexion de panier et de la cuve, couplés par l'intermédiaire du fluide, à une fréquence intermédiaire (79 Hz) entre les fréquences propres du panier et de la cuve découplés (44 Hz et 103 Hz). Ceci illustre l'effet de couplage de modes, également caractéristiques des interactions fluide/structure pour le système étudié (Axisa, 2001).

## 2.2. Effet de raideur ajoutée

La prise en compte des effets de précontraintes dus à la mise en pression du réacteur, conduisent à formuler le problème sous la forme suivante, en faisant apparaître les matrices de raideur de précontrainte  $\mathbf{K}_\sigma$  et de raideur géométrique  $\mathbf{K}_\pi$  (Gibert, 1986) :

$$\left(-\omega^2_{(P_o)}[\mathbf{M} + \mathbf{M}_H] + [\mathbf{K} + P_o(\mathbf{K}_\sigma - \mathbf{K}_\pi)]\right) \times \mathbf{U}(\omega_{(P_o)}) = 0 \quad [3]$$

Les éléments propres  $\mathbf{U}(\omega_{(P_o)})$  (mode propre) et  $\omega_{(P_o)}$  (pulsation propre) dépendent de la pression  $P_o$ . Le calcul est conduit dans le cas d'une pression de fonctionnement nominal du réacteur, en utilisant le code Castem. Les résultats de calcul sont proposés dans le tableau \ref{tab:3}.

$n$	Sans pression interne	Avec pression interne
1	25.709	25.711
2	79.414	79.460

**Tableau 2.** *Fréquences propres de la structure avec et sans fluide par masses modales croissantes*

Les effets de pré-contrainte se traduisent par une augmentation des fréquences propres, cependant très peu importante. La raideur ajoutée due à la prise en compte de la pression interne dans le réacteur est négligeable devant la raideur de la structure et les effets de masse ajoutée du fluide. Cet effet de raideur ajoutée ne sera donc pas pris en compte dans l'analyse sismique.

## 3. Analyse sismique

L'analyse sismique est conduite en prenant en compte l'effet de masse ajoutée. Une méthode temporelle (Newmark, 1954) et une méthode spectrale (Gupta, 1990) sont mise en œuvres. Les déplacements calculés pour le panier et la cuve sont donnés dans le tableau 3. Des résultats plus complets sont proposé par Sigrist et al. (2005)

Cas de calcul	Panier	Cuve
Méthode temporelle	$5.01 \times 10^{-3}$ m	$4.31 \times 10^{-3}$ m
Méthode spectrale	$4.99 \times 10^{-3}$ m	$4.37 \times 10^{-3}$ m

**Tableau 3.** *Analyse sismique. Déplacements maximum calculés pour le panier et la cuve avec une méthode spectrale et temporelle.*

#### 4. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une démarche d'analyse d'une structure industrielle avec prise en compte des phénomènes d'interactions fluide/structure. Les effets de masse et de raideurs ajoutées ont ainsi été pris en compte. L'analyse montre que seuls les effets de masse ajoutées ont une importance significative sur le comportement dynamique du système couplé. L'utilisation d'une modélisation axi-symétrique harmonique en formulation symétrique permet de produire un modèle simplifié d'analyse pour lequel une méthode spectrale donne de bons résultats. Cette étude permet de disposer d'une méthode de pré-dimensionnement applicable avec les outils d'analyse disponible en bureau d'étude.

#### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier MM. Guillopé, Glavizic et Jucker pour le soutien apporté aux actions de collaboration technique et scientifique entre le CEA et DCN Propulsion dans le domaine des interactions fluide/structure et leurs applications dans le cadre de projets de propulsion navale nucléaire.

#### 5. Bibliographie

- Axisa F., *Interactions fluide structure*, Hermès, 2001.
- Fritz R.J., « The Effect of Liquids on the Dynamic Motion of Immersed Solids », *Journal of Engineering for Industry*, pp. 167-173, 1972.
- Gibert R.J., *Vibration des structures. Interaction avec les fluides*, Eyrolles, 1986.
- Gupta A.K., *Response Spectrum Method*, Blackwell Scientific Publication, 1990.
- Makerle J., « Fluid-Structure Interaction Problems, Finite Element Approach and Boundary Elements Approaches. A Bibliography », *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 31, pp. 231-240, 1999.
- Morand H.J.P., Ohayon R., *Fluid-Structure Interaction*, Wiley & Sons, 1995.
- Newmark M.N., « A Method of Computation for Structural Dynamics », *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 85, pp. 67-94, 1954.
- Sigrist J.F., Lainé C., Peseux B., « Analyse modale d'une structure industrielle avec prise en compte du couplage fluide/structure ». (Accepté pour publication dans) *Mécanique & Industries*, 2004.

Sigrist J.F., Broc D., Lainé C., « Seismic analysis of a nuclear reactor with fluid-structure interaction », Pressure Vessel and Piping, Denver, July 17-21, 2005.

Verpeaux P., et al., « A Modern Approach of Computer Codes for Structural Analysis ». Structural Mechanics in Reactor Technology, Anhiem, August 14-18, 1989.