



**HAL**  
open science

# Une méthode d'homogénéisation couplée fluide/structure appliquée à l'analyse vibratoire d'un faisceau de tubes

Jean-François Sigrist, Daniel Broc

► **To cite this version:**

Jean-François Sigrist, Daniel Broc. Une méthode d'homogénéisation couplée fluide/structure appliquée à l'analyse vibratoire d'un faisceau de tubes. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01495792

**HAL Id: hal-01495792**

**<https://hal.science/hal-01495792>**

Submitted on 26 Mar 2017

**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

---

# Une méthode d'homogénéisation couplée fluide/structure appliquée à l'analyse vibratoire d'un faisceau de tubes

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

\* *Service Technique et Scientifique*  
*DCN Propulsion*  
*44620 La Montagne*  
*jean-francois.sigrist@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 d'un faisceau de tubes d'échangeur de chaleur appliquée à l'analyse dynamique du système avec prise en compte des effets d'interaction fluide/structure. La modélisation couplée utilise une approche dans laquelle l'ensemble tube/fluide est décrit par un milieu homogène équivalent. Les fréquences propres, masses effectives des modes des tubes couplés avec le fluide déterminés avec la méthode d'homogénéisation sont comparés avec un calcul couplé direct (utilisant une modélisation de tous les tubes) sur un faisceaux 16×16. Différents niveaux de représentation des tubes sont adoptés selon que la cellule élémentaire est occupée par un ou plusieurs tubes, ce qui permet d'évaluer la précision de la méthode en fonction du niveau de description moyenne du mouvement des tubes. Il est ainsi montré que la méthode permet une description correcte des effets de couplage inertiels et de confinement avec une efficacité en terme de modélisation numérique et d'applicabilité sur des cas industriels.*

*ABSTRACT. The present paper is concerned with the numerical modelling of a heat exchanger tube bundle with fluid-structure interaction using a homogenisation approach. The presented method lies on the description of FSI between tubes and fluid based on an equivalent homogenised medium. Calculation of eigenmodes, eigenfrequencies and the corresponding effective masses is made possible using the homogenised equations of tubes-fluid interactions. Comparison of numerical results produced by the homogenisation method and the "classical method" (using a detailed model of the tube bundle) on an elementary case highlights the efficiency of the proposed modelling approach for industrial applications.*

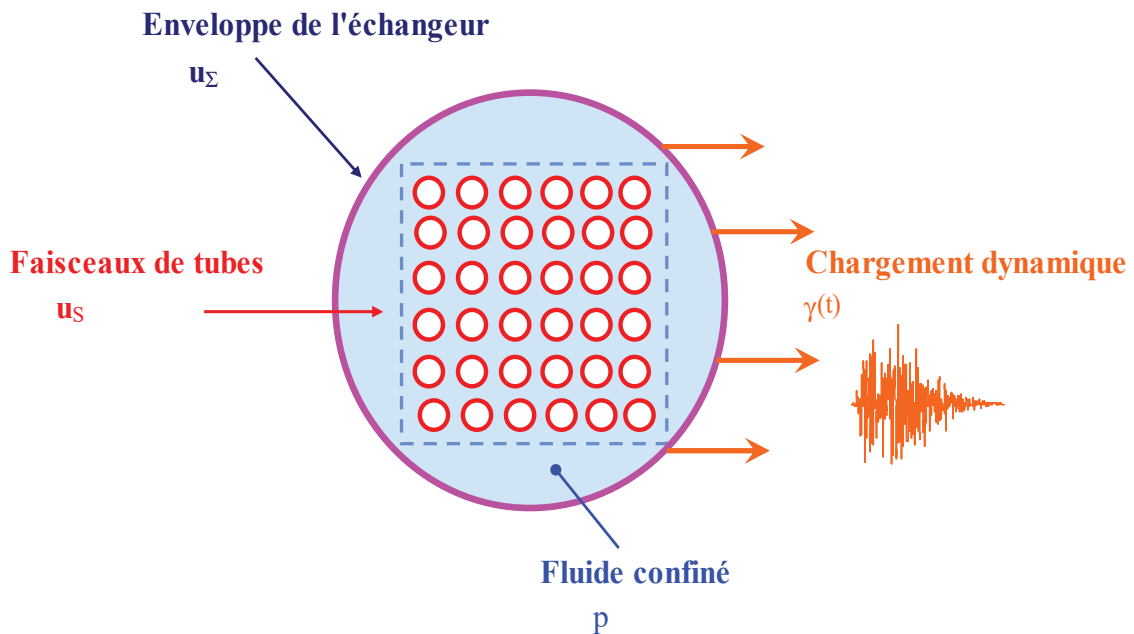
*MOTS-CLÉS : Interactions fluide/structure, méthode d'homogénéisation, faisceaux de tubes, analyse modale.*

*KEYWORDS: Fluid-structure interaction, homogenization method, tube bundle, modal analysis.*

---

## 1. Introduction

Le dimensionnement des échangeurs de chaleur embarqués à bord des bâtiments de surface et sous-marins nécessite l'analyse de comportement vibratoire sous chargement dynamique (Fig. 1), représentatif des effets d'un choc induit par la détonation d'une charge explosive à proximité du navire.



**Figure 1.** Schématisation d'un échangeur de chaleur tubulaire

Les procédures de calcul développées dans le cadre du dimensionnement au séisme des échangeurs de chaleur des centrales nucléaires (Brochard et al. 1987 ; Hammami, 1991 ; Cheval, 2001 ; Broc et al., 2003) permettent une modélisation du comportement dynamique de faisceaux de tubes avec prise en compte des effets d'interaction fluide/structure en utilisant des méthodes d'homogénéisation.

Le présent article s'intéresse à la mise en œuvre d'une méthode d'homogénéisation inspirée des travaux précédents (Sigrist-Broc, 2006a) au cas d'étude de la Fig. 1.

## 2. Calcul des modes propres d'un faisceau de tubes

### 2.1. Méthode directe

L'approche numérique la plus directe du problème consiste à mettre en œuvre un calcul avec modélisation de l'interaction fluide/structure (Morand-Ohayon, 1995), ce qui nécessite un maillage éléments finis du domaine fluide en tenant compte de la présence des tubes. Les modes propres couplés sont obtenus par résolution du problème:

$$\left( -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_S & \mathbf{0} \\ \rho \mathbf{R}^T & \mathbf{M}_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_S & -\mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_F \end{bmatrix} \right) \times \begin{Bmatrix} \mathbf{U}(\omega) \\ \mathbf{P}(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad [1]$$

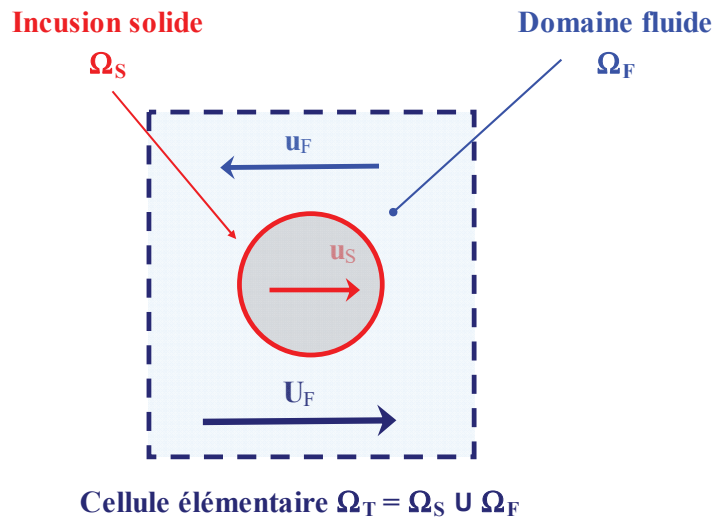
Cette approche n'est cependant pas envisageable à l'échelle de la structure industrielle en raison de la complexité géométrique du domaine fluide à discrétiser et du grand nombre de tubes qui composent le faisceau.

## 2.2. Méthode d'homogénéisation

La méthode d'homogénéisation proposée (Sigrist-Broc, 2006b), permet de s'affranchir du maillage des tubes et propose une modélisation du comportement du fluide basé sur une description moyenne utilisant la vitesse d'écoulement de Darcy  $\dot{\mathbf{U}}_F$  au niveau d'une cellule fluide élémentaire (Fig. 2), calculée à partir de la vitesse du fluide  $\dot{\mathbf{u}}_F$  dans la cellule et celle d'une inclusion solide (représentant un tube)  $\dot{\mathbf{u}}_S$  :

$$\dot{\mathbf{U}}_F = \frac{\Omega_S}{\Omega_T} \dot{\mathbf{u}}_S + \frac{1}{\Omega_T} \int_{\Omega_F} \dot{\mathbf{u}}_F d\Omega_F \quad [2]$$

L'utilisation de la vitesse de Darcy permet d'assurer la continuité du flux fluide entre deux cellules élémentaires et permet une description à l'échelle de la cellule basée sur l'utilisation des deux degrés de liberté  $\mathbf{U}_F$  (déplacement fluide moyen sur la frontière de la cellule) de et  $\mathbf{u}_S$  (déplacement de l'inclusion continue dans la cellule). Cette approche n'est valable que dans le cas de confinements faibles ou moyens, ce qui est le cas dans les applications industrielles concernées.



**Figure 2.** Cellule élémentaire : inclusion solide dans un espace fluide

L'équation de conservation de la quantité de mouvement homogénéisée s'écrit ainsi :

$$\rho \ddot{\mathbf{U}}_F = -(1-J)\nabla p + \rho J \ddot{\mathbf{u}}_S \quad [3]$$

où  $J$  est le ratio de confinement défini par :

$$J = \frac{m_A + \rho |\Omega_S|}{m_A + \rho (|\Omega_S| + |\Omega_T|)} \quad [4]$$

avec  $m_A$  masse ajoutée de l'inclusion solide  $\Omega_S$  dans la cellule  $\Omega_T$ . Avec cette description homogénéisée du fluide, on montre que la dynamique du système couplé est régie par une équation de la forme (Sigrist-Broc, à paraître) :

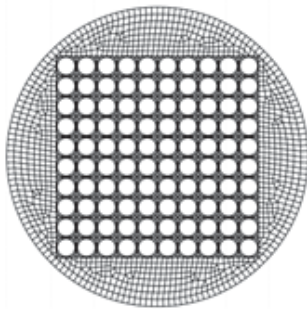
$$\left( -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_S + \mathbf{M}_S^* & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_\Sigma & \mathbf{0} \\ -\rho \mathbf{J} \mathbf{C}^T & -\rho \mathbf{R}^T & \mathbf{M}_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_S & \mathbf{0} & \mathbf{J} \mathbf{C} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_\Sigma & \mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & (1-J)\mathbf{K}_F \end{bmatrix} \right) \times \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_S(\omega) \\ \mathbf{U}_\Sigma(\omega) \\ \mathbf{P}(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad [5]$$

où  $\mathbf{U}_S$  et  $\mathbf{U}_\Sigma$  sont respectivement le champ de déplacement des tubes et de l'enveloppe et  $\mathbf{P}$  est le champ de pression dans le fluide homogénéisé, et  $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{C}$  sont des opérateurs de couplage.

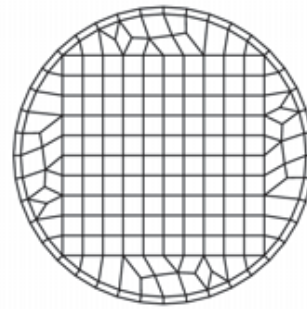
### 3. Application à un faisceau élémentaire. Comparaison des approches

La méthode a été validée pour la modélisation des internes d'un réacteur nucléaire (Sigrist-Broc, 2006c), dans lequel les inclusions sont supposées rigides, alors que dans le cas du faisceau de tubes, les inclusions sont déformables.

La méthode est validée également dans ce dernier cas, par comparaison entre un calcul directe et un calcul homogénéisé (Fig. 3) sur une géométrie élémentaire.



Méthode directe

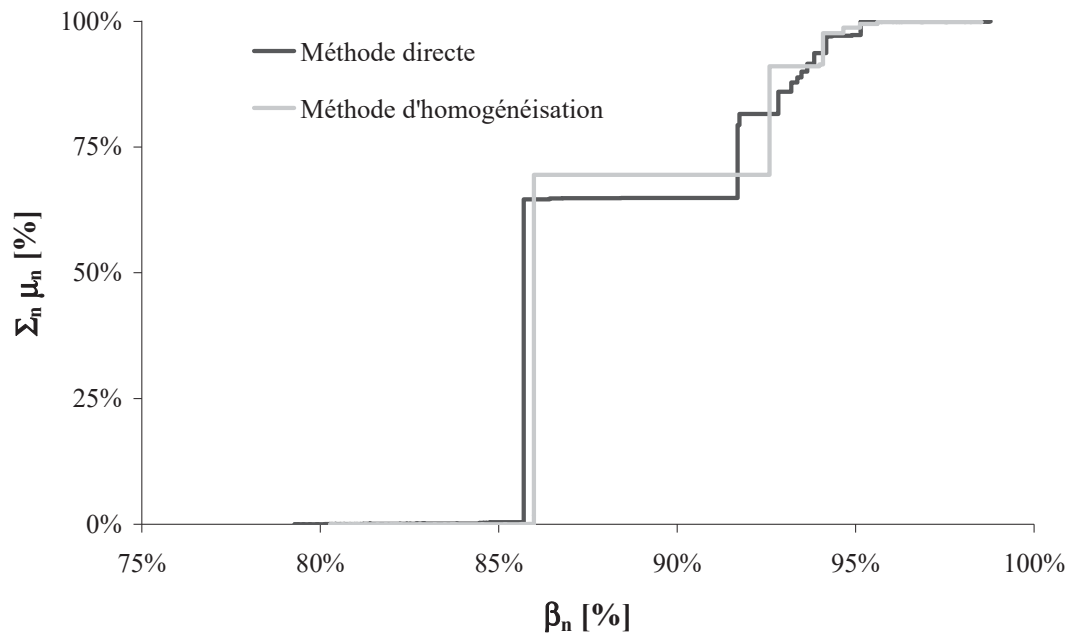


Méthode homogénéisée

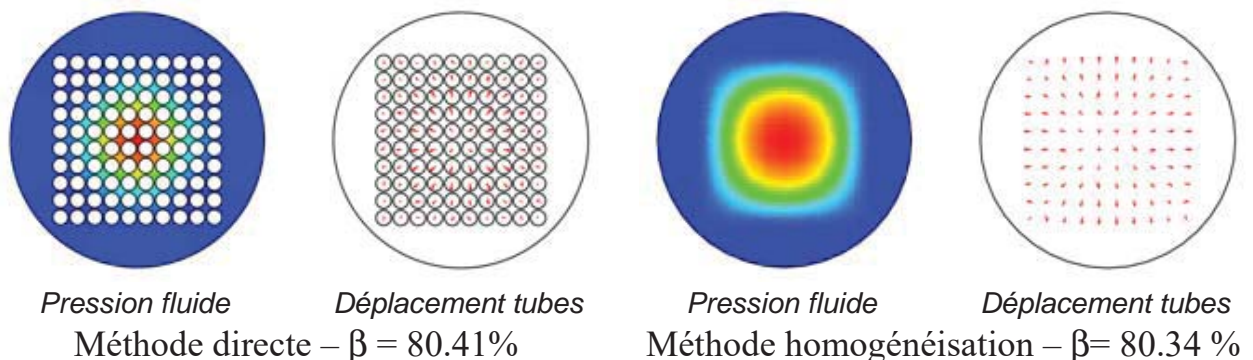
**Figure 3.** Masses effectives cumulées et coefficient de masse ajoutée pour le faisceau 10×10. Comparaison des méthodes directe et d'homogénéisation

Les deux méthodes donnent des résultats similaires, en particulier pour l'estimation des ratios de masse ajoutée  $\beta$  (rapport des fréquences propres en

eau/dans le vide) et des masses effectives  $\mu$  (Fig. 4), ainsi que des allures des modes propres (Fig. 5).



**Figure 4.** Masses effectives cumulées et coefficient de masse ajoutée pour le faisceau  $10 \times 10$ . Comparaison des méthodes directe et d'homogénéisation



**Figure 5.** Comparaison des méthodes directe et homogénéisation sur un mode propre (pression dans le fluide, déplacement des tubes)

Les performances comparées des méthodes, en terme de taille de problème (maillage, nombre de degrés de liberté) et de temps de calcul de modes propres, mettent en évidence l'efficacité de la méthode d'homogénéisation (Tab. 1).

Méthode de calcul	Directe	Homogénéisation
Nombre de nœuds	6.700	660
Nombre de degrés de liberté	21.000	3.500
Nombre de modes calculés	200	200
Temps de calcul	2.150 s	295 s

**Tableau 1.** Comparaison des méthodes de calcul (directe, homogénéisation) pour le faisceaux de tubes  $10 \times 10$

## 4. Conclusion

La méthode d'homogénéisation proposée par le CEA et appliquée par DCN au cas des internes d'un réacteur nucléaire (Sigrist-Broc, 2006) avec interaction fluide/structure a été étendue et validée dans la présente étude au cas d'un faisceau tubulaire bidimensionnel.

Des travaux en cours visent maintenant à généraliser l'approche au cas tridimensionnel pour une application à l'analyse vibratoire d'un générateur de vapeur.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier MM. Guillopé et Glavicic pour le soutien continu apporté aux actions de collaboration technique et scientifique entre le laboratoire EMSI du CEA et le service STS de DCN.

## Bibliographie

- Broc, D., Queval, J.C., Viallet, E., « Seismic behaviour of PWR reactor cores: fluid-structure effects », 17<sup>th</sup> Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Prague, August 2003.
- Brochard, D. Gatenbein, F. Gibert, R.J., « Homogenisation of tube bundle. Application to LMFBR core analysis », « Modelling of the dynamic behaviour of LWR internals », 9<sup>th</sup> Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, August 1987.
- Cheval, K., « Modélisation du comportement sismique de structures multitubulaires baignées par un fluide dense ». Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 2001.
- Hammami, L., « Etude de l'interaction fluide/structure dans les faisceaux de tubes par une méthode d'homogénéisation. Application à l'analyse sismique des cœurs RNR », Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 1991.
- Morand H.J.P., Ohayon R., *Fluid-Structure Interaction*, Wiley & Sons, 1995.
- Sigrist, J.F., Broc, D., « Une méthode d'homogénéisation pour l'analyse modale d'un problème d'interaction fluide/structure », *Revue Européenne de Mécanique Numérique*, vol. 7, pp. 867-889, 2006.
- Sigrist, J.F., Broc, D., « A homogenisation method for the modal analysis of a nuclear reactor with fluid-structure interaction », Pressure Vessel and Piping, Vancouver, 25-28 July 2006.
- Sigrist, J.F., Broc, D., « Fluid-structure interaction: validation of an homogenisation method », Pressure Vessel and Piping, Vancouver, 25-28 July 2006.
- Sigrist, J.F., Broc, D., « Homogenisation method for the modal analysis of a nuclear reactor with internal structures modelling and fluid structure-interaction coupling », Nuclear Engineering and Design, 2007 (à paraître).