



HAL
open science

Modélisation par éléments finis d'un réseau de tubes soumis à un écoulement: approche par milieux poreux

Guillaume Ricciardi, Sergio Bellizzi, Bruno Collard, Bruno Cochelin

► To cite this version:

Guillaume Ricciardi, Sergio Bellizzi, Bruno Collard, Bruno Cochelin. Modélisation par éléments finis d'un réseau de tubes soumis à un écoulement: approche par milieux poreux. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01508944

HAL Id: hal-01508944

<https://hal.science/hal-01508944>

Submitted on 15 Apr 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

Modélisation par éléments finis d'un réseau de tubes soumis à un écoulement : approche par milieux poreux

Guillaume Ricciardi*, — Sergio Bellizzi** — Bruno Collard*—
Bruno Cochelin****

* CEA CADARACHE, 13108, Saint-Paul-Lez-Durance Cedex, France
guillaume.ricciardi@cea.fr, bruno.collard@cea.fr

** LMA CNRS, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France
bellizzi@lma.cnrs-mrs.fr, bruno.cochelin@egim-mrs.fr

RÉSUMÉ. Dans cet article on propose un modèle numérique du comportement mécanique d'un cœur de réacteur nucléaire incluant la dynamique complète des assemblages combustibles et du fluide. Chaque assemblage combustible est assimilé à un milieu poreux déformable, les équations globales du fluide sont obtenues par moyenne spatiale, le champ de vitesse du fluide et le champ de déplacement de la structure sont définis sur tout le domaine spatial. Les équations du mouvement de la structure sont obtenues par une formulation Lagrangienne, tandis que, pour permettre le couplage fluide structure, les équations de mouvement du fluide sont obtenues par une formulation Arbitrary Lagrangian Eulerian. Des résultats numériques sont présentés.

ABSTRACT. In this paper we propose a numerical model of the nuclear reactor core mechanical behavior including the full complexity dynamics of both fuel assemblies and fluid. Each fuel assembly is considered as a deformable porous media, global motion equations of the fluid are obtained by spatial averaging method, the velocity field of the fluid and the displacement field of the structure are defined in the whole domain space. The motion equations of the structure are obtained by a Lagrangian formulation, and to allow the fluid structure coupling, the motion equations of the fluid are obtained by an Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation. Numerical results are presented.

MOTS-CLÉS : fluide-structure, non-linéaire, poreux.

KEYWORDS : fluid-structure, non-linear, porous.

1. Introduction

Cette étude porte sur la modélisation du comportement mécanique d'un cœur de réacteur nucléaire à eau pressurisée. De tels modèles sont nécessaires au dimensionnement d'un cœur de réacteur sous séisme, le but de cette étude est de fournir un modèle plus performant en terme de marge d'erreur que ceux actuellement utilisés par les industriels. Un cœur de réacteur est constitué d'environ 150 assemblages combustibles traversés par de l'eau sous pression, l'eau récupère l'énergie dégagée par la réaction de fission sous forme de chaleur. Un assemblage combustible est constitué d'un réseau de 17x17 tubes dans lesquels se trouvent des pastilles d'uranium enrichi. Ces tubes sont maintenus entre eux à l'aide de grilles, une dizaine de tubes appelés tubes guides sont soudés aux grilles et forment le squelette. La liaison tubes/ grilles est assurée par adhérence. Ainsi devant la complexité de la structure une modélisation fine par éléments finis du fluide et de la structure entraînerait un trop grand nombre de degrés de liberté. Nous proposons donc un modèle qui rende compte de façon globale du comportement de la structure, de l'écoulement du fluide et du couplage fluide structure, pour se faire on assimilera la structure à un milieu poreux.

2. Méthode

La méthode utilisée pour obtenir les équations du modèle est illustrée en figure 1. La méthode est basée sur une approche milieu poreux en intégrant un modèle de fluide équivalent ainsi qu'un modèle de structure équivalente. Dans un premier temps les équations du fluide équivalent et de la structure équivalente sont établies séparément. Pour la partie fluide : les équations globales du fluide s'écoulant au travers d'un réseau de tubes sont obtenues par moyenne spatiale des équations de Navier Stokes. Le fluide équivalent, dont les variables sont obtenues par moyenne sur l'espace, est défini sur tout le domaine. Les efforts de la structure ($\vec{F}_{structure/fluide}$) sont pris en compte par une force volumique elle aussi définie sur tout le domaine spatial. Pour la partie structure : chaque assemblage combustible est modélisé par un milieu poreux qui subit les efforts volumiques, $\vec{F}_{fluid/structure}$, du fluide sur la structure qui sont opposés aux efforts volumiques, $\vec{F}_{structure/fluide}$, de la structure sur le fluide. Enfin les modèles fluide et structure sont résolus d'un même bloc.

2.1. Modèle du fluide équivalent

Classiquement, les équations du fluide sont écrites avec une formulation Eulerienne (le fluide est observé au travers d'une fenêtre fixe), et les équations de la structure avec une formulation Lagrangienne (la structure est suivie dans son mouvement). Pour s'autoriser le couplage du fluide et de la structure, ces derniers doivent être décrits du même point de vue, c'est pourquoi nous utiliserons une formulation Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) pour écrire les équations du

fluide. Le fluide est observé au travers d'une fenêtre qui suit le mouvement de la structure.

Pour obtenir les équations du fluide équivalent on applique la méthode des milieux poreux (Robbe 2002) ; on intègre les équations de Navier Stokes sur un volume de contrôle, ainsi la vitesse équivalente sera la moyenne de la vitesse sur ce volume de contrôle. Le volume de contrôle $\Omega_f(x, y, z)$ étant défini par la position de son centre (x, y, z) la vitesse équivalente est exprimée en ce même point. La vitesse équivalente est alors définie dans tout le domaine spatial par :

$$\vec{V}_{eq} = \frac{1}{V_{\Omega_f}} \iiint_{\Omega_f(x,y,z)} \vec{V} d\Omega \quad [1]$$

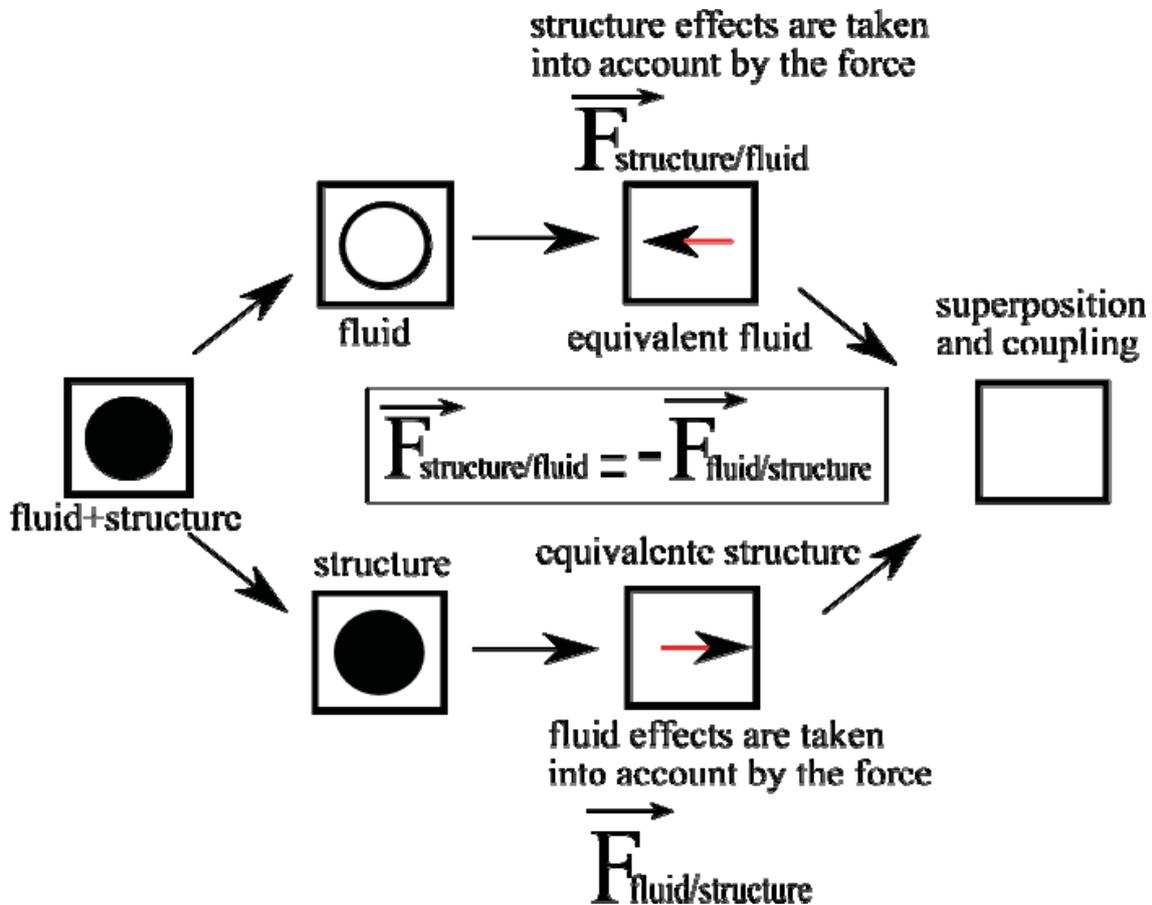


Figure 1. Modélisation par milieu poreux

La turbulence des échelles inférieures aux dimensions du volume de contrôle est prise en compte par un modèle de viscosité turbulente de type Smagorinsky que nous choisirons invariable dans le temps et l'espace. Le moyennage spatial des équations de Navier Stokes permet de dégager une équation fonction du déplacement de la structure et de la vitesse du fluide équivalent :

$$\rho_{eq} \frac{\partial \vec{V}_{eq}}{\partial t} + \rho_{eq} \operatorname{div} \vec{V}_{eq} \otimes \vec{V}_{eq} = -\nabla P_{eq} + \mu_{Teq} \Delta \vec{V}_{eq} + 2\rho_{eq} \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \cdot \nabla \vec{V}_{eq} - \rho_{eq} \nabla \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \cdot \vec{V}_{eq} \right) + \vec{F}_{structure \rightarrow fluide} \quad [2]$$

$$\operatorname{div} \vec{V}_{eq} = 0 \quad [3]$$

où P_{eq} est la pression équivalente, \vec{U} est le déplacement de la structure équivalente, ρ_{eq} est la densité équivalente et μ_{eq} est la viscosité turbulente équivalente.

2.2. Modèle de la structure équivalente

Chaque assemblage combustible assimilé à un milieu poreux est modélisé par une structure équivalente définie sur tout le domaine spatial délimité par l'assemblage. De par les dimensions d'un assemblage et compte tenu de leur faible rigidité de cisaillement nous avons retenu un modèle poutre de type Timoshenko avec une loi de comportement visco-élastique non linéaire en accord avec des observations faites sur le comportement des assemblages combustibles. Chaque poutre équivalente sera soumise aux efforts volumiques du fluide sur la structure.

2.3. Couplage

Les efforts volumiques introduisant le couplage entre le modèle fluide équivalent et le modèle structure équivalente sont établis à partir des efforts subis par un tube soumis à un écoulement axial. Païdoussis (1972) propose une expression non linéaire en fonction du déplacement de la structure et de la vitesse du fluide de ces efforts, on utilisera ces expressions que l'on modifiera pour tenir compte de la composante radiale de l'écoulement.

3. Modèle numérique

3.1. Discrétisation spatiale et temporelle

La discrétisation spatiale du problème 2D est obtenue par la Méthode des Éléments Finis, le champ de vitesse du fluide est discrétisé avec des mailles à 9 nœuds d'interpolation, la pression avec des mailles à 4 nœuds d'interpolation, et la rotation et le déplacement de la structure sont discrétisés avec des éléments poutres à 3 nœuds d'interpolation. La discrétisation temporelle est assurée par deux schémas d'intégration différents, on utilise un schéma d'Uzawa pour le fluide, et un schéma de Newmark pour la structure. Chaque pas d'intégration temporelle nécessite la résolution d'un système non linéaire qui est résolu avec une méthode de Newton.

3.2. Résultats

Des simulations numériques d'une structure 2D constituée de deux assemblages combustibles soumis à un écoulement axial ont été effectuées. L'assemblage combustible gauche a un déplacement initial imposé, l'assemblage combustible de droite lui est au repos (figure 2). A $t=0$, on lâche l'assemblage combustible gauche et on observe les oscillations libres amorties. La simulation est effectuée pour deux vitesses d'écoulement avec des valeurs de paramètres du modèle qui restent encore à affiner. Le champ de vitesse du fluide est modifié par le déplacement de la structure (voir figure 2). On observe que l'amortissement et le couplage entre assemblages augmentent avec la vitesse d'écoulement (figure 3). Ces tendances sont en accord avec les observations expérimentales (Collard et al, 2001,2003). Une comparaison quantitative reste à faire.

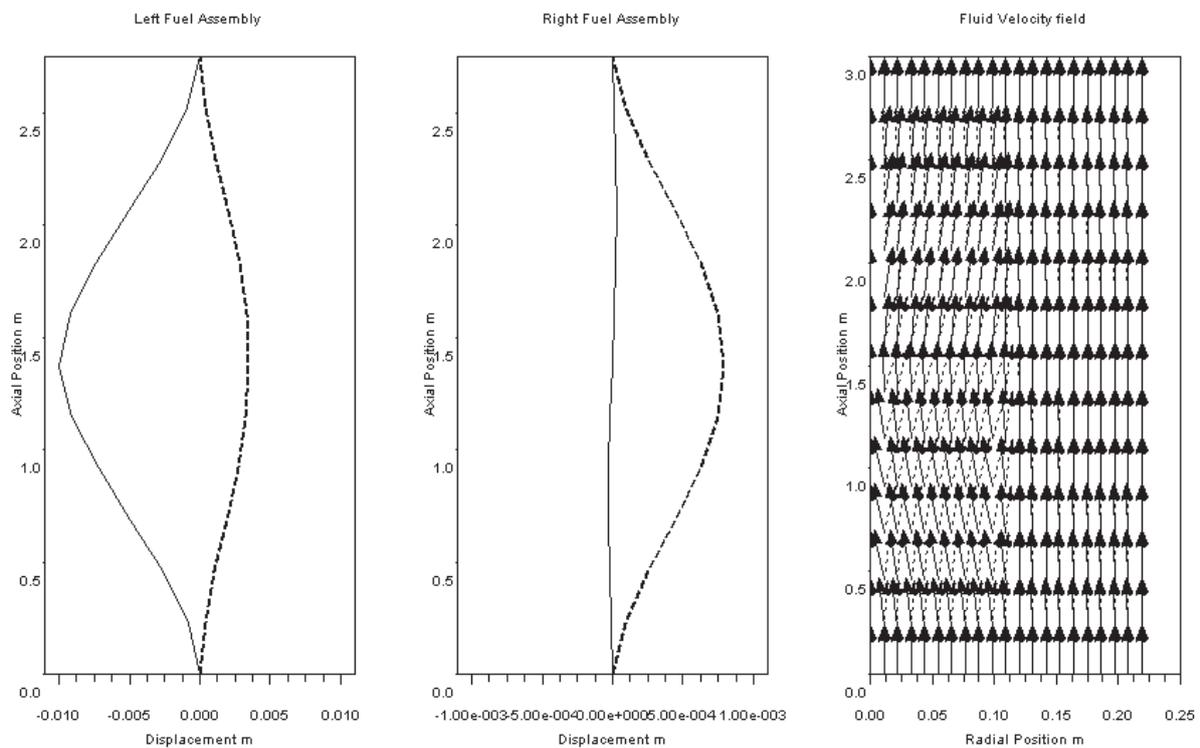


Figure 2. Configuration initiale à $t=0$ (ligne continue), et à $t=0.13$ s (ligne pointillée)

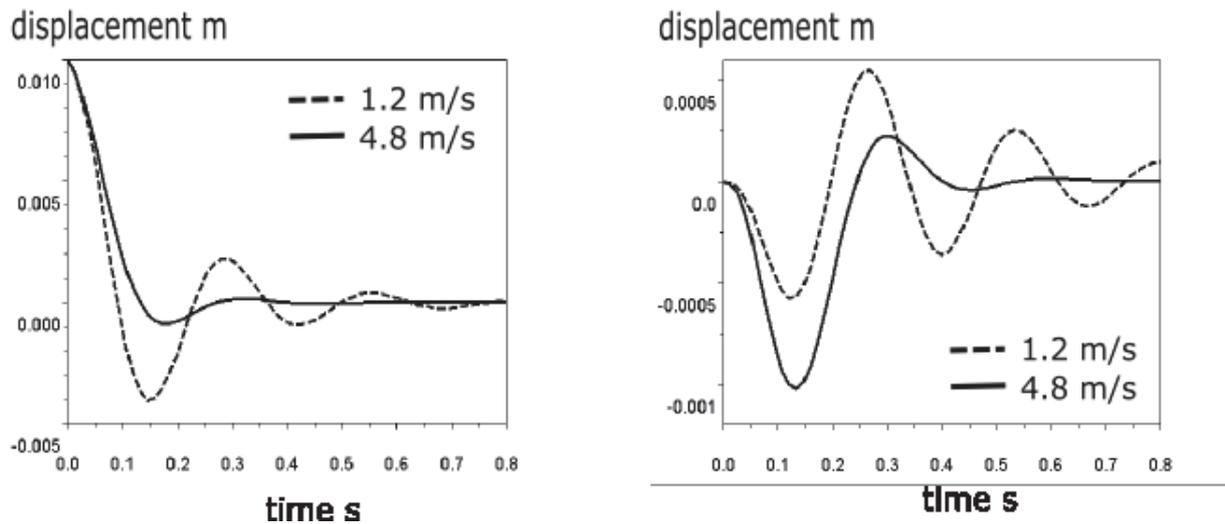


Figure 3. Déplacement de l'assemblage combustible gauche(à gauche), et déplacement de l'assemblage combustible droite(à droite)

7. Conclusion

Dans ce papier nous avons proposé un modèle globale d'un cœur de réacteur nucléaire prenant en compte la structure, la non linéarité du fluide, et le couplage fluide structure. Un modèle numérique 2D a été établi à l'aide d'une méthode Éléments Finis, les simulations numériques donnent des résultats cohérents en accord avec les observations expérimentales. Un modèle 3D est en cours de développement, et une validation expérimentale du modèle numérique reste à faire.

8. Références

- Paidoussis, M. P., 1972, "Vibration of cylindrical structures induced by axial flow," Cycle de conférence sur l'Aero-Hydro-Elasticité, Ermenonville, 197-275.
- Robbe, M. F. and Bliard, 2002, "A porosity method to describe the influence of internal structures on a fluid flow in case of fast dynamics problems," Nuclear Engineering and Design, 215, 217-242.
- Collard, B., Pisapia, S., Bellizzi, S., Witters, F., 2003, "PWR fuel assembly modal testing and analysis", Symposium of Flow-Induced Vibration ASME PVP Conference, Cleveland, Ohio, USA.
- Collard, B., Vallory., J., 2001, "Impact forces on a core shroud of an exited PWR fuel assembly", 9th International Conference on Nuclear Engineering Nice Acropolis, France.