

Modélisation d'un réseau de tubes par milieu poreux : comparaison expérience théorie

Guillaume Ricciardi, Sergio Bellizzi, Bruno Collard & Bruno Cochelin

CEA CADARACHE
DEN/DTN/STRI/LHC
13108, Saint-Paul-Lez-Durance Cedex
guillaume.ricciardi@cea.fr

Résumé :

Dans cet article nous proposons un modèle numérique du comportement mécanique d'un coeur de réacteur nucléaire incluant la dynamique complète des assemblages combustibles et du fluide. Chaque assemblage combustible est assimilé à un milieu poreux déformable avec un comportement visco-élastique non linéaire, 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 confrontés aux données expérimentales.

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 with nonlinear visco-elastic behavior, 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 and compared to experimental data.

Mots-clefs :

fluide-structure ; non-linéaire ; poreux

1 Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la sûreté des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) sous seisme. Le but est de réduire les marges d'erreurs des codes de calculs simulant le comportement d'un REP sous seisme, pour se faire nous proposons dans cette article de développer un modèle numérique incluant le comportement non linéaire de la structure et du fluide. Un calcul du domaine complet d'un coeur de réacteur donnerait lieu à un trop grand nombre de degré de liberté, nous proposons donc un modèle global du fluide et de la structure en tenant compte des non linéarités de chacun.

2 Méthode

La méthode utilisée pour obtenir les équations du modèle est illustrée en Figure 1. La méthode est basée sur une approche milieux 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 moyennées sur l'espace, est défini sur tout le domaine. Les efforts de la structure ($\vec{F}_{\text{structure} \rightarrow \text{fluid}}$) 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 volumique du fluide $\vec{F}_{\text{fluid} \rightarrow \text{structure}}$ qui est l'opposée de la force $\vec{F}_{\text{structure} \rightarrow \text{fluid}}$. Enfin les modèles fluide et structure sont résolus d'un même bloque.

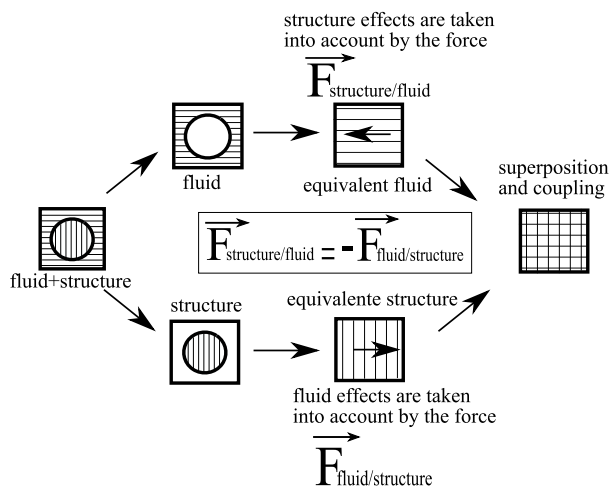


FIG. 1 – Modélisation par milieu poreux

3 Equations du modèle milieu poreux

Dans cette partie les équations du mouvement des fluide et structure équivalents sont établis avec la méthode proposée au paragraphe 2.

3.1 Hypothèses

Le modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

H1 Le fluide est visqueux incompressible et Newtonien.

H2 Les effets de la gravité sont négligés.

H3 La section droite d'un tube ne se déforme pas.

H4 La distance entre deux tubes d'un assemblage combustible reste constante.

H5 La viscosité dynamique est négligeable devant la viscosité turbulente.

H6 L'énergie cinétique turbulente est négligeable devant le gradient de pression.

3.2 Fluide équivalent

Dans cette partie les équations du fluide équivalents sont établies. Dans un premier temps, les équations de Navier Stokes sont moyennées, dans un second temps les turbulences des plus petites échelles sont modélisées par une viscosité turbulente, et enfin les efforts de la structure sur le fluide sont assimilés aux forces agissant sur un tube.

3.2.1 Arbitrary Lagrangian Eulerian

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. Les équations de Navier Stokes écrites avec une formulation ALE pour un fluide incompressible donnent :

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho \left(\mathbf{V} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right) \cdot \nabla \mathbf{V} = \text{div} \boldsymbol{\sigma} \quad (1)$$

$$\text{div} \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

où \mathbf{U} est le déplacement de la structure, \mathbf{V} est la vitesse du fluide, et $\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur des contraintes. La loi de comportement d'un fluide Newtonien s'exprime :

$$\boldsymbol{\sigma} = -P \mathbf{I}_d + \mu (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) \quad (3)$$

où P est la pression, μ est la viscosité, et \mathbf{I}_d est la matrice identité.

3.2.2 Moyenne spatiale

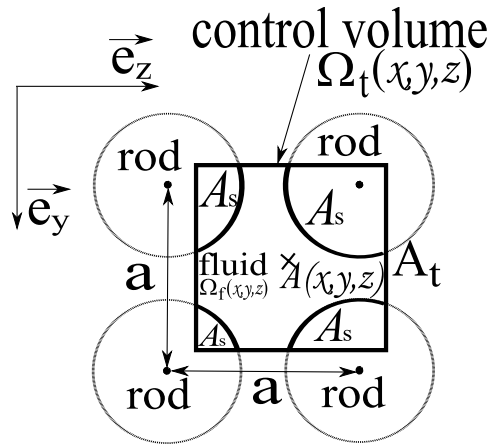


FIG. 2 – Volume de contrôle pour la moyenne spatiale

Considérons un volume de contrôle $\Omega_t(x, y, z)$ (Figure 2). $A(x, y, z)$ est le centre du volume de contrôle, $\Omega_f(x, y, z)$ est le domaine occupé par le fluide et $V_{\Omega_f}(x, y, z)$ son volume, $\Omega_s(x, y, z)$ est le domaine occupé par la structure et $V_{\Omega_s}(x, y, z)$ son volume, et $\Omega_t(x, y, z)$ est le domaine total et $V_{\Omega_t}(x, y, z)$ son volume.

$$\Omega_t(x, y, z) = \Omega_f(x, y, z) \cup \Omega_s(x, y, z) \quad (4)$$

$$V_{\Omega_t}(x, y, z) = V_{\Omega_f}(x, y, z) + V_{\Omega_s}(x, y, z) \quad (5)$$

Les dimensions du volume sont $a \times a \times dx$, a est la distance séparant deux centres de deux tubes successifs (cette grandeur est supposée invariable dans le temps et l'espace), ainsi le volume de

contrôle contient exactement la section d'un tube, et la fraction de fluide présent dans le volume ne dépend pas de la position du volume de contrôle. On peut écrire :

$$V_{\Omega_t}(x, y, z) = V_{\Omega_t} \quad (6)$$

$$V_{\Omega_f}(x, y, z) = V_{\Omega_f} \quad (7)$$

$$V_{\Omega_s}(x, y, z) = V_{\Omega_s} \quad (8)$$

L'intégration sur le volume de contrôle des équations de Navier Stokes écrites avec une formulation ALE pour un fluide incompressible Newtonien donne :

$$\rho \frac{1}{V_{\Omega_t}} \int_{\Omega_f(x,y,z)} \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \left(\mathbf{V} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right) \cdot \nabla \mathbf{V} \right) d\Omega = \frac{1}{V_{\Omega_t}} \int_{\Omega_f(x,y,z)} \text{div} \boldsymbol{\sigma} d\Omega \quad (9)$$

$$\frac{1}{V_{\Omega_t}} \int_{\Omega_f(x,y,z)} \text{div} \mathbf{V} d\Omega = 0 \quad (10)$$

Les équations du fluide moyennées sont traitées de sorte à dégager des équations aux dérivées partielles de la vitesse moyenne du fluide (voir Robbe et Bliard 2002), pour se faire il nous a fallu introduire un modèle de viscosité turbulente (Smagorinsky 1963) supposée constante.

Considérons les variables équivalentes :

$$\beta = \frac{V_{\Omega_f}}{V_{\Omega_t}} \quad (11)$$

$$\rho_{eq} = \beta \rho \quad (12)$$

$$\mathbf{V}_{eq} = \frac{1}{V_{\Omega_f}} \int_{\Omega_f(x,y,z)} \mathbf{V} d\Omega \quad (13)$$

$$P_{eq} = \beta \frac{1}{V_{\Omega_f}} \int_{\Omega_f(x,y,z)} P d\Omega \quad (14)$$

$$\mu_{Teq} = \beta \mu_T \quad (15)$$

où β est la porosité.

Après traitement, (9) et (10) deviennent :

$$\rho_{eq} \frac{\partial \mathbf{V}_{eq}}{\partial t} + \rho_{eq} \text{div} \mathbf{V}_{eq} \otimes \mathbf{V}_{eq} = -\nabla P_{eq} + \mu_{Teq} \Delta \mathbf{V}_{eq} + 2\rho_{eq} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \cdot \nabla \mathbf{V}_{eq} - \rho_{eq} \nabla \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \cdot \mathbf{V}_{eq} \right) + \mathbf{F}_{\text{structure} \rightarrow \text{fluid}} \quad (16)$$

$$\text{div} \mathbf{V}_{eq} = 0 \quad (17)$$

Les termes de couplage apparaissant dans les équations moyennées ($\mathbf{F}_{\text{structure} \rightarrow \text{fluid}}$) sont identifiés à partir des efforts s'exerçant sur un tube soumis à un écoulement axial, nous utilisons un modèle de Païdoussis (1966) pour exprimer ces efforts.

Finalement nous définissons un fluide équivalent dont les variables sont définis dans tout le domaine spatial.

3.3 Structure équivalente

Chaque assemblage combustible est assimilé à un milieu poreux avec un comportement viscoélastique non linéaire (voir Collard et al. 2003), comme pour le fluide, le champ de déplacement de la structure équivalente est défini dans tout l'espace. Compte tenu des dimensions d'un assemblage combustible, nous appliquons un modèle poutre, mais le module de cisaillement équivalent d'un assemblage combustible étant très faible l'approximation d'Euler-Bernoulli n'est plus vérifiée, nous utilisons donc un modèle poutre de type Timoshenko. Les efforts du fluide sur la structure sont l'opposé des efforts de la structure sur le fluide, ces derniers sont intégrés sur la section de l'assemblage combustible pour obtenir les efforts linéiques appliqués au modèle poutre.

Le fluide et la structure équivalents ont leurs inconnues définies sur tout le domaine spatial, et les équations de la dynamique du fluide équivalent et de la structure équivalente sont fortement couplées. Le problème fluide-structure est résolu d'un seul bloc.

4 Résultats

Dans cette partie nous proposons la simulation numérique 2D d'un dispositif expérimental. Deux assemblages combustibles sont soumis à un écoulement d'eau axial, le confinement latéral et l'écart entre assemblages est proche des conditions de fonctionnement d'un cœur (voir Collard et Vallory 2001). L'assemblage combustible gauche est initialement déplacé de sa position d'équilibre, tandis que l'assemblage combustible droit est au repos (Figure 3), à $t = 0$, on lâche l'assemblage combustible gauche, et on observe les oscillations libres du système. La résolution des équations est obtenue à l'aide de la méthode des éléments finis, avec des mailles standards, et des schémas d'intégration temporelle classiques.

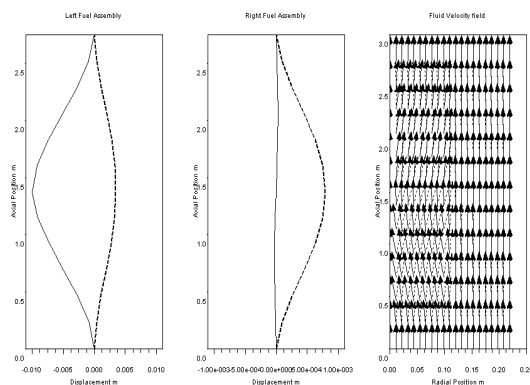


FIG. 3 – Simulation numérique 2D pour $t = 0$ (ligne continue), et $t = 0.1s$ (ligne pointillée)

On peut observer en Figure 4 (a) et (b), la comparaison expérience-théorie pour deux vitesses d'écoulement.

Les simulations donnent de bons résultats pour l'assemblage combustible gauche, l'amortissement augmente avec la vitesse d'écoulement, mais l'énergie transmise à l'assemblage combustible droit semble être surestimée pour une grande vitesse d'écoulement, le modèle 2D en est sûrement responsable, en effet le modèle 2D ne tient pas compte des redistributions radiales qui doivent consommer une partie de l'énergie. Des simulations numériques 3D seront effectuées pour mettre ce point en évidence.

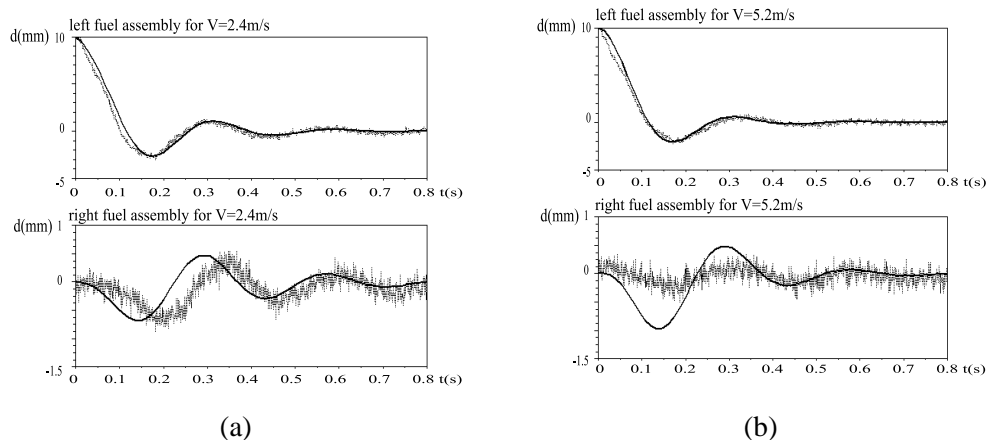


FIG. 4 – (a) Simulation numérique 2D (ligne continue) et résultat expérimental (ligne pointillée), pour une vitesse d'écoulement de 2.4m/s ;(b) Simulation numérique 2D (ligne continue) et résultat expérimental (ligne pointillée), pour une vitesse d'écoulement de 5.2m/s

5 Conclusion

Dans cet article nous avons proposé un modèle global d'un coeur de réacteur nucléaire prenant en compte les comportements non linéaire du fluide, de la structure, et du couplage fluide structure. Un modèle numérique 2D a été établi avec la méthode de éléments finis, les simulations numériques donnent des résultats cohérents en accord avec les données expérimentales.

Références

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Païdoussis, M.P., 1966. "Dynamics of flexible slender cylinders in axial flow part 1 theory". *Journal of Fluids Mechanics* 26 p.717-736.
- [4] Robbe, M. F. and Bliard, F., 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.
- [5] Smagorinsky, J. 1963. "General circulation experiments with primitive equations". *Mon. Weather Rev.*, 91, 216-241.