

Une expérience pour l'étude des forces fluides sur les assemblages combustibles des réacteurs à eau pressurisée en condition de séisme

A. JOLY^{a, b}, O. CADOT^a, P. MOUSSOU^{a, b} et N. DE BURETEL DE CHASSEY^b

a. Institut des Sciences de la Mécanique et Applications Industrielles (IMSIA)
EDF, ENSTA ParisTech, CEA, CNRS : UMR9219
828 boulevard des Maréchaux, 91120 Palaiseau

b. EDF Lab Paris-Saclay – 7 boulevard Gaspard Monge, 91120 Palaiseau

Résumé :

Une nouvelle expérience donnant accès aux forces fluide locales qui s'exercent dans un réseau de cylindres en écoulement axial a été mise en place récemment à l'IMSIA. Elle permettra une compréhension fine, sur des structures simplifiées, des phénomènes d'interaction fluide-structure intervenant dans le mouvement des assemblages combustibles sous séisme. On propose ici une maquette à tester en soufflerie, comportant un faisceau confiné de 3x3 cylindres de longueur 2 m et de diamètre 4,5 cm. Dans une approche quasi-statique, on mesure, au moyen d'une balance aérodynamique et de nombreuses prises de pression aux parois des cylindres, l'influence en termes de forces fluides d'un déplacement ou d'une déformation du cylindre central par rapport à ses voisins.

Abstract :

A new experiment investigating local fluid forces in a cylinder array in axial flow was recently set up at IMSIA. It aims at giving sharp insight into fluid-structure interaction phenomena occurring when fuel assemblies of pressurized water reactors move because of seismic load. In this paper, the experimental setup is presented. A bundle made of 3x3 cylinders of length 2 m and diameter 4.5 cm is set in a wind tunnel. A quasi-static approach is used. By means of a force sensor and numerous pressure measurement points at the cylinder walls, the influence of a change of geometry of the central cylinder is assessed in terms of fluid forces.

Mots clés : faisceau de cylindres, écoulement axial, aérodynamique expérimentale, mesure de pression, interaction fluide-structure

1 Introduction

Dans le cadre des études réglementaires de séisme pour les réacteurs à eau pressurisée, EDF et ses partenaires cherchent à caractériser avec plus de précision le chargement hydrodynamique des assemblages

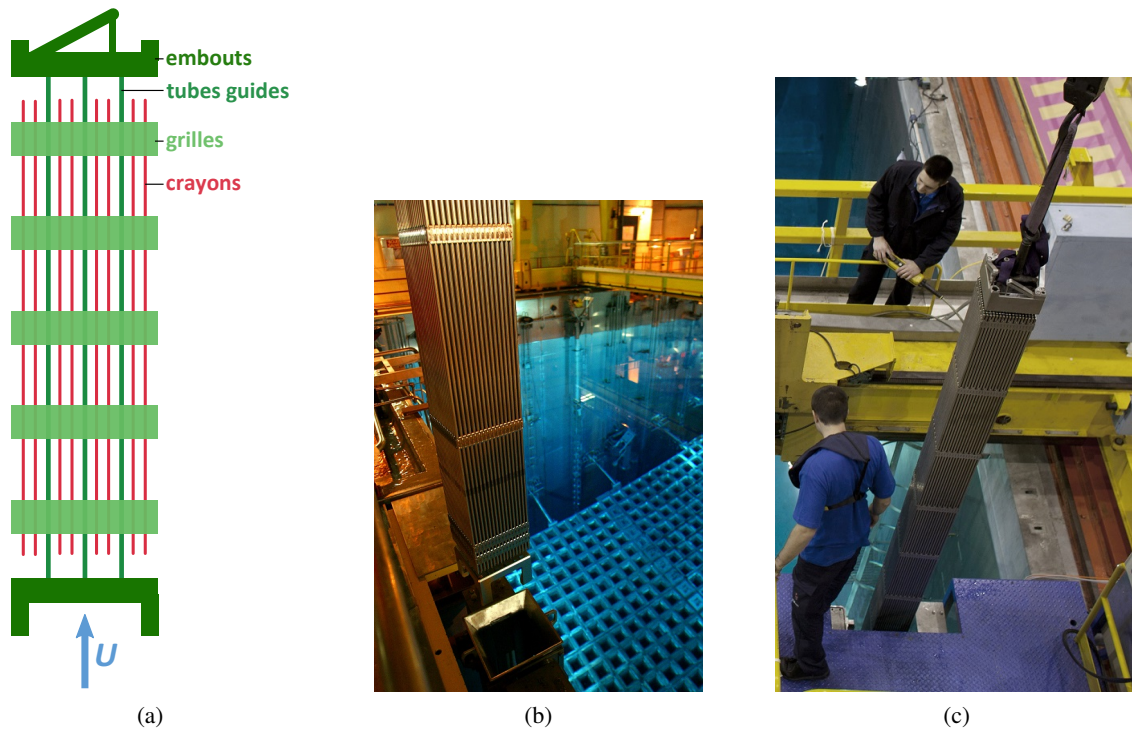


FIGURE 1 – Assemblage combustible : (a) représentation schématisée de la structure ; (b) mise en eau (© EDF, Damien Charfeddine) ; (c) formation à la manutention (© EDF, Sophie Brandstrom).

combustibles lorsque ceux-ci sont soumis à une sollicitation vibratoire extérieure. Des campagnes d'essais en condition industrielle ont déjà été réalisées [1, 2]. Ils mettent clairement en évidence le rôle amortissant de l'écoulement fluide : les vibrations de l'assemblage sont d'autant plus amorties que la vitesse d'écoulement est grande. Afin de mieux comprendre le mécanisme de cet amortissement, des mesures de forces fluides locales sont souhaitables. L'objet de cet acte est de présenter un nouveau dispositif expérimental de l'IMSIA, dédié à la caractérisation du chargement spatial hydrodynamique d'un assemblage simplifié, et de l'écoulement entre ses crayons. Les résultats des premières campagnes d'essais qui débutent au mois d'avril seront présentés au congrès.

Dans la suite, on commence par exposer la démarche de simplification du problème, qui permet de passer de l'objet industriel à un concept d'expérience élémentaire réalisable en laboratoire. On donne ensuite des détails sur les choix de conception et la mise en œuvre pratique de cette expérience.

2 De l'assemblage combustible à une expérience élémentaire

2.1 Description de l'assemblage combustible

L'assemblage combustible est un objet élancé, d'environ 4 m de long et 20 cm de côté. Le combustible lui-même est disposé dans des cylindres d'environ 1 cm de diamètre qu'on appelle crayons combustibles. Un assemblage consiste en un faisceau de 17x17 crayons, maintenus en place grâce au squelette de l'assemblage (grilles, tubes guides et embouts, voir figure 1). Les assemblages combustibles sont placés verticalement dans la cuve du réacteur, et soumis à l'écoulement d'eau du circuit primaire, qui récupère la chaleur issue de la réaction nucléaire. Cet écoulement se fait dans le sens de la longueur des assemblages, du bas vers le haut.

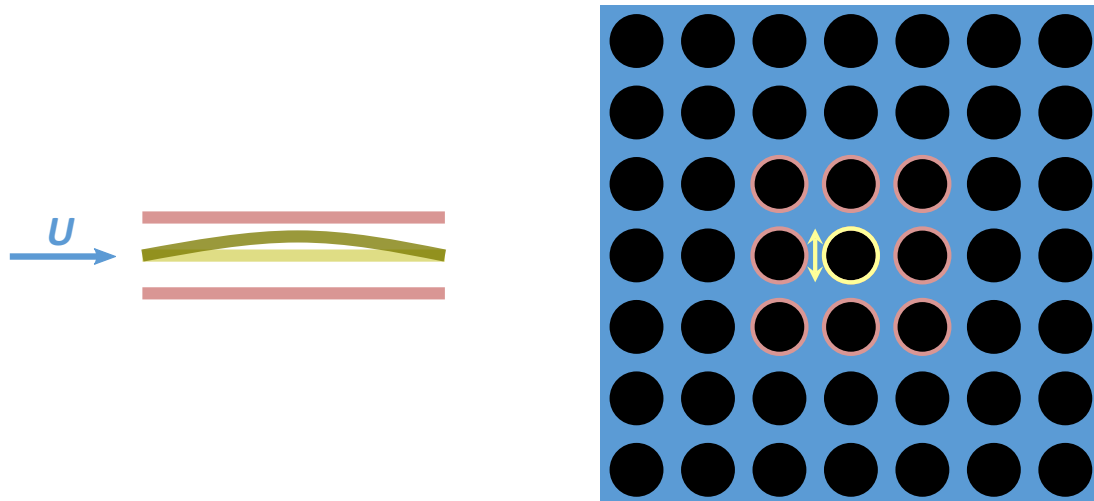


FIGURE 2 – Réseau infini de cylindres en écoulement axial, interaction entre un cylindre en mouvement et ses voisins directs.

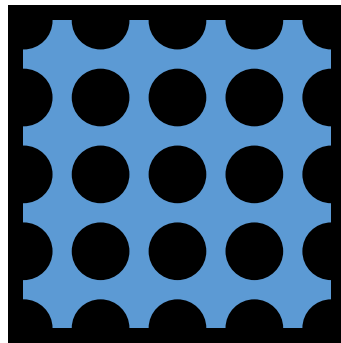


FIGURE 3 – Géométrie du problème simplifié : faisceau de cylindres confiné en écoulement axial.

2.2 Concept d'expérience : géométrie, paramètres réglables, grandeurs à mesurer

En simplifiant la géométrie, il s'agit d'étudier les forces fluides qui s'exercent dans un réseau de cylindres en écoulement axial, les cylindres étant en mouvement. On s'inspire de l'approche proposée par Tanaka [3] dans les années 80 pour traiter la question des vibrations de réseaux de cylindres en écoulement transverse : on se focalise sur une cellule élémentaire du réseau (3x3 cylindres), et on cherche à caractériser sous la forme de coefficients d'influence l'effet d'une perturbation au niveau du cylindre central (figure 2). Pour simuler dans l'expérience un réseau infini autour du faisceau élémentaire de 9 cylindres, on réalise en pratique la géométrie proposée en figure 3.

On se restreint dans un premier temps à un cadre quasi-statique : on s'intéresse aux forces fluides stationnaires faisant suite à la translation, la rotation ou la flexion du cylindre central. Ce sont là les trois paramètres géométriques sur lesquels on doit pouvoir jouer dans l'expérience.

Quant aux grandeurs à mesurer, l'accès aux forces fluides s'exerçant sur les cylindres se fait par des mesures de pression en un grand nombre de points (cf. paragraphe suivant). Des mesures de force résultante peuvent permettre de consolider les résultats, par comparaison avec l'intégration des mesures

TABLE 1 – Dimensions principales de la maquette et matériaux.

Paramètre	Valeur	Justification
pas du réseau P	6 cm	utiliser toute la largeur de veine disponible
diamètre des cylindres D	4,5 cm	respecter le rapport P/D industriel
longueur des cylindres L	2 m	maximiser le rapport d'aspect L/D
matériau des cylindres	aluminium	minimiser la flèche sous poids propre
épaisseur des cylindres	2 mm	idem

de pression. En complément, des mesures ponctuelles de vitesse d'écoulement aident à comprendre l'origine des forces fluides.

3 Conception et réalisation du dispositif expérimental

3.1 Dimensionnement et choix techniques

Les essais sont réalisés en soufflerie, pour des raisons pratiques (moins de problèmes d'étanchéité) et de disponibilité de l'installation. La transposition au cas industriel, en eau, peut se faire car le nombre de Reynolds est similaire (environ 1×10^5 dans la maquette contre 4×10^5 en condition industrielle) et que le nombre de Mach reste inférieur à 0,3 (caractère compressible de l'air négligé).

Le tableau 1 rassemble les données principales de la maquette. Le déplacement du cylindre central se fait à l'aide d'une table élévatrice et d'un plateau rotatif de précision. Sa flexion se fait au moyen de poids suspendus à ses extrémités. La figure 4 donne un bilan de ces informations.

La maquette est instrumentée par 306 prises de pression, reliées à un scanner de pression 64 voies. Ce nombre est le résultat d'un compromis entre la précision et la faisabilité. Ainsi, dans la longueur, on a prévu 6 sections de mesures sur le cylindre central et 4 sur les cylindres périphériques (figure 4), afin d'avoir des informations sur l'évolution longitudinale des forces fluides. Sur chaque section, on a prévu 8 points de mesure par cylindre (figure 5) : 4 auraient été insuffisantes pour capter les variations azimutales de la pression, et 16 auraient été très difficilement réalisables.

Par ailleurs, une balance aérodynamique mesure la force résultante qu'exerce l'écoulement sur le cylindre central.

3.2 Réalisation de la maquette

Partant des concepts et solutions concrètes proposées dans les paragraphes précédents, un modèle CAO de la maquette a été réalisé, figure 6. C'est sur la base de ce modèle que les différentes pièces ont été réalisées, voir les photos en figure 7.

4 Conclusion

La tradition de l'étude des structures flexibles en écoulement axial a déjà proposé des modèles de force fluide (Taylor [4], Lighthill [5], Païdoussis [6]), plus ou moins confirmés par des études récentes [7]. Les résultats de l'expérience proposée ici, dont la nouveauté réside principalement dans la mesure détaillée du champ de pression aux parois des cylindres, devraient permettre d'approfondir ces modèles.

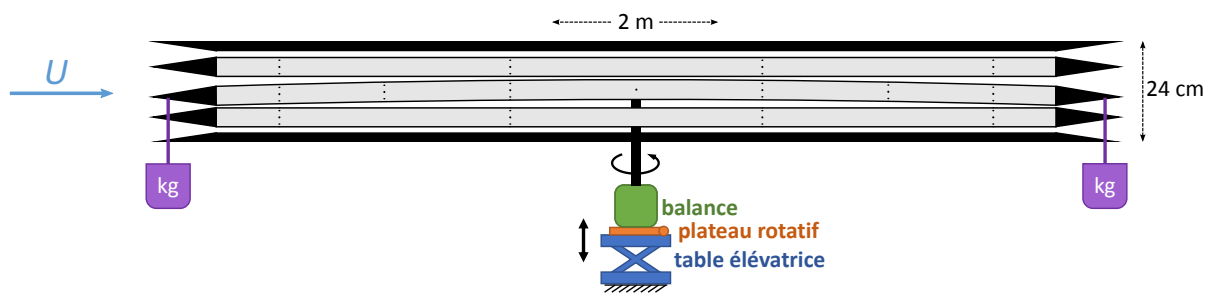


FIGURE 4 – Représentation schématique des solutions techniques retenues pour répondre au cahier des charges. Les points représentent les prises de pression (placement à l'échelle).

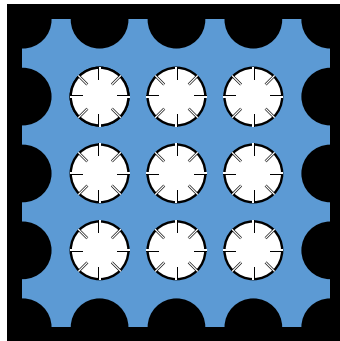


FIGURE 5 – Agencement des prises de pression, vue de face.

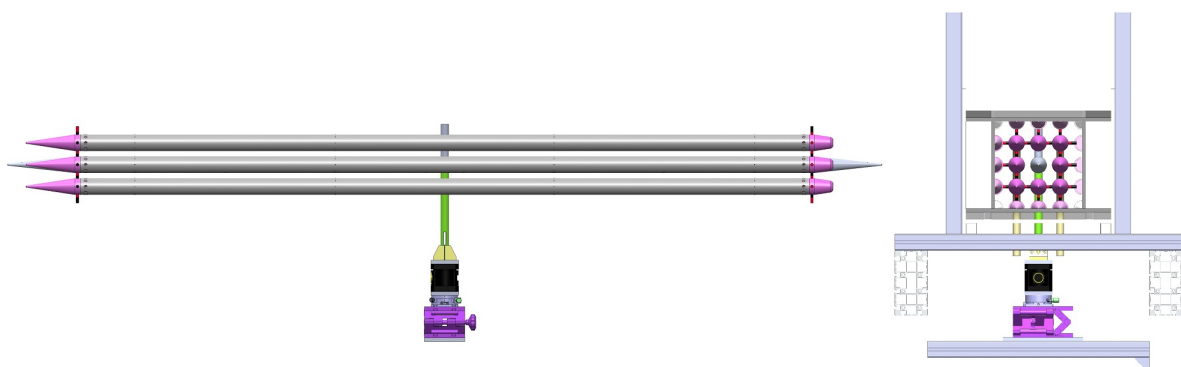


FIGURE 6 – Représentation CAO partielle du dispositif expérimental. Gauche : faisceau vu de profil. Droite : veine complète vue de face.

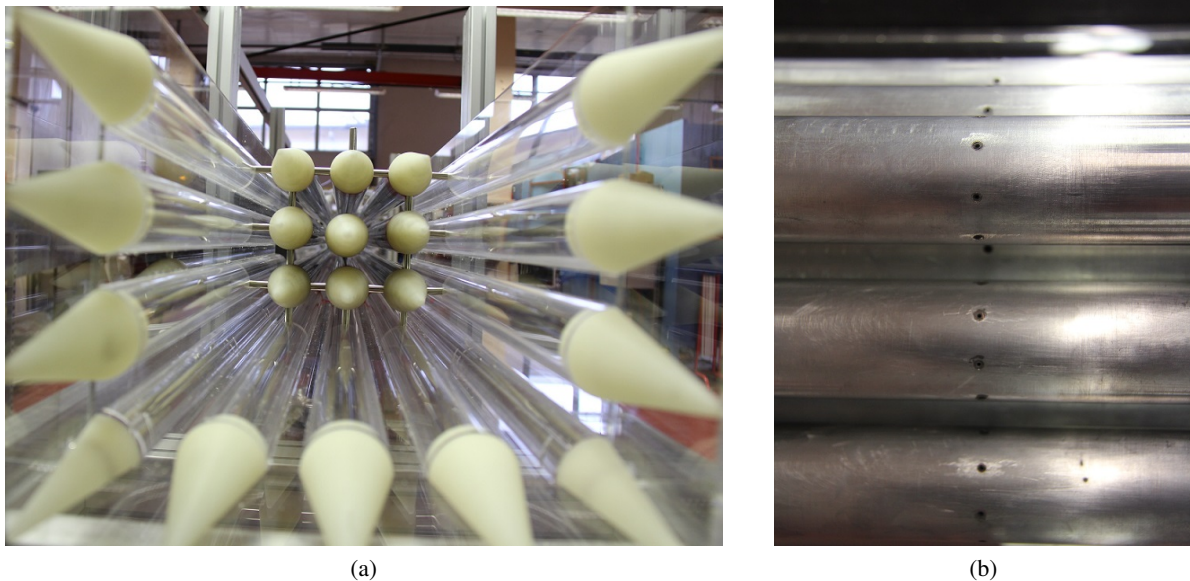


FIGURE 7 – Maquette réalisée et assemblée : (a) vue de face (sans la paroi supérieure) ; (b) détail sur les prises de pression.

De plus, cette expérience donnera des critères de qualification de méthodes numériques pour la résolution d'écoulements autour de structures à très faible angle d'incidence. Inversement, des simulations numériques adéquates (dans l'esprit de celles présentées par Adjiman *et al.*[8]) devraient pouvoir enrichir les résultats expérimentaux.

Enfin, les premiers résultats de cette expérience seront présentés au congrès français de mécanique et comparés aux essais en conditions industrielles qui se poursuivent au CEA [9].

Références

- [1] M. Tanaka, K. Fujita, A. Hotta et N. Kono, Parallel flow-induced damping of PWR fuel assembly, ASME, PVP Vol. 133 (1988).
- [2] J. C. Flamand, J. C. Maguin, A. Mattei, J. Rigaudeau et J. C. Leroux, Influence of axial coolant flow on fuel assembly damping for the response to horizontal seismic loads, SMiRT 11 Transactions Vol. C (1991).
- [3] H. Tanaka et S. Takahara, Fluid elastic vibration of tube array in cross flow, Journal of Sound and Vibration, 77 (1981), pp. 19–37 .
- [4] G. Taylor, Analysis of the swimming of long and narrow animals, Proceedings of the Royal Society of London A, 214 (1952), pp. 158–183.
- [5] M. J. Lighthill, Note on the swimming of slender fish, Journal of Fluid Mechanics, 9 (1960), pp. 305–317.
- [6] M. P. Païdoussis, Fluid-Structure Interactions, tome 2 : slender structures and axial flow, Elsevier, 2^{de} édition, 2016.
- [7] L. Divaret, O. Cadot, P. Moussou et O. Doaré, Normal forces exerted upon a long cylinder oscillating in an axial flow, Journal of Fluid Mechanics, 752 (2014), pp. 649–669.

- [8] J. Adjiman, P. Moussou, O. Doaré, H. Berro, O. Z. Pascan et J. Berland, Divergence modes of a cluster of simply supported arrays in axial flow, Proceedings FIV 11 (2016).
- [9] G. Ricciardi, Coupled porous medium leakage flow modelling applied on a fuel assembly subjected to axial flow, Proceedings FIV 11 (2016).