

Ein Modellprüfstand zur Untersuchung der Fluidkräfte auf die Brennelemente eines Druckwasserreaktors im Erdbebenfall

An experiment investigating hydrodynamic forces on PWR fuel assemblies in case of seismic loading

A. Joly, O. Cadot, P. Moussou, N. de Buretel de Chasse

Institute of Mechanical Sciences and Industrial Applications (IMSIA)

EDF, ENSTA ParisTech, CEA, CNRS: UMR 9219

828 boulevard des Maréchaux, 91120 Palaiseau, Frankreich

Schlagworte: Zylinderbündel, Längsströmung, Druckverteilungsmessung

Keywords: cylinder array, axial flow, pressure field measurement

Zusammenfassung

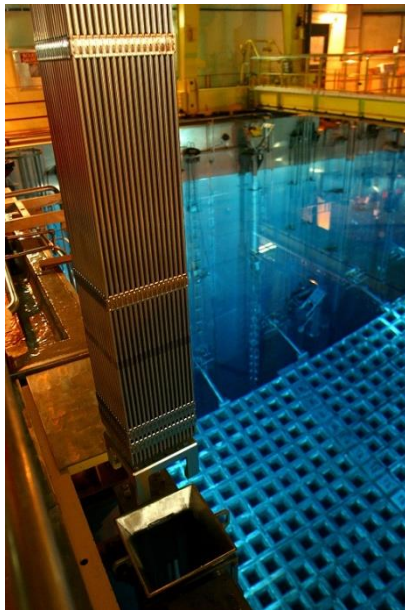
Ein neuer Modellprüfstand zur Bestimmung der lokalen Fluidkräfte in einem längs angeströmten Zylindernetz wurde neulich am *Institute of Mechanical Sciences and Industrial Applications* in Betrieb genommen. Durch eine vereinfachte Geometrie unter Laborbedingungen soll es dazu beitragen, tiefere Einsichten in die im Erdbebenfall stattfindenden Fluid-Struktur-Kopplungsvorgänge an Brennelementen von Druckwasserreaktoren zu sammeln. Der experimentelle Aufbau besteht aus einem 3x3 Zylinderbündel mit 2 m Länge und 4,5 cm Zylinderdurchmesser, das in einem Windkanal aufgestellt wird. Im Rahmen eines quasi-statischen Ansatzes werden die Fluidkräfte bei einer Geometrieänderung am zentralen Zylinder mittels einer Kraftmessdose sowie zahlreicher Druckbohrungen erfasst. Erste Messergebnisse bei variierendem Anströmwinkel des zentralen Zylinders zeigen ein lineares Verhältnis zwischen Auftriebskraft und Winkel. Der Proportionalitätsfaktor ist dabei ca. zwei Mal größer als im Fall eines isolierten Zylinders.

Einleitung

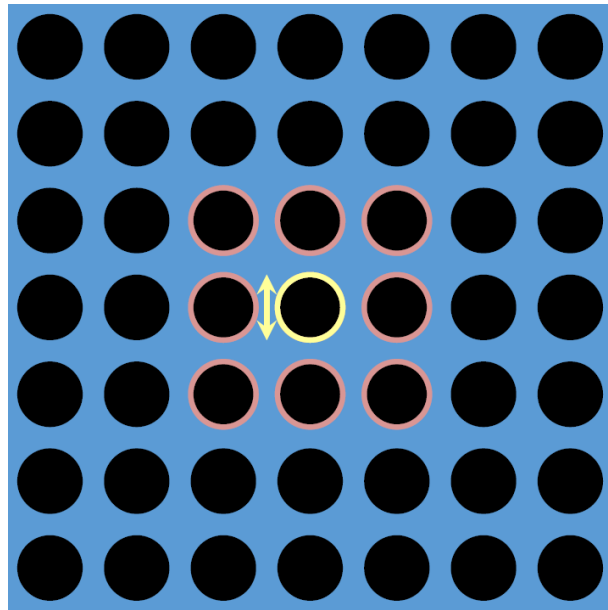
Im Rahmen der Standsicherheitsuntersuchungen für Druckwasserreaktoren im Erdbebenfall soll die hydrodynamische Last auf Brennelemente bei einer externen Anregung genauer charakterisiert werden. Maßstabsgetreue Versuche mit einem Brennelement haben nachgewiesen, dass die Wasserströmung die Schwingungen erheblich dämpft (Tanaka et al. 1988, Flaman et al. 1991). Um ein besseres Verständnis der Physik dieser starken Dämpfung zu gewinnen, sollen Messungen der lokalen Fluidkräfte durchgeführt werden. Ziel dieses Beitrages ist es, einen neuen Modellprüfstand einzuführen, der diese Aufgabe für eine vereinfachte Geometrie erfüllen soll. Die ersten Messergebnisse aus den vor kurzem gestarteten Versuchsreihen werden vorgestellt und mit der Literatur verglichen. Der Beitrag legt den Akzent auf die Beschreibung des Vereinfachungsvorgehens, der von einer industriellen Fragestellung zu einem grundlegenden Laborexperiment führte. Weiterhin werden detaillierte Angaben zur praktischen Umsetzung des Experimentkonzeptes in einen funktionsfähigen Prüfstand gegeben.

Entwicklung und Auslegung eines vereinfachten Modellprüfstands

Ein Brennelement besteht aus 17x17 dünnen Brennstäben (Länge 4 m, Durchmesser 1 cm), die vertikal im Reaktorkern stehen und zur Wärmeübertragung in Längsrichtung umströmt werden, siehe Abb. 1(a). Schematisch entspricht dies dem Fall eines rechtwinkligen Zylindernetzes, das einer Längsströmung ausgesetzt ist. Die Netzgeometrie ist durch das Verhältnis P/D gekennzeichnet, wobei P der Entfernung zwischen zwei Zylinderachsen und D dem Zylinderdurchmesser entspricht (*pitch-to-diameter ratio*). Im realen Fall beträgt dieses Verhältnis ca. 1,3.



(a) © EDF, Damien Charfeddine



(b)

Abb. 1: (a) Brennelement und (b) Darstellung als Zylindernetz.

Zur Untersuchung der Dynamik dieses Netzes wird ein Ansatz verwendet, der von Tanaka in den 80er Jahren für querangeströmte Zylindernetze entwickelt wurde (Tanaka und Takahara, 1981). Dabei wird lediglich eine Elementarzelle des Netzes betrachtet (3x3 Zylinder). Untersucht werden die Fluidkräfte auf die 9 Zylinder dieses Bündels infolge einer Bewegung des zentralen Zylinders, siehe Abb. 1(b). In diesem Modell sind die ermittelten Einflussbeiwerte C_{ij} dann ausreichend, um die Dynamik eines gesamten Netzes zu beschreiben. Hier wird zunächst in einem quasi-statischen Rahmen gearbeitet: die stationären Fluidkräfte werden bei unterschiedlichen Positionen und Winkeln des zentralen Zylinders bestimmt.

Für den experimentellen Aufbau wird somit die in Abb. 2 vorgestellte vereinfachte Geometrie ausgeführt. Die Auslegung des Versuchsmodells erfolgte entsprechend der vorgegeben Rahmenbedingungen: für die Versuche steht ein Windkanal mit den Abmessungen 0,3x0,4 m² (Querschnitt) x 3 m (Länge der Messstrecke) und Windgeschwindigkeit bis zu 20 m/s zur Verfügung. Aluminiumrohre mit $D = 4,5$ cm Durchmesser, $e = 2$ mm Dicke und $L = 2$ m Länge werden verwendet. Dadurch wird eine minimale Durchbiegung unter Eigengewicht gewährleistet. Zum Einstellen der Position des zentralen Zylinders kommen ein fester Hubtisch und ein Hochpräzisions-Drehteller zum Einsatz. Die Reynoldszahl beträgt ca. 10^5 und ist somit mit den industriellen Bedingungen vergleichbar ($4 \cdot 10^5$).

Praktisch werden die Fluidkräfte durch insgesamt 306 Druckbohrungen an den Zylinderoberflächen über ein Scanivalve-Vielfach-Messsystem (64 Kanäle) ermittelt, siehe Abb. 2 und Abb. 3. Zum Vergleich mit der resultierenden Kraft wird außerdem der zentrale Zylinder an einer multiachsialen AMTI-Kraftmessdose befestigt.

Basierend auf diesen Angaben und geometrischen Kenngrößen wurde ein CAD-Modell ermittelt (Abb. 4), das zur Fertigung des physikalischen Modells herangezogen wurde (Abb. 5).

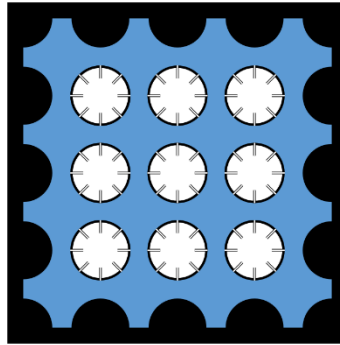


Abb. 2: ausgeführte Geometrie und Lage der Druckbohrungen.

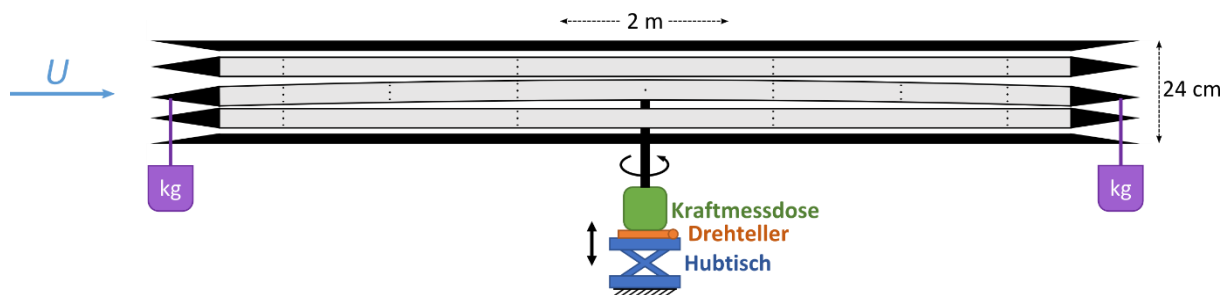


Abb. 3: schematische Darstellung des Prüfstands. Jeder Punkt entspricht einer Druckbohrung.

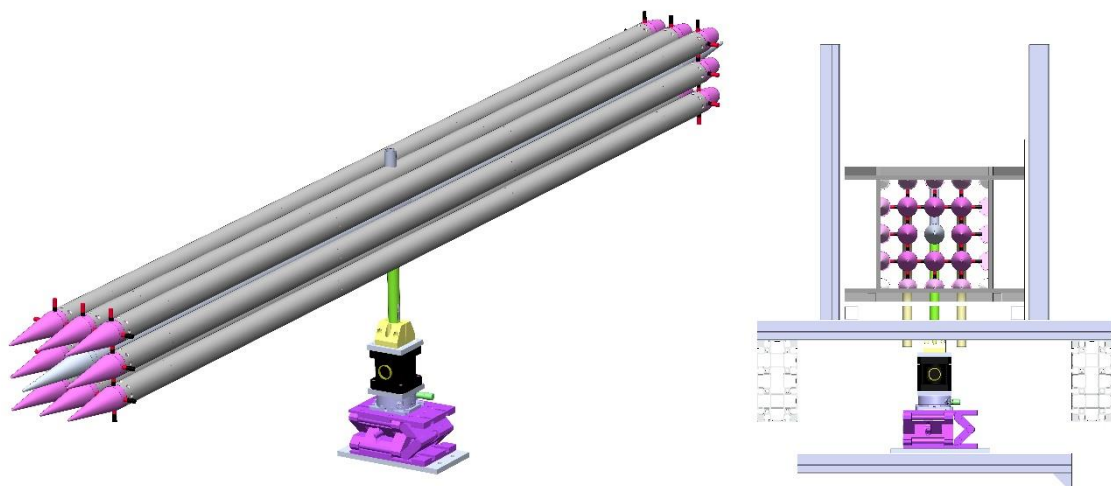


Abb. 4: CAD-Modell des Prüfstands.

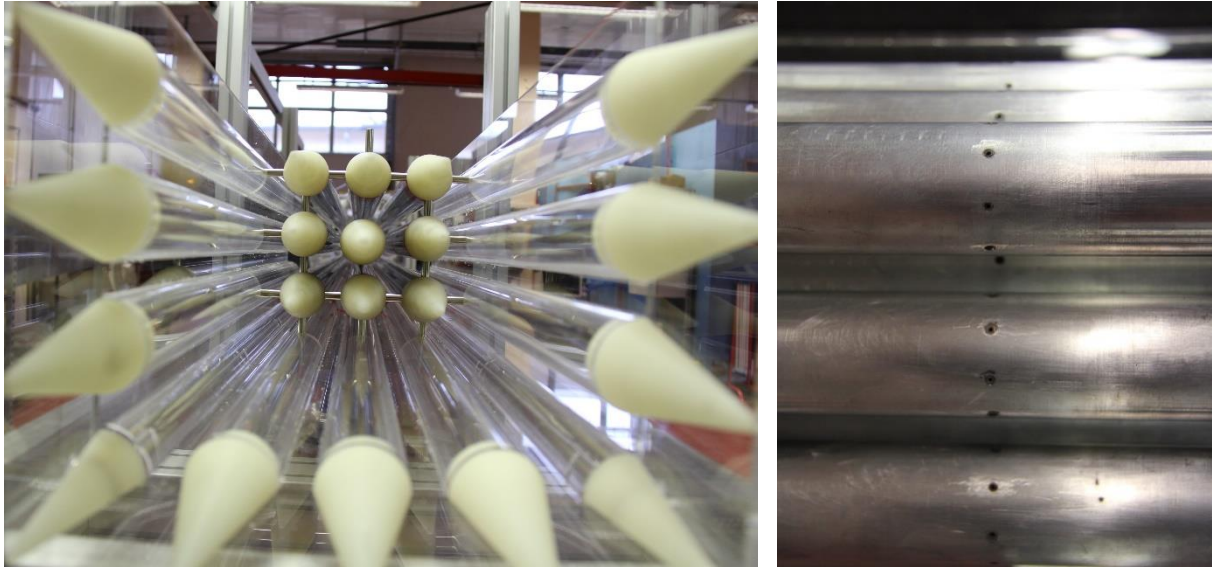


Abb. 5: Frontalansicht des Versuchsmodells (die obere Wand fehlt) und Blick auf die Druckbohrungen.

Messergebnisse

Mit den eigentlichen Versuchen wurde erst kürzlich angefangen. Einige Messergebnisse stehen allerdings schon zur Verfügung. Besonders aussagekräftig sind die Messungen der Auftriebskraft F_y am zentralen Zylinder bei variierendem Anströmwinkel α . Abb. 6 zeigt ein Beispiel mit $U = 27$ m/s, wobei U der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt entspricht. Die Kurve weist eindeutig ein lineares Verhalten auf. Dass sie bei $\alpha = 0$ ungleich Null ist, ist vermutlich auf eine nicht perfekt homogene Anströmung zurückzuführen.

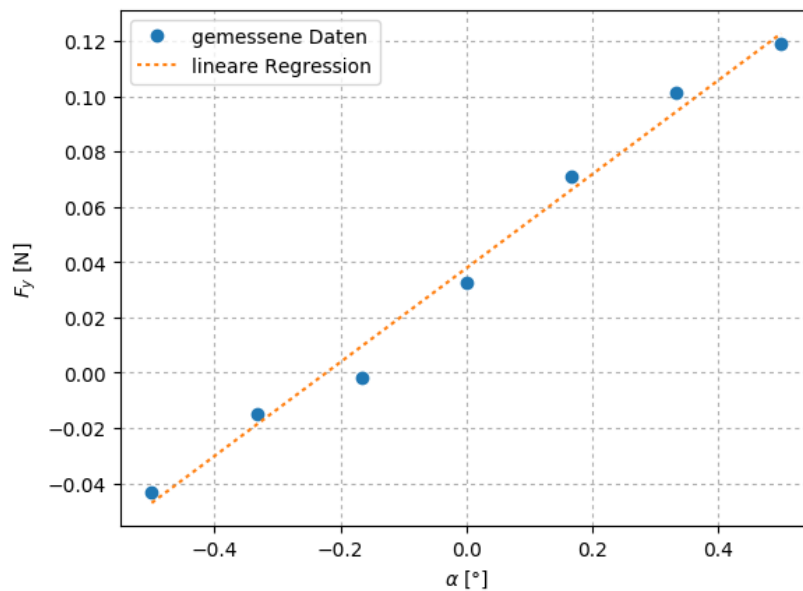


Abb. 6: Auftriebskraft über dem Anströmwinkel bei $U = 27$ m/s.

Führt man den Auftriebsbeiwert

$$C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL}$$

ein, so ergibt sich

$$C_y = C \alpha$$

mit $C = 0,24$. Dieses lineare Verhältnis zwischen Auftriebskraft und Anströmwinkel wurde schon durch Kraftmessungen an einem isoliertem Zylinder von Divaret et al. (2014) beobachtet, wobei der Proportionalitätsfaktor bei 0,11 lag. Der höhere Wert bei den hier vorgestellten Versuchen ist wahrscheinlich auf eine Auswirkung der naheliegenden Nachbarzylinder zurückzuführen. Es könnte auch damit zu tun haben, dass die Winkelbereiche unterschiedlich sind ($\pm 0,5^\circ$ hier, $\pm 5^\circ$ in Divaret et al. 2014), was auf das Strömungsbild einen Einfluss haben kann.

Die Druckmessungen bereiten mehr Schwierigkeiten. Abb. 7 zeigt die über 30 s zeitgemittelten Druckwerte am ersten Messquerschnitt des zentralen Zylinders, der 15 cm stromabwärts von der Spitze liegt. Es bildet sich ein Muster, auf das der Anströmwinkel nur wenig Einfluss hat. Dies weist wahrscheinlich auf Störungen an den einzelnen Druckbohrungen. Als Ursache dafür werden kleine Unvollkommenheiten an der Geometrie der Druckbohrungen vermutet. Es wird noch daran gearbeitet, eine geeignete Kompensation dieser Störungen zu finden.

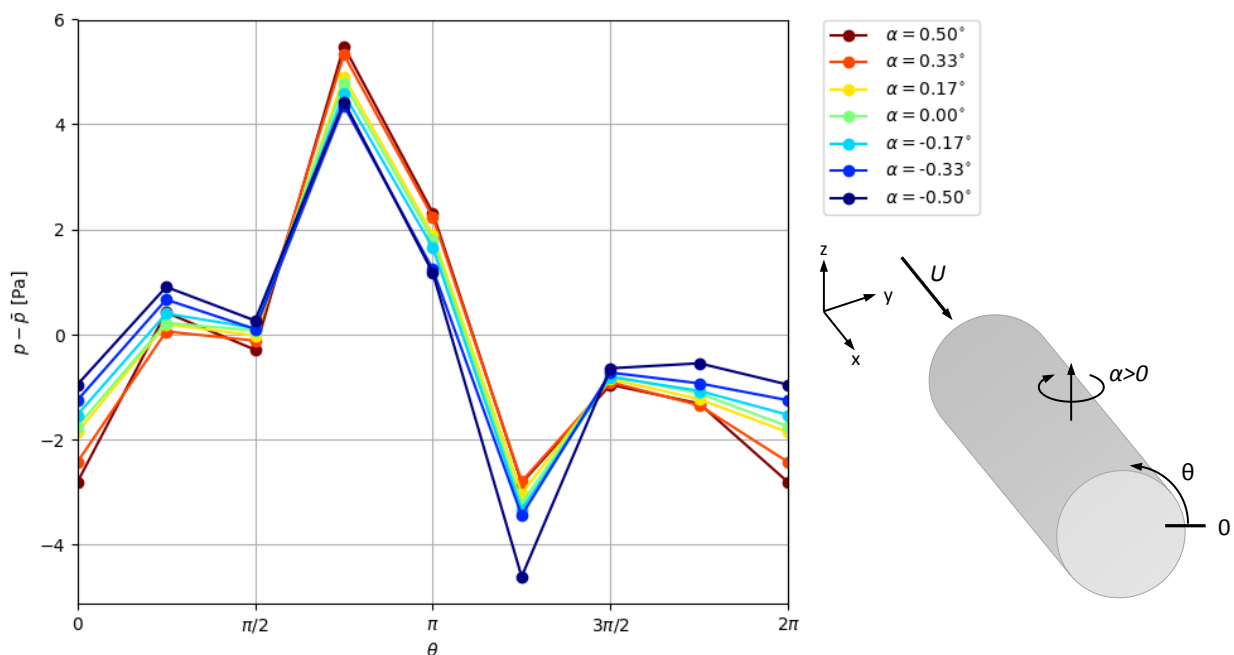


Abb. 7: Druckwerte am ersten Messquerschnitt des zentralen Zylinders bei unterschiedlichen Anströmwinkeln. Damit die Druckwerte verglichen werden können, wurde die Differenz $p - \bar{p}$ gebildet, wobei \bar{p} dem Mittelwert über die 8 Messpunkte entspricht.

Projiziert man die interpolierten Druckwerte auf die Y-Achse und integriert man, so erhält man die lokale Auftriebskraft, wie in Abb. 8 dargestellt:

$$f_y = \int_0^{2\pi} -p(\theta) \cos(\theta) R d\theta .$$

Trotz der Störungen ist mit den Druckmessungen wieder ein lineares Verhalten zu erkennen. Eine lineare Regression ergibt $C = 0,28$, was dem Ergebnis aus den Kraftmessungen ähnlich ist.

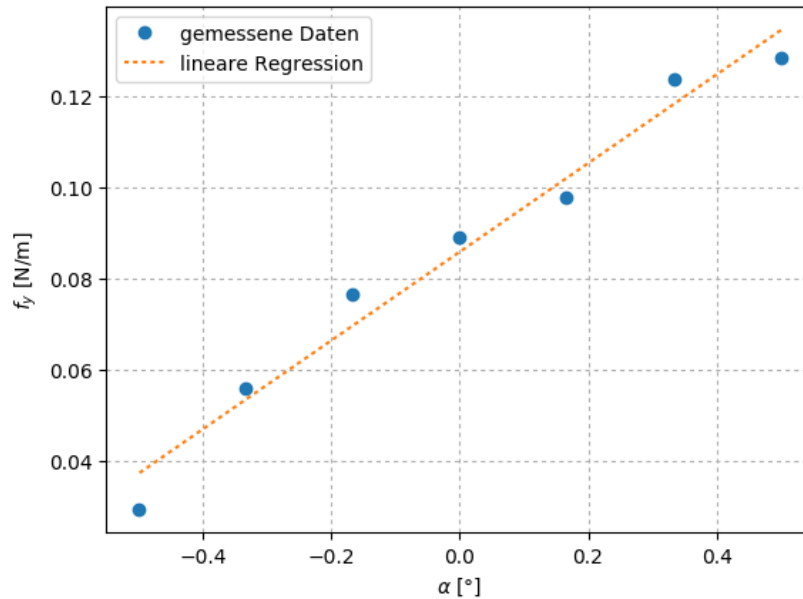


Abb. 8: aus den Druckmessungen ermittelte Auftriebskraft am ersten Messquerschnitt des zentralen Zylinders.

Ausblick

In der Literatur sind bereits Modellierungen zu den Fluidkräften auf längs angeströmte flexible Körper vorhanden (Taylor 1952, Lighthill 1960, Païdoussis 2016), die durch neuere Studien teilweise bestätigt wurden (Divaret et al. 2014). Die hauptsächliche Besonderheit des hier vorgestellten Modellprüfstands, nämlich die ausführliche Erfassung des Wanddruckfeldes, sollte eine Vertiefung dieser Modellierungen ermöglichen.

Außerdem sollen die Experimente an diesem Modellprüfstand Validierungsmaterial für CFD-Berechnungen erzeugen. Weiterhin können die auf die diskreten Messergebnisse kalibrierte CFD-Modellen (so wie beispielsweise in Adjiman et al. 2016) detailliertere Informationen liefern.

Sobald eine geeignete Modellierung der Fluidkräfte vorhanden ist, kann auf die industrielle Fragestellung eingegangen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dann den weiterhin stattfindenden maßstabsgetreuen Versuchen gegenübergestellt werden (siehe z.B. Ricciardi 2016).

Literatur

- J. Adjiman, P. Moussou, O. Doaré, H. Berro, O. Z. Pascan, J. Berland, 2016:** "Divergence modes of a cluster of simply supported arrays in axial flow", Proceedings FIV 11.
- L. Divaret, O. Cadot, P. Moussou, O. Doaré, 2014:** "Normal forces exerted upon a long cylinder oscillating in an axial flow", Journal of Fluid Mechanics, 752, pp. 649--669.
- J. C. Flamand, J. C. Maguin, A. Mattei, J. Rigaudeau, J. C. Leroux, 1991:** "Influence of axial coolant flow on fuel assembly damping for the response to horizontal seismic loads", SMiRT 11 Transactions Vol. C
- M. J. Lighthill, 1960:** "Note on the swimming of slender fish", Journal of Fluid Mechanics, 9, pp. 305-317.
- M. P. Paidoussis, 2016:** Fluid-Structure Interactions, vol. 2: slender structures and axial flow, Elsevier.
- G. Ricciardi, 2016:** "Coupled porous medium leakage flow modelling applied on a fuel assembly subjected to axial flow", Proceedings FIV 11.
- M. Tanaka, K. Fujita, A. Hotta, N. Kono, 1988:** "Parallel flow-induced damping of PWR fuel assembly", ASME, PVP Vol. 133.
- H. Tanaka, S. Takahara, 1981:** "Fluid elastic vibration of tube array in cross flow", Journal of Sound and Vibration, 77, pp. 19-37.
- G. Taylor, 1952:** "Analysis of the swimming of long and narrow animals", Proceedings of the Royal Society of London A, 214, pp. 158-183.