

Interaction fluide-structure 3D au sein du cœur des réacteurs à eau pressurisée par approche en réseau hydraulique

T. Belazzouz^{1*}, V. Faucher², P. Badel¹, J. Curt¹

¹ EDF Lab Paris-Saclay, Palaiseau, taryk.belazzouz@edf.fr, pierre.badel@edf.fr, jordan.curt@edf.fr

² CEA, Cadarache, vincent.faucher@cea.fr

Résumé — Afin de simuler les IFS au niveau des assemblages combustibles, il est nécessaire de coupler itérativement la simulation de leurs déformations avec la simulation du fluide réfrigérant. Cependant, simuler par CFD le réfrigérant à chaque itération du couplage s'avère trop coûteux. Ces travaux cherchent à modéliser le comportement du réfrigérant en « réseau hydraulique » pour parvenir à simuler les IFS pour des configurations de cœurs de REP à la complexité croissante : du simple assemblage 2D, jusqu'au cœur complet contenant l'ensemble de ses assemblages disposés en 3D.

Mots clefs — Interaction fluide-structure (IFS), assemblage combustible, réacteur à eau pressurisée (REP).

1. Introduction

1.1. Contexte

Les déformations des assemblages combustibles en cœur des réacteurs à eau pressurisée (REP) représentent un problème régi par différentes physiques fortement couplées. Au premier ordre, ce problème est gouverné par le couplage de deux jeux d'équations aux dérivées partielles : celles de Navier-Stokes pour l'écoulement du fluide réfrigérant primaire, et celles de la mécanique des structures pour la déformation quasi-statique des assemblages [17]. Simuler ces déformations nécessite donc la prise en charge des trois composantes de l'interaction fluide-structure (IFS), en simulant le comportement du fluide, celui de la structure, et en mettant en place un algorithme de couplage entre les deux. Deux de ces trois composantes sont relativement accessibles :

- Un couplage partitionné peut être par exemple implémenté via un algorithme itératif de point fixe. Pour cela, il suffit d'alterner itérativement une simulation du fluide en fonction des positions des assemblages et une simulation de la structure en fonction des efforts hydrauliques appliqués par le réfrigérant, ceci jusqu'à atteindre la convergence des déformations (couplage classique de type Dirichlet-Neumann). En pratique, des algorithmes d'accélération du point fixe sont privilégiés dans les nombreux cas où l'algorithme standard est trop lent ou ne converge pas [7].
- De plus, simuler la mécanique des structures de l'ensemble des assemblages d'un cœur représente, pour certaines modélisations d'assemblages, un problème de taille raisonnable dont les équations peuvent être résolues par méthode éléments finis (MEF). Différents codes de calculs en MEF ont d'ailleurs des outils métiers prévus à cet effet [3].
- Cependant, toute simulation à l'échelle CFD du fluide réfrigérant dans l'entièreté d'un cœur nécessite des ressources et des temps de calcul prohibitifs dans un contexte de couplage itératif [4].

Le coût d'une simulation CFD rend ainsi inenvisageable la simulation du problème IFS via une approche couplée. Ceci est d'autant plus vrai pour des études nécessitant de large campagne de calculs, telles que pour des analyses de sensibilité ou de quantification d'incertitudes.

Ces analyses sont pourtant primordiales pour mesurer la robustesse de nos modèles numériques [13,16]. Il est donc nécessaire de simuler l'itération « fluide » du couplage avec une modélisation plus légère, rapide à simuler, mais qui représente assez fidèlement le comportement du réfrigérant pour en obtenir des efforts hydrauliques représentatifs.

1.2. Etat de l'art

Avant les années 2000, les valeurs des efforts hydrauliques appliqués sur les modèles éléments-finis d'assemblages étaient en pratique, soit issus d'essais expérimentaux, soit post-traités d'une seule itération CFD pour réaliser un couplage faible avec la structure [18].

La prise en compte de la rétroaction de la structure sur le fluide a pu être étudiée plus tard, lorsque les ressources et méthodes de calculs ont rendu accessibles la réalisation de CFD successives pour des domaines fluides représentant tout au plus quelques assemblages. On retrouve ainsi en 2013 une étude de couplage partitionnée CFD-MEF sur une ligne de 7 assemblages et demi aux géométries simplifiées [5] ; puis en 2018 une étude de couplage avec une modélisation fluide en milieux poreux d'une ligne de 15 assemblages [17]. Ces deux études relèvent notamment la nécessité de prendre en compte la rétroaction de la structure sur le fluide. Sans cela, le couplage faible surestime les déformations quasi-statiques ainsi que le nombre de contacts entre assemblages.

Les modélisations en milieux poreux accélèrent l'itération CFD en traitant l'assemblage comme un milieu continu, mais elles perdent la résolution spatiale nécessaire à la prise en compte de certains phénomènes locaux. Parmi eux, l'écoulement passant entre les grilles des assemblages voisins représente un phénomène de premier ordre puisqu'il produit un effort latéral sur chaque grille. Cet écoulement localisé peut alors être pris en compte en le modélisant comme un canal 1D représentant un débit de fuite [12].

Afin d'accélérer davantage les itérations fluides du couplage par rapport à une modélisation en milieu poreux, certains travaux ont fait le choix de modéliser l'ensemble des écoulements en cœur comme un ensemble de canaux 1D interconnectés. Cette approche, initialement développée par Stanislas de Lambert [8] et ensuite utilisée par Ali Aboud dans le cadre d'analyses de sensibilité sur des configurations 2D de lignes d'assemblages [1], permet d'avoir une itération fluide quasi-instantanée pour quelques assemblages. Du fait de sa relative légèreté, cette simplification des équations de Navier-Stokes en un modèle de « réseau hydraulique » représente une approche prometteuse pour l'étude des IFS à l'échelle du cœur complet 3D.

1.3. Objectifs

Puisque l'approche en réseau hydraulique s'est révélée probante dans un cadre 2D pour étudier des lignes d'assemblages, nous proposons d'explorer son extension en 3D. Ces travaux ont donc deux objectifs principaux :

- Valider l'approche réseau contre des solutions CFD, et des essais de référence pour des configurations représentatives.
- Démontrer la faisabilité du couplage IFS à l'échelle d'un cœur complet.

La suite de ce résumé étendu servira à présenter succinctement l'approche en réseau hydraulique ainsi que quelques résultats intermédiaires.

2. Eléments d'un réseau hydraulique de cœur

2.1. Principe

L'approche en «réseau hydraulique» repose sur l'intégration spatiale des équations de conservation sur des volumes de contrôle définis a priori ; ces volumes étant choisis pour représenter au mieux les différents chemins d'écoulement en cœur. Dans ce formalisme, l'interconnexion de l'ensemble des chemins d'écoulement forme un réseau hydraulique, et l'équation de quantité de mouvement se réduit à une relation de perte de pression sur chaque branche de ce réseau :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho * \zeta(Re, \text{géométrie}) * \frac{Q^2}{A^2} \quad (1)$$

où le coefficient de perte de pression ζ dépend de la géométrie du canal, il encapsule les phénomènes visqueux et inertiels (avec Re le nombre de Reynolds, Q le débit, et A l'aire de la section droite de la branche) [6]. Cette simplification préserve la conservation de la masse via les lois de Kirchhoff aux nœuds du réseau hydraulique ($\sum Q = 0$) tout en négligeant les termes instationnaire ($\partial u / \partial t$), convectif ($(u \cdot \nabla)u$), et visqueux ($\nu \nabla^2 u$) de l'équation de quantité de mouvement [14]. Le système d'équations aux dérivées partielles se retrouve ainsi réduit à un système d'équations algébriques non-linéaires pouvant être résolu par une méthode de Newton-Raphson.

2.2. Méthodologie de mise en place

Modéliser les écoulements en cœur en un réseau hydraulique revient à modéliser les différents « chemins d'écoulement » que le fluide prend dans le cœur en un réseau de tuyaux interconnectés. Simuler ce réseau hydraulique revient à simuler un circuit électronique en faisant l'équivalence entre Débit (Q) dans les branches du réseau et Courant (I) dans les branches d'un circuit, et entre les Pressions (P) aux interconnexions du réseau et les Tensions (V) aux nœuds d'un circuit. Sur chacune des branches du réseau se trouve alors une résistance hydraulique qui est modélisée par une loi de perte de pression (singulière et/ou régulière) (1) à laquelle le fluide est sujet sur le chemin d'écoulement modélisé par la branche. Chaque résistance hydraulique du réseau est fonction d'un coefficient de perte de pression ζ . La Figure 1 illustre sur un motif de réseau 2D une proposition de modélisation des chemins d'écoulements en cœur

2.3. Paramètres du réseau

Ci-dessous se trouve la liste des différents coefficients de perte de pression utilisés sur le réseau présenté en Figure 1 :

- ζ_{Tr} , le coefficient de perte de pression transverse que le fluide voit en passant à travers les rangées de crayons combustibles (issu des essais Eole [10]) ;
- ζ_{Ax} , le coefficient de perte de pression axial lié au frottement à la remontée du fluide au contact du faisceau de crayon. Le coefficient de friction de Darcy est ici approximé par la corrélation de Haaland [2] ;
- ζ_{Gr} , le coefficient de perte de pression lié au passage de la grille (scalaire caractéristique de du modèle de grille étudié) ;
- ζ_{By} , le coefficient de perte de pression lors du passage entre deux grilles voisines (issu de [9]).

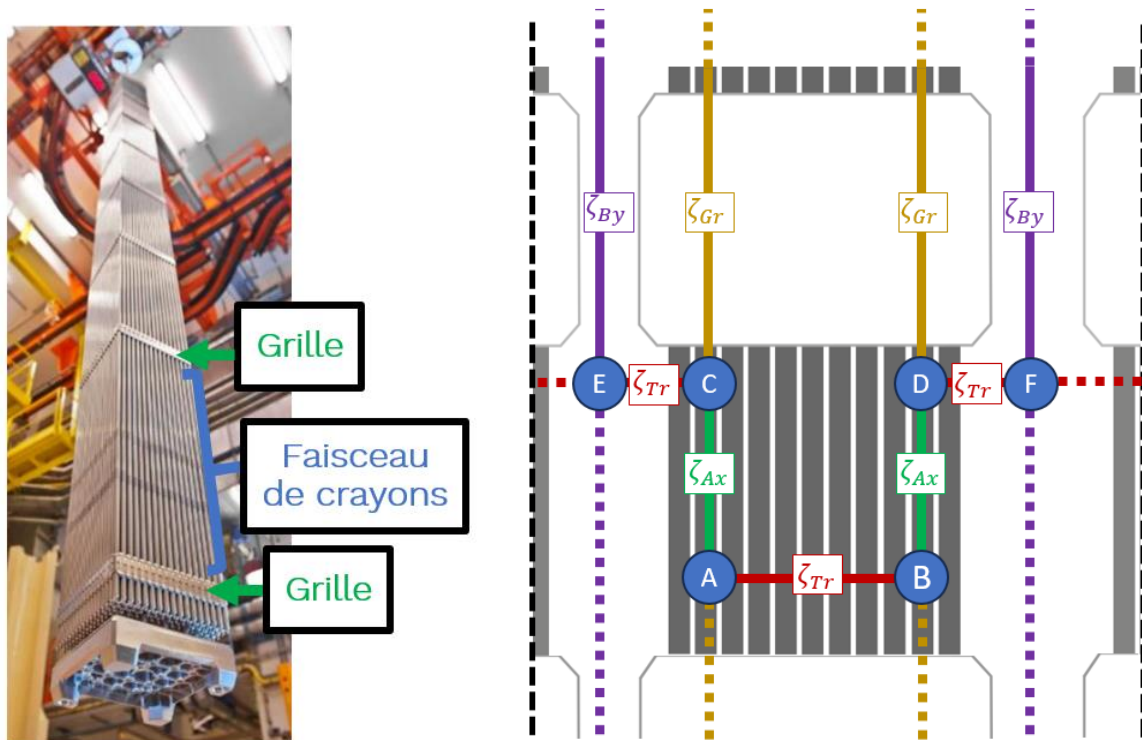


Figure 1 – (Gauche) Un assemblage combustible (Droite) Exemple de motif pour un réseau 2D en cœur.

Afin de simuler nos réseaux hydrauliques, nous avons choisi d'utiliser les solveurs du code open source de simulation de circuit électronique Ngspice [15]. Nous transformons la relation de perte de pression (1) $\Delta P = f(Q)$ en une relation équivalente $Q = f(\Delta P)$ afin de définir sur chaque branche du réseau une source de courant (équivalent débit) dépendant de la différence de tension (équivalent pression) aux deux nœuds de la branche :

$$Q = \text{signe}(\Delta P) \sqrt{\frac{|\Delta P|}{\frac{1}{2A^2} \rho * \zeta(\text{Re, géométrie})}} \quad (2)$$

Le système résolu par Ngspice est le système d'équations de conservation du débit en chaque nœud du réseau. Les lois de perte de pression (1)(2) étant non-linéaires, Ngspice met en place un algorithme itératif de Newton-Raphson afin de converger vers un jeu de solutions qui sont les pressions aux différents nœuds du réseau. Puisque l'algorithme évalue des dérivées partielles, il est alors plus sûr de lui fournir des versions « lissées » de l'expression (2) et de celles au sein des coefficients ζ , là où leurs dérivées ne sont pas définies : $\text{signe}_{\text{smoothed}}(x) = \tanh(x * \varepsilon_1)$, $\text{abs}_{\text{smoothed}} = \sqrt{x * \varepsilon_2}$ (avec $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ des paramètres de lissage à définir).

Une fois que la simulation du réseau a convergé, il est possible de post-traiter à partir des résultats de pressions aux nœuds les différents efforts fluides à appliquer sur les assemblages.

3. Résultats de couplage

3.1. Modélisation du couplage pour un essai sur un assemblage combustible

La Figure 2 illustre le résultat d'un couplage modélisant un essai ayant eu lieu dans la boucle HERMES T au CEA Cadarache [12]. L'essai consiste d'abord à déformer un assemblage avec un vérin hydraulique qui applique un déplacement constant sur sa 5^{ème} grille, puis un débit constant est injecté au pied de l'assemblage.

La déformation initiale de l'assemblage par le vérin provoque une redistribution transverse du débit injecté qui applique alors des efforts fluides sur les différentes parties de l'assemblage, le déformant ainsi davantage. Afin de modéliser cet essai, nous avons couplé le réseau hydraulique dont le motif a été présenté ci-dessus (Figure 1) avec le module de simulation élément-finis Mac3_Statique de Code_Aster [3]. La Figure 2 illustre ainsi des résultats de simulations dont la tendance est semblable à celle de l'essai et laisse donc espérer que l'approche en réseau hydraulique permet de capturer suffisamment le vrai comportement du fluide malgré la légèreté du modèle.

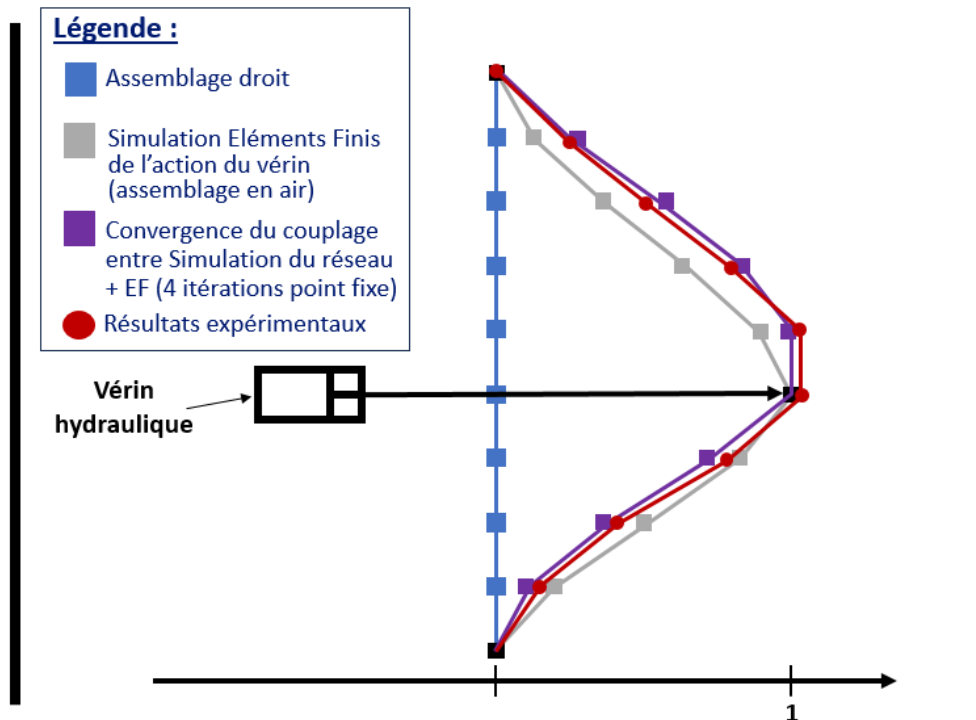


Figure 2 – Comparaison entre simulation du couplage IFS et résultats expérimentaux dans la boucle HERMES T au CEA Cadarache [12]

3.2. Modélisation du couplage pour une ligne de 15s assemblages

La Figure 3 illustre le résultat d'un couplage modélisant une étude de couplage partitionnée CFD-MEF sur une ligne d'assemblages [5]. La redistribution transverse du débit causant les efforts fluides est ici produite par les conditions aux limites qui sont non-uniformes ; des profils de débit paraboliques sont injectés aux pieds des assemblages et éjectés en leurs sommets. Les déformations obtenues sur les 15 assemblages respectent bien les tendances observées dans l'étude citée. Contrairement au cas de couplage précédent concernant un seul assemblage (partie 3.1), ici l'algorithme standard de point fixe ne converge pas. Il a fallu utiliser un algorithme d'accélération de point fixe (algorithme de la séquence croisée, [11]) pour lequel le calcul a convergé en 11 itérations de couplage.

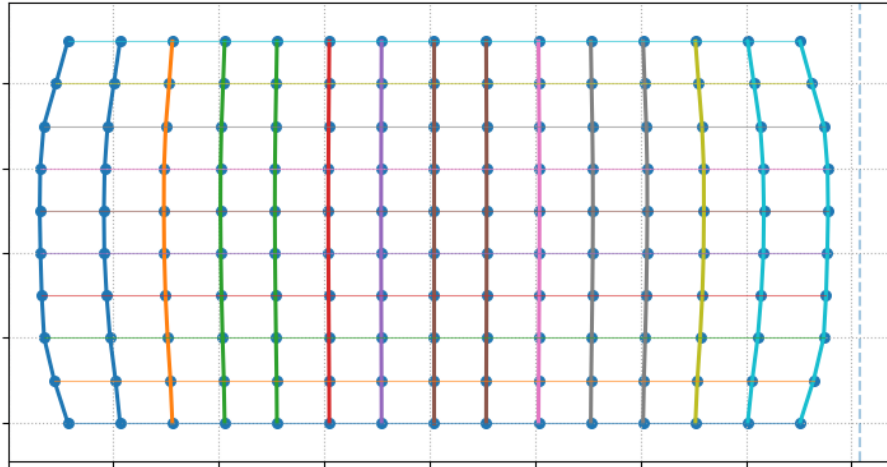


Figure 3 – Résultat de couplage pour une ligne de 15 assemblages, modélisation de l'étude [5]

3. Suite des travaux, modélisation d'un réseau 3D du cœur complet

L'objectif de ces travaux sera de réaliser les couplages IFS en 3D sur des cœurs de plus ou moins grandes échelles, jusqu'à celle du cœur à taille réelle. Cela présente différentes problématiques à propos de :

- La faisabilité de la simulation du réseau hydraulique quand la taille du circuit représente un cœur à taille réelle avec l'ensemble de ses presque 200 assemblages.
- La convergence du couplage qui devra être aidé par méthode d'accélération du point fixe.
- La métrique avec laquelle nous validerons nos résultats, n'ayant pas de données expérimentales ni de simulations CFD sur des cœurs à échelle réelle.
- La sensibilité de nos résultats aux paramètres de notre réseau.

Cela étant dit, nous illustrons sur la Figure 4 une proposition de motif pour un réseau 3D basé sur les mêmes éléments de résistances hydrauliques présentés pour le réseau 2D.

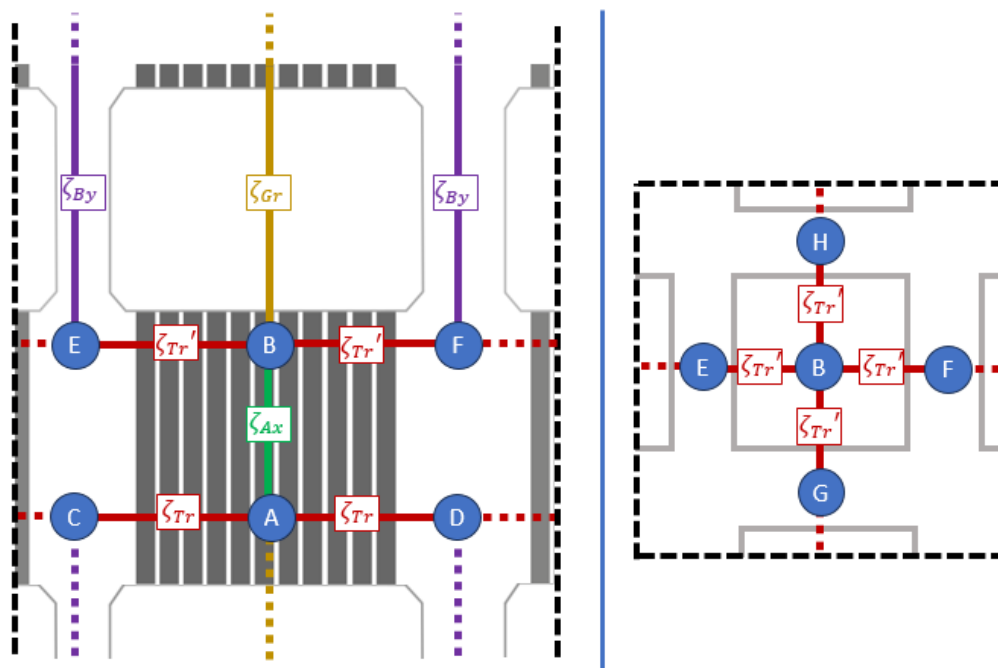


Figure 4 - Exemple de motif pour un réseau 3D en cœur, (Gauche) vue de face, (Droite) Vue en coupe, sous une grille.

Références

- [1] A. Abboud, S. de Lambert, J. Garnier, Sensitivity analysis of a flow redistribution model for a multidimensional and multifidelity simulation of fuel assembly bow in a pressurized water reactor, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 443, 2025.
- [2] M. Asker, O. Turgut and M. Coban, A review of non iterative friction factor correlations for the calculation of pressure drop in pipes, *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 4, Pages 1-8, 2014.
- [3] Électricité de France, code_aster Analyse des Structures et Thermo-mécanique pour des Études et des Recherches, Documentation [U4.90.11] Opérateur CALC_MAC3COEUR, Open source sur <https://www.code-aster.org>, 2024.
- [4] J. Fang, D.R. Shaver, A. Tomboulides, Feasibility of full-core pin resolved CFD simulations of small modular reactor with momentum sources, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 378, 2021.
- [5] Á. Horváth, B. Dressel, On numerical simulation of fuel assembly bow in pressurized water reactors, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 265, Pages 814-825, 2013.
- [6] I.E Idel'cik, Memento des pertes de charges, « 1.8 Perte de charges » Page 33, Eyrolles, 1969.
- [7] U. Küttler, W.A. Wall, Fixed-point fluid–structure interaction solvers with dynamic relaxation, *Computational Mech*, Volume 43, Pages 61–72, 2008
- [8] S. de Lambert, J. Cardolaccia, V. Faucher, Semi-analytical fluid-structure model for the analysis of fuel assembly bow in full PWR cores, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 160, 2023.
- [9] S. de Lambert, J. Cardolaccia, V. Faucher, Semi-analytical modeling of the flow redistribution upstream from the mixing grids in a context of nuclear fuel assembly bow, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 371, 2021.
- [10] J. Peybernès, Evaluation of the forces generated by cross-flow on PWR fuel assembly, Technical meeting on structural behaviour of fuel assemblies for water cooled reactors, 2005.
- [11] I. Ramière, T. Helfer, Iterative residual-based vector methods to accelerate fixed point iterations, *Computers and Mathematics with Applications*, Volume 70, Issue 9, Pages 2210 – 2226, 2015.
- [12] G. Ricciardi, Fluid–structure interaction modelling of a PWR fuel assembly subjected to axial flow, *Journal of Fluids and Structures*, Volume 62, Pages 156-171, 2016.
- [13] A. Saltelli, K. Aleksankina, W. Becker, Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices, *Environmental Modelling & Software*, Volume 114, Pages 29-39, 2019.
- [14] N. E. Todreas and M. S. Kazimi, *Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals*, 2nd ed., « 4.5.1 Conservation of Mass, 4.5.2 Conservation of Momentum » Pages 153-160, « 9.2.1 Possible Simplifications » Pages 439-441, « 9.3.6 Pressure Drop in Channels » Pages 464-466) CRC Press, 2011.
- [15] H. Vogt, G. Atkinson, P. Nenzi, Ngspice User's Manual, Version 45, Ngspice Project, 2025.
- [16] V. Volodina, P. Challenor, The importance of uncertainty quantification in model reproducibility, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Volume 379, 2021.
- [17] A. Wanninger, M. Seidl, R. Macián-Juan, Mechanical analysis of the bow deformation of a row of fuel assemblies in a PWR core, *Nuclear Engineering and Technology*, Volume 50, Issue 2, Pages 297-305, 2018.
- [18] D. P. Weber, S. S. Chen, C. Y. Wang, Coupled CFD/CSM vibration design methodology for generation IV long-life fuel and component design, Argonne National Lab , 2000.