

Quantification d'incertitudes appliquée à la déformation des assemblages combustibles au sein d'un réacteur à eau pressurisée

A. Abboud¹, B. Leturcq², S. de Lambert², J. Garnier¹

¹ Centre de Mathématiques Appliquées, Ecole Polytechnique, France, ali.abboud@polytechnique.edu, josselin.garnier@polytechnique.edu

² Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Etudes Mécaniques et Thermiques, 91191, Gif-sur-Yvette, France, bertrand.leturcq@cea.fr, stanislas.de-lambert@cea.fr

Résumé — La simulation des déformations en service d'assemblages combustibles nucléaires propage les incertitudes d'entrée au travers de modèles non-linéaires couplés entre eux via un algorithme d'interaction fluide-structure. Afin d'évaluer et, si possible, de réduire l'incertitude des prédictions, une démarche d'analyse de propagation d'incertitudes exploitant des métamodèles par processus gaussiens couplés par un algorithme est mise en œuvre. Elle rassure quant à la stabilité des réponses et permet d'identifier des axes d'amélioration méthodologiques en regard d'un paramètre épistémique et des conditions aux limites.

Mots clefs — Propagation d'incertitudes, processus gaussien, interaction fluide-structure.

1. Contexte et méthodologie

La déformation des assemblages combustibles à long terme au sein d'un réacteur à eau pressurisée résulte de l'interaction fluide-structure entre les assemblages, qui sont des structures élancées et encastrées à leurs extrémités, et le fluide caloporteur, qui circule principalement du bas vers le haut de la chaudière. Le calcul des forces hydrauliques et celui de la thermomécanique des structures sous irradiation sont alors étroitement couplés par le biais d'un algorithme itératif. De par le nombre de paramètres, la non-linéarité des modèles et leur couplage on se pose la question de l'incertitude finale des prédictions obtenues. Or de telles simulations couplées sont coûteuses, ce qui rend les approches de quantification d'incertitudes (UQ) conventionnelles impraticables. Pour relever ce défi, des modèles de substitution par processus gaussien sont d'abord développés pour les efforts hydrauliques [1], puis pour la réponse structurelle [2]. Enfin, une méthodologie dédiée à leur couplage efficace est proposée [3]. S'appuyant sur ce cadre basé sur la substitution, la présente étude réalise une analyse de sensibilité globale et une UQ complète de la déformation des assemblages combustibles sur le cycle d'irradiation. Les résultats mettent en évidence les principales sources de variabilité, quantifient leur impact sur les prévisions de déformation et démontrent que le couplage basé sur des modèles de substitution permet une quantification d'incertitude précise et utilisable pour les systèmes multiphysiques complexes. Ce travail ouvre la voie à ce type d'analyses dans les simulations à l'échelle du réacteur pour un coût de calcul nettement inférieur à celui du couplage direct haute-fidélité.

2. Analyse de sensibilité et métamodélisation de la simulation hydraulique

2.1. Régularité du champ de forces hydrauliques

La simulation des écoulements et des efforts hydrauliques à l'instant courant sur les assemblages combustibles est réalisée à l'aide d'un réseau de pertes de charges paramétriques qui tiennent compte des conditions aux limites hydrauliques aux frontières du domaine, de la géométrie des obstacles (les différents composants de chaque assemblages) et de la géométrie des espaces inter-assemblages [4], laquelle dépend directement de leur déformée. Les débits sont résolus de manière itérative et les forces résultantes sur les structures sont ensuite déduites [5].

Dans l'objectif d'analyser et de métamodéliser ces forces, il est utile de vérifier leur régularité par rapport aux déformations des assemblages combustibles qui constituent un jeu de paramètres influent et évolutif au cours de l'irradiation. Pour ce faire, en fixant les conditions aux limites hydrauliques, on réalise plusieurs études de perturbation du champ de déformation structurel. Les premières considèrent la variation de déformée d'un seul assemblage et montrent que la perturbation du champ des forces hydrauliques reste limitée à l'assemblage en question et à ses proches voisins. De plus la perturbation reste très linéaire avec l'intensité de la déformation tant que les lames d'eau entre assemblages gardent une valeur significative par rapport à leur valeur nominale, ce qui n'est plus le cas en cas de contact notamment. La seconde étude considère la déformation plus ou moins prononcée de tous les assemblages combustibles au sein d'un unique mode de déformation collectif réaliste et sans contacts, dit « en tonneau régulier », cf. Figure 1. Ceci permet alors d'explorer un domaine de fortes amplitudes des déformations d'assemblages sans générer de lames d'eau d'épaisseur quasi nulle.

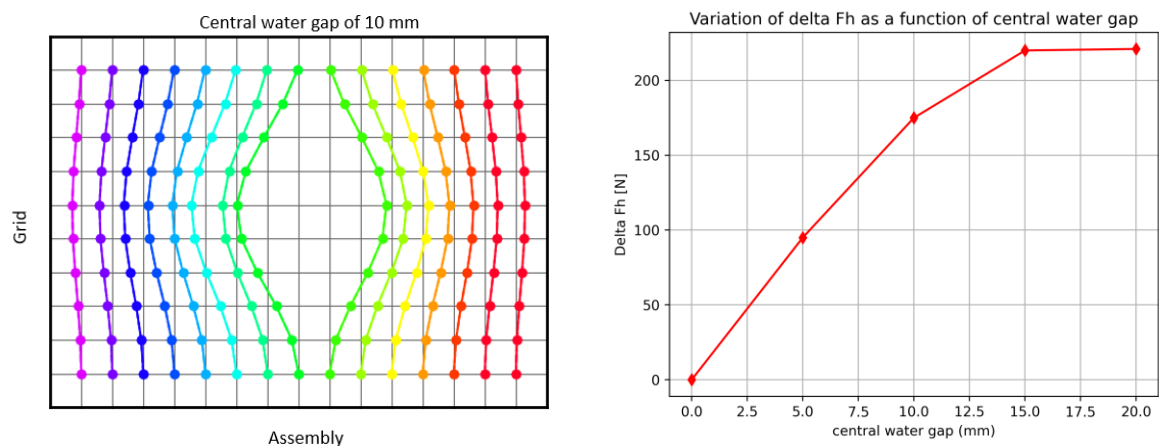


Figure 1 – représentation de la déformation en tonneau d'une rangée de 15 assemblages et variation maximale du champ de forces hydrauliques en fonction de l'écartement central.

Ces premières analyses des forces hydrauliques font apparaître la superposition d'un effet de fond important piloté par les conditions aux limites (débit du caloporteur, profil de vitesse en entrée du cœur et profil de vitesse en sortie du cœur) auquel s'ajoutent des perturbations locales associées aux déformations de chaque assemblage. La relation déformation-perturbation, sans être complètement linéaire, se montre tout de même très régulière et bornée, donc favorable à une métamodélisation, en particulier à l'aide de processus gaussiens.

2.2. Métamodèle des forces hydrauliques par processus gaussien

2.2.1. Paramètres incertains retenus

Une réduction dimensionnelle est opérée afin de décrire la déformée de chaque assemblage issue du modèle de structures à l'aide de seulement trois amplitudes. Pour cela on définit classiquement une base orthonormée de trois modes de flexion respectant l'immobilité des extrémités de chaque assemblage. Ces modes prennent une forme de C, de S et de W. Pour 15 assemblages, 45 coefficients modaux sont alors nécessaires, leur plage de variation étant donnée par le retour d'expérience industriel. Les autres données incertaines concernent des paramètres assez bien maîtrisés car directement mesurables mais aussi des conditions aux limites hydrauliques instantanées moins bien maîtrisées. Enfin, on intègre le paramètre épistémique h_l [4], qui présente la dimension d'une longueur et doit être fixé par l'utilisateur dans une plage déterminée au préalable par des calculs de CFD locale.

Table 1 – Paramètres incertains du modèle hydraulique

Paramètre	Définition
C_{ij}	Coefficients modaux
T ($^{\circ}C$)	Température
h_l (mm)	Hauteur de redistribution du débit
C_g	Coefficient de perte de charge axiale pour une grille
V (m/s)	Vitesse d'écoulement
M_{in}	Aplatissement du profil de vitesse parabolique entrant
L_{offset}^{in}	Décalage du profil de vitesse parabolique entrant
M_{out}	Aplatissement du profil de vitesse parabolique sortant
L_{offset}^{out}	Décalage du profil de vitesse parabolique sortant

2.2.2 Contraintes sur le tirage des jeux de paramètres

Comme on souhaite aussi bien couvrir les domaines de faibles et fortes déformations des assemblages, il arrive que des tirages d'amplitudes modales de déformation conduisent à des interpénétrations entre assemblages ou avec la paroi extérieure. Celles-ci ne sont pas autorisées et nous conduisent à corriger le jeu de donnée à l'aide d'un algorithme de répulsion. Celui-ci détecte les interpénétrations puis réduit les amplitudes modales des deux assemblages concernés en pondérant chacun des 3 modes suivant l'altitude du contact et la raideur du mode considéré. Cette méthode itérative, bien que rustique, donne des résultats suffisamment proches d'une simulation mécanique de contact, comme le montre la Figure 2, pour un coût très inférieur. Elle permet également de respecter la répartition statistique des cas de grandes déformations avec contacts après l'étape d'insertion des assemblages plus ou moins déformés au sein du cœur, contrairement à ce que donnerait un simple rejet des tirages interpénétrants.

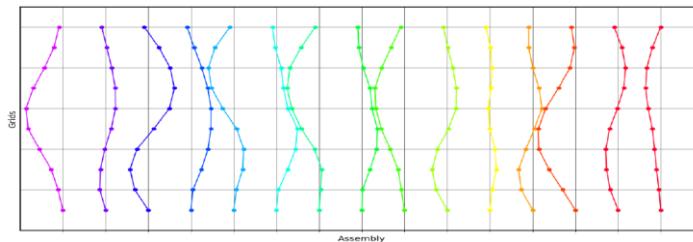


Figure 2 – Exemple de tirage à déformations importantes, corrigé par l'algorithme de répulsion

2.2.3 Qualité du métamodèle

Dans cette étude nous définissons un processus par assemblage (position dans le cœur) et par niveau de grille (altitude) dont la sortie d'intérêt est la force latérale locale exercée par le fluide sur la structure. Il y a donc autant de processus que de nœuds visibles dans la Figure 2. Les entrées de chaque métamodèle sont celles définies dans la Table 1.

Suite au constat de régularité du champ de forces hydrauliques établie au 2.1 nous choisissons d'utiliser un processus gaussien à noyau de covariance tensorisé de Matérn avec le paramètre $\nu=3/2$. Compte tenu de la nature quasi linéaire du modèle de forces hydrauliques nous avons décidé d'adopter une tendance linéaire pour le processus gaussien. L'évaluation des hyperparamètres, variance et longueur de corrélation, repose sur la méthode Leave-One-Out (LOO).

Afin d'évaluer leur performance, nous traçons en Figure 3 la distribution du classique coefficient de prédictivité Q^2 sur un ensemble de test comprenant un ensemble de réalisations différent de l'ensemble d'apprentissage. La valeur moyenne de prédictivité de 0,93 et le minimum de 0,8 obtenus confirment l'efficacité prédictive de ce type de métamodèle. L'écart type de prédiction est également représenté et permet d'appréhender directement les niveaux d'erreur en termes de force, exprimée en Newton.

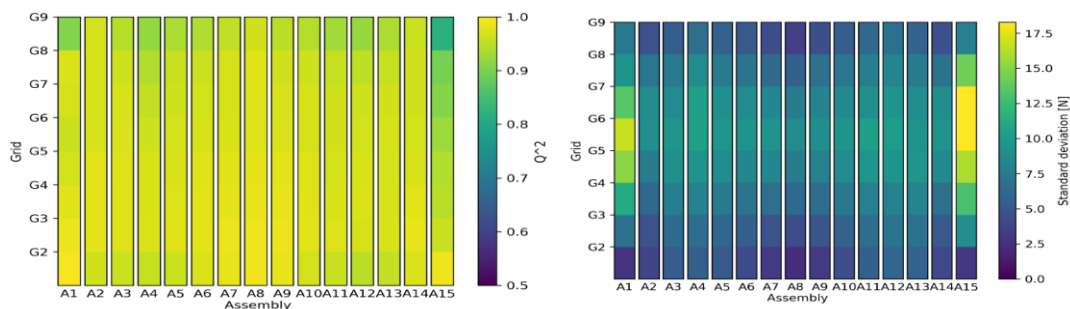


Figure 3 – Distribution spatiale de la qualité de prédiction Q^2 du processus gaussien des forces hydrauliques et écart type de l’erreur en force suivant la position dans la rangée d’assemblages.

2.3. Analyse de sensibilité du modèle hydraulique

L’analyse des indices de Sobol présentée en Figure 4, permet d’éclairer quels sont les paramètres les plus influents sur la variance des efforts hydrauliques. Cette analyse confirme une forte sensibilité aux déformations des assemblages et aux conditions aux limites hydrauliques. On remarque que les sensibilités dépendent de la position considérée, mais surtout, que le paramètre épistémique hl , en jaune ci-dessous, se révèle nettement plus influent qu’attendu pour au moins la moitié des efforts analysés. Elle indique deux leviers de réduction de la variance. Le premier consiste à mieux identifier les conditions aux limites et le second à réduire l’erreur épistémique au travers de la mise en œuvre d’un raffinement méthodologique supplémentaire au sein du modèle hydraulique de référence dans le but de réduire la plage de variation du paramètre hl ou, mieux encore, de pouvoir l’éliminer.

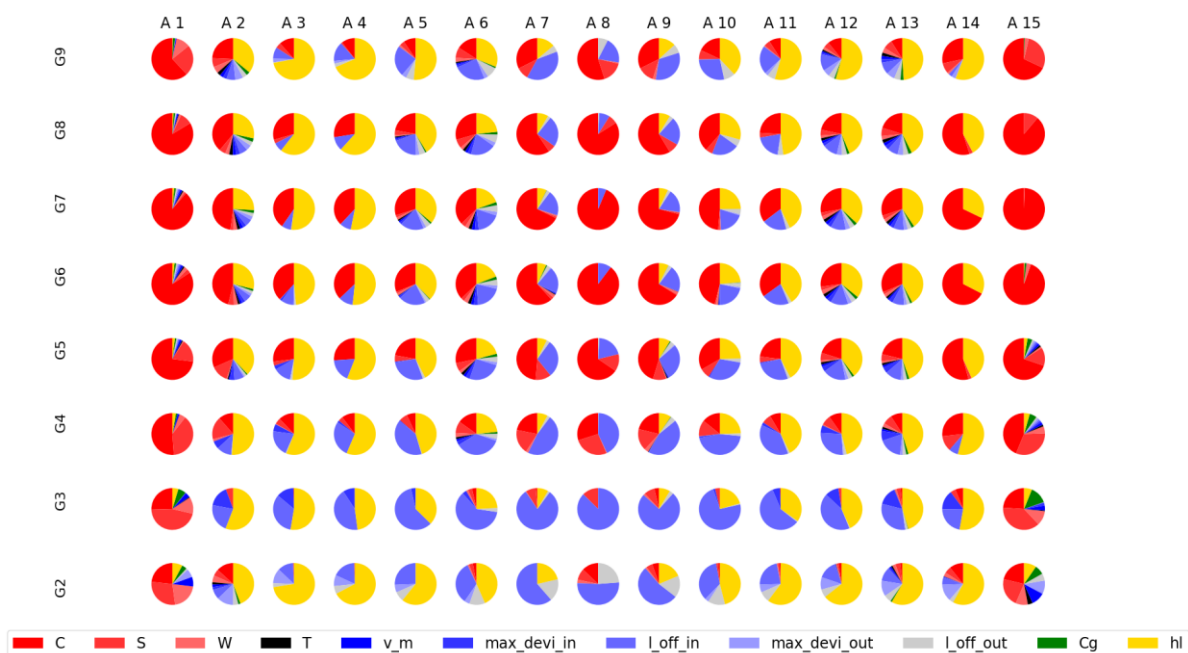


Figure 4 – Distribution spatiale des paramètres de sensibilité de Sobol du premier ordre pour l’évaluation des efforts hydrauliques latéraux sur une rangée de 15 assemblages et 8 altitudes

3. Métamodélisation thermomécanique

3.1. Modèle de référence

Le rôle du modèle thermomécanique [7,8] est de prédire l'évolution de la déformée macroscopique des assemblages tout au long d'un cycle de puissance électrogène, depuis le repositionnement dans le cœur d'assemblages neufs ou déjà irradiés, donc plus ou moins déformés et susceptibles d'entrer en contact avec leurs voisins, jusqu'à l'ouverture du cœur et leur retrait, environ 18 mois plus tard. Entre temps, ceux-ci subissent des dilatations thermiques et une intense irradiation par des neutrons qui conditionne leur croissance (allongement modéré de certains composants) et surtout leur fluage. Les non-linéarités en jeu proviennent des contacts, du frottement interne entre les composants de chaque assemblage et des lois de comportement des matériaux. Les chargements en service sont des historiques de flux neutronique et de champ thermique auxquels s'ajoutent les forces fluides analysées en 2., qui dépendent de la déformée instantanée des assemblages.

3.2. Métamodèle par processus gaussiens enchaînés et algorithme de contact

Après plusieurs tentatives infructueuses de métamodélisation thermomécanique pour prédire la déformation finale d'une rangée d'assemblages, on choisit finalement d'adopter la stratégie suivante :

- Les assemblages étant structurellement identique, on choisit d'apprendre la réponse d'un seul assemblage, quitte à appeler son métamodèle autant de fois qu'il y a d'assemblages.
- On réduit la dimension des déformations à l'aide des 3 modes C, S, W déjà mentionnés et celle des forces hydrauliques grâce à 4 modes orthonormés obtenus par POD.
- 3 métamodèles contenant chacun 3 processus gaussiens pour les 3 modes C, S, W sont successivement enchaînés : le premier prédit la phase avant démarrage du réacteur, le second est appelé plusieurs fois au cours de la phase de puissance (il est exprimé en vitesses de déformations modales à cause du fluage et nécessite une mise à jour des chargements mécaniques), le troisième concerne la phase d'arrêt et d'ouverture du cœur.
- Un algorithme itératif de contact par pénalisation est ajouté afin de forcer la non pénétration des assemblages à chaque pas de temps. Les forces de répulsion participent aux chargements mécaniques instantanés sur le métamodèle au même titre que les forces hydrauliques.
- Le cycle complet de simulation fait donc appel à une boucle en temps qui contient elle-même une boucle spatiale sur les assemblages (appel d'un des trois métamodèles mécaniques) et une boucle de contact qui ajoute les forces répulsives de contact aux efforts hydrauliques courants.

La Figure 5 rend compte de la prédictivité suffisante de chacun des 3 métamodèles successifs.

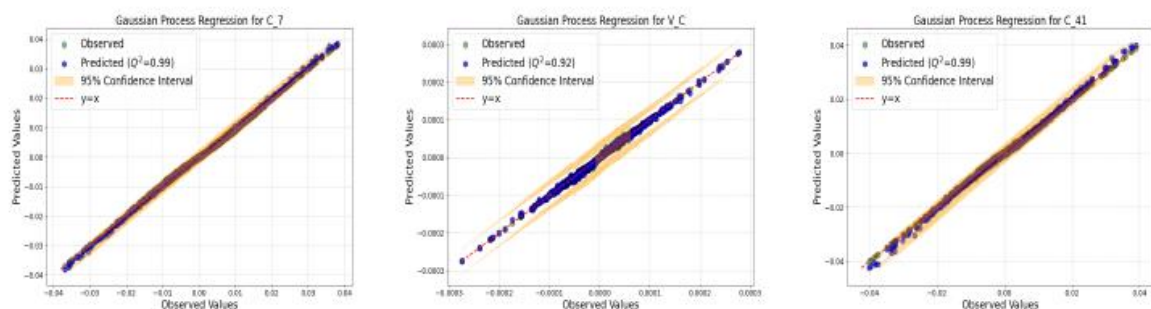


Figure 5 – Comparaison observés-prédits pour chacun des 3 processus gaussiens représentant l'évolution de la déformation d'un unique assemblage avant, pendant et après la phase de puissance du réacteur.

4. Analyse de sensibilité d'un cycle de puissance complet

4.1. Modélisation couplée et paramètres incertains

L'algorithme mentionné au 3.2. permet de coupler à chaque pas de temps à l'aide d'un point fixe un métamodèle mécanique prédisant les déformées, et le métamodèle hydraulique, qui évalue les efforts du fluide sur la structure. Comme dans [6] on aboutit ainsi à une prédiction à moindre coût de la déformée finale de la rangée à l'issue du cycle de puissance puis du retrait des assemblages.

Les paramètres d'entrée sont au nombre d'environ 50. Ils couvrent les déformations initiales (mesurées à une incertitude près, cf. Figure 6), les deux principaux paramètres de fluage et de croissance et les 7 derniers paramètres hydrauliques de la Table 1. Les autres paramètres sont fixés à leurs valeurs standards suite aux conclusions de l'analyse de sensibilité.

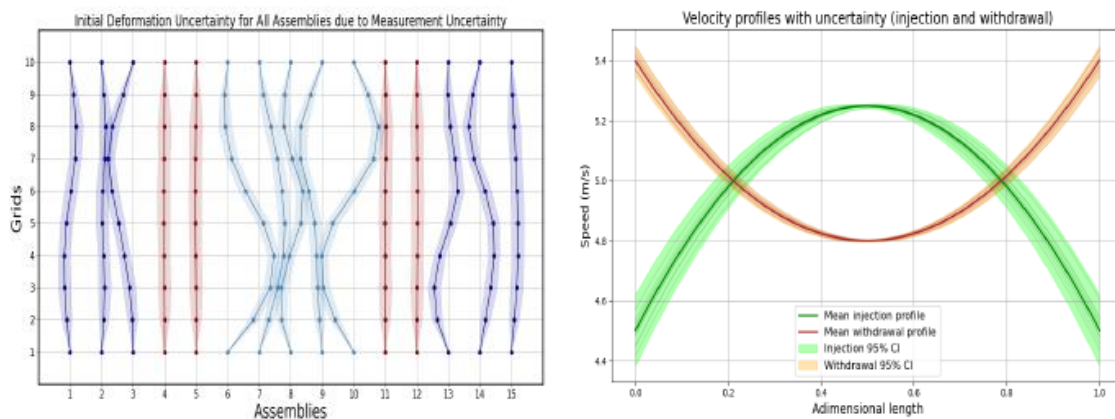


Figure 6 – Illustration de l'incertitude des mesures des déformations initiales et celle des profils de vitesse.

Dans cette analyse, nous considérons une configuration particulière de 5 assemblages « usés » (commençant leur cycle3) au milieu de la rangée, 6 assemblages cycle2 positionnés symétriquement à l'extérieur et enfin 4 assemblages neufs (cycle1) dans les régions intermédiaires (cf. figure 6).

4.2. Résultats du plan d'expérience et sensibilités

Une première série de 2000 prédictions sont réalisées à l'aide des métamodèles couplés et représentées statistiquement dans les Figures 8 à 10, respectivement pour les assemblages ayant vécu leur 1^{er}, second ou troisième cycle d'irradiation. La Figure 7 indique quant à elle le résultat de la simulation nominale. Une graduation correspond à 2mm de flèche latérale, La flèche maximale est donc ci-dessous de l'ordre de 10mm pour un assemblage de plus de 4m de hauteur.

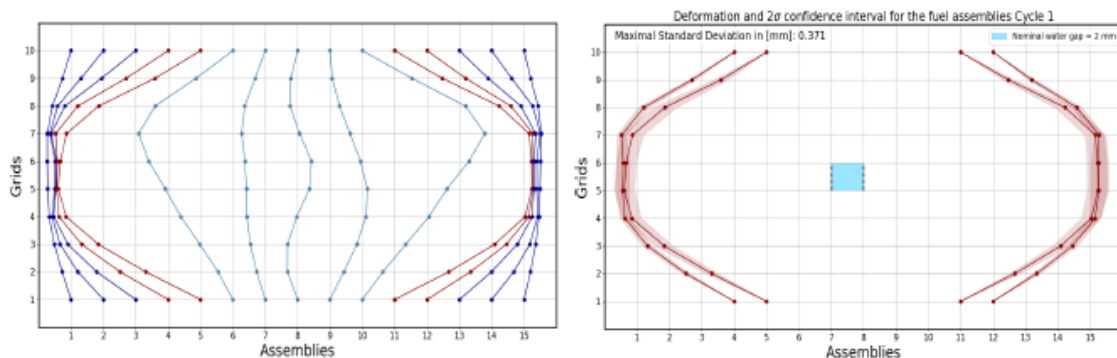


Figure 7 – Résultat nominal du couplage.

Figure 8 – Incertitude pour les assemblages en cycle 1

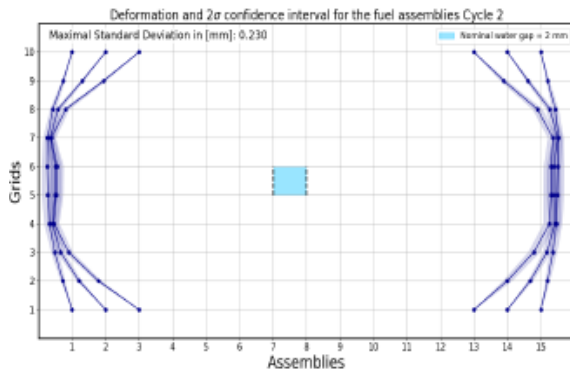


Figure 9 – Incertitude pour les assemblages en cycle 2

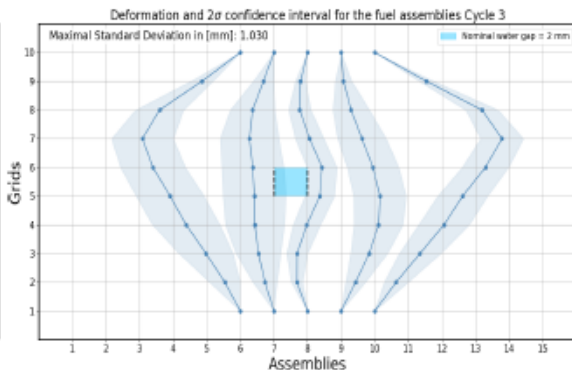


Figure 10 – Incertitude en cycle 3

L'ensemble de ces 2000 résultats obtenus à l'aide des processus gaussiens couplés reste dans le voisinage de la solution de référence, c'est-à-dire qu'aucun branchement de solution n'est apparu. On remarquera qu'une position centrale dans le cœur associée à une ancienneté marquée influence significativement sur l'incertitude de la flèche prédite.

La figure 11 permet ensuite d'identifier dans le cas particulier de cette étude les paramètres les plus influents sur la variance modale (modes C, S et W en ordonnée) en fin de cycle suivant le numéro de cycle de l'assemblage. On constate logiquement que le paramètre épistémique h_l (en violet) affecte encore une fois de manière importante la variance des résultats. De même, les conditions aux limites hydrauliques (en bleu) ont une influence majeure sur le résultat final.

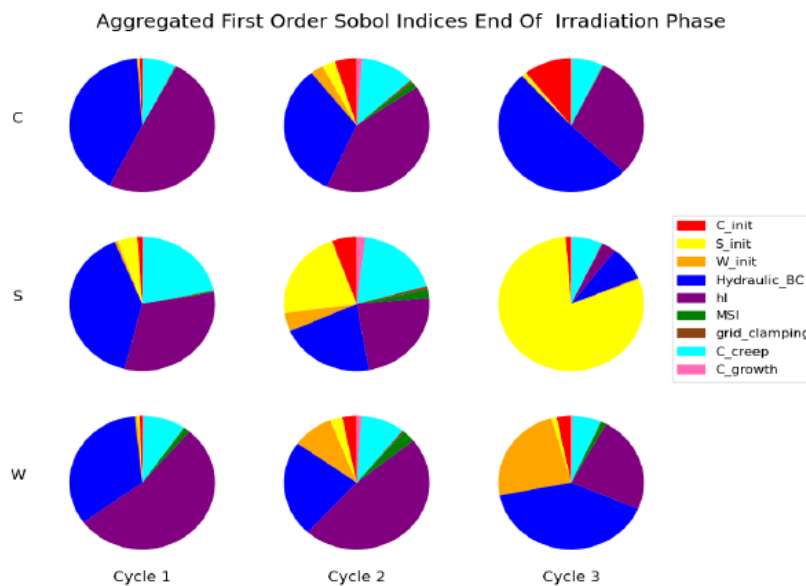


Figure 11 – Indices de Sobol agrégés du premier ordre de l'étude courante

Au sein de cette incertitude il est possible d'évaluer la part qui revient aux processus gaussiens couplés [9]. La figure 12 montre que celle-ci est au maximum d'un quart de millimètre dans ce cas et reste faible devant l'incertitude totale.

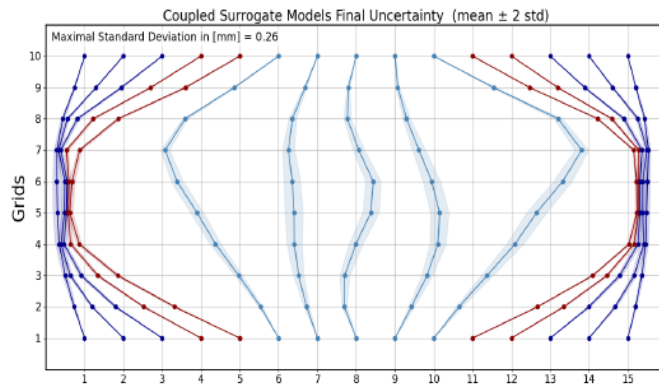


Figure 12 – Incertitude associée uniquement à l'utilisation des processus gaussiens couplés

5. Conclusions

Ce travail pose les bases d'une méthodologie d'analyse des déformations progressives des assemblages combustibles au sein des réacteurs à eau pressurisée et ouvre la voie à des analyses plus ciblées, telles que l'influence des hypothèses de gestion du combustible. A cette fin, elle montre en particulier qu'il est possible de définir des métamodèles par processus gaussiens aussi bien pour l'évaluation des efforts hydrauliques que pour l'évolution de la flèche des assemblages avant, pendant et après l'irradiation. Leur couplage a été réalisé et génère une incertitude propre dont la mesure reste au moins dix fois plus faible que l'incertitude associée à tous les paramètres. Enfin, elle quantifie l'influence des différents paramètres, tant stochastiques qu'épistémiques, dans la variance de prédiction. Nous en déduisons des pistes prioritaires d'amélioration des modèles qui concernent en premier lieu le paramètre h_l et la connaissance des profils de vitesse en entrée et sortie du cœur.

Références

- [1] Abboud, A., de Lambert, S., Garnier, J., Leturcq, B., and Lamorte, N., 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*, 443 :114259, 2025.
- [2] Abboud, A., Garnier, J., Leturcq, B., Pacull, J., Fandeur, O., and de Lambert, S., Uncertainty quantification of fuel assembly bow in pressurized water reactor through a thermomechanical simulation, In *Proceedings of conference M&C 2025*, 29 pp. 1612–1621, Denver, CO, April 2025. American Nuclear Society.
- [3] Abboud, I A., Garnier, J., Leturcq, B., Lamorte, N., and de Lambert, S., Towards uncertainty quantification: Efficient surrogate models in coupled fluid-structure interaction for fuel assembly bow, In *Proceedings of the 19th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Analysis (PSA 2025)*, pp. 942–951, Chicago, IL, June 2025. American Nuclear Society.
- [4] De Lambert, S., Cardolaccia, J., Faucher, V., Thomine, O., Leturcq, B., and Campioni, G., Semi-analytical modeling of the flow redistribution upstream from the mixing grids in a context of nuclear fuel assembly bow, *Nuclear Engineering and Design*, p. 110940, 2020.
- [5] De Lambert, S., Contribution to the multiphysical analysis of fuel assembly bow, PhD thesis, Université Paris-Saclay, 2021. Thèse de doctorat. Identifiant : 2021UPAST035.
- [6] Berthelin G, Dubreuil S, Salaün M, Bartoli N, Gogu C. Disciplinary proper orthogonal decomposition and interpolation for the resolution of parameterized multidisciplinary analysis. *Int J Numer Methods Eng.* 2022; 123(15): 3594–3626. doi:10.1002/nme.6981.
- [7] Wanninger, A., Mechanical analysis of the bow deformation of fuel assemblies in a pressurized water reactor core, Doctoral dissertation, Technische Universität München, Munich, Germany, July 2018.
- [8] Leturcq B., Réduction de modèles thermomécaniques non-linéaires pour l'évaluation des déformations d'un cœur de réacteur nucléaire, Thèse, Institut Polytechnique de Paris, mai 2022.
- [9] Abboud, A., Quantification d'incertitudes associée à la déformation d'assemblages combustibles au sein d'un réacteur à eau pressurisée. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Paris, Ecole Polytechnique, 2025.