

Sujet de stage : Amélioration par Machine Learning de la quantification d'incertitudes pour la simulation thermohydraulique de transitoires accidentels à seuil

Durée : 5/6 mois

Démarrage : Mars/Avril 2024

Lieu : CEA-Saclay, site de Saclay

Laboratoire d'accueil : LIAD (Laboratoire d'Intelligence Artificielle et de science des Données)

Futurs encadrants ou contacts :

Guillaume Damblin (DM2S/SGLS), Raksmey Nop (DM2S/STMF), Amandine Marrel (DER/SESI)

Diplôme préparé : Bac+5 – Master 2 / Diplôme École d'ingénieurs

Possibilité de poursuite en thèse : oui

Mots-clés : simulation numérique, accident de réactivité, quantification d'incertitudes, Machine Learning, transitoires à seuil.

Contexte et enjeux

Les réacteurs expérimentaux de type piscine sont utilisés pour des tests de matériaux sous irradiation ou encore pour la production de radio-isotopes pour l'industrie et la médecine. En cas d'insertion accidentelle de réactivité (RIA) dans le cœur d'un tel réacteur, la puissance générée peut augmenter de manière exponentielle, avec un temps caractéristique de l'ordre de la dizaine de millisecondes. Le réacteur va alors passer séquentiellement par différents régimes de transferts thermiques : transfert thermique monophasique, déclenchement de l'ébullition puis ébullition nucléée. Si l'excursion de puissance n'est pas suffisamment atténuée par les contre-réactions neutroniques, la crise d'ébullition peut survenir, menant à la transition vers le régime d'ébullition en film. Caractérisé par une forte dégradation des transferts thermiques et d'une partie des contre-réactions neutroniques, ce régime est à même d'engendrer une fonte du combustible et par la suite une réaction chimique explosive.

La simulation numérique de ce scénario accidentel est réalisée au CEA avec le code de calcul de référence, nommé CATHARE (Code Avancé de ThermoHydraulique pour les Accidents de Réacteurs à Eau). Les modèles physiques disponibles au sein du code CATHARE ont été développés pour convenir à la nature transitoire rapide de l'accident RIA dans des conditions thermodynamiques spécifiques des réacteurs piscine. Ensuite, dans le cadre d'un usage de la simulation pour les études de sûreté nucléaire, les incertitudes et la sensibilité de la simulation à chacune des variables physiques du scénario accidentel doivent être quantifiées. Le travail de stage portera sur cette seconde étape.

Objectifs

Dans le domaine de l'énergie nucléaire et plus particulièrement celui de la sûreté, le paradigme consistant à associer une simulation la plus fidèle possible de l'accident avec la maîtrise des incertitudes associées aux grandeurs d'intérêt calculées est appelé BEPU (Best Estimate Plus Uncertainty). Ce stage permettra de s'en approprier les principes, puis de proposer des adaptations rendues nécessaires par les spécificités de l'accident RIA. Pour ce faire, le/la stagiaire s'appuiera sur

des méthodes issues du champ des probabilités et de l'apprentissage statistique qu'il/elle devra appliquer aux résultats de simulation CATHARE.

Un objectif préliminaire confié au stagiaire consistera en la prise en main de la littérature scientifique liée, à la fois au scénario accidentel RIA sur des réacteurs de type piscine, et aux méthodes probabilistes de traitement des incertitudes appliquées dans la littérature sur ce type de scénario. En particulier, le/la stagiaire s'appuiera sur des travaux préliminaires effectués au CEA avec le code CATHARE dont l'objectif était l'identification des variables d'entrée prédominantes pour garantir l'intégrité du cœur du réacteur. Ces travaux ont permis de mieux comprendre la grande complexité de la simulation transitoire, caractérisée par des phénomènes physiques de « bifurcation ». Une bifurcation désigne le passage soudain de la simulation d'un régime de transfert thermique à un autre (ex : ébullition nucléée vers ébullition en film) en fonction des conditions expérimentales neutroniques et thermohydraulique du scénario (ex : réactivité, débit) et des incertitudes de modélisation physique (ex : échanges thermique, critères de changement de régime, etc.), sans que l'on puisse déterminer *a priori* les combinaisons de variables qui en sont à l'origine. Le stage se concentrera alors sur la réalisation des deux tâches suivantes :

1. L'identification, d'une part, des variables entraînant ces bifurcations via des méthodes d'analyse de sensibilité dédiées à des variables d'entrée probabilistes et, d'autre part, des configurations pénalisantes de ces variables pour la sûreté du réacteur (le terme « pénalisant » se rapportant ici aux configurations critiques pour la tenue du cœur du réacteur).
2. L'estimation de la probabilité que l'intégrité du cœur du réacteur soit garantie, en fonction des conditions expérimentales. Pour cela, des méthodes d'apprentissage automatique de classification et de régression (basées par exemple sur les processus aléatoires gaussiens) seront utilisées.

Références en lien avec le sujet :

- Marrel, A. & Chabridon, V.: Statistical developments for target and conditional sensitivity analysis: application on safety studies for nuclear reactor. *Reliability Engineering and System Safety*, 214, 2021.
- Nickisch, H. & Rasmussen, C.E.: Approximations for binary Gaussian process classification. *J. Mach. Learn. Res.* 9, 2035–2078, 2008.
- Bachoc, F., Helbert, C. & Picheny, V.: Gaussian process optimization with failures: classification and convergence proof. *J Glob Optim* 78, 483–506, 2020.
- Marrel, A., Iooss, B & Chabridon, V.: Statistical identification of penalizing configurations in high-dimensional thermal-hydraulic numerical experiments: the ICSCREAM methodology. *Nuclear Sciences and Engineering*, 196:301-321, 2022.

Environnement de travail

Le stage s'effectuera au sein du Laboratoire d'Intelligence Artificielle et de science des Données (LIAD) de la Direction des Energies (DES) du CEA à Saclay, en collaboration avec la DES du CEA de Cadarache (Laboratoire d'Etudes et de Modélisation des Systèmes).

Compétences requises ou souhaitées

Probabilités/statistiques, Machine Learning, Mécanique des fluides, Transferts thermiques, programmation sous Python, attrait pour les applications physiques. Une expérience avec l'environnement UNIX et une connaissance de l'ingénierie nucléaire seraient appréciées.

Profil recherché

Etudiant(e) de niveau bac+5 en école d'ingénieur généraliste ou Master 2 avec un goût prononcé pour les probabilités et statistiques, le Machine Learning et la modélisation des systèmes thermohydrauliques complexes en mécanique des fluides.

Contacts

Guillaume Damblin guillaume.damblin@cea.fr
Raksmey Nop raksmey.nop@cea.fr
Amandine Marrel amandine.marrel@cea.fr