

## PROPOSITION de SUJET de THESE pour 2019

### **Développement d'une méthodologie statistique pour l'analyse et l'assimilation des mesures locales de flux de neutrons, en support à la validation des nappes de puissances dans les petits cœurs de réacteur à eau**

Sujet proposé par le CEA/Direction de l'Energie Nucléaire

**Encadrants CEA :** Thomas BONACCORSI (CEA Cadarache)

**Directeurs de thèse :** Amandine MARREL (CEA Cadarache), Fabrice GAMBOA (Université de Toulouse).

**Lieu :** CEA de Cadarache, Laboratoire de Projets Nucléaires du Département d'Etudes des Réacteurs (DER/SPRC/LPN)

#### Résumé

Le tout nouveau réacteur d'essai RES dispose d'une Instrumentation In-Core (IIC) permettant de cartographier la nappe de flux expérimentale d'un cœur à eau de petite taille, par des mesures locales de flux à proximité des éléments combustibles. En parallèle de ces résultats expérimentaux, on dispose d'un simulateur numérique permettant de modéliser l'instrumentation du RES et prédire les nappes de flux. Lors de l'interprétation de ces essais du RES, il est donc possible de comparer les nappes de puissance prédites par le simulateur aux mesures locales. S'inscrivant dans une démarche de validation des outils de simulation, cette confrontation des résultats simulés et expérimentaux peut permettre ainsi de calibrer certains paramètres (incertains) de la simulation pour reproduire plus fidèlement l'expérience mais aussi d'estimer une éventuelle erreur résiduelle. Pour cela, une démarche probabiliste basée sur différents outils statistiques (analyse de sensibilité, métamodèle, optimisation sous incertitudes) pourra être utilisée afin de prendre en compte les différentes sources d'incertitudes.

Par ailleurs, les mesures locales étant parcellaires, elles ne décrivent pas la distribution de flux dans la continuité de l'espace des phases et notamment au sein même des matériaux combustibles (là où la donnée d'intérêt doit être particulièrement bien caractérisée). Ainsi, il est nécessaire de transposer les observations réalisées à proximité du combustible vers le combustible. Le simulateur, une fois calibré et validé, combiné à des méthodes géostatistiques pourra être utilisé pour réaliser cette transposition.

**L'objectif final de la thèse étant de proposer une méthode d'analyse des données de nappe de puissance locale pour la validation des outils de simulation de neutronique et l'amélioration des capacités de prédiction. La méthodologie développée s'appuiera et combinera habilement plusieurs outils statistiques avancés et adaptés à la problématique.**

## Sujet détaillé

Le Laboratoire de Projets Nucléaires (LPN) développe et valide des Outils de Calculs Scientifiques (OCS) de neutronique (ou formulaire de calculs de neutronique) destinés à être utilisés pour les études industrielles de conception et de sûreté des réacteurs à eau de petites tailles.

L'OCS de neutronique NARVAL consiste en un ensemble de procédures dédiées faisant appel aux codes de calcul APOLLO2, CRONOS2 et TRIPOLI4. S'adossant à son dossier de validation, à une base de données technologique ainsi qu'à une bibliothèque de données nucléaires, NARVAL permet de réaliser l'ensemble des calculs de neutroniques nécessaires aux études de conception et de sûreté de réacteurs à eau de petites tailles. Afin de mener à bien ces études, il existe une base de données expérimentale permettant de garantir un domaine de validité maîtrisé de cet OCS, par des comparaisons entre les modèles numériques et des expériences. Tout prochainement, cette base de données expérimentale va s'enrichir des essais réalisés dans le RES, réacteur d'essai dédiés à la validation de NARVAL.

Parmi ses moyens d'essais, le RES dispose d'une Instrumentation In-Core (IIC) permettant de cartographier la nappe de flux expérimentale en trois dimensions, par des mesures locales de flux à proximité des éléments combustibles. Lors de l'interprétation de ces essais, il est relativement facile de confronter cette nappe de mesures locales à des résultats de calculs NARVAL modélisant l'instrumentation du RES.

Dans le cadre d'une démarche de validation des OCS, une comparaison rigoureuse des résultats simulés et expérimentaux doit être réalisée en tenant compte des différentes sources d'incertitudes, qu'elles soient expérimentales, technologiques ou relatives aux données nucléaires (variables en entrée de l'OCS). Pour cela, on propose d'utiliser une démarche probabiliste [5] où les paramètres incertains sont considérés comme des variables aléatoires caractérisées par leur mesure de probabilité (densité de probabilité dans le cas de variables continues). Dans ce cadre, des outils statistiques s'appuyant sur des simulations de type Monte Carlo (simulations de l'OCS) peuvent être utilisés afin de :

- **réaliser une analyse de sensibilité** afin d'identifier les paramètres les plus influents sur les résultats de simulations [6];
- **propager les incertitudes en entrée du simulateur** pour évaluer leur impact sur les sorties prédites [5];
- **comparer qualitativement et quantitativement les résultats simulés avec les données expérimentales** ;
- **calibrer les paramètres de la simulation** pour reproduire le plus fidèlement possible l'expérience (problèmes d'optimisation sous incertitudes) [7] ;
- **estimer une éventuelle erreur de modélisation résiduelle**. Cette erreur pourra être approximée par un modèle statistique de type métamodèle [8].

Par ailleurs, les mesures locales étant parcellaires, elles ne décrivent pas la distribution de flux dans la continuité de l'espace des phases et notamment au sein même des matériaux combustibles (là où la donnée d'intérêt doit être particulièrement bien caractérisée). Ainsi, il est nécessaire de **transposer les observations réalisées à proximité du combustible vers le combustible**. A partir du

simulateur calibré et validé, plusieurs méthodes de reconstruction de la distribution de puissance mesurée pourront être étudiées : méthode dite « P/A » (pour « puissance / activité »), classiquement utilisée dans les REP électrogènes [1], qui s'appuie sur des résultats de calculs pour déduire la structure fine du flux et les rapports entre puissances (P) et activités (A) ; méthodes de géostatistiques [2] pour réaliser des estimations des incertitudes en chaque point de l'espace ; méthodes de transpositions par calculs de représentativités [3] [4] basées sur l'estimation de vecteurs de sensibilités ; autres méthodes éventuelles issues de l'étude bibliographique.

Ainsi, l'ensemble des travaux de thèse seront exploités pour interpréter les essais réalisés avec l'Instrumentation In-Core du RES et contribueront à la validation expérimentale des nappes de puissance prédites par l'OCS NARVAL.

### Références

- [1] J. –L. Mourlevat, Instrumentation interne des réacteurs, Techniques de l'Ingénieur (2001).
- [2] G. Simonini, Qualification du calcul de la puissance des cœurs de réacteurs à plaques : développement et application d'une nouvelles approche géostatistique, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales (2012).
- [3] T. Frosio, T. Bonaccorsi, P. Blaise, Fission yields and cross section uncertainty propagation in Boltzmann/Bateman coupled problems: Global and local parameters analysis with a focus on MTR, Annals of Nuclear Energy, (98) : p43-60 (2015).
- [4] Orlov, V.V.; Van'Kov, A.A.; Voropaev, A.I.; Kazanskij, Yu.A.; Matveev, V.I.; Murogov, Khodarev ; Problems of fast reactor physics related to breeding ; Atomic Energy Review, v. 18(4) p. 989-1077 (1980).
- [5] E. de Rocquigny, N. Devictor, and S. Tarantola (Editors), Uncertainty in industrial practice, Wiley (2008).
- [6] B. Iooss, Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques. Journal de la Société Française de Statistique, 152:1–23 (2011).
- [7] M. Carmassi, P. Barbillon, M. Keller Merlin, E. Parent and M. Chiodetti. Bayesian calibration of a numerical code for prediction, working paper, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01677167> (2018).
- [8] M. De Lozzo. Substitution de modèle et approche multifidélité en expérimentation numérique, Journal de la Société Française de Statistique, 156(3), p. 21–55 (2015).

### Profil du candidat

**BAC +5** (Diplôme d'ingénieur ou Master 2), **spécialisé en Mathématiques appliquées, Statistiques et probabilités**, avec un intérêt pour les applications physiques et industrielles.

### Contact

**Thomas BONACCORSI – [thomas.bonaccorsi\[at\]cea.fr](mailto:thomas.bonaccorsi@cea.fr)**