

Sujet de stage de fin d'études / M2 – Année universitaire 2021/2022

Traitement des incertitudes pour la simulation numérique du colmatage des générateurs de vapeur

MOTS-CLÉS :

Traitement des incertitudes – Calage de paramètres – Analyse de sensibilité – Apprentissage statistique / Machine learning – Approches hybrides

CONTEXTE GÉNÉRAL :

Au sein d'EDF R&D, le **département PRISME** (Performance, Risque Industriel et Surveillance pour la Maintenance et l'Exploitation) a pour mission de proposer des solutions innovantes pour une exploitation plus performante des différents moyens de production du groupe EDF : maîtrise des risques, amélioration de la sûreté, optimisation des performances technico-économiques, maîtrise de la durée de vie des installations et des composants.

La **thématique du "traitement des incertitudes"**¹ ("*uncertainty quantification*"²) désigne l'ensemble des méthodes probabilistes et statistiques dédiées à la modélisation des incertitudes, à leur quantification et à leur propagation dans les codes de simulation numérique. Portée par le **projet VIGIE** (Validation et Gestion des Incertitudes des Expériences numériques) et diffusée à travers le développement d'une plateforme dédiée (**logiciel OpenTURNS**³), cette thématique fait l'objet de travaux de recherche au sein du département PRISME et joue un rôle central et transversal au sein de nombreuses activités du groupe EDF.

PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE :

Les systèmes de production d'électricité (nucléaires, hydrauliques, éoliens, etc.) sont généralement des systèmes complexes constitués de composants dont le suivi et la maintenance sont des enjeux cruciaux en termes de sûreté et de gestion des coûts. Ces composants sont soumis à de nombreuses sources d'aléas, tant par leur fabrication initiale (conception, matériaux, etc.) que durant leur exploitation (aléas naturels, variations dues aux différents régimes de production, etc.).

Les outils de simulation numérique sont généralement adaptés à la modélisation et la prévision du comportement nominal des systèmes. Dès lors, ils peuvent être rendus plus robustes par la prise en compte des diverses sources d'incertitudes. Parfois, les outils numériques peuvent servir, non pas à capturer uniquement le comportement du système, mais aussi à modéliser, simuler et prévoir l'évolution de phénomènes de dégradation complexes. Dans ce contexte, la prise en compte des incertitudes est d'autant plus cruciale que les enjeux sont associés à une gestion des risques (p.ex., sous-performance, voire défaillance potentielle du système).

Ce stage s'inscrit dans le contexte particulier de l'étude du phénomène de **colmatage des Générateurs de Vapeur (GV)**⁴ des centrales nucléaires. Le colmatage est un phénomène de dépôt de bourrelets de magnétite obstruant le passage du fluide secondaire dans les passages foliés des plaques entretoises. Ce phénomène est décrit à travers un couplage physico-chimique complexe. La simulation de la cinétique de dépôt est réalisée à l'aide d'une chaîne de calcul numérique (**chaîne THYC-Puffer-DEPOTHYC**) développée à EDF R&D, au sein du département MFEE (**Mécanique des Fluides, Énergie et Environnement**) et s'appuyant sur des travaux de recherche antérieurs^{5,6}. Cette chaîne de simulation prend en entrée des grandeurs physiques et chimiques (p. ex., fractions massiques et diamètres de particules en suspension, température, etc.) et simule en sortie l'évolution du taux de colmatage pour un GV donné.

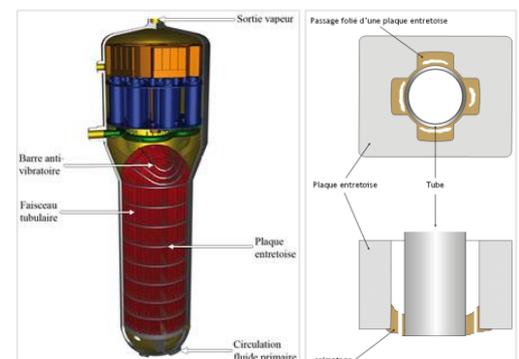


Figure 1 - Illustration d'une coupe interne d'un GV : tubes, plaques entretoises et passages foliés (source : IRSN³).

OBJECTIFS DU STAGE :

Pour qualifier un modèle de simulation numérique, supposé reproduire un comportement physique particulier, une étape dite de "**calage**" est souvent nécessaire. Cette étape vise à améliorer l'accord du modèle avec des observations de référence par ajustement des paramètres implémentés dans ce dernier. En d'autres termes, le but est de trouver les valeurs des paramètres qui minimisent l'écart entre les observations (mesures) et les prévisions numériques, sous les hypothèses d'incertitudes choisies au préalable.

De manière générale, le dialogue entre simulation numérique et données réelles (p. ex., données expérimentales, d'exploitation, de suivi, de maintenance ou mesures de dégradation in situ) est un enjeu crucial. Les connaissances apportées par l'un et l'autre sont complémentaires et doivent se nourrir mutuellement. Si le calage est une sorte de "premier pas" des données vers la simulation, des stratégies plus ambitieuses à

¹ De Rocquigny E., Devictor N., Tarantola S. (Eds.). "Uncertainty in Industrial Practice: A Guide to Quantitative Uncertainty Management", Wiley, 2008.

² Ghanem R., Higdon D., Owhadi H. (Eds.). "Handbook of Uncertainty Quantification", Springer, 2017.

³ OpenTURNS: An Open source Initiative for the Treatment of Uncertainties, Risks'N Statistics (www.openturns.org).

⁴ https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/generateurs-vapeur/colmatage/Pages/sommaire.aspx

⁵ Prusek T. (2012) "Modélisation et simulation numérique du colmatage à l'échelle du sous-canal dans les générateurs de vapeur", Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université.

⁶ Girard S. (2012) "Diagnostic du colmatage des générateurs de vapeur à l'aide de modèles physiques et statistiques", Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

base de couplage (**approches dites "hybrides"**) entre modèles numériques et apprentissage statistique ("**machine learning**") sont envisagées comme pistes de ce stage (cf. sujet de thèse envisagé à la suite du stage).

Ce stage se place donc à **l'intersection entre le traitement des incertitudes, le calage et l'apprentissage statistique**.

L'enjeu de ce stage est la mise en place, dans un premier temps, d'une stratégie de traitement des incertitudes (modélisation, quantification, propagation, analyse de sensibilité, calage) dans la chaîne de calculs THYC-Puffer-DEPOTHYC en s'appuyant sur le logiciel OpenTURNS. Cette étude reposera sur des travaux antérieurs et sur une expertise partagée entre les ingénieurs-chercheurs des départements PRISME et MFEE.

Dans le contexte d'une chaîne de simulation coûteuse, l'utilisation d'un métamodèle (p. ex., processus gaussiens ou krigeage, chaos polynomial, réseau de neurones) permettra ensuite la mise en œuvre pratique des autres phases de l'étude (notamment, le calage). Cette étape sera donc nécessaire et formera le cœur du stage.

PLANNING PRÉVISIONNEL :

Ce stage s'articulera selon plusieurs phases (qui pourront se chevaucher) :

- 1) Étude bibliographique : appropriation de la problématique physique (colmatage), état de l'art sur les méthodes de traitement des incertitudes dans les chaînes de calculs (quantification, propagation, utilisation de métamodèles, analyse de sensibilité, calage)
- 2) Prise en main de la chaîne THYC-Puffer-DEPOTHYC et couplage avec OpenTURNS pour la réalisation des étapes standard de traitement des incertitudes (quantification, propagation, analyse de sensibilité)
- 3) Construction d'un métamodèle et calage de la chaîne de simulation vis-à-vis de mesures de colmatage
- 4) Validation de la démarche.

En fonction de l'avancement du stage et de l'appétence du stagiaire pour des aspects plutôt théoriques ou numériques, des études complémentaires et/ou l'utilisation de stratégies avancées pourront être envisagées.

PROFILS :

Étudiant.e de M2 (mathématiques appliquées / probabilités-statistiques / modélisation & simulation numérique) ou d'écoles d'ingénieur.e.s (généralistes avec majeure en mathématiques appliquées / probabilités-statistiques).

COMPÉTENCES REQUISES :

- Solides compétences en probabilités, statistiques et analyse numérique
- Goût pour la programmation (Python, R, C++)
- Aisance dans la communication, orale et écrite, en Français et/ou en Anglais

APTITUDES PERSONNELLES SOUHAITÉES :

- Goût pour la recherche (méthodologies, concepts mathématiques, applications industrielles)
- Ouverture d'esprit, curiosité et capacité à être autonome

CONTACTS (ENCADRANTS INDUSTRIELS) :

Vincent Chabridon (vincent.chabridon@edf.fr), Emmanuel Remy (emmanuel.remy@edf.fr), Michaël Baudin (michael.baudin@edf.fr), Qingqing Feng (qingqing.feng@edf.fr)

DURÉE ENVISAGÉE :

6 mois à compter de février, mars ou avril 2022

PERSPECTIVES DU STAGE (POURSUITE EN THÈSE) :

Un sujet de thèse ("pronostic hybride à l'aide de codes de simulation et de modèles statistiques") devrait être ouvert à la suite du stage. Il élargira le périmètre du stage aux approches de machine learning, en visant à développer une démarche d'agrégation des résultats issus de la chaîne THYC-Puffer-DEPOTHYC à ceux obtenus par un modèle statistique d'évolution du taux de colmatage.

LIEU :

EDF R&D – EDF Lab Chatou
Département PRISME (Performance, Risque Industriel et Surveillance pour la Maintenance et l'Exploitation)
Groupe P17 GAIA (Gestion d'Actifs, Incertitudes et Apprentissage statistique)
6 Quai Watier, 78 401, Chatou, France