



## Sujet de Thèse de Doctorat (Ensam Lille) Partenaire industriel EDF R&D

### Développement de méthodes adaptées à la modélisation de défauts complexes en Evaluation Non Destructive par Courants de Foucault

Contacts : Stéphane Clénet (Arts et Métiers–L2EP) [stephane.clenet@ensam.eu](mailto:stephane.clenet@ensam.eu)  
Jean-Pierre Ducreux (EDF R&D) [jean-pierre.ducreux@edf.fr](mailto:jean-pierre.ducreux@edf.fr)

#### Contexte

Depuis plusieurs années, le calcul de champs électromagnétiques est utilisé dans l'industrie pour analyser le fonctionnement des dispositifs électromagnétiques (alternateurs, moteurs, transformateurs, examens non destructifs par courants de Foucault, ...). L'étude de ces dispositifs électromagnétiques demande, notamment en vue d'un diagnostic précis, une très grande finesse de modélisation. Pour cela, les équations de Maxwell en électromagnétisme sont résolues à l'aide de méthodes numériques, comme la méthode des Éléments Finis (EF), pour obtenir des grandeurs d'intérêt locales ou globales. Dans le cas de l'Evaluation Non Destructive par Courants de Foucault (END-CF), le modèle EF permet de lier la forme du défaut au signal de sortie du capteur en fonction de sa trajectoire et ainsi de déterminer une « signature » pour le défaut. En exécutant le modèle EF pour différentes formes de défaut, il est possible de constituer une base de données de signatures. Il est ainsi possible en appliquant des méthodes inverses de remonter à la forme du défaut à partir du signal de sortie du capteur et donc d'évaluer la dangerosité du défaut.

La performance des outils de simulation EF donne aujourd'hui accès à une finesse de résolution spatiale qui est inférieure aux tolérances géométriques de fabrication du matériel. Ainsi, il devient pertinent de concevoir la *géométrie réelle* du dispositif à étudier comme l'une des variantes possibles de sa *géométrie nominale*. En général, cette variante doit être considérée comme incertaine dans la mesure où l'on ne dispose pas d'un relevé géométrique suffisamment précis de la configuration réelle. Il en est de même des paramètres décrivant le comportement électromagnétique des matériaux (conductivité électrique, perméabilité magnétique...) qui ne sont pas toujours accessibles à la mesure. Enfin, le positionnement du capteur par rapport au défaut n'est pas parfaitement contrôlé et reste incertain. Dans le cas de dispositifs industriels en Evaluation Non Destructive par Courants de Foucault (END-CF), il est important de pouvoir évaluer l'influence de ces incertitudes sur la signature du défaut de manière à mieux contrôler la précision de la mesure.

Par ailleurs, la forme d'une fissure est a priori incertaine et les paramètres caractérisant sa forme sont probabilistes. La distribution de ces valeurs est alors fournie par un modèle de nature

probabiliste (éventuellement physique) ou, plus directement, par une statistique de leur évolution historique. Il faut donc coupler ces modèles de description d'évaluation de fissures au modèle EF décrivant le process de END-CF. Il faudra donc que le modèle EF soit capable de prendre en compte des défauts de forme complexe tout en évitant un remaillage source de bruit numérique perturbant la modèle EF stochastique.

La modélisation du process de END-CF ainsi que la prise en compte de défauts complexes amène à la résolution numérique d'un modèle EF stochastique. La résolution d'un tel problème en électromagnétisme basse fréquence a fait l'objet de nombreux travaux dans le cadre du laboratoire commun LAMEL entre EdF R&D et le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (Beddek 2012), (Abdelli et al, 2019). Aujourd'hui, il est envisageable de proposer une démarche généraliste pour traiter une plus large gamme de problématiques industrielles.

### **Objectif de la thèse**

L'objectif est de développer les outils numériques permettant de résoudre un modèle stochastique dans le cas de l'END-CF. Ces outils seront utilisés pour développer un modèle permettant de vérifier la contrôlabilité par Courant de Foucault de défauts complexes dans les composants du parc nucléaire et d'identifier les difficultés liées à la détection et à la caractérisation de ces défauts. Les méthodes développées permettront de minimiser l'erreur de dimensionnement due aux incertitudes matériaux et géométriques intrinsèques. Elles permettront également de se positionner par rapport aux capacités de contrôle atteignables par la voie expérimentale.

### **Déroulement du travail**

Dans le cadre du travail de thèse, un état de l'art sera effectué sur les principales méthodes permettant de décrire un défaut complexe dans un modèle éléments finis en courants de Foucault (Crack propagation 2021) d'une part et d'autre part sur les méthodes de quantification d'incertitudes (Ghanem et al., 2017). Ensuite, des modèles EF stochastiques des fissures seront construits et testés pour les situations les plus représentatives de manière à en déduire les signaux dérivés de ces modèles et les grandeurs d'intérêt utilisables pour le diagnostic. A l'issue de ces travaux, une approche la plus générale possible sera dégagée pour construire un outil métier à la portée des experts de la Direction Industrielle d'EDF.

La thèse devrait démarrer en 2022.

### **Bibliographie**

- K. Beddek, Propagation d'incertitudes dans les modèles éléments finis en électromagnétisme—Application au contrôle non destructif par courants de Foucault, Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, juin 2012.
- D. Abdelli, T.-T. Nguyen, S. Clenet, A. Cheriet, Stochastic Metamodel for Probability of Detection Estimation of Eddy-Current Testing Problem in Random Geometry, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 55, N°. 6, 06/2019.
- Crack propagation, <http://www.zset-software.com/> 2021

R. Ghanem, D. Higdon and H. Owhadi (Eds), Handbook on Uncertainty Quantification, Springer, 2017.

### **Profil souhaité**

- Élève ingénieur ou étudiant en Master recherche (Bac+5).
- Formation : Calcul scientifique ou Ingénieur généraliste avec des bases solides en calcul scientifique.
- Connaissances : Analyse Numérique, Programmation scientifique, Simulation numérique, Analyse de phénomènes électromagnétiques, Modélisation probabiliste, Statistique.