



Ecole doctorale

**Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes**

EGENGSYS



## Offre de thèse

**Estimation des erreurs numérique pour les quantités d'intérêt dans le calcul des champs électromagnétiques en vue des applications CND par courant de Foucault**

<b>Laboratoire d'accueil</b>	L2EP (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance)
<b>Directeur de thèse</b>	Zuqi TANG (L2EP-Université de Lille)
<b>Encadrant industriel</b>	Jean-Pierre DUCREUX (EDF R&D)
<b>Spécialité du doctorat</b>	Génie électrique
<b>Université d'inscription</b>	Université de Lille
<b>École doctorale</b>	Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (ENGYS)
<b>Financement prévu</b>	Région Hauts-de-France / EDF R&D
<b>Contact</b>	Zuqi Tang : <a href="mailto:zuqi.tang@univ-lille.fr">zuqi.tang@univ-lille.fr</a> Jean-Pierre Ducreux : <a href="mailto:jean-pierre.ducreux@edf.fr">jean-pierre.ducreux@edf.fr</a>
<b>Dossier de candidature</b>	CV, lettre de motivation, levés de notes, lettre de recommandation

### Contexte

La modélisation numérique revêt une importance croissante dans le domaine du contrôle non destructif par courants de Foucault [1]. Certains outils de simulation reposent sur le traitement analytique ou semi-analytique des équations, offrant une grande souplesse pour aborder des configurations simples [2]. Cependant, la complexité de certaines configurations rend souvent l'obtention d'une solution analytique impossible, soit très complexe et extrêmement coûteuse en termes de ressources de calcul. En revanche, d'autres font appel à la modélisation numérique, notamment par éléments finis, permettant de traiter des configurations sans limite de réalisme, mais cela s'accompagne aussi d'une certaine lourdeur numérique [3]. En variant la forme, la taille, la profondeur et d'autres caractéristiques des défauts, différentes quantités d'intérêt issues du calcul des champs électromagnétiques peuvent être obtenues par la méthode des éléments finis. Ces quantités peuvent ensuite être utilisées pour déterminer une signature spécifique au défaut. En exécutant le modèle pour ces diverses conditions, une base de données peut être constituée, associant chaque signature issue de la sortie du capteur à des caractéristiques spécifiques du défaut.

Il est bien connu que la qualité de la solution et le temps de calcul dans la méthode des éléments finis constituent un compromis, déterminé par la façon de discrétisation, c'est-à-dire la qualité du maillage. Cette qualité de maillage est évaluée à l'aide d'indicateurs, qu'ils soient heuristiques ou établis mathématiquement. Malheureusement, ces indicateurs sont souvent définis en supposant que l'erreur considérée est l'erreur au sens énergétique global, ce qui est naturel étant donné que la méthode des éléments finis minimise cette erreur de manière globale. Certains travaux de thèse sur ces sujets ont été menés au sein du laboratoire L2EP, portant une attention particulière aux équations de Maxwell. Cependant, dans l'application du contrôle non destructif par courants de Foucault, la quantité à laquelle on s'intéresse est bien une quantité d'intérêt mesurée par les capteurs, qui est plutôt au sens local, par exemple, le flux magnétique. Les travaux existants ne permettent pas de prendre en compte cette nouvelle problématique. Dans ce contexte, au cours de ces dernières années, des travaux concernant l'estimateur de quantité d'intérêt attirent de plus en plus d'attention. En particulier, dans le domaine du calcul électromagnétique, nous avons abordé cette nouvelle thématique, typiquement avec une investigation pour le problème de la magnétostatique [6]. Il apparaît que l'estimateur classique ne permet pas de gérer la qualité de la quantité d'intérêt localement de manière optimale. Récemment, de nouveaux estimateurs pour la quantité d'intérêt, basés sur la reconstruction de flux équilibré, ont été développés en électromagnétisme,

permettant d'obtenir une borne plus précise [7,8]. Cependant, le coût de calcul demeure élevé, ce qui peut représenter un défi pour les problèmes industriels, nécessitant ainsi la résolution complémentaire de problèmes duaux. Diverses approches ont été explorées pour réduire le coût de calcul de la construction de l'estimateur, notamment en utilisant une résolution inexacte pour les problèmes duaux [9] ou en cherchant des méthodes moins coûteuses pour construire le flux équilibré [10]. Par ailleurs, les applications dans le domaine du contrôle non destructif posent aussi de nouveaux défis, en particulier lorsque la grandeur de la quantité d'intérêt est proche du bruit numérique, nécessitant un raffinement plus adaptatif. Cependant, les travaux existants n'offrent pas encore d'indicateur explicite pour guider le raffinement des maillages.

### **Objectifs**

L'objectif de ce sujet de recherche est de développer un outil numérique basé sur le code de calcul destiné à améliorer la qualité des bases de données issues de simulations numériques, tout en assurant la fiabilité de la signature des capteurs dans le contexte de l'application du contrôle non destructif par courants de Foucault. Cette démarche consiste, d'une part, à développer des estimateurs spécifiques pour la quantité d'intérêt privilégiée, et d'autre part, à intégrer cet outil au sein de la chaîne de simulation, en maintenant un temps de calcul global acceptable. Il est envisageable que la méthode élaborée au cours de cette recherche puisse également répondre à d'autres besoins dans des applications issues de la simulation électromagnétique. Cette contribution novatrice ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche dans ce domaine (modélisation des sondes de flux dans les alternateurs par exemple).

Le travail sera organisé autour de 2 axes principaux.

--Le premier axe concernera le développement et la mise en œuvre des estimateurs de quantité d'intérêt pour les différentes formulations potentielles du problème de la magnétostatique et de la magnéto-dynamique.

--Le second axe traitera quant à lui des aspects relatifs à l'implémentation dans l'outil et à la mise en œuvre pour des applications industrielles.

### **Bibliographie**

- [1] J. García-Martín J, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez, "Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing", *Sensors*. 2011; 11(3):2525-2565.
- [2] T. Wu, J. R. Bowler and T. P. Theodoulidis, "Eddy-Current Induction by a Coil Whose Axis is Perpendicular to that of a Tube," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 7, pp. 1-9, July 2017, Art no. 6201709.
- [3] L. Maurice, V. Costan, E. Guillot, P. Thomas, "Eddy current NDE performance demonstrations using simulation tools", *AIP Conf. Proc.* 25 January 2013; 1511 (1): 464–471.
- [4] M. Ainsworth, J.T. Oden, "A posteriori error estimation in finite element analysis", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 142, Issues 1–2, 1997, Pages 1-88.
- [5] T. Grätsch, K.J. Bathe. "A posteriori error estimation techniques in practical finite element analysis." *Computers & structures* 83.4-5 (2005): 235-265.
- [6] Z. Tang, S. Lou, A. Benabou, E. Creusé, S. Nicaise, J. Korechki, J-C. Mipo, "Guaranteed Quantity of Interest Error Estimate Based on Equilibrated Flux Reconstruction," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 6, pp. 1-4, June 2021.
- [7] E. Creusé, S. Nicaise, Z. Tang, "Goal-oriented error estimation based on equilibrated flux and potential reconstruction for the approximation of elliptic and parabolic problems", *Computers & Mathematics with Applications*, Volume 146, 2023, Pages 323-338.
- [8] E. Creusé, S. Nicaise, Z. Tang, "Goal-oriented error estimation based on equilibrated flux reconstruction for the approximation of the harmonic formulations in eddy current problems", *IMA Journal of Numerical Analysis*, 2024.
- [9] G. Gregor, and M. Vohralik. "Inexpensive Polynomial-Degree-Robust Equilibrated Flux A Posteriori Estimates for Isogeometric Analysis." *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2023.
- [10] G. Mallik, M. Vohralík, S. Yousef, "Goal-oriented a posteriori error estimation for conforming and nonconforming approximations with inexact solvers", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Volume 366, 2020.