

Proposition de thèse Mathématiques Appliquées 2020

Emmanuel Creusé

02 décembre 2020

1 Renseignements généraux

- **Titre** : Estimateurs *a posteriori* pour les équations de Maxwell en régime basse fréquence.
- **Direction** : Emmanuel Creusé, Professeur. Laboratoire de Mathématiques et Applications de Valenciennes (LAMAV), Université Polytechnique Hauts-de-France.
- **Co-encadrement** : Zuqi Tang, Maître de Conférences. Laboratoire d'Electronique et d'Electrotechnique de Puissance (L2EP), Université de Lille.
- **Profil attendu** : Master 2 Mathématiques Appliquées, orientation recherche, axe méthodes numériques pour les équations aux dérivées partielles, ou formation équivalente.

2 Contexte applicatif

Aujourd'hui, presque 20% de l'utilisation des énergies non renouvelables et 25% des émissions de CO_2 sont dues aux transports [1]. La moitié de ces émissions provient du transport de passagers, utilisant essentiellement des véhicules thermiques. Parmi les solutions envisagées pour en réduire l'impact écologique, l'une des plus prometteuses consiste à développer des véhicules électriques ou hybrides. Pour ne prendre qu'un exemple parmi d'autres, au niveau local, le site de Toyota, basé à Onnaing dans le Valenciennois en Hauts-de-France, prévoit la construction de 80 % des modèles de sa nouvelle Yaris 4 en version hybride, pour le marché à destination de l'Europe et de l'Amérique du Nord [2].

La conception de ces nouvelles générations de véhicules pose de nombreux défis. Il est nécessaire d'augmenter la capacité et la fiabilité des moteurs électriques, pour permettre leur utilisation dans le cadre de courants de plus forte intensité, assurant un meilleur rendement, une meilleure dissipation de la chaleur émise et une sécurité accrue. Le travail proposé s'inscrit dans la simulation numérique en régime basse et moyenne fréquences des courants induits dans les matériaux conducteurs. L'objectif est de pouvoir développer des outils numériques appelés *estimateurs d'erreurs a posteriori*. Ces outils sont ensuite implémentés dans les codes de calcul industriels, permettant d'optimiser les algorithmes de simulation utilisés, et de parvenir à des résultats fidèles aux phénomènes physiques réels et suffisamment précis pour les décrire.

Ce projet s’inscrit dans la thématique de la transition énergétique (axe stratégique ”Science pour une planète en mutation”) promue par la région Hauts-de-France, et plus spécifiquement dans le domaine des transports et de l’écomobilité qui en constituent des priorités. Il comporte une dimension transdisciplinaire forte, à l’interface entre mathématiques appliquées et génie électrique. De plus, l’amélioration de la fiabilité des simulations numériques pour les dispositifs électromagnétiques relève de la Tâche 4 ”Outils d’analyse des systèmes électromagnétiques intégrés” du CPER ”Convertisseur d’Energie Intégré Intelligent” (CE2I) 2014-2020, et prend part à la thématique ”jumeaux numériques” du CPER ”Energie électrique 4.0” 2021-2027, auquel l’UPHF est déjà associée.

3 Etat de l’art et objectifs scientifiques

Les estimateurs d’erreur *a posteriori* pour les méthodes d’éléments finis constituent un sujet d’investigation intense depuis le début des années 1990, et depuis essentiellement la dernière décennie pour des problèmes électromagnétiques. En ce qui concerne l’électromagnétisme basse fréquence, modélisés par les formulations appelées ” $A - \varphi$ ” et ” $T - \Omega$ ”, plusieurs travaux ont déjà été menés par les chercheurs du LAMAV et du L2EP. Ainsi, des estimateurs résiduels ont été proposés pour la formulation ” $A - \varphi$ ” [3] ou ” $T - \Omega$ ” [4] en régime harmonique ou en régime temporel [5]. Des estimateurs équilibrés ont également été développés [6], permettant un contrôle plus précis de l’erreur. Tous ces résultats théoriques ont été validés sur des configurations industrielles [15, 10, 11, 14], et utilisés pour piloter des stratégies de raffinement adaptatif de maillages [8]. Les objectifs scientifiques que nous proposons de poursuivre dans cette thèse de mathématiques appliquées sont les suivants :

- D’une part, nous souhaitons généraliser les contributions précédentes à des formulations plus complexes, dans lesquelles les courants induits dans les parties correspondant aux courants sources ne peuvent plus être négligés. Nous avons particulièrement en tête la formulation appelée ” $A - \varphi - B$ ”, permettant de traiter les cas des régimes en moyenne fréquence [13], modèle intermédiaire entre la basse et la haute fréquence.
- D’autre part, nous souhaitons développer des estimateurs en quantités d’intérêts, permettant d’estimer les pertes Joules, responsables de la chauffe des systèmes. L’originalité de l’approche est de vouloir parvenir à une telle estimation uniquement sur une partie du domaine de calcul, et non pas dans le domaine entier. Cela est particulièrement pertinent pour estimer par simulation numérique des pertes en certains points de dispositifs difficiles ou impossibles à instrumenter pour y effectuer des mesures. Si des travaux ont déjà été réalisés dans cet axe pour plusieurs applications [12, 9, 7], le travail reste à effectuer en électromagnétisme, particulièrement pour les simulations en basse et moyenne fréquences auxquelles nous nous intéressons.

4 Contact

Pour plus d’information, prendre contact : Emmanuel Creusé - emmanuel.creuse@uphf.fr

References

- [1] International energy agency key word energy statistics : <https://www.iea.org/statistics/kwes>.

- [2] La Toyota Yaris, ou l'exception du "made in France" dans l'automobile. *Le monde*, 08 novembre 2019.
- [3] Emmanuel Creusé, Serge Nicaise, Zuqi Tang, Yvonnick Le Menach, Nicolas Nemitz, and Francis Piriou. Residual-based *a posteriori* estimators for the $\mathbf{A} - \varphi$ magnetodynamic harmonic formulation of the Maxwell system. *Math. Models Methods Appl. Sci.*, 22(5):1150028, 30, 2012.
- [4] Emmanuel Creusé, Serge Nicaise, Zuqi Tang, Yvonnick Le Menach, Nicolas Nemitz, and Francis Piriou. Residual-based *a posteriori* estimators for the \mathbf{T}/Ω magnetodynamic harmonic formulation of the Maxwell system. *Int. J. Numer. Anal. Model.*, 10(2):411–429, 2013.
- [5] Emmanuel Creusé, Serge Nicaise, and Roberta Tittarelli. Space-time residual-based *a posteriori* estimators for the $\mathbf{A} - \varphi$ magnetodynamic formulation of the Maxwell system. *Comput. Methods Appl. Math.*, 14(4):429–460, 2014.
- [6] Emmanuel Creusé, Serge Nicaise, and Roberta Tittarelli. A guaranteed equilibrated error estimator for the $\mathbf{A} - \varphi$ and $\mathbf{T} - \Omega$ magnetodynamic harmonic formulations of the Maxwell system. *IMA J. Numer. Anal.*, 37(2):750–773, 2017.
- [7] Josselin Delmas, Patrice Coorevits, Pierre-Bernard Badel, and Mohamed Guessasma. Estimation d'erreur en quantités d'intérêt dans un code de calcul industriel. In *8e Colloque national en calcul des structures*, Giens, France, May 2007. CSMA.
- [8] Patrick Dular, Yvonnick Le Menach, Zuqi Tang, Emmanuel Creusé, and Francis Piriou. Finite element mesh adaptation strategy from residual and hierarchical error estimators in eddy current problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(3):1–4, March 2015.
- [9] Pierre Ladevèze. Upper error bounds on calculated outputs of interest for linear and nonlinear structural problems. 334(7):399–407, 2006.
- [10] Thomas Lelong, Zuqi Tang, Riccardo Scorretti, Pierre Thomas, Yvonnick Le Menach, Emmanuel Creusé, Francis Piriou, Noël Burais, Cécile Miry, and Isabelle Magne. Error estimation in the computation of induced current of human body in the case of low frequency magnetic field excitation. In *the 19th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG)*, 30 June-4 July 2013.
- [11] Thomas Lelong, Zuqi Tang, Riccardo Scorretti, Pierre Thomas, Yvonnick Le Menach, Emmanuel Creusé, Francis Piriou, Noël Burais, Cécile Miry, and Isabelle Magne. Error estimation in the computation of induced current of human body. In *2013 CIGRE SC-C3 & EMF-ELF Colloquium*, October 2013.
- [12] Serge Prudhomme and J. Tinsley Oden. On goal-oriented error estimation for elliptic problems : application to the control of pointwise errors. 176(1-4):313–331, 1999.
- [13] Ruth V. Sabariego, Patrick Dular, and Johan Gyselinck. Time-domain homogenization of windings in 3-D finite element models. *IEEE Trans. Mag.*, 44(6):1302–1305, 2008.
- [14] Zuqi Tang, Yvonnick Le Menach, Emmanuel Creusé, S. Nicaise, and Francis Piriou. Residual *a posteriori* estimator for magnetoharmonic potential formulations with global quantities for the source terms. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(3):1–4, March 2015.

- [15] Zuqi Tang, Yvonnick Le Menach, Emmanuel Creusé, Serge Nicaise, Francis Piriou, and Nicolas Nemitz. Residual and equilibrated error estimators for magnetostatic problems solved by finite element method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(12):5715–5723, Dec 2013.