



<b>Titre Thèse (subject)</b>	<b>Résolution numérique de problèmes électromagnétiques non linéaires en présence d'hystérésis et d'anisotropie.</b>	
<b>Directeur (supervisor)</b>	Yvonnick Le Menach	E-mail : yvonnick.le-menach@univ-lille.fr
<b>Co-Encadrant</b>	Frédéric Guyomarch	E-mail : Frederic.Guyomarch@univ-lille.fr
<b>Laboratoire (research unit)</b>	L2EP	Web : <a href="http://l2ep.univ-lille.fr">http://l2ep.univ-lille.fr</a>
<b>Equipe (research team)</b>	OMN	Web : <a href="http://l2ep.univ-lille.fr/groupe-de-recherche/equipe-omn/">http://l2ep.univ-lille.fr/groupe-de-recherche/equipe-omn/</a>
<b>Financement prévu</b> <input type="checkbox"/>	Contrat Doctoral Etablissement <input checked="" type="checkbox"/> Région <input type="checkbox"/> – Autre <input type="checkbox"/> Contrat de recherche <input type="checkbox"/> Préciser :	ULille <input checked="" type="checkbox"/> UPHF <input type="checkbox"/> Centrale Lille <input type="checkbox"/> UGE <input type="checkbox"/> IMT <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/>
<b>Financement acquis ?</b> <input type="checkbox"/>	Contrat Doctoral Etablissement <input type="checkbox"/> Région <input type="checkbox"/> – Autre <input type="checkbox"/> Contrat de recherche <input type="checkbox"/> Préciser :	ULille <input type="checkbox"/> UPHF <input type="checkbox"/> Centrale Lille <input type="checkbox"/> UGE <input type="checkbox"/> IMT <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/>

#### Résumé du sujet (abstract):

#### Contexte

Les machines électriques font actuellement l'objet de nombreuses recherches pour améliorer leurs rendements de quelques pourcents. Une solution consiste à employer des matériaux (tôles) magnétiques hautes performances. Or il s'avère que le comportement de ces dernières sont fortement non linéaires et anisotropes et présentent aussi de l'hystérésis lors de leur utilisation dans des machines. Afin d'évaluer précisément le rendement, avant la construction de prototype réels, on s'appuie sur une modélisation numérique qui doit tenir compte du caractère non linéaire de ces matériaux.

Le L2EP développe, avec EDF R&D dans le cadre d'un laboratoire commun, depuis de nombreuses années un code de calcul, dénommé code\_carmel, basé sur la méthode des éléments finis pour modéliser des dispositifs électromagnétiques en basse fréquence. Cela revient à résoudre les équations de Maxwell avec les hypothèses des régimes quasi stationnaires. Lors de travaux menés récemment au travers d'une thèse, des solveurs non linéaires plus robustes ont été implémentés dans le code mais seules les lois scalaires isotropes ont été traitées [6]. Or les non linéarités que nous souhaitons aborder sont plus ardues.

Dans les cas des modèles d'anisotropie magnétique, la réponse du matériau se calcule en fonction de deux lois généralement : une loi sur la perméabilité magnétique dans le sens de lamination et une dans le sens transverse. À partir de là, un modèle (ellipse avec ou sans rotation d'axes, etc) permet de calculer la loi selon n'importe quel angle. Ce comportement différent suivant les axes, et pouvant avoir des effets ayant des ordres de grandeur différents pour des matériaux magnétiques très performants nuit gravement à la vitesse de convergence du solveur non linéaire utilisé.

Pour la modélisation de l'hystérésis magnétique, la littérature regorge de modèles différents et fortement étudiés. Nous citerons surtout les modèles de Preisach [1] difficile à mettre en œuvre et les modèles de Jiles-Atherton [2] car largement utilisés déjà. Cependant, il existe des modèles plus physiques en cours d'élaboration dans l'équipe OMN.



La résolution des équations de Maxwell en présence d'hystérésis fait actuellement l'objet de publications récentes que ce soit à base de méthodes plus orientées point-fixe [3] ou sur la méthode de Newton [4]. Le but de cette thèse est de mettre au point et d'intégrer un tel solveur dans code\_carmel qui sera robuste pour les nouveaux modèles de matériaux qui sont développés au sein de l'équipe.

## Challenges scientifiques

La méthode de Newton est plus souvent utilisée en raison de ces performances localement (convergence quadratique) mais des difficultés peuvent apparaître pour atteindre le bassin de convergence et elle nécessite le calcul de la matrice Jacobienne parfois coûteux voire inabordable dans certains cas.

Tout d'abord dans le cas de l'anisotropie, le premier problème numérique vient de la dégradation du conditionnement du système matriciel à résoudre et nuit fortement à la convergence des solveurs linéaires itératifs basés sur les méthodes de Krylov. Par ailleurs, dans le cas des tôles à grains orientés, les lois ne sont pas toujours monotones et viennent altérer la convergence des solveurs non linéaires. Les méthodes dites de quasi Newton peuvent simplifier les calculs et ainsi sa vitesse à laquelle le solveur fournit une solution. Pour augmenter la robustesse des solveurs, il faut coupler ces solveurs avec des méthodes de globalisation mais souvent au détriment de l'efficacité. Actuellement pour traiter ce type problème les modèles choisis sont simplifiés afin de pouvoir les exploiter dans les simulations numériques.

De plus, dans le cas de l'hystérésis magnétique, nous sommes confrontés à d'autres problèmes. En effet, la fonction que l'on cherche à annuler n'est pas toujours différentiable et les valeurs prises par cette fonction peuvent être sujettes à de très brusques variations (choc numérique).

Pour remédier à cela, il existe des extensions de la méthode de Newton telles les méthodes d'ordre supérieur mais elles sont souvent onéreuses en temps de calcul et en temps de développement.

Nous nous proposons dans cette thèse, d'explorer le lien entre le solveur différentiel ordinaire de l'équation en temps dû à la dynamique du problème et le solveur non linéaire interne dû au comportement des matériaux (anisotropes et hystérétiques). Lors d'une thèse précédente [6], nous avons montré qu'en choisissant bien le point d'initialisation de l'algorithme, nous améliorons grandement la stabilité de l'algorithme ainsi que sa vitesse de convergence.

En liant le solveur différentiel et le solveur non linéaire, cela devrait permettre en quelque sorte de prévoir ces variations rapides qui pourraient mettre en défaut la méthode de Newton et toujours lui fournir un point initial de bonne qualité afin d'accrocher au plus vite la convergence quadratique.

## L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil

Ce sujet thèse s'inscrit dans la continuité des travaux de thèse Rihab Cherif sur le Développement de solveurs non linéaires robustes pour la méthode des éléments finis appliquée à des problèmes électromagnétiques basse fréquence soutenue en décembre 2019. Comme il a déjà été précisé précédemment, ces travaux ont porté sur l'amélioration de la robustesse des solveurs non linéaires pour des lois scalaires. Par ailleurs, nous menons parallèlement dans le cadre du LAMEL des études sur les modèles de lois de comportement magnétiques des tôles employées dans les grands alternateurs. Il



s'avère que ces tôles présentent des caractéristiques fortement anisotropes qu'il convient de bien simuler afin d'évaluer le comportement de ces alternateurs pour des points de fonctionnement extrêmes. Toutefois ces travaux sont très orientés sur la caractérisation des matériaux pour d'obtenir des modèles pertinents en vue de l'implémenter dans Code\_carmel. Cette thèse viendra compléter ces études de façon à être capable de simuler numériquement un tel dispositif en fonctionnement dans des conditions réelles.

## Echéancier

Afin de prendre en main le code fortran de simulation, l'étudiant devra, dans la première année, valider le code pour des lois tensorielles simples qu'il faudra implémenter. Il devra aussi alors valider les solveurs déjà présents pour de tels modèles. En parallèle de cela, il faudra faire une étude bibliographique sur les solveurs EDO en temps, en se focalisant sur ceux utilisés pour résoudre des problèmes hystériques, en particulier en mécanique, pour après les adapter au cas électromagnétique.

En seconde année, nous prévoyons une implémentation de ces algorithmes ainsi qu'une étude de leur comportement avec les lois de Maxwell. La validation se faisant alors sur des cas académiques bien maîtrisés.

En troisième année, nous devrions avoir tous les outils (solveurs mais aussi modèles physique issus de travaux amont dans l'équipe OMN) pour les simulations de systèmes réels tels les turboalternateurs.

## Références

- [1] N. Takahashi;S.-H. Miyabara;K. Fujiwara "Problems in practical finite element analysis using Preisach hysteresis model," in IEEE Transactions on Magnetics , Vol: 35, no. 3,pp 1243 - 1246, May 1999, DOI: 10.1109/20.767175.
- [2] L. Perkkiö,B. Upadhaya ,A. Hannukainen, P. Rasilo, "Stable Adaptive Method to Solve FEM Coupled With Jiles–Atherton Hysteresis Model," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 2, pp. 1-8, Jan. 2018, Art no.7400208 , doi: 10.1109/TMAG.2017.2782214.
- [3] J. C. Young, S. D. Gedney, R. Adams, C. Schneider and C. Burgy, "A Stepped Nonlinear Solver for Nonlinear Magnetic Materials with Hysteresis," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 6, pp. 1-6, June 2015, Art no. 7301106, doi: 10.1109/TMAG.2014.2376993.
- [4] A. Chama, S. Gerber and R. Wang, "Newton–Raphson Solver for Finite Element Methods Featuring Nonlinear Hysteresis Models," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 1, pp. 1-8, Jan. 2018, Art no. 7400108, doi: 10.1109/TMAG.2017.2761319.
- [5] H. Vande Sande, F. Henrotte, K. Hameyer, "The Newton-Raphson method for solving non-linear and anisotropic time-harmonic problems," in COMPEL (The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering), vol 23-4, 1 Déc. 2004, ISSN: 0332-1649.
- [6] Cherif, R., Tang, Z., Guyomarch, F., Chevallier, L., Le Menach, Y. "An improved Newton method based on choosing initial guess applied to scalar formulation in nonlinear magnetostatics", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, Issue: 6, June 2019