

Sujet de thèse

Modélisation magnéto-mécanique des dispositifs électriques par la méthode des éléments virtuels

Mots clés : Couplage magnéto-mécanique, méthode des éléments virtuels, multi-échelle, homogénéisation, matériaux ferromagnétiques, magnétostriction, forces magnétiques, vibrations.

Résumé : La transition écologique et énergétique implique de concevoir des dispositifs électromagnétiques plus compacts et efficaces. Ceci conduit à disposer d'outils numériques de calcul des champs aptes à traiter les problématiques multiphysiques qui deviennent impactantes dans l'efficacité énergétique des dispositifs. Cette thèse propose de répondre à cette problématique en développant des approches de modélisation multiphysiques et multi-échelle basées sur la méthode des éléments virtuels.

Contexte : La transition écologique pour un développement soutenable (TEDS) implique une démarche globale visant à construire des solutions durables, cohérentes et résilientes, capables de répondre efficacement aux défis environnementaux majeurs de notre époque. La transition énergétique qui accompagne cette TEDS rend donc essentielle l'augmentation de l'efficacité des systèmes de conversion de l'énergie électrique. Une conséquence est une utilisation des dispositifs électromagnétiques dans des conditions de plus en plus sévères, consécutive notamment à des objectifs de compacité imposés dès la phase de conception. L'évolution technologique des dispositifs électromagnétiques impose donc une prise en compte plus précise des interactions multiphysiques ainsi qu'une compréhension plus approfondie du comportement des matériaux constitutifs. À cet égard, et en particulier pour les matériaux ferromagnétiques tels que les aciers électriques, les sollicitations mécaniques et thermiques impactent fortement la réponse du matériau. En particulier, les états de contraintes mécaniques multiaxiaux, résultant des processus de traitement et d'assemblage des matériaux (découpe, empilage, soudage, etc.) [1] ou des conditions de fonctionnement (forces magnétiques, forces d'inertie, etc.), modifient fortement les comportements magnétique [2, 3, 4] et magnétostrictif [5]. Cette augmentation des contraintes (visant à réduire les coûts et/ou à optimiser les capacités) illustre la nécessité de disposer d'outils de modélisation multiphysique adaptés permettant, non seulement, de concevoir des dispositifs électromagnétiques efficaces et de prédire leur comportement futur.

Différents travaux de modélisation magnéto-mécanique existent dans la littérature. Certains se concentrent sur l'établissement de modèles de comportement afin de décrire l'influence d'un état de contrainte sur la réponse magnétique. Cependant, la plupart de ces modèles sont restreints à des chargements mécaniques uniaxiaux, très peu traitent de la dépendance des propriétés magnétiques à des contraintes par nature multiaxiales [6, 7]. Une solution repose sur la définition d'une contrainte équivalente magnéto-élastique, i.e. une contrainte uniaxiale fictive qui modifierait le comportement magnétique de manière similaire à une contrainte multiaxiale. Certains de ces travaux adressent le comportement anhystérétique (i.e. réversible) [8] et peu le comportement hystérétique (i.e. dissipatif) [9, 10]. Cette question reste cependant ouverte, ces approches n'ayant pas permis d'aboutir à une description générale de l'effet de la contrainte sur le comportement magnétique. En parallèle, des modèles magnéto-mécaniques entièrement multiaxiaux ont été proposés pour les monocristaux et les matériaux polycristallins [11]. Basés sur des considérations énergétiques et tenant compte de la texture cristallographique des matériaux, ces modèles reproduisent assez fidèlement le comportement anhystérétique des matériaux pour des chargements magnéto-mécaniques complexes.

Pour la simulation de structures de dispositifs réelles, ces modèles de comportement sont générale-

ment implémentés dans des codes éléments finis (FEM) [12, 13, 14]. Les formulations mises en œuvre conduisent à résoudre des problèmes magnétiques et élastiques couplés et fortement non linéaires, associés à des lois constitutives complexes. Par ailleurs, la problématique du mouvement relatif rotor/stator n'est pas complètement résolue, ce qui peut conduire à des temps de calcul extrêmement longs, à cause de problèmes de convergence et d'un nombre important d'évaluations du modèle numérique. La conception et la prédiction du comportement des dispositifs électriques nécessitent donc des approches de modélisation numériques avancées, aptes à rendre compte des comportements non-linéaires couplés, anisotropes et dissipatifs résultant de mécanismes multi-échelles. La méthode des éléments virtuels (VEM) est une méthode numérique récente qui a un potentiel important pour traiter ce type de problèmes multiphysiques. La VEM [15, 16] étend les capacités de la FEM en traitant des maillages polygonaux/polyhédriques très généraux, y compris des éléments irréguliers ou non convexes, tout en conservant de bonnes propriétés de convergence et de stabilité. Elle se révèle par ailleurs plus efficace et plus robuste que la FEM en présence d'anisotropie marquée. Elle offre ainsi un cadre numérique alternatif à la FEM et particulièrement adapté pour traiter les problèmes à géométrie complexe, des pièces en mouvement et des matériaux hétérogènes.

Objectifs et étape de la thèse : L'objectif principal de cette thèse est d'explorer et de développer l'application de la méthode des éléments virtuels pour la modélisation multiphysique et multi-échelle des dispositifs électriques. Il s'agira de développer un cadre mathématique et numérique rigoureux pour la modélisation magnéto-mécanique particulièrement, en apportant une description multi-échelle du comportement des matériaux. Pour les structures 3D complexes présentant un fort couplage magnéto-élastique, leur intégration dans des simulations par éléments virtuels reste un enjeu majeur. Plus spécifiquement, les travaux de la thèse porteront sur les axes suivants :

- **Modélisation multi-échelle des matériaux ferromagnétiques**

Il s'agira de proposer un modèle de comportement magnéto-mécanique reposant sur une approche énergétique et une description multi-échelle des mécanismes sous-jacents, permettant la prise en compte de la dissipation (hystérésis) et de la dépendance à des états de contraintes complexes. Il conviendra de rendre cette modélisation la plus adaptée possible à une intégration dans un modèle éléments virtuels.

- **Développement de la méthode des éléments virtuel pour les problèmes magnéto-mécaniques**

Un cadre numérique basé sur la VEM pour la résolution de problèmes magnéto-mécaniques sera proposé. Pour ce faire, une formulation magnéto-mécanique qui intégrera le modèle de comportement sera développée dans le cadre des régimes quasi-statiques. Celle-ci reposera sur une stratégie à deux échelles, permettant de décrire le comportement homogénéisé à l'échelle macro. A cette fin, la capacité des Graph Neural Networks (GNNs) [17] à estimer le comportement homogénéisé de volumes élémentaires représentatifs peut constituer une alternative efficace. Une attention sera aussi portée à une formulation des efforts électromagnétiques en adéquation avec ce cadre de la VEM multi-échelle. Des stratégies de couplage et des algorithmes originaux seront développés pour traiter les non-linéarités du problème magnéto-mécanique et évaluer sa convergence.

- **Validation expérimentale**

Des montages expérimentaux impliquant des structures et des chargements magnéto-mécaniques complexes seront élaborés, en utilisant les installations du G2Elab, afin d'évaluer les modèles.

Profil de l'étudiant·e - Compétences requises :

Le ou la candidat·e devra être titulaire d'un Master (M2) ou d'un diplôme d'Ingénieur en mécanique, génie électrique, mathématiques appliquées ou physique appliquée. Il ou elle devra avoir des compétences en électromagnétisme, en mécanique des solides déformables, en méthodes numériques

(éléments finis) et en programmation scientifique (Python, Java, Matlab, ...). En outre, le ou la candidat·e doit montrer un fort intérêt pour la modélisation numérique et le développement de codes de calcul scientifiques. Il ou elle doit être motivé·e par la recherche appliquée en collaboration avec des chercheurs de différentes disciplines. Une bonne maîtrise de l'anglais et des capacités de rédaction sont requises.

Informations pratiques :

École doctorale : Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal

Spécialité : Génie Électrique

Établissement de préparation : Université Grenoble Alpes

Financement : Non encore acquis, la personne retenue devra **présenter le concours de l'école doctorale EEATS** de l'Université Grenoble Alpes pour obtenir une bourse ministérielle.

Début de la thèse : 1^{er} octobre 2026 (peut-être légèrement repoussé)

Lieu de la thèse : Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (G2ELab : <https://g2elab.grenoble-inp.fr/>)

Le Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (G2ELab) est reconnu pour son action en modélisation numérique de calcul des champs électromagnétiques, notamment par la méthode des éléments finis et les méthodes intégrales (méthode des moments magnétiques, méthode intégrale de volume, méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit)) ainsi que le couplage des méthodes numériques.

Encadrement : Nicolas Galopin - 04 76 82 71 77 - nicolas.galopin@g2elab.grenoble-inp.fr

Comment postuler ? Le la candidat·e est invité·e à envoyer un CV, les relevés de notes, une lettre de motivation (exposant clairement sa motivation pour ce projet) et d'éventuelles lettres de recommandation à l'encadrement. Un entretien pourra être organisé. Toutes les questions sont les bienvenues !

Références

- [1] A. Schoppa, et al. (2000). *Influence of the manufacturing process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 215:216-74?78.
- [2] K. Yamazaki et al. (2014). *Iron loss analysis of interior permanent magnet synchronous motors by considering mechanical stress and deformation of stators and rotors*, IEEE Transactions on Magnetics, 50(2):909-912.
- [3] L. Bernard et al. (2015). *Effect of stress on magnetic hysteresis losses in a switched reluctance motor: Application to stator and rotor shrink fitting*, IEEE Transactions on Magnetics, 51(9):1-13.
- [4] U. Aydin, et al. (2019). *Effect of multi-axial stress on iron losses of electrical steel sheets*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 469:19?27.
- [5] O. Hubert, et al. (2023) *Influence of biaxial stress on magnetostriction?Experiments and modeling*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 568:170389.
- [6] R. Langman. (1990). *Magnetic properties of mild steel under conditions of biaxial stress*, IEEE Transactions on Magnetics, 36(4):1246-1251.
- [7] J. Pearson, et al. (2000). *Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure iron*, IEEE Transactions on Magnetics 38(6):3251-3253.

- [8] L. Daniel. (2013). *An analytical model for the effect of multiaxial stress on the magnetic susceptibility of ferromagnetic materials*, IEEE Transactions on Magnetics, 49(5):2037-2040
- [9] P. Rasilo et al. (2016). *Modeling of hysteresis losses in ferromagnetic laminations under mechanical stress*, IEEE Transactions on Magnetics, 52(3):7300204.
- [10] U. Aydin, et al. (2017). *Modeling the Effect of Multiaxial Stress on Magnetic Hysteresis of Electrical Steel Sheets: A Comparison*, IEEE Transactions on Magnetics, 53(6):2000904.
- [11] L. Daniel, et al. (2008) *A constitutive law for magnetostrictive materials and its application to Terfenol-D single and polycrystals*, European Physical Journal Applied Physics, 42(2):152-159.
- [12] L. Bernard, et al. (2011). *Effect of Stress on Switched Reluctance Motors: A Magneto-Elastic Finite-Element Approach Based on Multiscale Constitutive Laws*, 47(9):2171-2178.
- [13] A. A. Journeaux, et al. (2013). *Multi-physics problems computation using numerically adapted meshes: application to magneto-thermo-mechanical systems*, The European Physical Journal Applied Physics, 61(3):30001.
- [14] M. Liu, et al. (2017). *Reduction of power transformer core noise generation due to magnetostriction-induced deformations using fully coupled finite-element modeling optimization procedures*, IEEE Transactions on Magnetics, 53(8):1-11.
- [15] L. Beirão Da Veiga, et al. (2013). *Basic principles of virtual element methods*, Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 23(01):199-214.
- [16] M. Mengolini, et al. (2019). *An engineering perspective to the virtual element method and its interplay with the standard finite element method*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 350:995-1023.
- [17] J.M. Hestroffer, et al. (2023). *Graph neural networks for efficient learning of mechanical properties of polycrystals*, Computational Materials Science, 217, p. 111894.