

## Représentation énergétique des systèmes décrits par équations aux dérivées partielles (EDP) – Application aux phénomènes électromagnétiques

### Environnement

|               |  |                |                                  |
|---------------|--|----------------|----------------------------------|
| Laboratoire : | ENIT – LGP   | Responsables : | Baptiste TRAJIN, Olivier PANTALE |
| Equipes :     | M <sup>2</sup> SD, e-ACE <sup>2</sup>              |                |                                  |
| E-mail :      | baptiste.trajin@enit.fr<br>olivier.pantale@enit.fr | – Téléphone :  | 05 67 45 01 03                   |

### Mots Clefs

Jumeau numérique, Electromagnétisme, Equations aux dérivées partielles, Méthode des volumes finis, Bond graph

### Contexte scientifique

Ce stage s'insère dans l'axe transverse « Jumeau numérique » du Laboratoire Génie de Production de l'ENI de Tarbes. Il s'inscrit comme une étude encadrée conjointement au sein des Groupes de Recherche « Efficacité des Systèmes de Conversion de l'Energie Electrique » (e-ACE<sup>2</sup>) et « Métallurgie Mécanique Structures enDommagement » (M<sup>2</sup>SD). Il a pour finalité de proposer des développements complémentaires à la thèse de doctorat de Majid Khalili : *Modélisation de couplages électromagnétiques par approche systémique pour l'efficacité énergétique des convertisseurs statiques*. Cette thèse a pour but de décrire les couplages électromagnétiques dans les systèmes complexes de conversion d'énergie au moyen d'un outil de modélisation énergétique macroscopique - le bond graph [1] – pour en optimiser le fonctionnement énergétique.

La modélisation des matériaux magnétiques peut se faire usuellement de manière macroscopique à l'échelle du composant magnétique avec des paramètres spécifiques comme le champ rémanent ou l'excitation coercitive. Cette méthode ne permet pas toujours de bien prendre en compte les aspects multiphysiques. Une autre approche consiste à appliquer une modélisation locale de type *éléments finis* dont la finesse permet de rendre compte des couplages mais pas des comportements dynamiques du matériau, du fait d'hypothèses simplificatrices de découplage entre les champs électriques et magnétiques.

De nombreux travaux du LGP visent à modéliser des phénomènes couplés au sein de systèmes d'électrotechnique et d'électronique de puissance (électrique, thermique, mécanique...) [2] en utilisant le bond graph. Cet outil conduit alors à une représentation dynamique des systèmes multiphysiques alliant des caractéristiques macroscopiques et microscopiques. Il a d'ailleurs été montré que les bond graph pouvaient s'adapter aux systèmes régis par des équations aux dérivées partielles irréversibles telles que les équations de diffusion.

La limite des modèles obtenus par le bond graph appliqués aux systèmes décrits par EDP réside dans la discrétisation qui est faite de l'espace au travers de la technique de maillage. Les *éléments finis*, bien que performants dans le cas de géométries complexes, tiennent compte d'approximations de quasi-statisme qui ne permettent pas de traiter aisément en une unique résolution numérique les variables duales de l'électromagnétisme. De plus, les phénomènes dynamiques haute fréquence sont mal représentés du fait de l'hypothèse précédente. La méthode des *différences finies* est efficace pour traiter les problèmes couplés de l'électromagnétisme mais elle implique un maillage serré de l'espace et donc une complexité algorithmique accrue lors de la résolution numérique. Enfin, la méthode des *volumes finis*, parfaitement adaptée aux phénomènes conservatifs, peut être utilisée [3, 4] mais implique une maîtrise du maillage pour les phénomènes diffusifs.

L'objectif de ces travaux de recherche est donc de palier les faiblesses de la méthode des volumes finis en utilisant des maillages non structurés permettant de bien représenter les phénomènes tout en maîtrisant la complexité algorithmique finale. Le verrou méthodologique identifié est d'utiliser cette approche typique de la résolution numérique avec l'approche de modélisation énergétique de type bond graph, permettant ainsi une réunion des échelles macroscopiques et microscopiques. La levée du verrou méthodologique permettra d'obtenir un jumeau numérique physique complet d'un système de couplage électromagnétique allant de la géométrie du matériau et de ses propriétés magnétiques macroscopiques jusqu'au système équationnel permettant sa description dynamique locale en passant par une représentation sous forme de transfert d'énergie.

### Contribution attendue

Le stage s'articulera autour de plusieurs tâches complémentaires :

- Une phase d'étude bibliographique, qui permettra à l'étudiant(e) de mieux cerner l'intérêt et le rôle chaque méthode de résolution numérique tout en se familiarisant avec la représentation énergétique bond graph. L'étudiant(e) prendra également en main les techniques de programmation permettant la résolution numérique des équations.
- La réalisation d'un modèle énergétique des phénomènes de couplage électromagnétiques s'appuyant sur les volumes finis non structurés.
- Une étape de codage de la démarche proposée et sa validation vis-à-vis d'outils logiciels commerciaux pourra permettre de livrer les premières briques d'un codage de résolution numérique ouvert utilisable par l'ensemble de la communauté scientifique ayant à traiter des problématiques décrites par des équations aux dérivées partielles.
- Une validation expérimentale peut également être envisagée sur la plateforme PRIMES ou des mesures de rayonnement électromagnétiques sont possibles.

## Qualités requises

Le (la) candidat(e) devra être issu d'une formation scientifique spécialisée dans le génie électrique ou les mathématiques appliqués. Outre des qualités techniques certaines, le (la) candidat(e) devra posséder une curiosité scientifique pour aborder les différentes étapes proposées mais aussi être force de proposition dans le déroulement de l'étude. Une bonne maîtrise des outils mathématiques et numériques pour l'ingénieur est demandée. La maîtrise des logiciels Matlab/Simulink et/ou Python est un prérequis obligatoire.

Le (la) candidat(e) devra également posséder un bon niveau de maîtrise de l'anglais et des qualités de communication et de synthèse écrites et orales en français comme en anglais.

## Modalités pour postuler

Toute candidature devra être adressée par mail (CV + lettre de motivation, relevé de note du M1 optionnel mais recommandé) aux adresses [baptiste.trajin@enit.fr](mailto:baptiste.trajin@enit.fr) et [olivier.pantale@enit.fr](mailto:olivier.pantale@enit.fr)

## Déroulement du stage

**Date de début possible** : février – mars 2024

**Durée** : 5 à 6 mois

Les travaux se dérouleront principalement au Laboratoire Génie de Production – LGP rattaché à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de TARBES, 47 avenue d'AZEREIX, 65000 TARBES. Des expérimentations pourront être conduites sur la plateforme PRIMES située également à Tarbes.

La gratification sera versée mensuellement et correspondra au taux horaire de gratification de 3,9 € par heure de stage. La gratification mensuelle sera calculée au prorata de jours travaillé, avec le calcul suivant : 1 jour = 7 heures.

## Bibliographie

- [1] W. Borutzky, « Bond graph methodology - Development and analysis of multidisciplinary dynamic system models », Springer, 2010.
- [2] B. Trajin, P.-E. Vidal, « Bond graph multi-physics modeling of encapsulating materials in power electronic modules », European Physical Journal Applied Physics, vol. 89, no. 2, 2020.
- [3] S. Mazumder, « Numerical Methods for Partial Differential Equations : Finite Difference and Finite Volume Methods », Academic Press, 2016.
- [4] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, Numerical Recipes in C, The art of scientific computing, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

## Energy Representation of Systems Described by Partial Differential Equations (PDEs) – Application to Electromagnetic Phenomena

### Environment

|             |  |              |                                  |
|-------------|--|--------------|----------------------------------|
| Laboratory: | ENIT – LGP   | Supervisors: | Baptiste TRAJIN, Olivier PANTALE |
| Teams:      | M <sup>2</sup> SD, e-ACE <sup>2</sup>              |              |                                  |
| E-mail:     | baptiste.trajin@enit.fr<br>olivier.pantale@enit.fr | Phone:       | 05 67 45 01 03                   |

### Key Words

Digital twin, Electromagnetism, Partial differential equations, Finite volume method, Bond graph

### Context

This internship is part of the transversal axis 'Digital Twin' within the Laboratoire de Génie de Production at ENI Tarbes. It is framed as a supervised study within both the Research Groups 'Efficacité des Systèmes de Conversion de l'Énergie Électrique' (e-ACE<sup>2</sup>) and 'Métallurgie Mécanique Structures en Dommagement' (M<sup>2</sup>SD). Its purpose is to propose complementary developments to Majid Khalili's doctoral thesis: 'Modeling Electromagnetic Couplings by Systemic Approach for the Energy Efficiency of Static Converters.' This thesis aims to describe electromagnetic couplings in complex energy conversion systems using a macroscopic energy modeling tool - the bond graph [1] - to optimize their energy operation.

The modeling of magnetic materials can typically be done at a macroscopic level for the magnetic component, employing specific parameters such as remnant field or coercive excitation. However, this method does not always adequately consider multiphysical aspects. Another approach involves applying a local modeling technique like finite element analysis, which, while detailed, might not capture the material's dynamic behaviors due to simplifying assumptions that decouple electric and magnetic fields.

Numerous works within LGP aim to model coupled phenomena within power electronics and electrical engineering systems (electrical, thermal, mechanical...) [2] using bond graphs. This tool leads to a dynamic representation of multiphysical systems that combines macroscopic and microscopic characteristics. It has indeed been demonstrated that bond graphs can adapt to systems governed by irreversible partial differential equations such as diffusion equations.

The limitation of models obtained by bond graphs applied to systems described by PDEs lies in the discretization of space through meshing techniques. Finite elements, while effective for complex geometries, involve quasi-static approximations that do not easily handle the dual variables of electromagnetism in a single numerical resolution. Additionally, high-frequency dynamic phenomena are poorly represented due to the aforementioned assumption. The finite difference method is effective in handling coupled electromagnetism problems but requires a dense spatial mesh, increasing algorithmic complexity during numerical resolution. Finally, the finite volume method, well-suited for conservative phenomena, can be utilized [3, 4] but demands skill in meshing for diffusive phenomena.

The objective of this research is to overcome the weaknesses of the finite volume method by using unstructured meshes to effectively represent phenomena while managing final algorithmic complexity. The identified methodological challenge lies in integrating this typical numerical resolution approach with the energy modeling approach, specifically the bond graph type, thereby uniting macroscopic and microscopic scales. Overcoming this methodological challenge will result in a complete physical digital twin of an electromagnetic coupling system, encompassing the material's geometry, its macroscopic magnetic properties, the equation system enabling its local dynamic description, and an energy transfer representation.

## Expected work

The internship will revolve around several complementary tasks:

- A bibliographic study phase, enabling the student to better understand the significance and role of each numerical resolution method while familiarizing themselves with the bond graph energy representation. The student will also grasp programming techniques necessary for the numerical solution of equations.
- Development of an energy model for electromagnetic coupling phenomena based on unstructured finite volumes.
- Implementation of the proposed approach through coding and validation against commercial software tools, aiming to deliver initial components of an open numerical resolution code usable by the scientific community dealing with problems described by partial differential equations.
- Experimental validation could also be considered using the PRIMES platform, where measurements of electromagnetic radiation are feasible.

## Required qualities

The candidate should hold a scientific background specializing in electrical engineering or applied mathematics. Apart from possessing certain technical skills, the candidate should exhibit scientific curiosity to approach the various proposed stages and also be proactive in the study's progression. A strong command of mathematical and numerical tools for engineering is required. Proficiency in Matlab/Simulink and/or Python software is a mandatory prerequisite.

Moreover, the candidate must have a good command of English and possess written and oral communication as well as synthesis skills in English and possibly in French.

## How to apply

All applications must be sent via email (CV + cover letter, M1 transcript of records optional but recommended) to the following addresses: [baptiste.trajin@enit.fr](mailto:baptiste.trajin@enit.fr) et [olivier.pantale@enit.fr](mailto:olivier.pantale@enit.fr)

## Internship structure

**Possible beginning dates:** February – March 2024

**Duration:** 5 to 6 months

The work will primarily take place at the Production Engineering Laboratory (LGP) affiliated with the National School of Engineering in TARBES, 47 Avenue d'AZEREIX, 65000 TARBES. Experiments may be conducted at the PRIMES platform, also located in Tarbes.

The remuneration will be paid monthly at an hourly rate of €3.9 for each hour worked during the internship. The monthly remuneration will be calculated proportionally based on the number of days worked, following this formula: 1 day = 7 hours.

## Bibliography

- [1] W. Borutzky, « Bond graph methodology - Development and analysis of multidisciplinary dynamic system models », Springer, 2010.
- [2] B. Trajin, P.-E. Vidal, « Bond graph multi-physics modeling of encapsulating materials in power electronic modules », European Physical Journal Applied Physics, vol. 89, no. 2, 2020.
- [3] S. Mazumder, « Numerical Methods for Partial Differential Equations : Finite Difference and Finite Volume Methods », Academic Press, 2016.
- [4] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, Numerical Recipes in C, The art of scientific computing, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.