

**Sujet de thèse**  
**École doctorale EEA de Lyon**

*Merci de compléter l'ensemble des rubriques et de lire les notes de bas de page.*

<b>Etablissement d'inscription</b> : Université Claude Bernard Lyon 1 <sup>1</sup>
<b>École doctorale</b> : ED 160 EEA de Lyon dirigée par Mr Delachartre Philippe
<b>Intitulé du doctorat</b> : Génie Electrique <sup>2</sup>
<b>Sujet de la thèse</b> : Caractérisation de matériaux magnétiques en 1D et 2D dans une large gamme d'amplitude, de fréquence et de température.
<b>Unité de recherche</b> : Ampère <sup>3</sup> , dirigée par Christian Vollaire
<b>Directeur/trice de thèse</b> : Mr SIXDENIER Fabien
<b>Co-directeur/trice de thèse (le cas échéant)</b> <sup>4</sup> : Mr JOUBERT Charles
<b>Co-directeur/trice de thèse en entreprise (le cas échéant)</b> :

<sup>1</sup> A impérativement choisir dans la liste suivante : Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1

<sup>2</sup> A impérativement choisir dans la liste suivante : Automatique // Electronique, Nanotechnologie, Optique et Laser // Génie Electrique // Ingénierie pour le vivant Traitement du signal et de l'Image)

<sup>3</sup> A impérativement choisir dans la liste suivante : Laboratoire Ampère, CITI, CREATIS, INL, LAGEPP, LGEF

<sup>4</sup> Un/une co-encadrant-e n'est pas nécessairement co-directeur/trice de thèse puisque pour remplir ce rôle, il est nécessaire d'être habilité à diriger des recherches (pour plus de précision, voir le règlement intérieur de l'ED EEA, section 3.

### **Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels :**

Des collaborations et comparaisons de résultats avec l'Institut National de Recherche en Instrumentation et en Métrologie (INRIM) de Turin et l'école polytechnique de Turin (PoliTo) pourront être menées afin d'aboutir à un standard de mesure des pertes en 2D & Température.

### **Domaine et contexte scientifiques :**

Le contexte scientifique adresse les problématiques de caractérisation des matériaux magnétiques dans des limites inexplorées afin de pouvoir améliorer le densité de puissance volumique ou/et massique des applications du génie électrique (moteurs, transformateurs, inductances,...).

**Mots-clefs :** caractérisation magnétique, hystérésis, pertes fer, distortion magnétique

### **Objectifs de la thèse :**

Les objectifs de la thèse sont de pouvoir étudier les propriétés magnétiques de matériaux

magnétiques doux dans des limites inexplorées. Plus particulièrement, il est attendu de pouvoir solliciter le matériau sous champ proche de la saturation du matériau, simultanément sous contrainte thermique et de mesurer les pertes magnétiques avec précision. Des collaborations et comparaisons de résultats avec l'Institut National de Recherche en Instrumentation et en Métrologie (INRIM) de Turin pourront être menées afin d'aboutir à un standard de mesure des pertes en 2D & Température. De plus, ces données expérimentales serviront à édifier des modèles comportementaux de ces phénomènes complexes. En effet, la communauté de modélisation est en attente de nouveaux modèles et de systèmes de mesure fiables sur lequel elle pourrait s'appuyer pour confronter les résultats de leurs modèles à des mesures expérimentales.

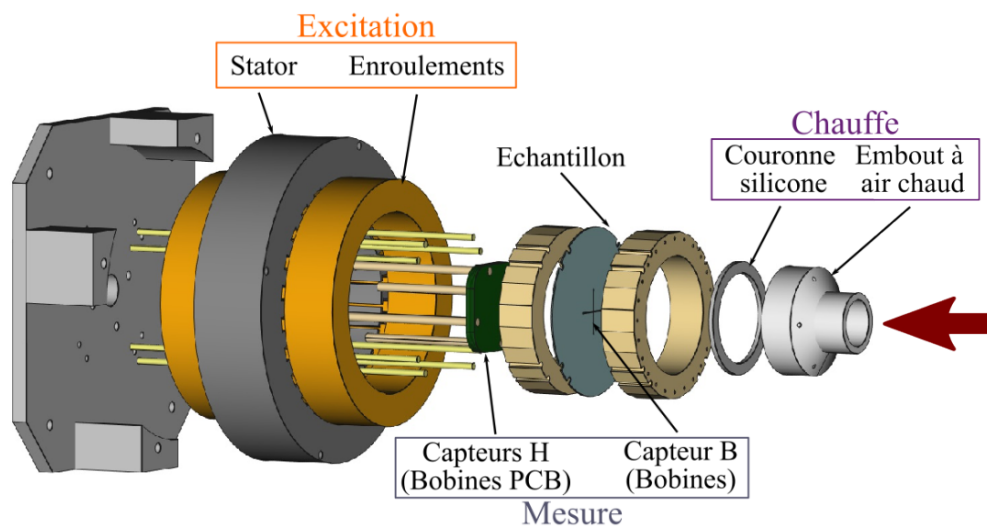
### **Verrous scientifiques :**

Verrous scientifiques :

- dépasser les limites des systèmes de caractérisation magnétique existants en particulier :
  - repousser les limites d'amplitude, de fréquence et de température actuelles
  - améliorer la robustesse des algorithmes de contrôle des formes d'onde dans des conditions extrêmes.

- mise au point de mesures de pertes par une méthode thermique
- comparaison systématique de certains résultats avec d'autres équipes internationales et publications communes.
- Mise à disposition des résultats de mesure pour la communauté "modélisation de matériaux magnétiques"

**Figures :**



Systeme de caractérisation

**Contributions originales attendues :**

1. Extension du domaine expérimental de la caractérisation magnétique 1D et 2D.

Démonstration expérimentale de mesures magnétiques fiables sous sollicitations extrêmes :

- champ proche de la saturation,
- fréquences étendues,

- température contrôlée.

Mise en évidence des limitations physiques et instrumentales des dispositifs classiques et proposition de critères objectifs de validité des mesures dans ces régimes.

## 2. Méthodes robustes de contrôle des formes d'onde en régime fortement non linéaire

Développement ou adaptation d'algorithmes avancés d'asservissement des excitations magnétiques capables de :

- compenser les distorsions dues à l'hystérésis et à la saturation,
- maintenir des formes d'onde imposées (B ou H) malgré les non-linéarités.
- Analyse de la stabilité et de la robustesse des algorithmes en conditions extrêmes.

Constitution d'une base de données expérimentale de référence

## 3. Production d'un jeu de données expérimentales inédites, couvrant :

- différentes amplitudes, fréquences et températures,
- excitations 1D et 2D,
- matériaux magnétiques doux représentatifs des applications industrielles.

Mise à disposition de ces données pour la communauté de modélisation.

### **Programme de recherche et démarche scientifique proposée :**

Année 1 : Prise en main du sujet et premières expérimentations

- Étude approfondie de la bibliographie sur les techniques de caractérisation existantes (mesures invasives et non-invasives, contrôle des formes d'onde, amplification).
- Familiarisation avec le banc d'essai et les instruments de mesure disponibles.

- Réalisation de premières expérimentations pour comprendre les limitations actuelles du système.
- Proposition d'améliorations potentielles sur le plan matériel et logiciel.
- Premiers essais d'optimisation des algorithmes de contrôle des formes d'onde d'excitation (améliorations logicielles).

#### Année 2 : Développement et optimisation des solutions techniques

- Mise en place d'un premier prototype pour améliorer la puissance des amplificateurs (amélioration logicielles validées en année 1).
- Tests et comparaisons entre mesure invasive et non-invasive (échantillons percés ou non).
- Validation expérimentale des améliorations proposées (améliorations matérielles et logicielles confondues).
- Tests et optimisation des nouvelles limites de performances des systèmes de caractérisation développés.

#### Année 3 : Consolidation et valorisation des résultats

- Comparaison approfondie avec d'autres équipes de recherche internationales.
- Analyse des écarts entre les différentes approches et explication des divergences observées corrélées aux matériels et méthodologies employés sur chacun des systèmes de caractérisation.
- Si possible, rédaction d'un standard (norme) de caractérisation tirant parti des conclusions précédentes



**EEA**  
ÉLECTRONIQUE  
ÉLECTROTECHNIQUE  
ET AUTOMATIQUE  
UNIVERSITÉ DE LYON

- Rédaction des publications scientifiques et participation à des conférences internationales.
- Rédaction du manuscrit de thèse et préparation de la soutenance.

L'ensemble de la thèse suivra une approche itérative, avec des ajustements continus en fonction des résultats obtenus et des échanges avec la communauté scientifique.

### Encadrement scientifique :

- **Description du comité d'encadrement :** [à compléter avec le rôle dans l'encadrement scientifique (en termes de compétences scientifiques, etc.) et le pourcentage d'implication du directeur de thèse <sup>5</sup> et des autres membres du comité<sup>6</sup> ]

Nom Prénom	Labo / Equipe	Compétences scientifiques	Taux d'encadrement %
Mr SIXDENIER Fabien	Ampère MAGEC	Caractérisation et modélisation des matériaux magnétiques, conception de transformateurs	50
Mr JOUBERT Charles	Ampère COSMA	Chaine d'instrumentation, électromagnétisme	50

- Le comité d'évaluation de l'HCERES ayant demandé à l'école doctorale de limiter la taille du comité d'encadrement à deux membres (directeur de thèse compris), il est impératif de ne proposer des comités d'encadrement de taille plus importante que si cela est absolument nécessaire<sup>7</sup> et **de le justifier soigneusement.**

<sup>5</sup> Le directeur de thèse doit être un HdR rattaché à l'ED EEA ou en passe de le devenir avant juin de l'année en cours ou bénéficier d'une dérogation du Conseil Scientifique lors du dépôt du sujet de thèse.

<sup>6</sup> Dans le cas d'un comité d'encadrement réparti sur plusieurs établissements, la plus grande partie de l'encadrement est effectuée par des membres de l'établissement. Si l'encadrement de la thèse implique des membres hors de l'ED EEA, la part de l'encadrement des membres ED doit être très supérieure à 50%.

<sup>7</sup> Un certain nombre de commissions type CNU ne reconnaissent un co-encadrement qu'au-delà d'un certain pourcentage. Souvent l'encadrement est considéré comme effectif si > 30%.

- **Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s)** (Département/Equipe(s) impliquée(s)) (**pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s)**) :

La personne fera partie de la nouvelle équipe MAGEC à 100% (MATériaux du Génie Electrique et ses Composants)

**Financement de la thèse** : Contrat doctoral de l'établissement d'inscription

**Profil du candidat recherché (prérequis)** :

De fortes compétences expérimentales et des connaissances pointues sur les systèmes d'acquisition et pilotage de ces systèmes nous semble indispensable au candidat pour mener à bien sa thèse. Au vu des grandeurs à mesurer, de bonnes connaissances générales en électromagnétisme sont également nécessaires. Une connaissance des différents matériaux magnétiques doux et de leurs domaines d'application serait un plus, mais celle-ci sera rapidement acquise lors de la thèse.

**Objectifs de valorisation des travaux de recherche** :

Plusieurs publications sur le système de caractérisation lui même sont à prévoir ou/et en modélisation sont à prévoir. La participation à la conférence dédiée aux mesures magnétiques 1D et 2D nous paraît indispensable (1&2DM).

**Compétences qui seront développées au cours du doctorat** :

La personne développera des compétences dans le domaine de la métrologie et de l'acquisition de données. Il aura d'autre part acquis à l'issue de la thèse une connaissance aiguë de l'utilisation des matériaux pour le génie électrique sollicités dans des conditions au plus proches des conditions

rencontrées dans certaines applications. L'aspect modélisation fera toucher du doigt à la

personne recrutée, l'un des phénomènes les plus complexes à modéliser dans le domaine du génie électrique.

### **Perspectives professionnelles après le doctorat :**

Les perspectives professionnelles ouvertes sont académiques (recherche, enseignement supérieur) et/ou industrielles (recherche-développement), voire création de start-up.

### **Références bibliographiques sur le sujet de thèse :**

[1] « Prediction of anisotropic properties of grain-oriented steels based on magnetic measurements », Stan Zurek , Piotr Borowik and Krzysztof Chwastek ,Volume 69: Issue 6,

Pages: 470-473, DOI: <https://doi.org/10.2478/jee-2018-0078>

[2] « Characterisation of Soft Magnetic Materials Under Rotational Magnetisation », Stan Zurek, November 2017, DOI: 10.1201/b22374, CRC Press, ISBN: 9781138304369

[3] Enokizono, Masato & Tanabe, I.. (1998). Local Two-Dimensional Magnetic Properties of Grain-Oriented Sheets. Journal of The Magnetics Society of Japan. 22. 901-904. 10.3379/jmsjmag.22.901.

[4] Appino, Carlo & Ferrara, Enzo & Fiorillo, Fausto & Ragusa, Carlo & Barrière, Olivier. (2019). Static and dynamic energy losses along different directions in GO steel sheets. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 500. 166281. 10.1016/j.jmmm.2019.166281.

[5] de la Barrière, Olivier & Appino, Carlo & Ragusa, Carlo & Fiorillo, Fausto & Lobue, M. &

Mazaleyrat, F.. (2018). 1-D and 2-D Loss-Measuring Methods: Optimized Setup Design, Advanced

Testing, and Results. IEEE Transactions on Magnetics. 1-15. 10.1109/TMAG.2018.2846619

[6] Clémentine Delaunay, Fabien Sixdenier, Charles Joubert, Riccardo Scorretti. Flux density waveform control based on root-finding algorithms. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 564, 2022