



# Ampère

Unité Mixte de Recherche du CNRS - UMR 5005

Génie Électrique, Automatique et Bio-Ingénierie

note

## Partie I

<b>Établissement d'inscription :</b> Université Claude Bernard Lyon 1
<b>École doctorale :</b> ED 160 EEA de Lyon dirigée par Mr Delachartre Philippe
<b>Intitulé du doctorat :</b> Génie Electrique
<b>Sujet de la thèse :</b> Etude des propriétés magnétiques d'alliages magnétiques doux en conditions extrêmes sous excitation 2D
<b>Unité de recherche :</b> Ampère, dirigée par Christian Voltaire
<b>Directeur/trice de thèse :</b> Mr SIXDENIER Fabien
<b>Co-directeur/trice de thèse (le cas échéant) :</b> Mr JOUBERT Charles
<b>Co-directeur/trice de thèse en entreprise (le cas échéant) :</b>

Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels : INRIM (Torino, Italie) ou/et [Università degli Studi di Perugia](http://www.uniperugia.it) (Perugia, Italie)

## Partie II

### Domaine et contexte scientifiques :

Certains matériaux magnétiques possèdent une anisotropie de leurs propriétés magnétiques [1]. Ces propriétés sont souvent déterminés sur des échantillons dédiés en 1D. Or, dans les applications, le champ magnétique peut avoir plusieurs directions en même temps voir tourner comme c'est le cas dans une machine électrique tournante. Par ailleurs, pour atteindre des compacités élevées, les concepteurs de machines doivent augmenter les niveaux d'induction, ce qui parfois conduit à utiliser des tôles à grains orientés à certains endroits de la machine. Ces tôles fortement anisotropes par nature vont induire des champs avec de fortes distorsions. Ces distorsions peuvent être empirées si la température est trop élevée.

**Mots-clefs :** Caractérisation vectorielle, hystérésis vectoriel, anisotropie température,

**Objectifs de la thèse :**

Les objectifs de la thèse sont de pouvoir étudier les propriétés magnétiques de matériaux magnétiques doux plus ou moins anisotropes soumis à un champ bidimensionnel contrôlable à souhait. Ces mêmes propriétés anisotropes seront également étudiés sous contrainte thermique pour, comprendre l'influence de la température sur les propriétés dans chaque direction et l'influence de celle-ci sur l'anisotropie. Plus particulièrement, il est attendu de pouvoir solliciter le matériau sous champ proche de la saturation du matériau et sous contrainte thermique et de mesurer les pertes magnétiques avec précision. La thèse précédente a répondu, en partie, à cette première attente. En effet, la présentation du système de caractérisation s'est fait remarquer à des conférences nationales et internationales. Des collaborations et comparaisons de résultats avec l'Institut National de Recherche en Instrumentation et en Métrologie (INRIM) de Turin ont pu être faites et donnent des résultats plus qu'encourageants. Il reste malgré tout des verrous et phénomènes complexes à maîtriser avant d'aboutir à un standard de mesure des pertes en vectoriel et qui plus est sous contrainte de température élevée, ce qui n'est fait quasiment nulle part. De plus, les tentatives de modélisation de phénomènes aussi complexes ont pour l'instant abouti à des résultats mitigés (impossible de prédire le déphasage de retard entre H et B avec précision). La communauté de modélisation est donc en attente de nouveaux modèles aptes à répondre à ces nouveaux enjeux.

**Verrous scientifiques :**

- Asservissement fortement non-linéaire de formes d'ondes de champ magnétique tournant équilibré, de caractéristiques connues, à l'intérieur d'un échantillon 2D de matériau magnétique avec propriétés fortement anisotropes;
- Mesure en 2D (direction, amplitude, déphasage) des grandeurs magnétiques dans l'échantillon, compensation de capteurs de champ de surface ?
- Modélisation d'hystérésis vectoriel prenant en compte la température.

Le standard de mesure des pertes magnétiques se fait par une combinaison linéaire entre plusieurs mesures en 1D, i.e un seul axe à la fois (? comprendre mesurées sur un axe puis un autre puis un autre,...). Le but, ici est de caractériser dans plusieurs directions à la fois simultanément, ce qui permettra d'explorer plus de types d'excitations magnétiques, d'obtenir plus de réponses et donc de mieux comprendre le rôle de certains paramètres ou procédés technologiques sur les propriétés magnétiques [3,4]. Conjointement à la sollicitation magnétique selon plusieurs axes simultanément [5] une contrainte en température sera appliquée. Ces multiples conditions réunies seront beaucoup plus représentatives et fidèles aux conditions que rencontrent les matériaux doux dans certaines applications.



### **Contributions originales attendues :**

Deux contributions majeures sont attendues :

- fiabiliser le système de caractérisation magnétique existant et de le perfectionner si besoin, et notamment l'asservissement du contrôle de la forme d'onde dans le cas des champs proches de la saturation [6] en comparant systématiquement les résultats avec des équipes internationales travaillant sur ce sujet
- contribuer à la modélisation de l'hystérésis vectoriel en modifiant les approches développées au laboratoire AMPERE [7]

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

Après avoir pris connaissance, via la bibliographie, des techniques de caractérisation, le doctorant devra rapidement prendre en main le système existant, puis fort de cette expérience proposer des solutions techniques pour perfectionner le système de caractérisation 2D sous contrainte thermique qui sera amélioré tout du long de la thèse. Des comparaisons avec les équipes internationales seront à l'ordre du jour.

Dans un second temps, des améliorations du modèle d'hystérésis vectoriel utilisé par le laboratoire AMPERE [7] devront être proposées, testées et qualifiées ou non et ce tout au long de la thèse.

### **Encadrement scientifique :**

Nom Prénom	Labo/equipe	Compétences scientifiques	Taux d'encadrement
Fabien SIXDENIER	AMPERE, EE	Caractérisation, modélisation matériaux magnétiques	50 %
Charles JOUBERT	AMEPRE, EE	Électronique analogique, métrologie, traitement du signal	50,00 %

### **Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s):**

[Laboratoire AMPERE, département Énergie Électrique, 100 %]

### **Financement de la thèse :**

Contrat doctoral de l'établissement d'inscription



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

Dans l'idéal, un profil mixte (expérimental/modélisation) est attendu. Cependant, selon le profil du candidat et sa motivation, le(la) candidat(e) pourra orienter son travail sur l'un ou l'autre des thèmes.

*Profil caractérisation :* 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.

*Profil modélisation :* De fortes compétences en analyse numérique et programmation et implémentation de code dans des logiciels de simulation/conception.

**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 :**

Le(a) candidat(e) 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 aigüe 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.

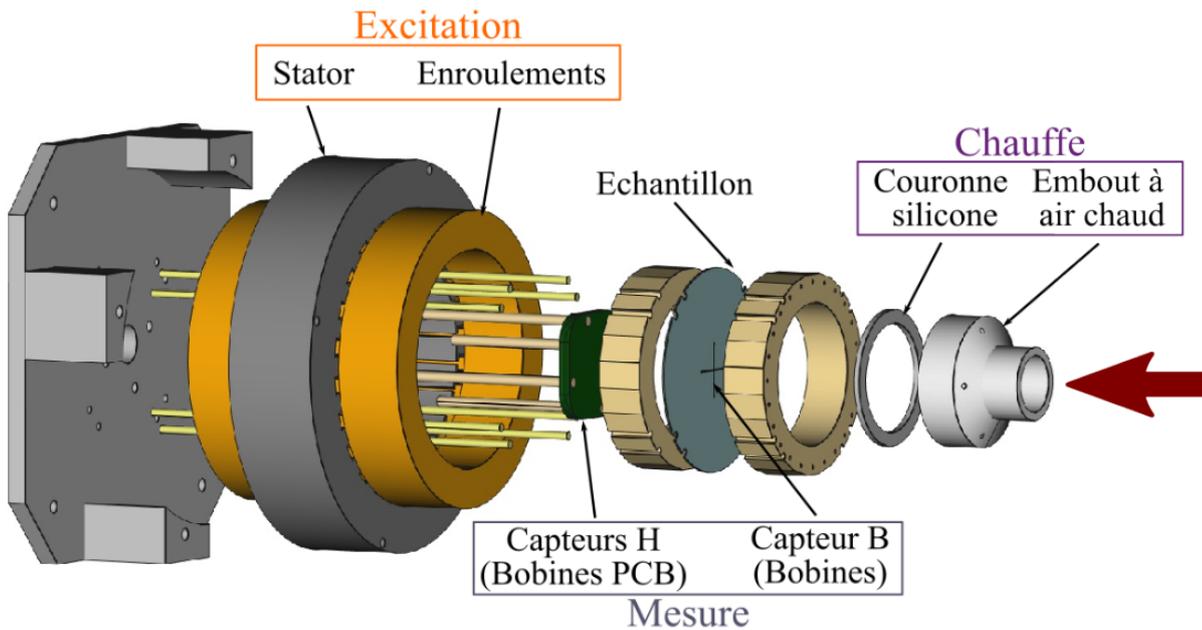


Figure 1: Système de caractérisation 2D avec système de mise en chauffe

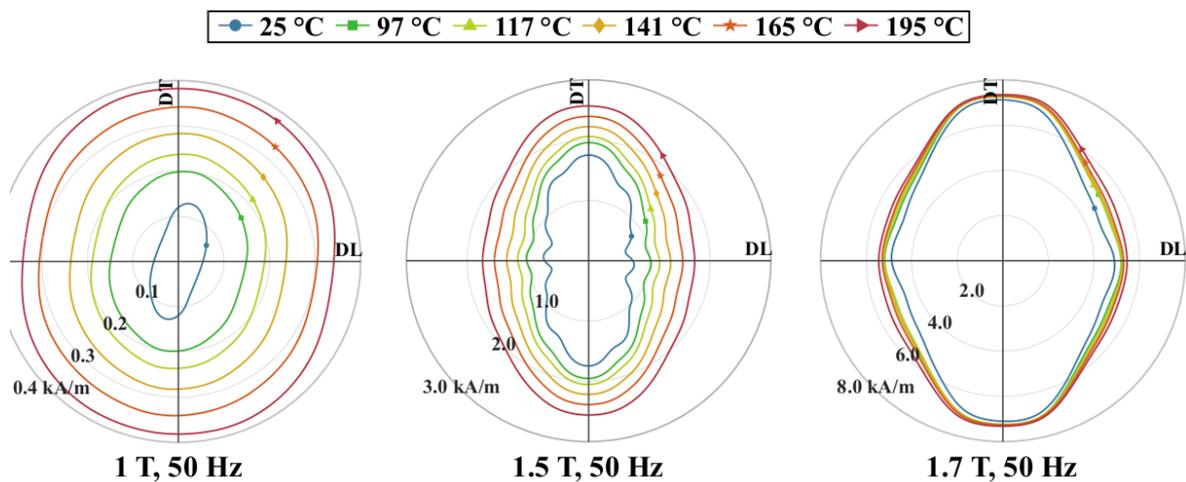


Figure 2: Vecteurs  $H$  représentés dans un plan 2D pour une induction de 1T(gauche), 1.5T(centre) et 1.7T(droite), 50Hz constante tournante pour différentes températures.

**Figures :**

## 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*, 2022, 564, pp.170109. [10.1016/j.jmmm.2022.170109](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170109). [hal-03841260](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03841260)
- [7] Riccardo Scorretti, Fabien Sixdenier. An analytical formula to identify the parameters of the energy-based hysteresis model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 548, pp.168748. [10.1016/j.jmmm.2021.168748](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168748). [hal-03512726](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03512726)