

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 641

*Mathématiques et Sciences et Technologies du numérique,
de l'Information et de la Communication*

Spécialité : Génie électrique

Par

Hakim OUESLATI

Contribution à la modélisation multiphysique des matériaux magnétiques à point de Curie en vue de l'autorégulation thermique dans les procédés de chauffage par induction

Thèse présentée et soutenue à « Saint-Nazaire », le « 16/07/2025 »

Unité de recherche : Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique (IREENA)

Rapporteurs avant soutenance :

Anouar Belahcen Professeur des universités, Aalto University, Finlande
Nicolas Galopin Maître de conférences HDR, Université Grenoble Alpes, G2Elab

Composition du Jury :

Examinateurs :	Abdelkader Benabou Gérard Berthiau Yasmine Gabi Simon Morville	Professeur des universités, Université de Lille, L2EP Professeur émérite, Nantes Université, IREENA Docteur, Fraunhofer Institute, Allemagne Docteur, Ingénieur de recherche, IRT Jules Verne
Dir. de thèse :	Didier Trichet	Professeur des universités, Nantes Université, IREENA
Co-dir. de thèse :	Guillaume Wasselynck	Maître de conférences HDR, Nantes Université, IREENA

Invité(s)

Thierry Waeckerle Docteur, société APERAM (Nevers)

Titre : Contribution à la modélisation multiphysique des matériaux magnétiques à point de Curie en vue de l'autorégulation thermique dans les procédés de chauffage par induction

Mots clés : Température de Curie, Ferromagnétisme, Couplage magnétothermique, Autorégulation thermique.

Résumé : Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la modélisation multiphysique des matériaux à point de Curie soumis à un chauffage par induction électromagnétique, avec pour perspective leur exploitation dans le domaine des matériaux composites. Ces matériaux présentent la particularité de perdre leurs propriétés ferromagnétiques au-delà d'une température critique, appelée température de Curie. Ce changement d'état magnétique se traduit par une chute brutale de la perméabilité magnétique, entraînant une forte diminution de la puissance électromagnétique transférée au matériau. Ce phénomène ouvre ainsi la voie à une régulation thermique intrinsèque, autonome, et sans recours à des capteurs externes. Toutefois, la modélisation de ce type de matériaux soulève plusieurs défis scientifiques majeurs. Parmi ceux-ci, la prise en compte d'une double non-linéarité, liée à la dépendance simultanée de la perméabilité magnétique au champ appliqué et à la température, constitue une difficulté centrale.

À cela s'ajoutent les contraintes numériques induites par les variations rapides de l'épaisseur de peau, qui exigent un maillage raffiné et adaptable, notamment dans les zones de transition magnétique.

Afin de répondre à ces problématiques, un outil de simulation dédié a été développé, intégrant un couplage magnétothermique avec mise à jour itérative des propriétés du matériau. Cet outil permet de simuler avec précision le comportement de ces matériaux au voisinage du point de Curie, tout en évaluant leur potentiel d'autorégulation thermique dans diverses conditions d'excitation. Une analyse de sensibilité a également été conduite pour identifier les plages de paramètres physiques et géométriques favorisant l'apparition de l'autorégulation, apportant ainsi des éléments de dimensionnement essentiels pour une intégration industrielle maîtrisée.

Title : Contribution to the multiphysics modelling of Curie point magnetic materials for thermal self-regulation in induction heating processes

Keywords : Curie temperature, Ferromagnetism, Magnetothermal coupling, Thermal self-regulation.

Abstract : This thesis focuses on the multiphysics modeling of Curie point materials subjected to electromagnetic induction heating, with a view to their potential application in the field of composite materials. These materials exhibit a distinctive behavior: their ferromagnetic properties vanish beyond a critical temperature known as the Curie temperature. This transition results in a sudden drop in magnetic permeability, significantly reducing the electromagnetic power absorbed by the material. Such a mechanism paves the way for intrinsic thermal self-regulation, operating without external sensors or feedback systems.

However, modeling these materials poses several scientific challenges. Chief among them is the double nonlinearity of their magnetic behavior, stemming from the simultaneous dependence of permeability on both magnetic field intensity and temperature.

In addition, sharp variations in the skin depth near the Curie point introduce numerical difficulties, particularly with respect to mesh refinement in regions of steep magnetic transitions.

To address these issues, a dedicated simulation tool has been developed, featuring a magnetothermal coupling approach with iterative updating of the material properties. This tool allows for accurate prediction of the behavior of Curie point materials near their transition temperature, while also assessing their self-regulation capabilities under varying excitation conditions. A sensitivity analysis has been conducted to identify favorable parameter ranges that promote thermal stabilization, thus providing valuable insight for reliable and controlled industrial integration.