

Université de Lorraine
École Doctorale IAEM-Lorraine

Informatique - Automatique - Électrotechnique - Électronique - Mathématiques
Département de Formation Doctorale « Électrotechnique - Électronique »

Sujet de thèse de doctorat :

**Influence de la posture sur les courants induits dans le
corps des travailleurs opérant en champ magnétique
basses fréquences**

Proposé par :

Baptiste Ristagno, Responsable d'études en électromagnétisme,
Laboratoire EVO – Département IET, INRS

Julien Fontchastagner, Maître de conférences en génie électrique,
Université de Lorraine – GREEN

Contexte :

Le Groupe de Recherche en Énergie Électrique de Nancy (GREEN) est un laboratoire reconnu internationalement pour ces travaux et compétences dans le domaine de l'utilisation et du traitement de l'énergie électrique. Les compétences du laboratoire sont particulièrement liées à l'électromagnétisme, aux machines électriques, au stockage de l'énergie électrique, aux structures des convertisseurs d'interface, aux chaînes de conversion électromécanique et aux applications de la supraconductivité en électrotechnique.

L'Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS) est une association loi 1901, à but non lucratif, qui a pour mission de développer et de promouvoir une culture de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. Dans ce cadre, le centre lorrain de l'INRS conduit des études et recherches afin d'améliorer ses connaissances sur l'ensemble des risques professionnels. Beaucoup de travailleurs étant exposés à des champs électromagnétiques, l'INRS s'intéresse aux effets de ces champs sur le corps humain.

Les effets des champs en hautes fréquences (HF) sont largement étudiés en téléphonie (radiofréquences), mais aussi dans le cas des machines industrielles hautes fréquences telles que les machines à souder par pertes diélectriques [1]. L'exposition professionnelle à des champs basses fréquences (BF) étant moins courante, peu de travaux portent sur leurs effets. Cependant, certains procédés mettent en œuvre des valeurs de courants sources conséquentes et donc induisent des niveaux de champ relativement importants dans le corps d'un travailleur situé à proximité. L'INRS estime à environ 130 000 [2] le nombre de ce type d'installations. Quantifier les phénomènes intervenant dans le corps d'un travailleur présent autour de ces installations représente donc un enjeu très important.

Description scientifique et technique :

Le but de la thèse est de quantifier le champ électrique induit (ou la densité de courants induits correspondante) à l'intérieur d'un corps humain au voisinage de sources de champs basses fréquences. Un intérêt tout particulier sera apporté à l'influence de la posture du travailleur.

L'objectif premier est de développer des modèles de « compréhension » des phénomènes. Afin d'assurer une certaine qualité de résultats, nous souhaitons développer deux axes en parallèle. Les modèles issus de chacun de ces deux axes seront complémentaires et permettront de valider ou non les hypothèses sur lesquelles ils reposent :

1. Des **modèles d'expérimentations physiques** : l'idée est de disposer d'une plateforme d'essais expérimentaux mettant en œuvre des dispositifs plus simples que les cas réels mais suffisamment représentatifs. Ceci reposera sur la création de mannequins dont les caractéristiques physiques se rapprochent de celles d'un corps humain tout en étant beaucoup moins complexes. L'intérêt est de construire pas à pas une série d'expérimentations pertinentes en choisissant comme point de départ un mannequin constitué de formes géométriques simples (pavés, cylindres, sphères ou tores) faites d'un unique milieu homogène et isotrope aux propriétés linéaires.

Le challenge sera de définir un protocole expérimental approprié. En effet, les champs électriques induits à mesurer à l'intérieur des mannequins seront de très faibles amplitudes, de l'ordre de quelques $\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ à quelques $\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}$ en fonction de la source, et répartis volumiquement (à l'inverse des champs HF qui sont essentiellement surfaciques). Toute une métrologie adaptée devra être mise en place et validée. Pour ce faire, le docteur aura accès à l'ensemble du matériel disponible au laboratoire d'électromagnétisme de l'INRS comme par exemple des bobines de Helmholtz récemment développées Figure 1.

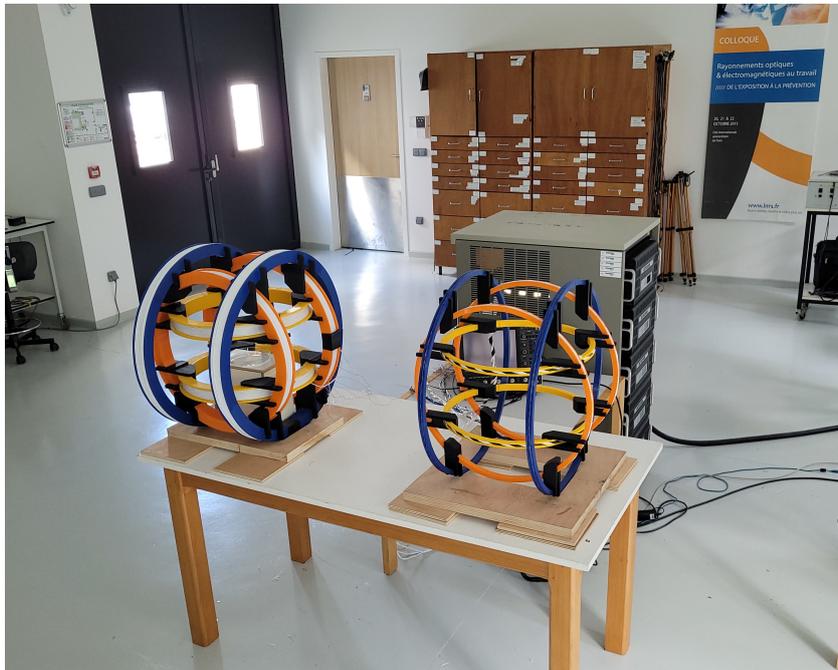


FIGURE 1 – Bobines de Helmholtz au laboratoire d'électromagnétisme de l'INRS

2. Des **modèles d'expérimentations numériques** : en complément des modèles précédents, il est nécessaire de disposer d'outils de calcul adaptés. Ils seront particulièrement utiles pour prédéfinir certaines expérimentations et permettront de valider ou non certaines mesures par corrélation. Compte tenu de l'historique et de l'expérience des encadrants, seront privilégiés, dans un premier temps, des modèles reposant sur la méthode des éléments finis (MEF). Différentes formulations seront étudiées : en potentiels vecteurs ou scalaires [3], ou en champs (plus originales). L'intérêt de commencer avec les formes géométriques simples citées ci-dessus (et telles que dans [4]), outre la possibilité de calcul analytique, est de pouvoir tester certaines astuces de modélisation permettant de réduire les temps de calculs [5]. Des exemples de résultats préliminaires représentant la norme de la densité de courant induit sur un disque et sur un corps humain simplifié sont donnés en Figure 2.

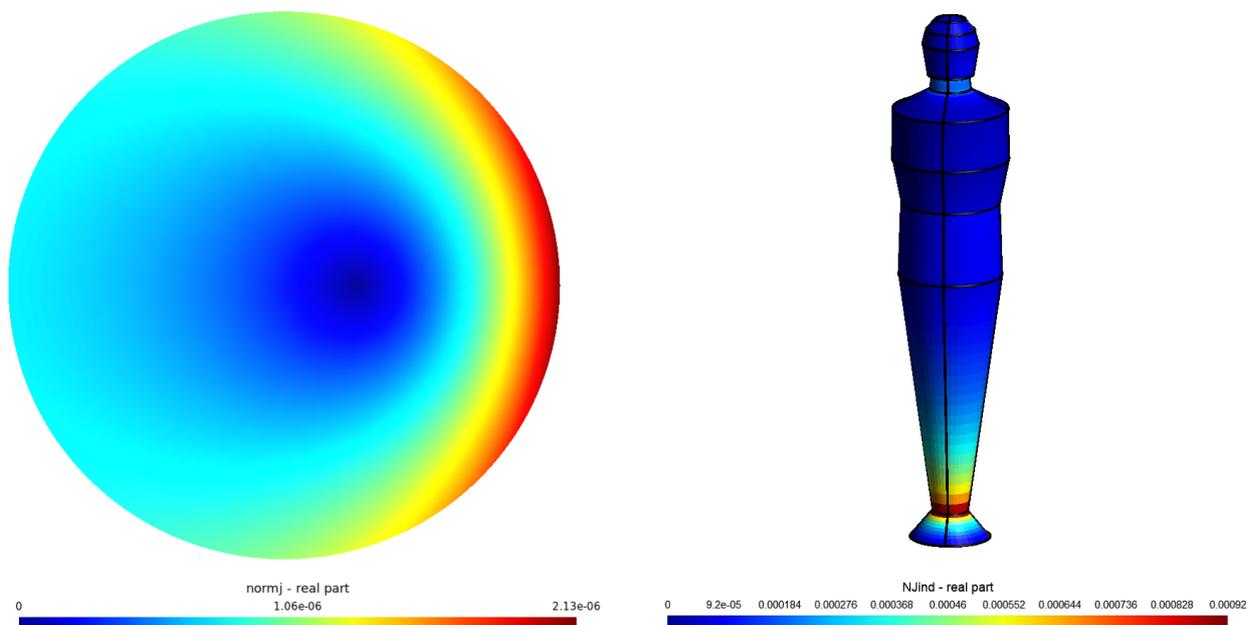


FIGURE 2 – Exemples de résultats obtenus via la MEF

Une fois les modèles développés et validés, l'influence de la posture du manipulateur sera étudiée dans différentes situations. Les géométries utilisées seront encore choisies pour être représentatives tout en évitant d'être trop complexes. Une des originalités de l'approche sera donc de se situer à une échelle intermédiaire, à mi-chemin entre :

- les géométries très simples sur lesquelles reposent certaines normes, typiquement un disque pour la NF EN 62226-2-1 [6] ;
- les géométries très complexes des « mannequins numériques » (appelés fantômes) obtenus à partir d'images médicales voxelisées, mais de postures figées (bras le long du corps ou tendus vers l'avant) [7].

Dans le cadre d'activités d'information et de prévention sur les risques dus à l'exposition à de forts champs BF, cette étude permettrait de mieux évaluer les risques sanitaires des travailleurs exposés à des champs électromagnétiques.

Profil recherché :

Les candidats peuvent être issus (liste non-exhaustive) :

- de Master 2 « Physique expérimentale » ou équivalent,
- ou de Master 2 « Bioscience et Ingénierie de la Santé » ou équivalent,
- ou de Master 2 « Génie Électrique / Électrotechnique » ou équivalent,
- ou d'une École d'ingénieur avec une formation « Génie Électrique / Électrotechnique ».

Les postulants devront montrer un goût prononcé pour les essais expérimentaux et une expérience préliminaire (stage, projet de fin d'étude, ...) dans un laboratoire de recherche ne fera que renforcer le dossier de candidature. Une connaissance des méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles (type MEF) serait appréciée, mais n'est en rien obligatoire.

Complément d'information :

Lieu de la thèse : INRS (Vandœuvre-lès-Nancy)

Début de la thèse : septembre/octobre 2023

Contrat de travail INRS : CDD 36 mois, 30 500€ bruts annuel

Candidature en envoyant une lettre de motivation et un CV par e-mail simultanément à :

- Baptiste Ristagno : baptiste.ristagno@inrs.fr
- Julien Fontchastagner : julien.fontchastagner@univ-lorraine.fr

Sources bibliographiques :

- [1] R. Scorretti. “Travailleurs et champs électromagnétiques industriels : Exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques industriels.” Les cahiers de la Recherche. Santé, Environnement, Travail. ANSES, La santé au travail, pp.13-14, 2018.
- [2] INRS, “Les champs électromagnétiques”, Dossier Travail et sécurité, TS765, 2015.
- [3] R. Scorretti, R. Perrussel, L. Morel, *et al*, “Numerical dosimetry of currents induced in the human body by ELF magnetic fields”, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 29, n° 6, pp. 1425-1434, 2010.
- [4] A. C. Gubernati, F. Freschi, L. Giaccone, *et al*, “Modeling of Exposure to Low Frequency Electromagnetic Fields of Workers in Arbitrary Posture”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, n° 2, 2019.
- [5] B. Ristagno, D. Giraud, J. Fontchastagner, *et al*, “FEM using projection of physical properties suitable for movement modeling and optimization processes”, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 39, n° 5, pp. 1185-1199, 2020.
- [6] AFNOR. “Exposition aux champs électriques ou magnétiques à basse et moyenne fréquence – Méthodes de calcul des densités de courant induit et des champs électriques induits dans le corps humain – Partie 2-1 : exposition à des champs magnétiques – Modèles 2D”. Norme NF EN 62226-2-1, avril 2005.
- [7] Tomoaki Nagaoka et Soichi Watanabe, “Postured voxel-based human models for electromagnetic dosimetry”, *Physics in Medicine & Biology*, vol. 53, pp. 7047–7061, 2008.



**University of Lorraine
IAEM-Lorraine Doctoral School**

Computer Science - Automatic Control - Electrical Engineering - Mathematics - Architectural
Sciences

Department of Doctoral Training « Electrical Engineering - Electronics »

Subject of PhD thesis:

**Influence of posture on eddy currents in the bodies of
workers working in low frequency magnetic fields**

Proposed by:

Baptiste Ristagno, Person in charge of studies in electromagnetism,
EVO Laboratory – Work Equipment Engineering Department, INRS
Julien Fontchastagner, Associate Professor in electrical engineering,
University of Lorraine — GREEN

Context:

The Group of Research in Electrical Energy of Nancy (GREEN) is a laboratory known internationally for its works and skills in the field of using and treating electrical energy. The laboratory's skills are in particular linked to electromagnetism, electric machines, electric energy storage, interface converter structures, electromagnetic conversion channels and superconductivity applications in electronics.

The French National Research and Safety Institute for the Prevention of Occupational Accidents and Diseases (INRS) is a non-profit association subject to the law of 1901, whose vocation is to develop and promote awareness to prevent occupational accidents and diseases. Hence, the INRS centre in Lorraine carries out studies and research to improve its knowledge relating to all occupational risks. Since many workers are exposed to electromagnetic fields, INRS focuses on the effects of these fields on the human body.

The effects of high frequency (HF) fields have been widely studied for the telephony (radiofrequencies) sector, and for industrial machines operating at high frequencies such as dielectric welding machines [1]. Since occupational exposure to low frequency fields (LF) is less common, few works have focused on their effects. However, some processes implement high source current values and therefore lead to quite considerable levels in the bodies of workers working close by. INRS estimates the number of these installations at about 130,000 [2]. Thus, quantifying the phenomena involved in the bodies of workers working in the vicinity of such installations is an important challenge.

Scientific and technical description:

The aim of the thesis is to quantify the electric field induced (or the density of the corresponding induced currents) inside a human body close to sources of low frequency fields. Particular attention will be given to the influence of workers' postures.

The first objective is to develop models to “understand” the phenomena. In order to ensure the quality of the results, we want to develop two directions in parallel. The models produced from each of these two directions will be used in synergy and permit validating or not the hypotheses in which they are based:

1. **Experimental models:** the idea is to utilise an experimental test platform that implements simpler devices than those used in real cases but which are sufficiently representative. This will rely on the development of manikins whose physical characteristics are close to those of a human body while being far less complex. The aim is to build step-by-step a series of pertinent experiments by choosing as starting point a mannikin made of simple geometric shapes (blocks, cylinders, spheres and toruses) made of a single and isotropic medium with linear properties.

The challenge will be to define an appropriate experimental protocol. Indeed, the induced electric fields to measure the interior of the manikins will be of very low amplitudes, in the region of several $\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ to several $\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}$ as a function of source, and distributed volumetrically (contrary to HF fields which are essentially on the surface). The metrology used must be adapted, installed and validated. To do this, the PhD student will have access to an array of equipment available at the INRS electromagnetism laboratory, such as the recently developed Helmholtz coils Figure 1.



Figure 1: Helmholtz coils at the INRS electromagnetism laboratory.

2. **Numerical models:** in addition to the previous models, it is necessary to have available adapted models. They will be especially useful for predefining certain experiments and permit validating or not certain measures by correlation. Taking into account the history and experience of the supervisors, priority will first be given to models based on the finite elements method (FEM). Different formulations will be studied: in vector or scalar potentials [3], or in fields (more original). The advantage of beginning with the simple geometric shapes mentioned above (and those in [4]), besides the possibility of analytical calculation, is to be able to test several modelling tricks that allow reducing calculation

time [5]. Examples of preliminary results representing the norm of the current density induced on a disc and on a simplified human body are shown in Figure 2.

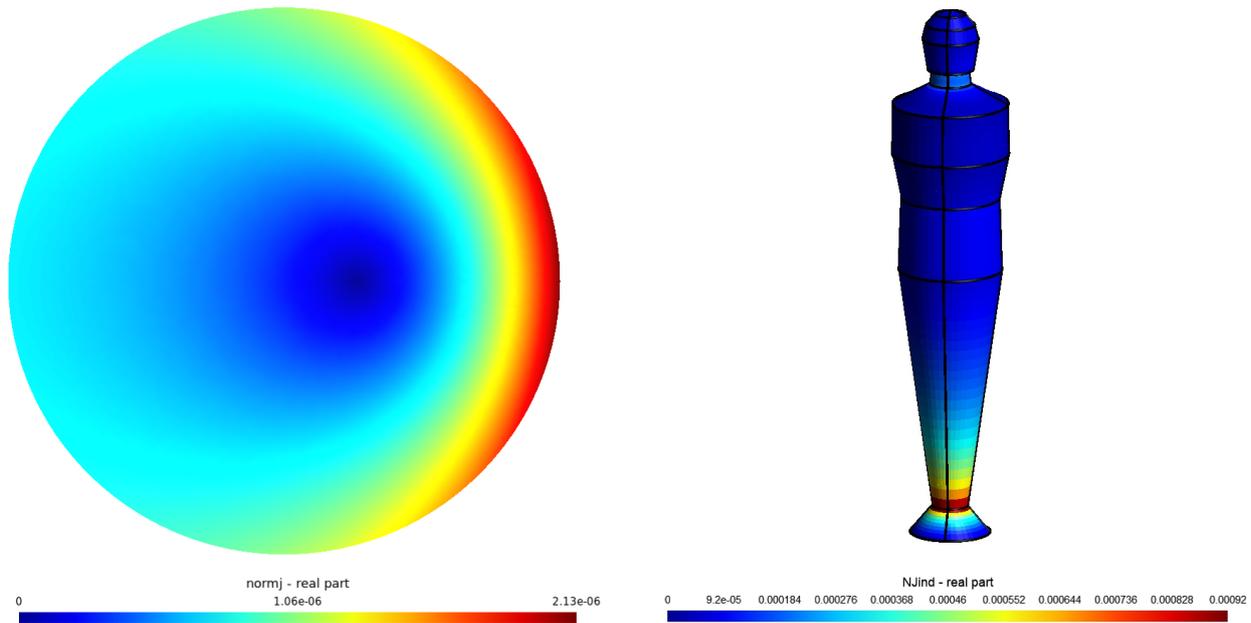


Figure 2: Examples of results obtained through FEM.

Once the models have been developed and validated, the influence of the operator's posture will be studied in different situations. The geometries used will be chosen again to be representative while avoiding excessive complexity. One of the originalities of the approach will therefore be to situate it on an intermediate scale, midway between:

- very simple geometries on which certain norms are based, typically a disc for NF EN 62226-2-1 [6] ;
- the very complex geometries of "numerical manikins" (called phantoms) obtained from voxel-based medical images, but with static postures (arm alongside the body or held in front of it) [7].

In the framework of risk information and prevention relating to exposure to strong LF fields, this study will permit better assessment of the health risks of workers exposed to electromagnetic fields.

Desired profile:

The applicants can hold (non-exhaustive list):

- a second year Master's degree in "Experimental Physics" or equivalent,
- or a second year Master's degree in "Bioscience and Health Engineering" or equivalent,
- or a second year Master's degree in "Electrical/Electronic Engineering" or equivalent,
- or a degree from an Engineering School in "Electrical/Electronic Engineering".

The applicants must display a strong inclination for experimental tests and preliminary experience (training course, final year project, etc.) in a research laboratory will certainly strengthen the applicant's file. Knowledge of numerical methods used to solve partial derivative equations (FEM type) will be appreciated, but is not obligatory.

Additional information:

Place of PhD thesis: INRS (Vandœuvre-lès-Nancy)

Start of PhD thesis: september/october 2023

INRS employment contract: Fixed term contract: 36 months, €30,500 gross per year

Applications must include a motivation letter and a CV sent by email simultaneously to:

- Baptiste Ristagno : baptiste.ristagno@inrs.fr
- Julien Fontchastagner : julien.fontchastagner@univ-lorraine.fr

References:

- [1] R. Scorretti. “Travailleurs et champs électromagnétiques industriels : Exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques industriels.” Les cahiers de la Recherche. Santé, Environnement, Travail. ANSES, La santé au travail, pp.13-14, 2018.
- [2] INRS, “Les champs électromagnétiques”, Dossier Travail et sécurité, TS765, 2015.
- [3] R. Scorretti, R. Perrussel, L. Morel, *et al*, “Numerical dosimetry of currents induced in the human body by ELF magnetic fields”, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 29, no.6, pp. 1425-1434, 2010.
- [4] A. C. Gubernati, F. Freschi, L. Giaccone, *et al*, “Modeling of Exposure to Low Frequency Electromagnetic Fields of Workers in Arbitrary Posture”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, no.2, 2019.
- [5] B. Ristagno, D. Giraud, J. Fontchastagner, *et al*, “FEM using projection of physical properties suitable for movement modeling and optimization processes”, *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 39, no.5, pp. 1185-1199, 2020.
- [6] AFNOR. “Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 2-1 : Exposure to magnetic fields – 2D models”. Norme NF EN 62226-2-1, avril 2005.
- [7] Tomoaki Nagaoka et Soichi Watanabe, “Postured voxel-based human models for electromagnetic dosimetry”, *Physics in Medicine & Biology*, vol. 53, pp. 7047–7061, 2008.