



Contribution à la modélisation par méthodes intégrales des systèmes électromagnétiques en vue de leur contrôle et caractérisation – Application aux matériaux supraconducteurs

H. Menana

► To cite this version:

H. Menana. Contribution à la modélisation par méthodes intégrales des systèmes électromagnétiques en vue de leur contrôle et caractérisation – Application aux matériaux supraconducteurs. Energie électrique. Université de Lorraine, 2023. <tel-04411492>

HAL Id: tel-04411492

<https://hal.science/tel-04411492v1>

Submitted on 25 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Université de Lorraine

Ecole Doctorale IAEM (Informatique Automatique Electronique – Electrotechnique Mathématiques)

MEMOIRE DE RECHERCHE

Présenté en vue d'obtenir

L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES Spécialité : Génie Electrique

Par

Hocine MENANA

Docteur en Génie Electrique – Université de Nantes

Contribution à la modélisation par méthodes intégrales des systèmes électromagnétiques en vue de leur contrôle et caractérisation – Application aux matériaux supraconducteurs

Soutenue publiquement le 07 décembre 2023

Composition du Jury

Président

Jean-Philippe LECOINTE Professeur à l'Université d'Artois

Rapporteurs

Stéphane CLENET Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Gérard MEUNIER Directeur de recherche émérite – CNRS, Université Grenoble Alpes

Benoît VANDERHEYDEN Professeur à l'Université de Liège, Institut Montefiore

Examineurs

Françoise PALADIAN Professeure à l'Université Clermont Auvergne

Jean LEVEQUE Professeur à l'Université de Lorraine

Nouredine TAKORABET Professeur à l'Université de Lorraine

Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy

Faculté des Sciences & Technologies, BP 239
54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

Table des matières

INTRODUCTION.....	3
I. RAPPORT D'ACTIVITES	5
I.1. Résumé du Curriculum Vitae	5
I.1.1 Etat civil	5
I.1.2 Situation actuelle	5
I.1.3 Formations et diplômes	5
I.1.4 Expériences professionnelles	6
I.2. Synthèse du parcours professionnel et contexte d'exercice	6
I.3. Investissement pédagogique	8
I.3.1 Présentation synthétique des activités pédagogiques	8
I.3.2 Description des activités pédagogiques à l'Université de Lorraine	10
I.4. Activité scientifique	14
I.4.1 Présentation synthétique des thématiques de recherche	14
I.4.2 Encadrement doctoral et scientifique	18
I.4.3 Diffusion et rayonnement.....	24
I.4.4 Responsabilités scientifiques.....	27
I.4.5 Publications et production scientifique	28
I.5. Conclusions et préambule au mémoire scientifique.....	36
II. ETAT DE L'ART SUR LES MODELES MAGNETODYNAMIQUES ET LEUR APPLICATION AUX SUPRACONDUCTEURS.....	37
II.1. Introduction	37
II.2. Formulations des problèmes magnétodynamiques.....	37
II.3. Résolution par des méthodes numériques	41
II.3.1 Méthodes différentielles	42
II.3.2 Méthodes intégrales	45
II.4. Propriétés électromagnétiques des matériaux supraconducteurs et leur modélisation	49
II.4.1 Propriétés générales.....	49
II.4.2 Propriétés électromagnétiques	51
II.4.3 Pertes dans les supraconducteurs HTC	53
II.4.4 Modélisation des supraconducteurs HTC	55
II.5. Conclusion.....	58

III. SYNTHÈSE DES TRAVAUX RÉALISÉS SUR LA MODÉLISATION DES SUPRACONDUCTEURS EN VUE DE LEUR CARACTÉRISATION ET CONTRÔLE	59
III.1 Introduction	59
III.2 Approches de modélisation	60
III.2.1 Modélisation des sources de courant	61
III.2.2 Modélisation des aimants permanents	61
III.2.3 Modélisation des matériaux ferromagnétiques	61
III.2.4 Stratégies globales de modélisation en DC et AC	64
III.3 Application à l'évaluation des pertes par courants induits dans les rubans supraconducteurs multifilamentaires	64
III.3.1 Système modélisé	64
III.3.2 Modèle électromagnétique	65
III.3.3 Résolution dans le domaine fréquentiel dans le cas d'une excitation sinusoïdale	67
III.3.4 Principaux résultats obtenus	68
III.3.5 Publications liées à l'application	70
III.4 Application au contrôle par thermographie inductive des rubans supraconducteurs multicouches	71
III.4.1 Dispositif expérimental	71
III.4.2 Développement du modèle magnétothermique	71
III.4.3 Validation	75
III.4.4 Caractérisation de défauts	77
III.4.6 Publications liées à l'application	78
III.5 Application à la caractérisation de bobines supraconductrices sous champ propre et à proximité de matériaux actifs	79
III.6 Application à la modélisation et l'optimisation de machines supraconductrices	89
III.6.1 Modélisation et l'optimisation d'une structure virtuelle d'une machine totalement supraconductrice	89
III.6.2 Prédimensionnement, réalisation et tests d'une machine à induit supraconducteur	92
III.6.3 Publications liées à l'application	95
IV. BILAN ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	96
BIBLIOGRAPHIE	102
ANNEXES – PUBLICATIONS JOINTES	107

INTRODUCTION

Ce mémoire, présenté pour l'obtention d'une Habilitation à Diriger des Recherches, donne une synthèse de mes activités scientifiques et pédagogiques exercées durant ces vingt dernières années. J'ai débuté mon parcours en enseignement et recherche scientifique en Algérie, et, je l'ai poursuivi en France depuis 2005. J'ai eu l'occasion d'évoluer dans différentes structures, et, depuis septembre 2015, j'occupe le poste de Maître de conférences à l'Université de Lorraine. J'exprime mes remerciements et ma gratitude aux personnes qui m'ont fait confiance et qui m'ont accueilli au sein de leurs institutions et leurs équipes, à chaque étape de mon parcours professionnel.

Même si j'ai eu l'occasion de travailler sur différents projets de recherche, j'ai fait le choix de limiter la partie scientifique de ce mémoire aux travaux que j'ai réalisés sur la modélisation et la caractérisation des matériaux supraconducteurs à haute température critique, et, qui ont fait l'objet de l'essentiel de mon encadrement doctoral au sein Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy (GREEN). J'exprime mes remerciements à ses directeurs successifs depuis ma nomination au poste de Maître de conférences à l'UL : Pr. Bernard Davat et Pr. Noureddine Takorabet. J'adresse également mes remerciements et une pensée amicale à tous les membres du GREEN, collègues, doctorants, stagiaires, secrétaires et techniciens, qui créent une atmosphère d'équipe positive et collaborative, en particulier les membres de l'équipe supraconducteurs avec qui je collabore de manière plus étroite : Dr. Kévin Berger, Pr. Bruno Douine, et le Pr. Jean Lévêque qui a accepté de me parrainer pour cette HDR.

Je tiens également à adresser mes plus vifs remerciements à l'ensemble des membres du Jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer mon travail comme rapporteurs et examinateurs : M. Stéphane CLENET, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers; M. Gérard MEUNIER, Directeur de recherche émérite – CNRS, Université Grenoble Alpes; M. Benoît VANDERHEYDEN, Professeur à l'Université de Liège, Institut Montefiore; Mme Françoise PALADIAN, Professeure à l'Université Clermont Auvergne; M. Jean-Philippe LECOINTE, Professeur à l'Université d'Artois; M. Jean LEVEQUE et M. Noureddine TAKORABET, Professeurs à l'Université de Lorraine.

Les résultats présentés dans ce mémoire sont en grande partie le fruit de collaborations avec des collègues et doctorants que j'ai co-encadrés. Je leur adresse également mes remerciements pour la rigueur et le dynamisme dont ils ont fait preuve, et, pour les échanges et les discussions fructueuses qu'on a pu avoir.

Ce mémoire se divise en quatre parties :

La première partie constitue une synthèse de mon parcours et de mes investissements en enseignement et recherche scientifiques.

La seconde partie constitue un état de l'art, non exhaustif, de la modélisation électromagnétique et son application aux matériaux supraconducteurs. Cette partie permet notamment de mieux situer nos travaux, et, de décrire quelques modèles que nous avons exploités à des fins de validation.

La troisième partie donne une synthèse des travaux que j'ai menés sur la modélisation et la caractérisation des matériaux supraconducteurs à haute température critique, reprenant, de manière synthétique, les principaux développements et les principaux résultats obtenus.

La dernière partie du mémoire présente mes perspectives de recherche à court et à moyen termes.

I. RAPPORT D'ACTIVITES

I.1. Résumé du Curriculum Vitae

I.1.1 Etat civil

Hocine MENANA

GREEN, Université de Lorraine,
Faculté des Sciences et Technologies,
54506 Vandoeuvre Cedex, France

Tél : 03 72 74 51 02

Courriel : hocine.menana@univ-lorraine.fr

Né le 09 Aout 1976

Célibataire, sans enfant

Nationalité algérienne

I.1.2 Situation actuelle

Maître de conférences hors classe (promotion CNU 2015), en 63ème section, à l'Université de Lorraine, en poste à la Faculté des Sciences et Technologies de Nancy.

- Activités d'enseignement en génie électrique à la FST et à la Faculté de Médecine de Nancy
 - Responsable du parcours Energie Electrique du Master 2 EEA, depuis septembre 2021
 - Responsable de sept unités d'enseignement à la FST de Nancy
 - Enseignement à l'international (Algérie, Chine, Finlande, Maroc)
- Activités de recherche au Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy (GREEN)
 - Titulaire de la PEDR – A, depuis septembre 2019
 - Responsable de l'animation de séminaires au GREEN, depuis septembre 2018
 - Six thèses de doctorat et six stages de master recherche codirigés
 - Publications : 39 articles de revues & 71 conférences (<https://cv.archives-ouvertes.fr/hocine-menana>)

I.1.3 Formations et diplômes

- 2006-2009 : Doctorat en Génie Electrique, Université de Nantes, IREENA (Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique).
" *Modélisation 3D simplifiée pour le CND des matériaux composites anisotropes*".
Thèse soutenue le 10/11/2009.
Directeur de Thèse : Pr. Mouloud FELIACHI.
Jury : Adel RAZEK (Président), Claude MARCHAND (Rapporteur), Marc LAMBERT (Rapporteur), Joseph SAILLARD (Examineur), Gérard BERTHIAU (Examineur, Co-encadrant), Bernard Paya (Invité).
- 2005-2006 : Master 2 en Systèmes Electroniques et Génie Electrique (SEGE), Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes (Polytech'Nantes).
Stage : " Contribution à l'étude d'un capteur à courants de Foucault en régime pulsé ", sous la direction du Pr. M. FELIACHI et du Dr. G. BERTHIAU, IREENA, Juillet 2006.

- 2001-2004 : Magistère en Systèmes Electromagnétiques, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger.
Projet : " Mise en œuvre d'un couplage FEM-BEM pour le calcul du champ électromagnétique dans une tôle mince perméable ". Projet effectué de Septembre 2002 à Mai 2004, après une année théorique qui s'est déroulée de septembre 2001 à Septembre 2002.
- 1996-2001 : Ingénieur d'Etat en Electromécanique, de l'INHC (Institut National des Hydrocarbures et de la Chimie), devenu Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie en 1998, à la création de l'Université M'Hamed Bougara, à Boumerdès, Algérie.

I.1.4 Expériences professionnelles

- Depuis 2015 : Maître de conférences à l'Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies & Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy.
- 2012-2015 : Chargé d'enseignement et de recherche (CER) à l'Ecole Navale, Lanvéoc.
- 2011-2012 : Attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER) à l'ENSAM, en délégation à l'Ecole Navale, Lanvéoc.
- 2009-2011 : ATER (2 × 6 mois) & Contrat d'ingénieur (4 mois) à l'Université de Nantes, IUT de Saint Nazaire & IREENA.
- 2004-2005 : Attaché de recherche (Permanent) au Centre de Recherche Scientifique et Technique en Soudage et Contrôle (SCS) de Cheraga, Alger ; devenu Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI).

I.2. Synthèse du parcours professionnel et contexte d'exercice

Je présente ici le déroulement chronologique de mon parcours universitaire et professionnel (Figure 1). J'ai eu un premier parcours universitaire et professionnel en Algérie avant de le poursuivre en France à partir de septembre 2005.

Après l'obtention d'un BAC Sciences, j'ai intégré l'Institut National d'Hydrocarbures et de Chimie (INHC) de Boumerdès (Algérie), en 1996. Après un cycle préparatoire intégré de deux ans, j'ai préparé un diplôme d'ingénieur d'Etat en électromécanique, obtenu en Juillet 2001. Durant mon cursus, l'INHC est devenu Faculté d'Hydrocarbures et de Chimie, suite à la création de l'Université M'Hamed Bougara à Boumerdès en 1998, regroupant six instituts nationaux dont l'INHC.

J'ai poursuivi mon parcours universitaire en post graduation par un diplôme de magistère en systèmes électromagnétiques à l'Ecole Militaire Polytechnique (EMP) d'Alger, que j'ai préparé de septembre 2001 à février 2004, en tant qu'étudiant civil rattaché au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Le diplôme de magistère permet d'accéder à un poste d'enseignant chercheur ou à un poste de chercheur dans un centre de recherche scientifique en Algérie. La formation de Magistère à l'EMP était constituée de deux phases : une phase théorique d'un an, et une phase projet de recherche de deux ans, durant laquelle j'ai également effectué des enseignements, en tant que vacataire, à l'EMP ainsi qu'à l'Ecole Supérieure Navale de Tamentfoust (ESNT) – Alger.

A l'issue du magistère, j'ai été nommé en tant qu'Attaché de recherche (permanent), le 08 mai 2004, au centre de recherche en soudage et contrôle (CSC) d'Alger (actuel CRTI), au sein du Laboratoire de Caractérisation et d'Instrumentation (LCI). Durant mon emploi au CSC, j'ai poursuivi l'activité d'enseignement en tant que vacataire à l'ESNT d'Alger.

J'ai quitté mon emploi au CSC en septembre 2005 pour préparer une thèse de doctorat à l'Université de Nantes en France. N'ayant pas demandé une équivalence pour mon diplôme de Magistère, j'ai dû faire une année de Master 2-Recherche en Systèmes Electroniques et Génie Electrique (SEGE) de septembre 2005 à septembre 2006, à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes (Polytech'Nantes).

A l'issue du Master Recherche, j'ai pu obtenir, sur concours, un financement de Nantes Métropole pour faire une thèse de doctorat en génie électrique à l'Université de Nantes (UN), effectuée à l'Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique (IREENA), du 01/12/2006 au 10/11/2009. Durant cette période, j'ai effectué des enseignements en tant que vacataire dans les départements Mesures Physique et Génie Industriel et Maintenance de l'IUT de Saint Nazaire - UN. Après ma thèse de doctorat, soutenue le 10 novembre 2009, j'ai eu deux contrats d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) de six mois à temps plein à l'IUT de Saint Nazaire, ainsi qu'un contrat d'ingénieur de quatre mois, à l'IREENA.

Par la suite, j'ai eu un poste d'ATER à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), en délégation à l'Ecole Navale (Lanvéoc), en septembre 2011. A l'issue du poste ATER, l'Ecole Navale m'a proposé un poste de Chargé d'Enseignement et de Recherche (CER¹) que j'ai occupé du 1er septembre 2012 au 31 août 2015. J'ai eu une charge d'enseignement de 192h équivalent TD par an, complétée par une activité de recherche scientifique.

En septembre 2015, j'ai intégré l'Université de Lorraine (UL) sur le poste de Maître de conférences que j'occupe actuellement. J'effectue l'essentiel de mes activités pédagogiques à la Faculté de Sciences et Technologies (FST), et mes activités de recherche au sein du Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy (GREEN).

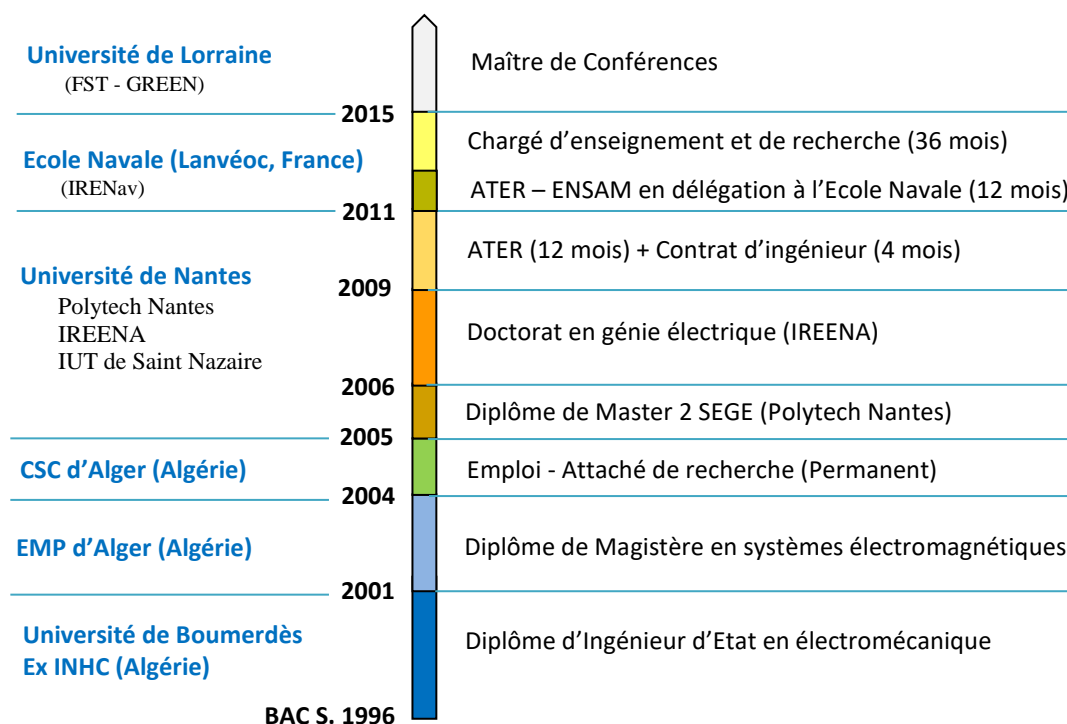


Figure 1 : Parcours universitaire et professionnel

¹ Contrat à durée déterminée (CDD) du ministère de la défense

I.3. Investissement pédagogique

I.3.1 Présentation synthétique des activités pédagogiques

J'ai débuté mon parcours dans l'enseignement supérieur dès le début du projet de recherche du Magistère en 2002, en tant que vacataire à l'EMP et à l'ESNT (Alger), jusqu'en 2005. Dans cette période, j'ai effectué des enseignements de travaux pratiques en machines électriques pour les élèves ingénieurs de l'EMP, et des cours d'électrotechnique et de maintenance industrielle pour les élèves de l'ESNT. J'ai eu une charge régulière de 8h à 12h hebdomadaire, pour un volume total d'environ 600h, de 2002 à 2005.

Tableau 1 : Enseignements effectués à l'EMP et l'ESNT d'Alger (2002-2005)

Etablissement	Niveau	Intitulé de l'enseignement	H CM	H TD	H TP
Ecole Supérieure Navale de Tamntfoust, Alger (2002-2005)	Technicien Supérieur	Technologie de maintenance	300	100	-
		Electrotechnique			
Ecole Militaire Polytechnique - Alger (2002-2004)	Ingénieur	Machines électriques	-	-	200

J'ai ensuite poursuivi cette activité d'enseignement à l'IUT de Saint Nazaire, de 2007 à 2011, en tant que vacataire pendant ma thèse de doctorat, puis en tant qu'ATER. J'ai enseigné en EEA, courants forts et courants faibles, dans les départements Mesures Physiques (MP) et Génie Industriel et Maintenance (GIM), pour les niveaux DUT et Licence Professionnelle (LP) Maintenance et Technologie. Durant cette période, j'ai effectué 528 heures d'enseignement : 495H de travaux pratiques (TP) et 33H de travaux dirigés (TD). J'ai également participé aux jurys de validations d'études semestrielles et aux commissions de recrutement des étudiants pour le DUT MP.

Tableau 2 : Enseignements effectués à l'IUT de Saint Nazaire (2007-2011)

Niveau	Intitulé de l'enseignement	H CM	H TD	H TP
DUT Mesures physiques	Electricité	-	-	96
	Electronique de puissance	-	12	30
	Informatique d'instrumentation 2	-	-	36
	Electronique Analogique	-	-	21
	Electronique d'instrumentation - Automatique	-	-	70
	Traitement du signal	-	-	50
	Bureautique	-	-	117
	Informatique- Calcul scientifique	-	-	36
LP- MT	Contrôle non destructif	-	-	49
	Physique - électromagnétisme	-	11	-

A l'Ecole Navale (EN), de 2011 à 2015, je suis intervenu dans la formation scientifique des élèves officiers (E.O.) de l'EN, et dans le Master Recherche « Environnement Naval » de l'ENSAM – EN, avec une charge d'enseignement de 192H équivalent TD par an. J'ai enseigné en énergie électrique, et j'ai mis en place un nouveau cours d'initiation à la recherche en Master 2 (Tableau 3). J'ai également proposé et encadré quelques projets liés à la conversion d'énergie en environnement naval (Tableau 4). J'ai, par ailleurs, eu l'occasion d'embarquer sur le Bâtiment de Projection et de Commandement DIXMUDE pour une mission de découverte l'environnement professionnel des E.O. à l'issue de leur formation, afin de mieux adapter les enseignements à leurs besoins.

Tableau 3 : Enseignements effectués par an à l'Ecole Navale (du 01/09/2011 au 31/08/2015)

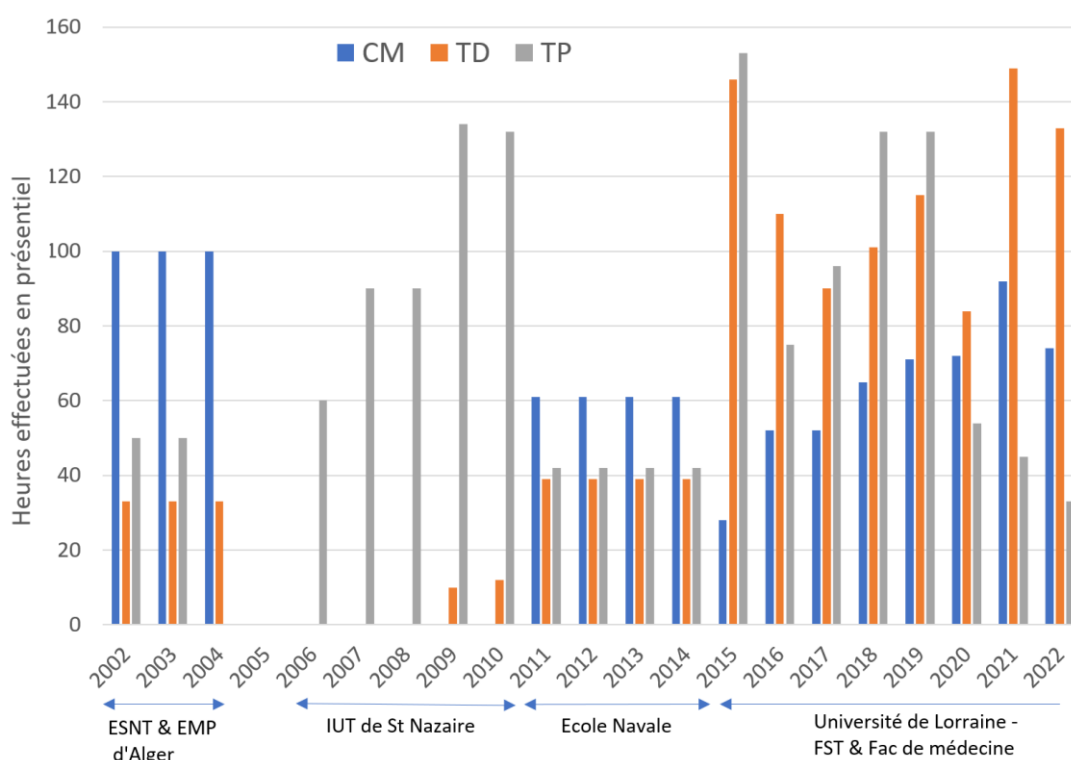
Niveau	Intitulé	Effectifs	H CM /an	H TD /an	H TP /an	Année
Ingénieur 2 ^{ème} & 3 ^{ème} années	Electronique de puissance	90	18	16	12	2011 → 2015
	Machines électriques		25	23	30	
	Réseaux embarqués		08	-	-	
Master 2	Initiation à la recherche	12	02			
Soutien Officiers	Electrotechnique	6	08			

Tableau 4 : Projets encadrés à l'Ecole Navale (du 01/09/2011 au 31/08/2015)

Niveau	Année	Projets
Ingénieur 3 ^{ème} année	14 - 15	Etude et réalisation d'un système de recharge par induction (2 E.O.)
	13 - 14	Etude et réalisation d'une pompe MHD à induction (2 E.O.)
	12 - 13	Dimensionnement et gestion des sources d'énergie d'un drone naval solaire (2 E.O.)
	12 - 13	Dimensionnement, et réalisation d'un prototype de lanceur électromagnétique (2 E.O.)
	11 - 12	Etude, modélisation, dimensionnement, et réalisation d'un prototype de lanceur électromagnétique (2 E.O.) – Projet publié (R28, Cl.37)
	11 - 12	Gestion et maintenance de l'usine électrique d'un aviso en arrêt technique (2 E.O.)
M2R	14 - 15	Calculation of MHD losses in an immersed magnetic transmission (1 étudiant)

A l'Université de Lorraine, j'exerce l'essentiel de mes activités d'enseignement, en énergie électrique, à la Faculté des Sciences et Technologies de Nancy, en Licence Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) et en Master EEA, ainsi qu'à la Faculté de Médecine de Nancy, en L2 Sciences Pour la Santé (SPS), partagée avec le Collège Médical de Shangrao (Chine). J'ai mis tous mes enseignements sous forme numérique, à disposition des étudiants sur la plateforme ARCHE de l'UL. J'ai par ailleurs eu quelques enseignements à l'international, et que je décris plus loin. Actuellement, Je suis responsable de cinq unités d'enseignement, et, depuis 2021, j'ai pris la responsabilité du parcours Energie Electrique du Master 2 EEA.

La figure 2 donne un aperçu des différentes périodes d'enseignement, avec les volumes horaires effectués en formation initiale.

**Figure 2 : Périodes et services annuels d'enseignement en formation initiale**

I.3.2 Description des activités pédagogiques à l'Université de Lorraine

Enseignements

A la Faculté de Médecine, j'enseigne L'électromagnétisme en L2 Sciences pour la Santé (L2-SPS), au semestre 3. L'enseignement comporte 18h de CM et 10h de TD par groupe, pour un effectif variant entre 65 et 70 étudiants, répartis en 4 groupes de TD. L'enseignement comporte des rappels mathématiques sur les vecteurs et l'analyse vectorielle, puis une partie électrostatique et une partie magnétostatique. Cet enseignement est partagé avec le Collège Médical de Shangrao (Chine) pour lequel j'effectue les enseignements par visio conférence et enregistrements de vidéos de cours.

A la Faculté des Sciences et Technologies (FST), j'ai une charge d'enseignement qui a un peu évolué dans le temps (Tableau 5). Actuellement j'ai les enseignements suivants :

- *Induction et ondes électromagnétiques* en L2 SPI, au semestre 3. J'ai la responsabilité de cette unité d'enseignement (UE) qui comporte 16h CM, 16h TD et 12h TP par groupe, pour un effectif qui varie sensiblement d'une année à l'autre, avec un minimum de 25 étudiants. Je m'associe généralement à un doctorant ou à un ATER pour les TP. J'ai réalisé les supports de CM et TDs, et j'ai mis en place un nouveau banc de TP à mon arrivée à l'UL. Les enseignements comportent des rappels mathématiques sur l'analyse vectorielle, des rappels d'électrostatique et de magnétostatique, une partie sur l'induction électromagnétique et une partie sur les ondes électromagnétiques. Les TP consistent en une mise en œuvre de la partie induction. Les manip concernent la mesure d'inductances et la mise en évidence du phénomène de courants induits à travers l'expérience de « l'aimant paresseux ».
- *Machines électriques à courant continu (MCC)* en L3 SPI, au semestre 5. J'ai également la responsabilité de cette UE, qui comporte 16h CM, 14h TD et 15h TP, pour un effectif d'une vingtaine d'étudiants. Une partie des TP sont effectués par un collègue de la FST. Les enseignements concernent des rappels sur l'électromagnétisme, la constitution et le principe de fonctionnement d'une MCC, les différents types de MCC et leur modélisation en régime permanent, et en régime transitoire pour l'asservissement. Les TP concernent l'identification des paramètres des modèles, les bilans de puissance, et l'asservissement en vitesse d'une MCC à excitation séparée.
- *La conversion d'énergie électromécanique* en M1 EEA, au semestre 7. J'ai également la responsabilité de cette UE qui comporte 14h CM et 16h TD, et qui passera à 20h CM et 20h TD à la prochaine accréditation. J'ai actualisé les supports de CM et DT en 2018. Les enseignements comportent des rappels sur les circuits magnétiques et leur modélisation par réseaux de perméances, le calcul des forces magnétiques par différentes méthodes : force de Laplace, méthode des travaux virtuels et tenseur de Maxwell, un bref rappel sur les MCC, le bobinage et le développement d'un champ tournant dans les machines à courant alternatif, ainsi que la détermination des inductances propres, des inductances mutuelles, et des inductances cycliques en triphasé.
- *Les énergies renouvelables*, en M2 EEA pour les parcours Energie Electrique (EE) et Contrôle de l'Efficacité Energétique (CEE), au semestre 9. J'ai également la responsabilité de cette UE qui compte 14h CM et 16h TD, et pour laquelle j'ai réalisé les supports de CM et TD. Les enseignements concernent les ressources en énergie, les problématiques énergétiques actuelles, l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne, les énergies marines, et le stockage d'énergie.
- *La compatibilité électromagnétique (CEM)*, en M2 EEA, parcours Energie Electrique, au

semestre 10. J'ai la responsabilité de cet enseignement que j'ai mis en place en 2016. Il comporte 6h CM, 6h TD et 9h TP par groupe, pour un effectif d'une vingtaine d'étudiants. J'ai réalisé les supports de CM, TD et mis en place deux bancs de TP, sur le blindage électromagnétique et la réalisation et caractérisation de filtres secteur. Les enseignements théoriques concernent l'étude des propagations des perturbations électromagnétiques, les techniques de leur réduction, ainsi que les techniques de mesure et de modélisation en CEM.

Tableau 5: Enseignements effectués par an à l'Université de Lorraine (du 01/09/2015 à ce jour)

Niveau	Dipl.	Intitulé	Effectifs	H CM /an	H TD /an	H TP /an	Année
Licence	L2- SPS	Électromagnétisme	68	12	10 (x4)	-	2020 →
	L- SPS Shangrao	Électromagnétisme (à distance)	14		6	-	
	L2 - SPI	Phénomènes d'induction & ondes électromagnétiques*	27	16	16	12 (x2)	2015 →
	L3 - SPI	Machines électriques (MCC)*	25	16	14	15	2015 →
		Matériaux pour le GE*		11	10	-	2015 → 2019
		Transformateurs		-	18	12	2015 → 2016
		Electronique de puissance		-	16	18(x2)	2015 → 2016
	LP - HTA BT	Outils de calcul pour le GE *	20	10	10	-	2015 → 2022
Master	M1 EEA	Conversion électromécanique*	20	14	16	-	2015 →
		Electrotechnique		-	-	21	2015 → 2021
		Machines à courant alternatif		-	-	18	2015 → 2016
	M2 EEA PT-EE	Energies renouvelables*	20	14	16	-	2015 →
		Compatibilité EM*		6	6	9 (x2)	2016 →
		Travaux Pratiques de GE		-	-	30	2015 → 2019
		Initiation à la recherche*		02	-	-	2015 → 2017

*Responsabilité de l'UE

De 2015 à 2022, j'ai eu la responsabilité de l'UE « *outils de calcul pour le génie électrique* », en Licence Professionnelle HTA-BT, qui compte 10h CM et 15h TD, pour un effectif d'une vingtaine d'étudiants. J'ai également réalisé les supports de CM et TDs pour cette UE. Les enseignements concernent des rappels mathématiques de base, comme les dérivées et intégrales de fonctions, les opérations sur les vecteurs, les nombres complexes, et la transformée de Fourier, avec des applications au champ électromagnétique et aux circuits électriques. J'ai cédé cet enseignement à partir de la rentrée 2022, pour des raisons de rééquilibrage de la charge d'enseignement.

De 2015 à 2019, j'ai effectué un enseignement de « *matériaux pour le génie électrique* » en L3 SPI, au semestre 6. Cet enseignement qui constituait une partie d'une UE partagée avec nos collègues d'électronique, comportait 11h CM et 10h TD, sur les matériaux conducteurs, diélectriques et magnétiques, en abordant des phénomènes thermoélectriques comme l'effet Thomson et l'effet Seebeck, des phénomènes magnétoélectriques comme l'effet Hall, ainsi que des phénomènes magnétomécaniques comme la magnétostriction et électromécaniques comme l'effet piézoélectrique.

Il y a par ailleurs quelque TD et TP que j'ai effectués les années précédentes, et que j'ai également cédés, pour des raisons de rééquilibrage d'enseignements, comme les TD et TP d'électronique de puissance, ainsi que les TD de circuits couplés, que j'ai effectués en L3 SPI, de 2015 à 2016, les TP de machines à courant alternatif que j'ai effectués en M1, de 2015 à 2016, les TP d'électrotechnique que j'ai effectués en M1, de 2015 à 2019, et la formation à l'initiation à la recherche que j'ai effectuée en M2, de 2015 à 2017, dans la continuité de ce que je faisais à l'Ecole Navale. J'ai également effectué 20h CM & TD de préparation au concours d'agrégation SII, en 2016.

Encadrement projets et de stages et de fin d'étude

En parallèle aux enseignements théoriques, les étudiants du Master EEA doivent réaliser un projet de cinq mois en M2, et, sur toute l'année, en M1. Depuis 2015, j'ai encadré 19 projets en M1 et M2 (Tableau 6). Les projets ont pour but d'initier les étudiants à la R&D et de les préparer à leurs parcours professionnels (stages & emplois). Les projets que j'ai proposés sont essentiellement axés sur la conversion d'énergie et les énergies renouvelables. J'ai également encadré 6 stages recherche de M2, liés principalement à la conversion d'énergie électromécanique.

Dans le cadre de mes activités pédagogiques à la FST, en tant que tuteur universitaire, j'ai également effectué le suivi de plusieurs stages de M2 en entreprise. Le suivi va de la simple vérification du bon déroulement du stage, à l'implication dans la démarche scientifique des projets. Le tuteur universitaire a également les tâches de relecture et de notation des rapports lors des soutenances.

Tableau 6 : Projets de M1 & M2 encadrés à l'Université de Lorraine (du 01/09/2015 à ce jour)

Niveau	Année	Projets
M1	2022 - 2023	Simulation d'une chaîne de propulsion d'un navire tout électrique (2 étudiants)
		Dimensionnement d'une installation solaire pour un site isolé (2 étudiants)
		Dimensionnement d'une installation solaire pour un site connecté au réseau (2 étudiants)
	2021 - 2022	Récupération d'énergie d'un système mobile (2 étudiants)
	2020 - 2021	Motorisation d'une valise en vue de la récupération d'énergie pour la recharge d'appareils électriques mobiles (2 étudiants)
		Étude du principe de fonctionnement d'un générateur MHD (2 étudiants)
		Dimensionnement d'une installation PV pour un site isolé (2 étudiants)
	2019 - 2020	Contribution à l'étude comparative des différentes structures d'éoliennes (2 étudiants)
	2018 - 2019	Motorisation pour porte de garage alimentée par une installation photovoltaïque autonome (1 étudiant)
		Dimensionnement d'une centrale photovoltaïque pour un site isolé (1 étudiant)
		Contribution à l'étude des régulateurs de charge d'une batterie d'un système photovoltaïque (1 étudiant)
M2	2022 - 2023	Dimensionnement et simulation dynamique d'un système PV alimentant une charge, avec une stratégie MPPT (2 étudiants)
	2020 - 2021	Simulation dynamique d'un système de recharge de batteries par panneaux solaires (2 étudiants)
		Simulation dynamique d'une chaîne de propulsion de navire tout électrique (1 étudiant)
	2019 - 2020	Mesure de conductivité électrique par capteur à courants de Foucault (1 étudiant)
		Modélisation magnétothermique d'une MRV fonctionnant à haute température (1 étudiant)
	2017 - 2018	Modélisation d'un lanceur électromagnétique (1 étudiant)
	2016 - 2017	Étude d'une transmission magnétique à flux guidé (3 étudiants)
	2015 - 2016	Réalisation d'un moteur à énergie solaire sur paliers supraconducteurs (1 étudiant)

Responsabilités pédagogiques

Outre la responsabilité des unités d'enseignement décrites dans la section précédente, depuis septembre 2021, j'ai pris la responsabilité du parcours Energie Electrique du Master2 EEA, à l'Université de Lorraine. Les principales tâches que j'effectue chaque année sont :

- *L'étude de dossiers* de candidature au parcours Energie Electrique du Master EEA (M1 & M2), et la réponse à d'éventuels recours des candidats non retenus. Cette partie s'avère en particulier très chronophage, car, nous recevons chaque année une quantité très importante de dossiers.
- *La planification* des enseignements et des examens associés, et l'organisation de la réunion de rentrée. Il s'agit aussi d'organiser les soutenances des projets et des stages, avec la définition des jurys et la planification des soutenances en sessions synchronisées et au fil de l'eau.

- *Le suivi des projets, des stages et des alternances.* Cela consiste à réunir les projets et les distribuer aux étudiants suivant des critères de choix et de mérite. Concernant les stages, il s'agit d'accompagner les étudiants dans leur recherche de stage, vérifier la cohérence des missions qui leur sont proposées avec le contenu de la formation, et donner un avis pédagogique pour l'établissement des conventions de stage. Par la suite, je me charge de mettre en relation chaque étudiant en stage avec un collègue pour le suivi de son stage en entreprise. Certains étudiants sont en contrat d'apprentissage. Je les accompagne dans la construction du dossier avec le CFA de l'Université de Lorraine, et, je réalise un suivi de leur parcours en entreprise. J'organise également les Jurys de soutenances et j'y prends part.
- *Les bilans des résultats semestriels.* Je collecte et je réalise les bilans des notes pour chaque semestre en M2, et je les présente dans les commissions et Jurys semestriels du master EEA, en faisant attention au traitement de cas particuliers.
- *Promouvoir la formation.* Je présente la formation lors des journées portes ouvertes à la FST, et j'invite des industriels pour des présentations d'entreprises et de métiers aux étudiants. Ainsi, par exemple, en février 2023, j'ai organisé une rencontre entre des cadres techniques de chez General Electric (Paris) et nos étudiants du Master EEA, pour une présentation de l'entreprise et des métiers liés à l'EEA, avec les opportunités d'emploi qui pourraient s'offrir.
- *Montage du dossier pour la nouvelle offre de formation.* Je contribue activement à la construction de la maquette d'enseignement dans le cadre du renouvellement de l'offre de formation pour la nouvelle accréditation du Master (2024-2028), en fonction des objectifs pédagogiques et du cadrage imposé par l'Université.
- *Autres actions non systématiques.* Il s'agit essentiellement de répondre aux différentes questions des étudiants, et les aider dans les difficultés qu'ils rencontrent sur le plan pédagogique, administratif ou encore dans leur environnement professionnel lorsqu'ils sont en stage ou en alternance, et parfois même sur le plan personnel. Il s'agit également de répondre aux sollicitations l'administration pour des avis pédagogiques pour des cas particuliers.

Parmi les responsabilités pédagogiques que j'ai eues à l'UL, j'ai également présidé les jurys de diplôme suivants à l'extérieur :

- En janvier 2017, un Jury de Bac Pro SEN au Lycée J. Prouvé, à Nancy.
- En juin 2022, le Jury d'admission du BTS Electrotechnique, au Rectorat de Nancy.

A l'Ecole Navale, en 2014, j'ai eu la responsabilité scientifique de l'organisation de la journée sciences navales (JSN2014), dont le thème était « Opérer sur et sous la mer » (<https://www.ecole-navale.fr/index.php/JSN-2014-Operer-sur-et-sous-la-mer>). Cette journée, vitrine de l'EN, a notamment pour but de valoriser l'enseignement scientifique et de sensibiliser les E.O. à la recherche scientifique. L'événement a rassemblé environ 400 personnes civiles et militaires.

Diffusion, rayonnement, activités internationales

J'ai été invité à l'EMP d'Alger, du 17 au 19 septembre 2018, pour donner une formation continue d'une semaine (24h) sur les supraconducteurs et leurs applications à un public constitué de militaires et d'industriels civils.

Dans le cadre d'une visite à l'Université Nationale Autonome du Mexique (UNAM), en mars 2018, j'ai donné un séminaire sur le contrôle non destructif et la caractérisation par voie

électromagnétique des matériaux conducteurs aux étudiants de l'institut d'ingénierie électrique de l'UNAM.

Dans le cadre d'un parcours commun en M2 EEA entre l'UL et l'Ecole Marocaine des Sciences pour l'Ingénieur (EMSI), je me suis déplacé, en janvier 2019, à Casablanca (Maroc), pour donner un cours d'une semaine (20h) sur les énergies renouvelables.

Sur l'invitation du Professeur Anouar Belahcen, j'ai mis en place une formation continue en anglais (PHD courses) sur les supraconducteurs et leurs applications pour les doctorants et post-doctorats de l'Université d'Aalto en Finlande, que j'ai effectuée en présentiel, du 03 au 07 Juin 2019. J'ai réalisé un support pédagogique et monté une manipe expérimentale pour la mise en évidence le phénomène de supraconductivité (lévitation d'une pastille supraconductrice au-dessus d'un aimant permanent).

En Mai 2023, dans le cadre d'une école d'été organisée par le COST Action CA19108 à Fethiye - Turquie, j'ai donné un cours de 3H, en présentiel, sur la modélisation électromagnétique des supraconducteurs à haute température critique, à des doctorants venus de différents pays.

I.4. Activité scientifique

I.4.1 Présentation synthétique des thématiques de recherche

J'ai entamé mon parcours dans la recherche scientifique en génie électrique, avec mon projet de Magister, en 2002. Depuis, j'ai eu l'occasion d'aborder plusieurs applications du champ électromagnétique. Les projets réalisés ont eu une importante part de modélisation, où, j'ai développé des modèles, essentiellement numériques, pour le calcul du champ électromagnétique dédiés aux applications concernées. Les stratégies de modélisation ont eu pour objectif de satisfaire le meilleur compromis entre précision et rapidité d'exécution, répondant à des besoins clairement identifiés dans l'état de l'art de ces systèmes. Pour répondre à des besoins d'encadrement, j'ai également eu l'occasion de codiriger des projets dans des domaines qui s'écartent un peu de mon domaine d'expertise. C'était une opportunité d'élargir mon spectre de compétences, même si le périmètre des aspects abordés dans ces projets ne permet pas d'afficher une réelle expertise dans ces domaines.

Ainsi, durant mon magistère à l'EMP d'Alger (2001-2004), j'ai travaillé sur le calcul du champ électromagnétique dans des tôles minces conductrices et perméables, appliqué au magnétisme du navire. Les difficultés rencontrées dans une telle modélisation sont liées aux effets d'échelle où les épaisseurs des tôles sont très petites devant les tailles des systèmes modélisés (navires). Pour pallier cette difficulté, j'ai développé un modèle électromagnétique qui permet de confiner la modélisation à la tôle mince. Ce modèle est basé sur un couplage de la méthode des éléments finis et de la méthode d'intégrales de frontières. N'ayant pas eu d'outils de calcul, j'ai dû implémenter entièrement le modèle, en partant du maillage des structures de navires considérés. L'originalité dans ce travail était de considérer à la fois les régimes magnétostatique et magnétodynamique, et, ainsi permettre la prise en compte de l'influence des sources internes du navire sur son aimantation. J'ai publié les développements et les résultats de ce travail en 2021, soit, 20 ans après sa réalisation [R13, CI.23].

Au CSC d'Alger (actuel CRTI), du 08/05/2004 au 15/09/2005, j'ai travaillé sur les transducteurs électromagnétiques acoustiques (EMATs) pour le contrôle non destructif des

matériaux conducteurs. L'utilisation de ce type de transducteurs est notamment justifiée dans le cas des tôles minces où il est difficile de générer des ondes ultrasonores par des capteurs classiques utilisant des piézoélectriques. D'autre part, ils permettent d'orienter et de focaliser le faisceau ultrasonore en jouant sur les alimentations électriques des éléments actifs. L'inconvénient majeur de leur utilisation est lié à leur très mauvais rendement et leur très faible rapport signal sur bruit. Les recherches menées visaient de ce fait à améliorer ces deux aspects en augmentant notamment l'impédance d'entrée (en réception) et en diminuant l'impédance de sortie (en émission). Dans le cadre de ce projet, un prototype d'EMAT a été réalisé, ainsi qu'un modèle de calcul couplant les équations de l'électromagnétisme aux équations de la mécanique pour la simulation et l'optimisation de ce type de capteurs. Les travaux réalisés ont été valorisés par des présentations en conférences nationales et internationales et une publication nationale [R39, CI.48, CI.49, CN.16].

Durant mon stage de master recherche, effectué à l'IREENA-Université de Nantes, de Février à Juillet 2006, j'ai travaillé sur le calcul du champ électromagnétique appliqué à la caractérisation des tôles conductrices par courants de Foucault en régime pulsé. J'ai développé un modèle éléments finis dans le domaine temporel associé aux équations des circuits électriques pour la simulation de l'ensemble plaque conductrice – capteur à courant de Foucault alimenté en tension. J'ai élaboré un protocole de caractérisation de la conductivité et de l'épaisseur de tôles conductrices en exploitant les variations des régimes subtransitoires du courant dans le capteur. Les résultats de simulation ont été validés par des mesures. L'originalité de ce travail était d'effectuer une comparaison entre les approches temporelle et fréquentielle. J'ai pu montrer que l'approche fréquentielle qui consiste à reconstruire le signal à partir de ses harmoniques ne permet pas une telle caractérisation, car, dans ce cas, les régimes subtransitoires ne sont pas reconstitués, étant donné que le signal résulte d'une superposition d'un ensemble de régimes harmoniques établis. Les travaux réalisés ont été valorisés par une présentation en conférence internationale et une publication de revue internationale [R30, CI.47].

Lorsque j'ai démarré ma thèse de doctorat à l'Université de Nantes, j'avais déjà acquis une certaine expérience dans la recherche scientifique, et, de ce fait, j'ai eu une autonomie absolue dans le choix de l'orientation, de la démarche, des méthodes et des outils à développer. Ainsi, durant ma thèse de doctorat, et mon Post-Doc à l'Université de Nantes (2006-2011), j'ai travaillé sur le calcul du champ électromagnétique dans les matériaux composites à fibres de carbone (CFRPs), en vue de leur contrôle et caractérisation. Les matériaux considérés sont des stratifiés composés de plusieurs couches (plis), caractérisés par des dimensions multi-échelles, une hétérogénéité et une forte anisotropie des propriétés électriques. Partant d'un tenseur de conductivité homogénéisé, et dans la limite fréquentielle où les effets capacitifs entre fibres et entre couches (plis) peuvent être négligés, j'ai développé un modèle basé sur une formulation intégral-différentielle en potentiel vecteur électrique pour un calcul rapide des courants induits générés par un capteur à courants de Foucault dans ce type de matériaux. Ce modèle tient compte naturellement des conservations du courant électrique et du flux magnétique, et permet de limiter le domaine d'étude aux parties actives du système modélisé. Ces dernières sont discrétisées séparément ; les aspects multi-échelles et les mouvements sont donc traités plus facilement. D'autre part, compte tenu des structures en couches minces des CFRPs, et sous certaines conditions, ce modèle se réduit à un cas quasi-bidimensionnel n'impliquant que la composante normale du potentiel vecteur électrique, réduisant ainsi considérablement la taille du système à résoudre et le temps de calcul. Dans un second temps, j'ai proposé une approche de caractérisation du tenseur de conductivité des CFRPs, en introduisant

une structure de capteur à courant de Foucault tournant de forme rectangulaire allongée. J'ai alors développé un modèle analytique liant directement les composantes du tenseur de conductivité d'un pli en CFRP aux impédances du capteur rectangulaire tournant, correspondant à ses positions parallèle et transversale aux fibres. Cette approche a été validée expérimentalement. Une partie de ce travail a fait l'objet d'un projet interne SEEDS². Cela nous a permis d'avoir un financement de 10K euros. Durant ma thèse de doctorat, j'ai également travaillé, en collaboration avec les collègues de l'EMP d'Alger, sur un projet de contrôle de fissures dans des matériaux conducteurs en utilisant des capteurs à courants de Foucault multiéléments. Dans un premier temps, un modèle numérique rapide basé sur un couplage des méthodes éléments finis – dyades de Green, exploitant les principes de superposition et de réciprocité, a été développé pour calculer la réponse (variation d'impédance) de chaque bobine d'un capteur à courant de Foucault multiéléments en présence d'une plaque conductrice comportant une fissure. Dans un second temps, un modèle inverse basé sur une résolution itérative d'une partie du modèle direct a été développé pour caractériser une fissure à partir de la réponse de chaque bobine du capteur multiélément. Pour cela, la fissure, supposée idéale (i.e. à épaisseur nulle), est représentée par un vecteur dont la dimension représente un nombre d'éléments (choisis) issus de sa discrétisation suivant sa longueur et dont la valeur de chaque élément représente une profondeur (un certain nombre d'éléments suivant la profondeur). Une telle représentation a permis une reconstitution rapide d'une forme approchée de la fissure. Les travaux réalisés dans ce projet ont été valorisés par des présentations en conférences internationales et deux publications de revues internationales [R34, R36, CI.40, CI.44, CI.46]. Après ma soutenance, un séjour post doctoral en tant qu'ATER et ingénieur, à l'Université de Nantes, de 2009 à 2011, m'a permis de finaliser la valorisation des modèles développés et des résultats obtenus [R29, R30, R31, R32, R33, R34, R35, CI.41, CI.42, CI.43, CI.45, CI.46, CI.47]. Durant cette période, j'ai été sollicité pour rédiger un sujet de thèse pour la suite de mes travaux, à la lumière des résultats obtenus et des perspectives que j'envisageais. J'ai, par la suite, formé la doctorante qui a été retenue, à la prise en main des modèles et outils de calcul que j'avais développés.

A l'Ecole Navale (2011-2015), j'ai fait partie de l'équipe Mécanique et Energie en Environnement Naval (M2EN) de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav). Étant donné la courte durée initialement prévue (un an d'ATER), j'ai eu le choix de continuer à travailler sur mes travaux de thèse, où de m'engager dans un nouveau projet de recherche. J'ai alors fait le choix d'initier un nouveau projet de recherche sur la magnétohydrodynamique (MHD) ; une thématique qui n'était pas abordée jusque-là à l'EN, mais qui suscitait un certain intérêt, en raison de son caractère transversal et fédérateur, concernant deux axes de recherche de l'Ecole : le génie électrique et l'hydrodynamique navale. J'ai alors collaboré avec les collègues travaillant sur les systèmes hydrodynamiques, pour le développement de modèles MHD pour le contrôle par voie électromagnétique des couches limites des fluides conducteurs. A l'issue du contrat d'ATER, l'EN m'a proposé un contrat d'enseignant chercheur contractuel, et, j'ai poursuivi les travaux sur la MHD, que j'avais étendus à l'évaluation des pertes MHD dans les machines électriques à entrefers immergés, ce qui a donné lieu à des développements originaux qui ont été publiés dans des revues scientifiques internationales [R22, R27, R28]. Ces travaux ont suscité l'intérêt d'industriels des secteurs civile et militaire qui nous avaient contactés pour le développement d'un projet sur la propositions MHD. Dans la même période, nous avons également été sollicités par l'entreprise SEGULA pour mettre en place une thèse CIFRE sur la propulsion électrique de navires à faible tonnage. J'ai rédigé le projet de cette thèse à la lumière des discussions menées avec le partenaire

² Systèmes d'Energie Electrique dans leur Dimension Sociétale, GDR 2994 du CNRS

industriel, et, j'ai encadré la thèse à 70% dans un premier temps, puis à 40%, lorsqu'un troisième collègue a rejoint l'équipe d'encadrement, suite à mon départ de l'EN pour rejoindre l'Université de Lorraine, et, le Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy (GREEN), sur le poste MCF que j'occupe actuellement.

Au GREEN, j'ai poursuivi l'encadrement de la thèse CIFRE que j'avais entamée à l'EN, et, conformément à mon projet d'intégration, j'ai recentré l'essentiel de mes travaux de recherche sur la caractérisation des matériaux supraconducteurs et leur intégration dans les systèmes de puissance, en parallèle à une activité d'enseignement parfois assez soutenue et à des responsabilités pédagogiques tout aussi prenantes. Alors que les travaux sur la caractérisation des supraconducteurs à haute température critique (HTC), en particulier dans leurs formes de rubans, ou de bobines pour des applications en énergie électrique, étaient essentiellement menés sur le plan expérimental, avec des mesures souvent délicates à obtenir et parfois difficile à interpréter, et, associées à des modèles analytiques basés sur des hypothèses parfois fortes sur les propriétés physiques, la géométrie, et les réparations des grandeurs électromagnétiques, supposées homogènes, j'ai redynamisé cet axe de recherche en étendant la caractérisation à la prise en compte des effets locaux, grâce à des méthodes et stratégies de modélisation électromagnétique rapides que j'ai mises en place, tirant profit de l'expérience que j'ai acquise dans ce domaine. J'ai également proposé d'étendre la caractérisation de l'élément supraconducteur à la prise en compte de la proximité de matériaux actifs, reproduisant l'environnement électromagnétique d'un système de conversion d'énergie qui l'intégrerait. Les travaux ont été essentiellement menés dans le cadre de thèses de doctorat que j'ai codirigées, et dont les publications sont principalement liées aux stratégies de modélisation à grandeurs locales, qui ont permis de mettre en évidence des phénomènes liés aux propriétés exceptionnelles des supraconducteurs. Les travaux ont notamment porté sur la caractérisation de rubans supraconducteurs à haute température critique, sous différentes formes et à différents régimes d'alimentation, en prenant en compte leur environnement électromagnétique, comme la proximité de matériaux actifs. Cette caractérisation s'est appuyée sur des approches expérimentales et numériques combinées. Parmi les apports les plus significatifs à l'état de l'art :

- Le développement de modèles rapides pour l'évaluation des pertes dans les supraconducteurs. Nous avons notamment montré qu'aux faibles champs magnétiques appliqués, pour l'évaluation des pertes par courants induits, les rubans supraconducteurs composites multifilamentaires peuvent être modélisés comme des matériaux conducteurs linéaires fortement anisotropes. Lorsqu'il faut prendre en compte la dépendance de la densité de courant critique au champ magnétique, nous avons également montré qu'un calcul non linéaire dans le domaine fréquentiel, limité au premier harmonique est suffisant [R19, R21].
- La prise en compte de l'effet de la proximité de matériaux ferromagnétiques sur l'évolution des pertes dans les bobines supraconductrices, et l'extraction, à partir de la mesure des pertes totales, la partie liée à la partie supraconductrice afin de dimensionner le système cryogénique pour le refroidissement de ces bobines en dessous de la température critique [R16].
- La caractérisation du courant critique et des pertes dans des bobines non inductives, où les niveaux du champ magnétique sont inférieurs au champ propre d'un ruban, rendant invalides les modèles donnant l'évolution du courant critique en fonction du champ magnétique. Nous avons alors développé une caractérisation basée sur un processus itératif associant modélisation et mesures. Nous avons également montré quelques phénomènes physiques intéressants liés à la répartition spatiale des densités de courant dans ces bobines [R11].

- La caractérisation de l'évolution de l'inductance des bobines supraconductrices en fonction du courant. En effet, lors de nos investigations expérimentales, nous avons constaté que l'inductance d'une bobine supraconductrice variait de manière assez significative avec le courant, et, contrairement à ce qui était annoncé dans quelques travaux dans la littérature, nous avons montré qu'il n'était pas possible de reproduire une telle variation par une modélisation en courant continu, et, qu'une modélisation dans le domaine temporel était nécessaire, car, cette variation s'est avérée être liée à la dynamique de pénétration du courant et du champ magnétique dans les rubans constituant la bobine [R6].
- La mise en évidence de l'importance de la prise en compte la forme exacte du supraconducteur dans un ruban multifilamentaire pour le calcul des pertes AC. Nous avons alors montré que la prise en compte de la section elliptique du supraconducteur dans les rubans multifilamentaires était nécessaire pour une modélisation précise des pertes AC dans ces derniers, alors que la majorité des travaux rencontrés dans la littérature adoptent des stratégies d'homogénéisation, considérant que la partie supraconductrice occupe toute la section rectangulaire de ces rubans [R1].
- L'association des modèles d'intégrales de volume 3D avec des méthodes d'optimisation, pour l'optimisation d'une machine supraconductrice à flux axial, avec des temps d'exécution très compétitifs, grâce à une stratégie de modélisation rapide, par secteurs, des bobinages [R18].

Par la suite, l'expérience que j'ai eue dans le domaine du contrôle non destructif (CND) m'a permis d'entreprendre une voie originale de caractérisation de l'intégrité structurelle des matériaux supraconducteurs HTC, par des méthodes non destructives, à température ambiante, dans une démarche contrôle qualité et de fiabilité ; des facteurs qui limitent leur intégration dans les systèmes de puissance. En effet, la structure et le process de fabrication de rubans supraconducteurs multicouches favorisent l'apparition de défauts structurels comme des délaminages, des manques de matière ou encore des inclusions. La littérature ne ressent dans ce contexte que quelques travaux concernant le contrôle de l'homogénéité de la couche supraconductrice par des balayages magnétiques à températures cryogéniques. La structure multicouche très fine de ces rubans limitant les possibilités d'un contrôle étendu aux autres couches par les méthodes classiques, j'ai proposé une approche de contrôle sans contact, et à température ambiante, par thermographie inductive. Les premiers travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Walid Dirahoui, où un banc expérimental impliquant un inducteur à aimants permanents en mouvement, et une modélisation numérique 3D dédiée, associant des modèles électromagnétique et thermique, ont été développés. Les résultats obtenus sont très encourageants [R3, R4, R5].

L'essentiel des travaux que j'ai menés dans le contrôle et la caractérisation des matériaux supraconducteurs ont été réalisés dans le cadre de projets de thèses de doctorat que j'ai co-dirigés. Une présentation succincte de ces projets et des publications associées est fournie dans la prochaine section.

I.4.2 Encadrement doctoral et scientifique

Depuis 2015, j'ai codirigé six thèses de doctorat et autant de stages de M2 et d'ingénieurs (Tableau 7). Les financements ont été obtenus soit via l'Université (allocations de recherche), via des contrats avec des industriels, ou encore des financements que j'ai pu obtenir via mes collaborations à l'international. J'ai obtenu une autorisation de codirection (ACT) pour toutes les thèses pour lesquelles les candidats sont inscrits à l'Université de Lorraine. Depuis septembre 2019, je suis bénéficiaire de la prime d'encadrement doctoral et de recherche (PEDR – A).

Tableau 7 : Thèses de doctorat et stages de Master 2 dirigés ou co-dirigés

Début / fin	Candidat & Titre du projet	Etabliss.	Taux	Co-encadrants	Publications
Thèses de doctorat					
01/06/2015 03/12/2019	Nacera BENNABI , « Composition dynamique de modèles de simulation multicritère de chaîne de propulsion navale hybride pour unité maritime de faible tonnage à fort appel de puissance »	ENSAM / Ecole Navale	40%	J-F Charpentier (E N) : 30% J-Y Billard (EN) : Directeur 30%	3 Art. de rev. 4 Conf.
01/09/2016 27/09/2019	Mohamad FARHAT , « Contribution à la modélisation 3D du champ électromagnétique dans les supraconducteurs à haute température critique »	Univ. Lorraine	50%	Melika Hinaje (UL) : Directrice 50%	2 Art. de rev. 3 Conf.
01/09/2017 05/07/2021	Yazid STATRA , « Contribution à la modélisation et à la caractérisation des supraconducteurs HTC pour leur intégration dans les machines électriques »	Univ. Lorraine	50%	Bruno Douine (UL) : Directeur 50%	7 Art. de rev. 18 Conf.
01/10/2019 05/10/2022	Walid DIRAHOU , « Caractérisation numérique et expérimentale de défauts structurels dans les rubans supraconducteurs multicouches par thermographie inductive »	Univ. Lorraine	50%	Melika Hinaje (UL) : Directrice 50%	3 Art. de rev. 5 Conf.
01/10/2020 03/10/2023	Sara FAWAZ , « Etudes numérique et expérimentale de bobines supraconductrices SHTC pour des applications en énergie électrique »	Univ. Lorraine	50%	Bruno Douine (UL) : Directeur 50%	5 Art. de rev. 13 Conf.
01/01/2017 -	Karim ALITOUCHE , « Modélisation magnétothermique de MRV fonctionnant à haute températures »	Univ. Béjaïa (Algérie)	50%	Rachid Saou (Univ. Béjaïa, Algérie) : Directeur 50%	1 Art. de rev. 2 Conf.
Stages de M2 & Ingénieur					
01/03/2016 16/09/2016	Eulalie FLEUROT , « Contribution à la modélisation des forces entre aimants permanents pour des applications aux transmissions magnétiques »	Ecole Navale	50%	Jean Frédéric Charpentier (Ecole Navale) : 50%	-
01/05/2017 15/09/2017	Mustapha EL HACHIMI , « Modélisation et Dimensionnement d'un Palier Magnétique actif à Flux Axial »	Univ. Lorraine	50%	Xavier DE LEPINE (General Electric) : 50%	-
15/03/2017 15/09/2017	Sokhna Oumou GUEYE , « Réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'actionneur électrique »	Univ. Lorraine	50%	Xavier DE LEPINE (General Electric) : 50%	-
15/03/2019 15/09/2019	Jihane KHALFI , « Modélisation magnétothermique d'une machine à réluctance variable »	Univ. Lorraine	50%	Noureddine TAKORABET (UL) : 50%	1 Art. de rev.
01/04/2021 31/08/2021	Ayoub DAKIL , « Contrôle par thermographie inductive de matériaux conducteurs minces multicouches - Application aux rubans supraconducteurs de seconde génération »	Univ. Lorraine	100%	-	-
22/08/2022 15/11/2022	Geoffroy de MELLON et François-Joseph GAUTIER , « Dimensionnement d'une machine supraconductrice homopolaire pour la propulsion navale »	Ecole Navale	70%	Jean Lévêque (UL) : 30%	-

Les projets de thèse ont concerné essentiellement la modélisation et la caractérisation des supraconducteurs à haute température critique pour des applications en énergie électrique. Deux thèses ont concerné la conversion d'énergie électromécanique et la gestion d'énergie en environnement naval. Même si cette dernière est hors de ma thématique de recherche, j'ai répondu à un besoin d'encadrement exprimé au moment du montage du projet. Les projets de stage de M2 et d'ingénieurs ont essentiellement concerné la conversion d'énergie électromécanique, sur des

problématiques académiques et industrielles, visant à favoriser l'insertion professionnelle des étudiants ou à les préparer à une poursuite d'une activité de recherche, en thèse de doctorat.

J'ai réalisé un suivi de proximité de ces projets, allant de la définition des objectifs et des tâches à réaliser, la proposition d'idées et de modèles et l'aide à la prise en main et au développement d'outils de calcul.

Thèse de doctorat de Nacera BENNABI (01/06/2015 - 03/12/2019)

J'ai entamé l'encadrement de cette thèse à l'Ecole Navale, et j'ai poursuivi son encadrement au GREEN, en parallèle à mes travaux de recherche sur les supraconducteurs. Réalisée dans le cadre d'une convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE) avec SEGULA Engineering, les travaux de cette thèse ont porté sur le développement de modèles de simulation multicritère de chaînes de propulsion hybrides pour des bateaux de transport maritime et fluvial, à faible tonnage, ayant des cycles de navigation courts et des régimes à fort appel de puissance, afin de diminuer les impacts environnementaux et sanitaires des pollutions de proximité lors du passage en zone urbaine ou portuaire, émises par les moteurs diesels de propulsion.

L'intégration d'architectures propulsives hybrides ou électriques sur des navires de faible tonnage et pour lesquels des cycles de fonctionnement sont courts est, cependant, un réel défi technique. La mise en œuvre d'un outil permettant une modélisation multiphysique et configurable du système a permis de conforter et d'optimiser les choix concernant l'architecture propulsive et la stratégie de commande associée, dans des délais compatibles avec les temps d'étude conventionnels. L'estimation des rejets environnementaux, des coûts d'acquisition et d'exploitation des équipements sur la durée de vie du navire, a permis une comparaison multicritère des différentes architectures afin de sélectionner la plus appropriée au cahier des charges de l'unité. L'étude a porté particulièrement sur les systèmes susceptibles de répondre au cahier des charges des bacs de Seine, mais peut être également s'étendre aux petits navires se rapprochant de ce cahier des charges (faible temps de navigation, forts appels de puissances, conditions environnementales difficiles).

Les travaux de cette thèse ont été valorisés par trois publications de revues et la présentation dans des conférences nationales et internationales [[R14](#), [R25](#), [R37](#), [CI.29](#), [CI.30](#), [CI.33](#), [CN.11](#)].

Thèse de doctorat de Mohamed FARHAT (01/09/2016 - 27/09/2019)

Cette thèse a été financée par un organisme libanais visant à promouvoir l'éducation et la recherche. Dans cette thèse, nous avons repris un modèle électromagnétique intégro-différentiel que j'avais précédemment développé pour le calcul du champ électromagnétique dans les matériaux composites à fibres de carbone, et, nous l'avons adapté à la modélisation des rubans composites supraconducteurs multi-filamentaires, en introduisant, en plus de l'anisotropie, la non-linéarité des propriétés électromagnétiques et leurs interdépendances, avec les problèmes de stabilité et de convergence liés aux méthodes de discrétisation choisies, et, pour lesquels nous avons apporté des solutions. Les tests de validation nous ont permis d'apprécier les performances du modèle, mettant en évidence quelques phénomènes liés aux propriétés particulières des supraconducteurs. Nous avons notamment montré que pour un calcul des pertes par courants induits, et dans le cas des faibles champs magnétiques appliqués, les supraconducteurs à haute température critique (HTC) peuvent être modélisés comme des matériaux conducteurs linéaires fortement anisotropes. Lorsqu'il faut prendre en compte la dépendance de la densité de courant critique à l'induction magnétique «

Jc(B) », nous avons également montré qu'un calcul non linéaire dans le domaine fréquentiel, limité au premier harmonique est suffisant pour le calcul des pertes par courants induits [R19, R21, CI.21, CI.31, CI.32, CN.13].

Thèse de doctorat de Yazid STATRA (01/09/2017 - 05/07/2021)

Cette thèse a été financée sur 4 ans par l'Etat algérien, mise en place grâce à mes collaborations avec les collègues de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, dans laquelle M. Statra a effectué sa formation d'ingénieur, et poursuit actuellement son parcours professionnel. Les travaux de cette thèse constituent une contribution à la modélisation et à la caractérisation expérimentale de supraconducteurs à haute température critique (HTC) en vue de leur intégration dans les systèmes de puissance ; notamment dans les machines électriques. Les travaux ont été menés, parallèlement, sur deux axes complémentaires :

- Le développement d'approches de modélisation par méthodes intégrales de volume pour le calcul des grandeurs électromagnétiques dans les supraconducteurs HTC sous champ propre ou à proximité d'autres sources, et, notamment en présence de pièces ferromagnétiques à perméabilité magnétique linéaire et non linéaire. Les résultats obtenus ont été validés par des comparaisons aux mesures et à des calculs numériques par la méthode des éléments finis.

- La caractérisation expérimentale afin de déterminer le courant critique en courant continu (DC) et les pertes dissipées en courant alternatif (AC). L'étude va de l'élément de base (rubans supraconducteurs) au système (machine électrique), montrant les difficultés rencontrées dans une telle caractérisation. Un prototype de machine synchrone à induit supraconducteur a également été réalisé et testé. Les résultats de mesure obtenus ont été en bonne concordance avec la modélisation.

Les travaux réalisés ont été valorisés par des publications de revues internationales [R7, R8, R10, R16, R17, R18, R20], ainsi que des présentations en conférences nationales et internationales [CI.3, CI.9, CI.13, CI.15, CI.17, CI.18, CI.20, CI.22, CI.24, CI.25, CI.27, CN.1, CN.6, CN.7, CN.9, CN.10, CN.12, IN1].

Thèse de doctorat de Walid DIRAHOUI (01/10/2019 – 05/10/2022)

Cette thèse a été financée par l'Université de Lorraine, sous forme d'une allocation de recherche. Le projet de cette thèse concerne la caractérisation, sans contact, par thermographie inductive, de l'intégrité structurelle des rubans HTC multicouches, à base d'YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide), dans une démarche contrôle de qualité et de fiabilité. La caractérisation électromagnétique, sans contact, a déjà été proposée et appliquée avec succès pour la caractérisation de la couche supraconductrice de ces rubans, aux températures cryogéniques. L'originalité de ce travail est son application à la caractérisation des défauts structurels à dans les autres couches, à température ambiante.

Dans sa première phase, le travail a consisté à mettre en évidence numériquement la possibilité d'un tel contrôle grâce à une approche de modélisation bidimensionnelle. Les résultats obtenus ayant été concluants, et, un banc expérimental exploitant un inducteur tournant et une caméra infrarouge pour la mesure de température a été mis en place. Les mesures expérimentales ont été complétées par une modélisation numérique tridimensionnelle à des fins de validation et pour la simulation des situations qui ne peuvent pas être reproduites expérimentalement. Des stratégies de caractérisation des défauts structurels ont été développées. Les résultats obtenus ont été très concluants, et nous encourageant à poursuivre le projet en développant une plateforme de

caractérisation, en collaboration avec des constructeurs de rubans supraconducteurs. Les travaux de cette thèse ont été valorisés par trois publications internationales et quelques présentations dans des conférences nationales et internationales [R3, R4, R5, CI.2, CI.5, CI.7, CI.17, CN.3].

Thèse de doctorat de Sara FAWAZ (01/10/2020 - 09/2023)

Cette thèse a été également financée par l'Université de Lorraine, sous forme d'une allocation de recherche. Les travaux de cette thèse concernent la caractérisation de bobines supraconductrices de différentes structures (inductives, non inductives, isolées, non isolées) et à différents régimes d'alimentation (DC, AC, AC+DC). Les études comportent un volet expérimental important, allant de la réalisation de bobines, face aux difficultés imposées par les structures fragiles des rubans HTC, au développement de stratégies d'alimentation et de mesures pour des régimes particuliers, tel que le AC+DC. Des stratégies de caractérisation expérimentales par méthodes électriques, associées à des modélisations par méthodes intégrales aussi réalistes que possible, ont été développées. La modélisation a notamment permis de consolider les résultats expérimentaux, délicats à obtenir et à interpréter, et, d'accéder aux grandeurs locales soulignant l'importance de prendre en compte la forme exacte du supraconducteur dans la section d'un ruban supraconducteur multifilamentaire. Nous avons également montré qu'une modélisation AC est nécessaire pour reproduire la variation d'inductance des bobines HTC en fonction du courant, alors que certains travaux dans la littérature adoptent une approche en DC. Pour les bobines non inductives, nous avons proposé une approche originale de caractérisation exploitant les simulations et les mesures, du fait des faibles niveaux de champ magnétique invalidant certains modèles fournis dans la littérature. Une stratégie de réduction de modèles a été proposée pour évaluer les pertes en courant alternatif dans les bobines non-inductives de grande taille. En courant continu, un modèle original prenant en compte la répartition non homogène du courant dans la section d'un ruban supraconducteur a été proposé. Le travail réalisé a été mis en valeur par cinq publications internationales et quelques présentations dans des congrès nationaux et internationaux [R1, R6, R7, R9, R11, CI.1, CI.4, CI.6, CI.8, CI.9, CI.11, CI.12, CI.16, CI.19, CI.20, CN.2, CN.4, CN.6].

Thèse de doctorat de Karim ALITOUCHE (01/01/2017 -)

Monsieur Alitouche est inscrit à l'Université de Bejaia (Algérie). Je co-encadre cette thèse à distance, et, lors de séjours que M. Alitouche a passés au GREEN, en 2018 et 2019. Le projet de thèse concerne la modélisation magnétothermique d'une machine à réluctance variable (MRV) fonctionnant à haute température. En effet, dans certaines applications, les gammes de températures atteintes dans les machines électriques peuvent être très élevées, entraînant une interdépendance des phénomènes électromagnétiques et thermiques. Le dimensionnement de ces machines nécessite de ce fait une modélisation magnétothermique, où, la connaissance du comportement électromagnétique et thermique des matériaux aux hautes températures est cruciale. L'une des difficultés rencontrées dans une telle modélisation est le choix adéquat des propriétés des matériaux et leur évolution avec la température. Un effort a donc également été fait dans ce sens, pour fournir des paramètres réalistes, et les intégrer dans une modélisation numérique [R15, CI.14, CN.5]. Monsieur Alitouche devrait pouvoir soutenir sa thèse dans un futur proche.

Stage de M2 d'Eulalie FLEUROT (01/03/2016 -16/ 09/2016)

Ce stage, co-encadré avec J-F Charpentier de l'Ecole Navale (EN), portait sur le développement de modèles semi analytiques pour le dimensionnement de transmissions de

mouvement sans contact à aimants permanents. Ce type de transmission permet la réduction des vibrations, autorise un désalignement entre les parties en mouvement, et assure une protection contre les forts couples. Elle permet notamment de réaliser une isolation étanche dans les applications marines, ainsi qu'une isolation thermique entre des parties portées à des températures très différentes. Des avantages significatifs pour des applications marines, ou celles utilisant des éléments supraconducteurs. Les pertes MHD dans une telle transmission lorsqu'elle est immergée dans l'eau de mer ont également fait l'objet d'un autre projet de M2 que j'ai encadré à l'EN. Ce stage a permis à Eulalie FLEUROT de poursuivre son parcours en thèse de doctorat à l'EN.

Stages de M2 de Mustapha EL HACHIMI et Sokhna Oumou GUEYE (15/03/2017 -15/ 09/2017)

Ces deux projets de stage de M2 se sont déroulés à la même période, en collaboration avec l'entreprise General Electric (GE) Power Conversion de Champigneulle (Meurthe-et-Moselle). Les objectifs étaient l'étude et le développement d'outils de modélisation pour le dimensionnement de paliers magnétiques actifs à flux radial et axial, destinés à des applications impliquant de très hautes vitesses de rotation. Des modèles à réseaux de ré reluctances ont d'abord été développés pour le prédimensionnement, puis un modèle éléments finis 2D, implémenté sur FEMM / Octave, avec interfaces utilisateur, a été développé pour une meilleure représentation de la géométrie et la prise en compte de la non linéarité des propriétés magnétiques des matériaux.

Stage de M2 de Jihane KHALFI (15/03/2019 -15/ 09/2019)

J'avais proposé ce stage en complément aux travaux de thèse de M. Alitouche, sur la modélisation magnétothermique d'une MRV fonctionnant à haute température. L'étudiante a réalisé un état de l'art sur l'évolution des propriétés magnétiques et électriques des matériaux en fonction de la température, puis elle a implémenté un outil de modélisation magnétothermique d'une MRV, en exploitant les modules magnétique et thermique du logiciel FEMM/Octave [R15].

Stage de M2 de Ayoub DAKILI (01/04/2021 - 31/ 08/2021)

J'ai proposé ce stage en soutien aux travaux de thèse de Walid DIRAHOUI sur le contrôle par thermographie inductive de matériaux conducteurs minces multicouches. L'étudiant a contribué au développement de modèles magnétothermiques, en 2D et 3D, sur le logiciel COMSOL Multiphysics® afin de valider les approches par méthodes intégrales développées dans les travaux de thèse de M. Dirahoui.

PFE d'Ingénieur de Geoffroy de Mellon et François-Joseph Gautier, (22/08/2022 -15/11/2022)

J'ai accueilli, au GREEN, les Elèves Officiers Geoffroy de Mellon et François-Joseph Gautier, pour effectuer un stage dans le cadre de leur projet de fin d'études d'ingénieur à l'Ecole Navale. Ils ont travaillé sur le dimensionnement d'une machine supraconductrice homopolaire pour la propulsion navale. Leur travail a commencé par une étude théorique et expérimentale des supraconducteurs et leurs propriétés physiques. La partie expérimentale a consterné la caractérisation de rubans et de bobines supraconductrices existantes, notamment pour la détermination du courant critique et la mise en évidence de sa dépendance au champ magnétique. Le travail s'est ensuite poursuivi par le dimensionnement d'un inducteur supraconducteur pour une machine homopolaire, destinée à la propulsion d'un navire pour un certain cahier des charges. Le dimensionnement est basé sur l'évaluation de grandeurs locales et a, nécessité, de ce fait, le développement d'un outil de modélisation numérique du champ électromagnétique dans les bobines supraconductrices.

Stages recherche de courtes durées

Du 16/04/2018 au 16/05/2018, j'ai accueilli au GREEN M. Alejandro Baez Muñoz, étudiant en Master 2, à l'Université Nationale Autonome du Mexique (UNAM), pour un stage dans le cadre de son projet de Master sur les moteurs supraconducteurs. J'ai notamment suivi la dernière partie de son projet de M2 qui traite du modèle thermique dans l'inducteur supraconducteur d'une machine synchrone. J'ai également été membre de son Jury de soutenance de stage de Master à l'UNAM. Monsieur Baez s'est ensuite inscrit en thèse de doctorat à l'UNAM, et j'ai été membre du comité de suivi semestriel de ses travaux, et je suis membre de son Jury de soutenance de thèse.

J'ai accueilli au GREEN, du 17/03/2022 au 16/06/2022, monsieur Aougbi Abdelillah, dans le cadre de sa thèse de doctorat à l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, et dont le projet concerne la conception d'un interrupteur supraconducteur pour des générateurs d'impulsions de forte puissance [R2]. Durant son séjour au GREEN, monsieur Aougbi a pu effectuer une recherche bibliographique étendue sur les matériaux supraconducteur, ainsi que des mesures de caractérisation de rubans supraconducteurs à haute température critique, de seconde génération (REBCO), sous champ propre et sous champ appliqué, afin d'étudier les possibilités de leur utilisation comme interrupteurs de puissance.

I.4.3 Diffusion et rayonnement

Expertise de travaux et projets

Je suis régulièrement sollicité pour l'évaluation d'articles de revues scientifiques et de conférences nationales et internationales. J'accepte d'évaluer environ une dizaine d'articles par an, dans mon domaine d'expertise. Depuis 2015, j'ai évalué une soixantaine d'articles de revues et autant d'articles de conférences nationales et internationales (Tableau 8).

En décembre 2018, j'ai également expertisé un projet sur les sources autonomes d'énergie, pour le Fonds de Recherche du Québec – Nature et technologies.

Tableau 8 : Revues et conférences pour lesquelles j'ai effectué des expertises de travaux depuis 2015

Revue scientifique	Conférences
<ul style="list-style-type: none"> - Progress in Electromagnetic Research (22) - Journal of Applied Physics & Applied Physics Letters (6) - IEEE Transactions on Applied Superconductivity (5) - IEEE Transactions on : Magnetism (3) / Magnetism conferences (1) - IEEE Transactions on Energy Conversion (3) - Emerald - COMPEL (3) - IET Renewable Power Generation (5) - IET Science, Measurement & Technology (2) - Journal of Superconductivity and Novel Magnetism (2) - MDPI: Energies (3) / Sensors (1) - European Journal of Electrical Engineering (1) - Springer - Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (1) - Springer - Electrical Engineering (1) - Advanced Electromagnetics (AEM) (1) - Springer - Nature (1). - Elsevier - Superconductivity (2) 	<ul style="list-style-type: none"> - COMPUMAG 2023 (7) - Colloque Inductique : 2022 (4)/ 2021 (3) /2017 (6) /2015 (4) - ICEM16 (1) / ICEM18 (3) / ICEM2020 (3) / ICEM 2022 (2) - VPPC2017 (2) - SGE 2018 (4) / SGE 2023 (1) - ISEF2019 (3) - IECON2019 (1) - EUCAS2019 (2) - HTS 2020 (9)/ HTS 2022 (3) - MMM-Intermag 2022 (1) / 2023 (1) - SATES 2023 (1)

Activités éditoriales

En novembre 2022, j'ai accepté d'être éditeur invité « Guest Editor » pour une session spéciale «Electromagnetic systems : Challenges, Developments and Applications», à la revue Applied Sciences (ISSN 2076-3417, IF: 2.838) du Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) (https://www.mdpi.com/journal/applsci/special_issues/18U0OV1O20#editors). Ce travail éditorial consiste à rédiger le thème de l'édition spéciale, inviter un coéditeur, identifier et inviter les contributeurs potentiels, juger de la pertinence du contenu d'un papier reçu, définir et assigner des examinateurs à chaque papier recevable, et prendre la décision finale sur l'acceptation ou le refus des papiers expertisés, en se basant sur les rapports des examinateurs.

En juillet 2023, j'ai organisé, en collaboration avec un collègue de l'Ecole Navale, une session spéciale sur les actionneurs spéciaux au Symposium de Génie Électrique, SGE2023, Lille, France (<https://sge2023.sciencesconf.org/resource/page/id/29>).

Comités de sélection

J'ai pris part à des comités de sélection pour deux postes de Maîtres de conférences :

- Comité de sélection pour le poste 63-MCF-0302 à l'Université d'Artois en 2020.
- Comité de sélection pour le poste 63-MCF-0930 à l'Université de Lorraine, en 2017.

J'ai également été membre de six commissions de recrutement d'ATER à l'UL :

- Deux commissions de recrutement d'ATER 1352 à la FST de Nancy (Avril 2019, Avril 2023).
- Quatre commissions de recrutement d'ATER à l'IUT de Longwy : 63MCF0168 (Avril 2020, Avril 2021, Avril 2022), 63MCF0983 (Juin 2023).

Participation à des jurys de thèse

En plus des participations aux jurys des thèses que j'ai co-dirigées, j'ai fait partie, en tant qu'examineur :

- Du Jury de thèse de Mayra HERNANDEZ ALAYETO, à l'Université de Grenoble Alpes, en octobre 2023, et dont les travaux portent sur la modélisation des capteurs de courant autonomes par méthodes intégrales de volume.
- Du Jury de thèse de Alexandro BAEZ à l'UNAM (Mexique), en automne 2023, et dont les travaux portent sur les modélisations électrique, magnétique et thermique d'un générateur synchrone à inducteur supraconducteur intégré à une éolienne. J'ai également été membre de son comité de suivi de thèse. Nous avons eu sept évaluations semestrielles durant sa thèse.

Diffusion et vulgarisation

En avril 2017, j'ai été invité pour faire une présentation plénière sur les matériaux supraconducteurs et leurs applications en génie électrique, à la dixième édition de la conférence sur le génie électrique à l'Ecole militaire polytechnique d'Alger (CGE'10, EMP Alger, 17-18 Avril 2017).

En mars 2018, j'ai donné, en présentiel, un séminaire aux étudiants du département ingénierie électrique de l'UNAM (Mexico) sur la caractérisation électromagnétique des matériaux conducteurs.

En mars 2019, j'ai été invité par l'Université de la Culture Permanente de Nancy, pour donner une conférence grand public sur les supraconducteurs et leurs applications. La conférence s'est tenue le 06 mars 2019 (<http://ucp-nancy.org/conferences/>).

En octobre 2021, je me suis déplacé chez l'entreprise Naval Group (NG), Centre de Nantes-Indret, où, j'ai donné un séminaire sur les supraconducteurs et leurs applications à la conversion d'énergie électromécanique, aux ingénieurs de NG, dans le but de lancer un projet collaboratif sur le développement de machines supraconductrices pour la propulsion navale.

En juillet 2022, j'ai été sollicité par les animateurs GT calcul scientifique du GDR SEEDS pour donner un webinaire sur le calcul par méthodes intégrales du champ électromagnétique dans les matériaux supraconducteurs en vue de leur caractérisation. Le webinaire s'est tenu le 07 Juillet 2022 (<https://seeds.cnrs.fr/gt-calcul-scientifique-et-modelisation-numerique/>).

En Mai 2023, dans le cadre d'une école d'été organisée par le COST Action CA19108 à Fethiye - Turquie, j'ai donné un cours de 3H, en présentiel, sur la modélisation électromagnétique des supraconducteurs à haute température critique, à des doctorants venus de différents pays.

Organisation de colloques, conférences et journées d'étude

J'ai fait partie du comité d'organisation d'événements scientifiques organisés par le GREEN, à Nancy : Journées du Club EEA en 2016, la conférence nationale SGE 2018, la conférence internationale ISEF2019, le colloque international HTS modeling, en 2020 et 2022.

J'ai également présidé des sessions orales et poster dans dix conférences nationales et internationales :

- Une session orale sur la caractérisation des matériaux, à la conférence CGE 2017 organisée par l'EMP d'Alger, les 17-18 Avril 2017.
- Une session orale sur les actionneurs spéciaux à la conférence SGE 2018 organisée par le GREEN (Nancy, les 3-5 Juillet 2018).
- Une session poster à la conférence internationale ISEF 2019, organisée par le GREEN (Nancy, les 29-31 Août 2019).
- Une session orale dans le Workshop HTS 2020, organisée par le GREEN (Nancy, les 22-23 Jun, 2021).
- Une session orale sur les actionneurs spéciaux à la conférence SGE2021, organisée par l'IREENA (Nantes, les 3-5 Juillet 2021).
- Une session poster dans le Workshop HTS 2022, organisée par le GREEN (Nancy, les 14-16 Jun, 2022).
- Une session orale au 7ème Colloque Inductique (Ci07), les 10-11 Mai 2022, à l'Université de Constantine (Algérie). Je suis également membre permanent du comité de lecture de ce colloque qui est à sa 7ème édition.
- Une session orale au Symposium on Advanced Technologies in Electrical Systems (SATES2023), 22-23 Mars 2023, Arras, France.
- Une session orale, semi plénière, à la conférence sur la supraconductivité et le magnétisme : ICSM2023, à Fethiye-Oludeniz, Turquie.
- Une session spéciale sur les actionneurs spéciaux au Symposium de Génie Électrique, SGE2023, Lille, France, du 05 au 07 juillet 2023.

Participation aux réseaux de recherche

- Je suis membre du club EEA depuis 2016.

- Depuis janvier 2016, je suis membre du CS de la revue « Mediterranean Journal of Modeling & Simulation », pISSN : 2335-1357 – eISSN : 2437-1122 (<https://sites.google.com/site/lesimjms/editorial-board>).
- Je suis membre du réseau thématique de recherche en induction électromagnétique "Inductics-Net", rassemblant des organismes de recherche français et algériens (https://ireena.univ-nantes.fr/medias/fichier/historique_inductics_net_1453475440996.pdf). Je suis également membre du comité de lecture du colloque Inductique porté par ce réseau.
- Je participe régulièrement aux activités des GT supraconducteurs et calcul scientifique du GDR SEEDS.
- Je suis membre expert du COST (European Cooperation in Science and Technology) - CA-19108 High-Temperature Superconductivity for Accelerating the Energy Transition, depuis février 2023.
- J'ai été membre de l'International Compumag Society (ICS) de 2019 à 2021.

I.4.4 Responsabilités scientifiques

Animation scientifique

Je suis membre du Conseil Scientifique et du Conseil du Laboratoire, et, depuis 2018, j'ai pris la responsabilité de l'organisation des séminaires scientifiques au GREEN. Je sollicite les intervenants, et je planifie et anime les séminaires. J'ai invité plusieurs collègues externes au GREEN pour des séminaires en présentiel ou à distance.

Contrats de recherche

Hormis les financements des thèses de doctorat, les applications considérées dans mes travaux de recherche n'ont généralement pas nécessité de financements de grande envergure. Cependant, nous avons eu besoin de l'achat de petit matériel et de financer des stages et quelques déplacements en conférences. Ainsi, j'ai contribué au montage de quelques projets, en tant que porteur ou en tant que partenaire. Certains projets n'ont malheureusement pas pu être concrétisés, comme un projet ECOS-Nord que j'ai déposé en automne 2018, en collaboration avec l'UNAM (Mexico), et un projet ANR sur le développement d'un moteur hélice supraconducteur, déposé en automne 2020, en collaboration avec l'Ecole Navale, et pour lequel j'ai été porteur.

Durant ma thèse, j'ai monté un projet SEEDS en collaboration avec le LGEP (actuel GeePs), sur le contrôle non destructif. Le financement a servi à payer des déplacements en conférences et quatre mois de salaire d'ingénieur à l'IREENA. A l'école navale, j'ai contribué à la mise en place d'un contrat de collaboration entre l'IRENav, Airbus, et le Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), sur le développement d'actionneurs MHD à haut rendement stimulés par une source laser femtoseconde à haute énergie. J'ai également œuvré à la mise en place d'un contrat avec SEGULA ENGINEERING & CONSULTING - Branche MARINE, sous forme d'une thèse CIFRE que j'ai co-encadrée avec le Dr. J-F Charpentier et le Pr. J-Y. Billard (Thèse de Nacera Bennabi, du 01/06/2015 au 03/12/2019).

En 2016, j'ai monté un projet de thèse de doctorat avec l'Université de Béjaïa (Algérie). Le doctorant (M. ALITOUCHE) est inscrit à l'Université de Béjaïa. Je co-encadre cette thèse à distance.

En 2017, j'ai obtenu un financement de thèse sur quatre ans de l'Etat algérien, à travers une collaboration que j'entretiens avec l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger. Le doctorant (M. STATRA)

a effectué sa thèse de doctorat à plein temps au GREEN.

En 2019, j'ai déposé un projet auprès du Pôle Scientifique EMPP (Énergie Mécanique Procédés Produits) de l'Université de Lorraine, et, j'ai pu obtenir 12.5K€ pour le montage d'une plateforme expérimentale de caractérisation par thermographie inductive, pour les travaux de thèse de doctorat de M. Walid DIRAHOU.

En 2023, en collaboration avec un collègue du GREEN, j'ai monté un contrat de prestation de recherche avec l'entreprise Naval Group, pour le développement d'une machine supraconductrice pour la propulsion sous-marine, à base d'une structure originale de machines-hélice intégrée que j'avais initialement développée et qui a fait, au préalable, l'objet d'une déclaration d'invention « Moteur hélice homopolaire supraconducteur », mais, qui n'a malheureusement pas pu aboutir à un brevet.

Je suis, par ailleurs, impliqué dans quelques projets européens dans lesquels le GREEN est partenaire, comme les projets IMOTHEP et SCRYPT qui ont démarré en 2020.

I.4.5 Publications et production scientifique

Les travaux de recherche que j'ai menés, dans les différentes applications, ont été valorisés par des publications dans des revues et dans des actes de conférences nationales et internationales. La Figure 3 donne l'évolution du taux de publication dans le temps. Les années 2005 et 2015 furent des années de transition ; c'est pour cela que la production scientifique était nulle ces années-là. Le nombre de conférences relativement élevé en 2021 est dû au report de certaines conférences programmées en 2020, en raison de la situation sanitaire (COVID19).

Je me suis placé en premier auteur dans les articles liés aux travaux réalisés hors encadrement. Pour ceux liés aux encadrements de thèses de doctorat ou de Master, j'ai généralement privilégié la mise en avant des étudiants, quel que soit leur taux de contribution. Les revues et les conférences visées sont celles qui donnent une meilleure visibilité à nos travaux, auprès de la communauté scientifique, en génie électrique.

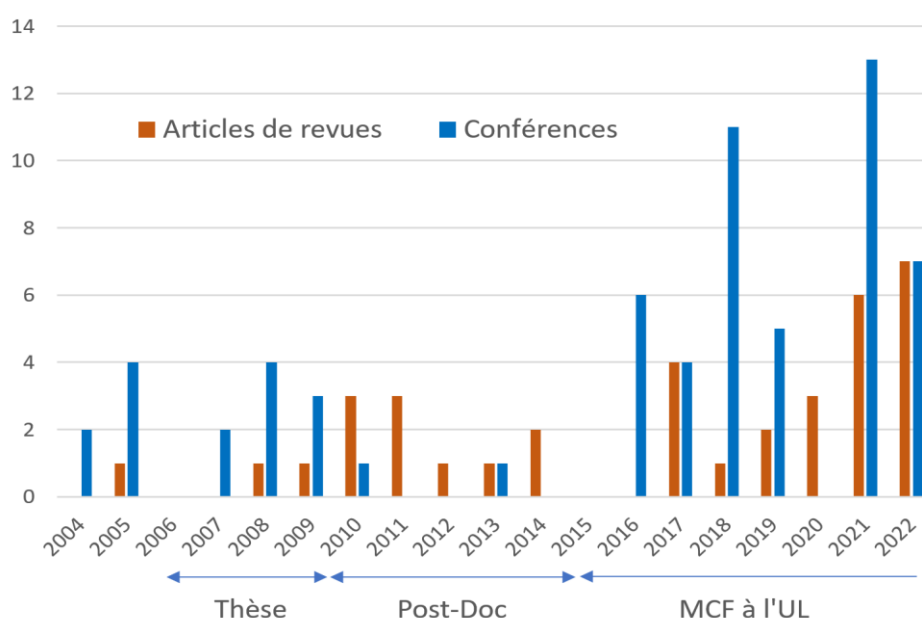


Figure 3 : Production scientifique au fil des années

Liste classée des publications

Je présente ci-après la liste des publications (<https://cv.hal.science/hocine-menana>). Mon nom est en gras et les noms des étudiants encadrés sont soulignés. Pour les conférences, la personne ayant présenté le travail est marquée d'un astérisque (*).

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

- R1. Sara FAWAZ, **Hocine MENANA**, Bruno DOUINE, Loïc QUEVAL, "Fast modeling approach of large-scale non-inductive HTS coils under different current supply ", Phys. Scr. 98 045503, 2023. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acbbae>
- R2. A. Aougbi, Y. Achour, A. Zaoui and **H. Menana**, "Improved Architecture of an Inductive Pulsed Power Supply Based on XRAM Meat-Grinder Combination," in IEEE Transactions on Plasma Science, 2023. [doi: 10.1109/TPS.2023.3261741](https://doi.org/10.1109/TPS.2023.3261741).
- R3. Walid Dirahoui, **Hocine Menana**, "Numerical and Experimental Investigations of Flaws Detection in Multilayer HTS Tapes by Magnetothermal Technique", IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, Vol. 8, pp. 233 - 240, May 2023. [DOI: 10.1109/JMMCT.2023.3275321](https://doi.org/10.1109/JMMCT.2023.3275321).
- R4. Walid Dirahoui, **Hocine Menana**, Melika Hinaje, "Nondestructive Testing of Multilayer HTS Tapes by Using Eddy Current Thermography", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 32 (8), 6602607, November 2022. [10.1109/TASC.2022.3197382](https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3197382)
- R5. Walid Dirahoui, **Hocine Menana**, Melika Hinaje, Jean Lévêque, "Magnetothermal modeling of multilayer HTS tapes for quality control at room temperature", Physica C: Superconductivity and its Applications, Elsevier, 600, 1354101, July 2022. (<https://doi.org/10.1016/j.physc.2022.1354101>)
- R6. Sara Fawaz, **Hocine Menana**, Bruno Douine, "Numerical and Experimental Investigations of HTS Coils Inductance", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 58, no 9, 8401804, September 2022. ([10.1109/TMAG.2022.3167566](https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3167566))
- R7. Yazid Statra, Sara Fawaz, **Hocine Menana**, Bruno Douine, "Experimental Electromagnetic Characterization of High Temperature Superconductors Coils Located in Proximity to Electromagnetically Active Materials", Fluid Dynamic and Material Process, Tech Science Press, Vol. 18, no. 5, pp. 1529-1537, February 2022. (<http://dx.doi.org/10.32604/fdmp.2022.021827>)
- R8. Yazid Statra, **Hocine Menana**, Bruno Douine, Thierry Lubin, "Axial-Field Synchronous Machine With HTS Armature Windings: Realization and Preliminary Tests", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 32, no. 4, 5200405, June 2022. ([10.1109/TASC.2022.3145321](https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3145321))
- R9. Bruno Douine, L. Queval, F. Trillaud, S. Fawaz, **H. Menana**, et al., "Characterization of a Superconducting Power Filter for Embedded Electrical Grid Application", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 32, no.4, 5900604, June 2022. ([10.1109/TASC.2022.3152678](https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3152678))
- R10. Yazid Statra, **Hocine Menana**, Bruno Douine, "Integral Modeling of AC Losses in HTS Tapes with Magnetic Substrates", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 32, no. 2, 5900407, March 2022. ([10.1109/TASC.2021.3139383](https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3139383))
- R11. Sara Fawaz, **Hocine Menana**, Bruno Douine and Loïc Queval, "DC modeling and characterization of HTS coils with non uniform current density distribution", Supercond. Sci. Technol. 34 124001, November 2021. ([10.1088/1361-6668/ac336c](https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac336c))
- R12. Bruno Douine, **Hocine Menana**, Kevin Berger, Jean Lévêque, Konstantin Kovalev, Nickolay Ivanov, "Overview of High Temperature Superconductor Machines", Elektrichestvo, No. 4, 2021. (<https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-4-25-33>)
- R13. **H. Menana**, "3-D FEM-BEM Coupling for the Magnetic Field Computation in Thin Shells: Application to the Evaluation of Ship Magnetic Signature," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 6, 7402206, June 2021. ([10.1109/TMAG.2021.3062563](https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3062563))

- R14. **N. Bennabi, H. Menana**, J.-F. Charpentier, J.-Y. Billard, B. Nottelet, "Design and Comparative Study of Hybrid Propulsions for a River Ferry Operating on Short Cycles with High Power Demands", *Journal of Marine Science and Engineering*, MDPI, 9 (6), 631, June 2021. ([10.3390/jmse9060631](https://doi.org/10.3390/jmse9060631))
- R15. **Karim Alitouche, Hocine Menana, Jihane Khalfi**, Nouredine Takorabet, Rachid Saou, "Contribution to the Magneto-Thermal Modeling of SRM Operating at High Temperatures", *European Journal of Electrical Engineering*, IETA, 23 (2), pp.143-147, April 2021. ([10.18280/ejee.230208](https://doi.org/10.18280/ejee.230208))
- R16. **Yazid STATRA, Hocine MENANA** and Bruno DOUINE, "Semi-Analytical Modeling of AC Losses in HTS Stacks Near Ferromagnetic Parts", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 31, no. 1, 5900306, January 2021. ([10.1109/TASC.2020.3033697](https://doi.org/10.1109/TASC.2020.3033697))
- R17. **Y. Statra, H. Menana**, and B. Douine, "Contribution to the Experimental Characterization of the Electromagnetic Properties of HTS," *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 93, 137-144, 2020. ([10.2528/PIERM20050705](https://doi.org/10.2528/PIERM20050705))
- R18. **Yazid Statra, Hocine Menana**, Bruno Douine, "3D Semi-analytical Modeling and Optimization of Fully HTS Ironless Axial Flux Electrical Machines", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 574, 15, 1353660, July 2020. ([10.1016/j.physc.2020.1353660](https://doi.org/10.1016/j.physc.2020.1353660))
- R19. **H. Menana, M. Farhat**, M. Hinaje, B. Douine, "An Integro-Differential Time Domain Scheme for Electromagnetic Field Modeling in HTS Materials", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 56, N. 3, 7514504, March 2020. ([10.1109/TMAG.2019.2953688](https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2953688))
- R20. **Yazid Statra, Hocine Menana**, Lamia Belguerras, Bruno Douine, "A volume integral approach for the modelling and design of HTS coils", *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, Vol. 38 No. 4, pp. 1133-1140, August 2019. ([10.1108/COMPEL-10-2018-0392](https://doi.org/10.1108/COMPEL-10-2018-0392))
- R21. **H. Menana, M. Farhat**, M. Hinaje, K. Berger, B. Douine, and J. Lévêque, "Eddy current modeling in linear and nonlinear multifilamentary composite materials" *Open Physics*, 16, pp. 183–187, April 2018. ([10.1515/phys-2018-0026](https://doi.org/10.1515/phys-2018-0026))
- R22. **H. Menana** and C. Gabillet, «Contribution to the Evaluation of the Efficiency and the Optimal Control of Conductive Fluids by Electromagnetic Forces», *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 55, 153-159, 2017. ([10.2528/PIERM17011006](https://doi.org/10.2528/PIERM17011006))
- R23. **H. Menana** and B. Douine, "Short notes on electromagnetic acoustic transducers (EMATs) design and modeling", *Med. J. Model. Simul.* 07, pp. 012-020, 2017. (<https://www.asjp.cerist.dz/en/downloadArticle/10/7/1/28477>)
- R24. Kévin Berger, Fawzi Boufatah, Rafael Linares, **Hocine Menana**, Melika Hinaje, Bruno Douine, Jean Lévêque, "Solar Electric Motor on Superconducting Bearings: Design and Tests in Liquid Nitrogen", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 27, No. 4, June 2017. ([10.1109/TASC.2016.2642140](https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2642140))
- R25. **N. Bennabi, H. Menana**, J. F. Charpentier, J. Y. Billard, B. Nottelet, "Improving Efficiency and Emissions of Small Ships by the Use of Hybrid Electrical Propulsion", *Journal of Power Supply*, Vol. 15, No.2, Mai. 2017. ([10.13234/j.issn.2095-2805.2017.2.001](https://doi.org/10.13234/j.issn.2095-2805.2017.2.001))
- R26. **H. Menana**, "Electromagnetic characterization of anisotropic and weakly conductive materials by using resonant circuits," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 50, 73-77, 2014. ([10.2528/PIERL14103003](https://doi.org/10.2528/PIERL14103003))
- R27. **H. Menana**, J. F. Charpentier, and C. Gabillet, "Contribution to the MHD Modeling in Low Speed Radial Flux AC Machines With Air-Gaps Filled With Conductive Fluids", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 50, no. 1, 8100104, January 2014. ([10.1109/TMAG.2013.2281421](https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2281421))
- R28. **H. Menana**, "Simplified modeling and measurement procedures for electromagnetic launchers performances evaluation", *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 31, 189-1998, 2013. ([10.2528/PIERM13050510](https://doi.org/10.2528/PIERM13050510))
- R29. **Hocine Menana**, Mouloud Féliachi, "An Integro-Differential model for 3D Eddy Current Computation in CFRPs", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, NO. 4, pages 756 – 763, April 2011. ([10.1109/TMAG.2010.2102770](https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2102770))
- R30. **Hocine Menana**, Mouloud Féliachi, "Contribution to the modeling of a voltage driven pulsed eddy current sensor for the characterization of conductive plates", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Vol. 69, no. 1, pp. 75-80, March 2011. ([10.1007/s10470-011-9623-8](https://doi.org/10.1007/s10470-011-9623-8))

- R31. **Hocine Menana**, Mouloud Féliachi, "Electromagnetic Characterization of the CFRPs anisotropic conductivity: modeling and measurements", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 53, 21101, January 2011. ([10.1051/epjap/2010100255](https://doi.org/10.1051/epjap/2010100255))
- R32. **Hocine Menana**, Mouloud Féliachi, "Nondestructive evaluation of the conductivity tensor of a CFRP plate using a rotating eddy current sensor", *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Computer Field Models of Electromagnetic Device*, Vol. 34, 789-795, IOS Press, 2010. ([10.3233/978-1-60750-604-1-789](https://doi.org/10.3233/978-1-60750-604-1-789)).
- R33. **Hocine Menana**, Mouloud Féliachi, "Modeling the response of a rotating eddy current sensor for the characterization of carbon fiber reinforced composites", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 52, 23304, October 2010. ([10.1051/epjap/20100079](https://doi.org/10.1051/epjap/20100079))
- R34. A. Zaoui, **H. Menana**, M. Feliachi, & G. Berthiau, "Inverse problem in nondestructive testing using arrayed eddy current sensor", *Sensors*, Vol. 10, pp. 8696-8704, September 2010. ([10.3390/s100908696](https://doi.org/10.3390/s100908696))
- R35. **H. Menana**, M. Féliachi, "3-D Eddy Current Computation in Carbon-Fiber Reinforced Composites," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, no. 3, pp.1008 – 1011, March 2009. ([10.1109/TMAG.2009.2012542](https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2012542))
- R36. A. Zaoui, **H. Menana**, M. Feliachi, M. Abdellah, "Generalization of the Ideal Crack Model for an Arrayed Eddy Current Sensor", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, no. 6, pp. 1638- 1641, June 2008. ([10.1109/TMAG.2007.914846](https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.914846))

Articles dans des revues nationales à comité de lecture

- R37. **N. Bennabi**, **H. Menana**, J-F. Charpentier, J-Y Billard, B. Nottellet, « Évaluation des capacités de freinage récupératif sur un navire électrique », *Revue 3EI*, n°95, pp. 16-24, Janvier 2019. (<https://see.asso.fr/produit/3ei-2019-95/>)
- R38. **H. Menana**, M. Féliachi et G. Berthiau, « Modélisation des courants de Foucault dans un matériau composite en vue de la caractérisation de défauts », *Revue Sciences & Maintenance*, 2012. (<https://datas.afim.asso.fr/publications/sm/sm.asp>)
- R39. **Hocine Menana**, « Modélisation des courants induits dans une tôle mince conductrice », *Algerian Journal of Technology*, ISSN 1111-357X, (2005). (<https://biblio.enp.edu.dz/wp-content/uploads/2020/06/Algerian-journal-of-technology-AJOT.-N%C2%B0-Special-Avril-2005.pdf>)

Conférences internationales

- CI. 1. Sara Fawaz, **Hocine Menana***, Bruno Douine. Losses in Large Scale Non-Inductive High Temperature Superconducting Coils. The 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2023), Fethiye-Oludeniz, Turkey, 4-11 Mai 2023.
- CI. 2. **W. Dirahoui**, **H. Menana***, M. Hinaje, "Eddy current thermography NDT of multilayer HTS tapes", 11th International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM2023), Avril 2023, Cannes, France.
- CI. 3. **Hocine MENANA***, **Yazid STATRA** and Bruno DOUINE, "Realization and preliminary tests of an axial-flux synchronous machine with HTS armature windings", Symposium on Advanced Technologies in Electrical Systems, 22-23 Mars 2023, Arras, France.
- CI. 4. **Sara FAWAZ**, **Hocine MENANA*** and Bruno DOUINE, "Fast integral modeling approach for the characterization of a superconducting stabilizer in DC electric grid", Symposium on Advanced Technologies in Electrical Systems, 22-23 Mars 2023, Arras, France.
- CI. 5. **Walid Dirahoui**, **Hocine Menana***, Melika Hinaje, "Numerical and Experimental Investigations on the Structural Control of REBCO HTS Tapes Using Eddy Current Thermography", International Conference on Quantum Materials and Technology (ICQMT), Oct 2022, Bodrum, Turkey.
- CI. 6. **Sara Fawaz**, **Hocine Menana***, Bruno Douine, "Numerical and Experimental Investigations of the Electromagnetic Parameters of Superconducting Coils", International Conference on Quantum Materials and Technology (ICQMT), Oct 2022, Bodrum, Turkey.

- CI. 7. Walid Dirahoui*, **Hocine Menana**, Melika Hinaje, Jean Lévêque, "Magnetothermal modeling of multilayer HTS tapes for their control at room temperature", 8th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, Jun 2022, Nancy, France.
- CI. 8. Sara Fawaz*, **Hocine Menana**, Bruno Douine, "Fast integral modeling approach of large-scale non-inductive HTS coils", 8th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, Jun 2022, Nancy, France.
- CI. 9. Sara Fawaz, **Hocine Menana***, Yazid Statra, Bruno Douine, "Numerical modeling and experimental study of HTS coils inductance. 23rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields", COMPUMAG 2021, Jan 2022, Cancun, Mexico (Virtual).
- CI. 10. **Hocine Menana***, Mohamad Farhat, Melika Hinaje, "Integrodifferential modelling of the electromagnetic field in HTS Bulks. 23rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields", COMPUMAG 2021, Jan 2022, Cancun, Mexico (Virtual).
- CI. 11. Frederic Trillaud*, Bruno Douine, Sara Fawaz, **Hocine Menana**, Nicolai Ivanov, "AC losses in non-inductive high temperature superconducting coils: modeling and measurements", 23rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG 2021, Jan 2022, Cancun, Mexico (Virtual).
- CI. 12. Sara FAWAZ*, **Hocine MENANA**, Bruno DOUINE, Loïc QUEVAL, "DC characterization of HTS coils with non-uniform current density distribution using E(J) and Jc(B) dependency", 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism, 21-27 October, 2021, Bodrum, Turkey.
- CI. 13. Y. Statra, **H. Menana***, B. Douine, "Notes on the realization and preliminary tests of an axial-flux synchronous machine with HTS armature windings", 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism, 21-27 October, 2021, Bodrum, Turkey.
- CI. 14. **H. Menana***, N. Takorabet, H. Elmadah, K. Alitouche, R. Saou, D. Roger, "Weak Magneto-Thermal Coupling for Modeling of a Reluctance Motor Working at High Temperature", 20th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, ISEF 2021, 20-23 September 2021, Lodz/Cracow, Poland (Virtual).
- CI. 15. Yazid STATRA*, **Hocine MENANA**, Bruno DOUINE, Thierry LUBIN, "Axial-field synchronous machine with HTS armature windings: Realization and preliminary results", 15th European Applied Superconductivity Conference, EUCAS, September 5-9, 2021, Moscow, Russia (Virtual).
- CI. 16. Bruno Douine*, Loïc Quéval, Frederic Trillaud, Sara Fawaz, **Hocine Menana**, Isabelle Schwenker, Olivier Despouys, Nikolay Ivanov, "Characterization of Superconducting Power Filter for embedded electrical grid application", 15th European Applied Superconductivity Conference, EUCAS, September 5-9, 2021, Moscow, Russia (Virtual).
- CI. 17. **Hocine Menana***, Walid Dirahoui, Yazid Statra, Malika Hinaje, Bruno Douine, "Contribution to the modeling of eddy current losses in HTS tapes", 7th International Workshop on Numerical Modeling of High Temperature Superconductors (HTS Modeling Workshop), Nancy, 22-23 June 2021.
- CI. 18. Yazid Statra*, **Hocine Menana**, Bruno Douine, "Fast Modelling Approach for Computing AC Losses in HTS Stacks and Coils Near Ferromagnetic Parts ", 7th International Workshop on Numerical Modeling of High Temperature Superconductors (HTS Modeling Workshop), Nancy, 22-23 June 2021.
- CI. 19. Sara FAWAZ*, **Hocine MENANA**, Bruno DOUINE, Loïc QUEVAL, "DC modeling & characterization of HTS coils with non uniform current density distribution", 7th International Workshop on Numerical Modeling of High Temperature Superconductors (HTS Modeling Workshop), Nancy, 22-23 June 2021.
- CI. 20. Y. Statra, S. Fawaz, **H. Menana***, B. Douine, "Experimental characterization of the electromagnetic properties of HTS coils in self field and with the proximity of electromagnetically active materials", International Conference on MATERIALS & ENERGY, ICOME2021, JUNE 09-11, 2021, METZ - FRANCE.

- Cl. 21. **Hocine Menana***, Mohamad Farhat, Melika Hinaje and Bruno Douine, " An Integro-Differential Time Domain Scheme for Electromagnetic Field Modeling in HTS Materials", COMPUMAG2019, 15-19 July 2019, Paris, France.
- Cl. 22. Yazid Statra*, **Hocine Menana**, Bruno Douine, "3D semi-analytical modelling of magnetic forces between HTS coils", ISEF 2019, 29-31 August 2019, Nancy, France.
- Cl. 23. **Hocine Menana***, "3D FEM-BEM coupling for electromagnetic field computation in thin shells", ISEF 2019, ISEF 2019, 29-31 August 2019, Nancy, France.
- Cl. 24. Y. Statra*, **H. Menana**, B. Douine, "AC losses computation in HTS coils in the frequency domain", EUCAS 2019, Glasgow, 1-5 Sept. 2019.
- Cl. 25. Yazid Statra, **Hocine Menana***, Lamia Belguerras, Bruno Douine, "HTS Coils Characterization for DC applications - Modelling and Measurements", EPNC 2018, 26-29 Jun 2018, Arras, France.
- Cl. 26. J. Lévêque*, K. Berger, **H. Menana**, B. Douine, M. Hinaje, "3D Modelling of HTS bulk submitted to an external magnetic field by stochastic methods", ASC 2018, Seattle, USA, Oct. 28 – Nov. 2, 2018.
- Cl. 27. Bruno Douine*, **Hocine Menana**, Yazid Statra, Elhadj Ailam "Caracterisation de rubans supraconducteurs HTC", CISTEM2018, 28-31 October 2018, Algiers, Algeria.
- Cl. 28. K. Berger*, L. Quéval, F. Trillaud, G. Escamez, B. Ramdane, G. Dilasser, **H. Menana**, J. Lévêque, "Hybrid analytical and integral methods for simulating HTS materials under various applied magnetic field configurations", HTS Modeling, Caparica, Portugal 26-29 June 2018.
- Cl. 29. N. Bennabi*, J. F. Charpentier, **H. Menana**, J. Y. Billard, B. Nottellet, "Evaluation of recovery braking capacities on electric vessel", ICEM 2018, September 3-6 2018, Alexandroupoli – Greece.
- Cl. 30. N. Bennabi*, **H. Menana**, J-F Charpentier, J-Y Billard, B. Nottellet, "Modeling and Simulation of a Series Hybrid Propulsion Chain for Small Ships", IEEE VPPC'2017 Conference, December, 11th-14th 2017, Belfort, France.
- Cl. 31. **Hocine Menana***, Kévin Berger, Bruno Douine, Melika Hinaje, Jean Lévêque, "Electromagnetic field modeling in HTS composite tapes in the frequency domain", 9ème Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme (NUMELEC 2017), 15-17 Nov 2017, Paris, France.
- Cl. 32. **H. Menana***, K. Berger, B. Douine, M. Hinaje and J. Lévêque, "Eddy current modeling in composite materials: CFRPs and multifilamentary HTS tapes", ISEF 2017, Lodz, Poland, 14-16 September 2017.
- Cl. 33. N. Bennabi*, **H. Menana**, J-F Charpentier, J-Y Billard, P. Genet, "Hybrid Propulsion Systems for Small Ship: Context and Challenges", ICEM 2016, Lausanne-Suisse, 4-7 September 2016.
- Cl. 34. **H. Menana***, B. Douine, K. Berger, J. Lévêque, M. Hinaje, « Eddy current modeling in multifilamentary superconductive tapes submitted to external time varying magnetic field », HTS Modelling Workshop, Bologna-Italy, 15 - 17 Juin 2016.
- Cl. 35. K. Berger*, **H. Menana**, T. Lubin, B. Douine, J. Lévêque, "Modelling of HTS bulk during Pulsed Field Magnetization in an iron core using analytical and integral methods", HTS Modelling Workshop, Bologna-Italy, 15 - 17 Juin 2016.
- Cl. 36. Kévin Berger*, Fawzi Boufatah, **Hocine Menana**, Rafael-Antonio Linares-Lamus, Melika Hinaje, et al., "Solar electric motor on superconducting bearings: design, producing and potential applications", ASC 2016 - Applied Superconductivity Conference, Sep 2016, Denver, Colorado, United States.
- Cl. 37. **H. Menana***, A. Verschae and L. Morvan, "Modeling and measurement strategies for electromagnetic coil gun launchers", EMF 2013, Bruges- Belgique, 23-25 April 2013.
- Cl. 38. **H. Menana***, M. Féliachi, "Electromagnetic field modeling in laminated carbon fiber reinforced polymer composites (CFRPs)", Workshop EM IEEE 2010, les 2-3 December 2010, Saint Malo, France.
- Cl. 39. **H. Menana*** and M. Féliachi, "Nondestructive evaluation of the conductivity tensor of a CFRP plate using a rotating eddy current sensor", ISEF 2009, 14th International Symposium on Electromagnetic Fields In Mechatronics Electrical and Electronic Engineering, Arras – France, 10-12 September 2009.

- CI. 40. A. Zaoui*, **H. Menana**, M. Féliachi, & G. Berthiau, "Inverse problem in nondestructive testing using arrayed eddy current sensor", ISEF 2009, 14th International Symposium on Electromagnetic Fields In Mechatronics Electrical and Electronic Engineering, Arras – France, 10-12 September 2009.
- CI. 41. **Hocine MENANA**, Mouloud FELIACHI, and Gérard BERTHIAU*, "Contribution to the eddy current nondestructive evaluation of the CFRPs properties", ENDE 2009, 14th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Dayton, USA, 12-13, July 2009.
- CI. 42. **H. Menana**, M. Féliachi*, "Modélisation de la réponse d'un capteur à courants de Foucault tournant pour la caractérisation des matériaux composites à fibres de carbone", NUMELEC 2008, Liege, 8-10 December 2008.
- CI. 43. **H. Menana***, M. Féliachi, "A fast 3D eddy current computation in carbon fiber reinforced composites", CEFC 2008, Athens, Greece, 11- 15 May 2008.
- CI. 44. A. Zaoui, **H. Menana***, M. Féliachi, G. Berthiau, "Fast Crack Profile Reconstitution Using Arrayed Eddy Current Sensor Modeling", CEFC 2008, Athens 11- 15 May 2008.
- CI. 45. **H. Menana***, M. Féliachi et G. Berthiau, "Modélisation des courants de Foucault dans un matériau composite en vue de la caractérisation de défauts", COFREND Meeting, 20 -23 May 2008, Toulouse, France.
- CI. 46. A. Zaoui, **H. Menana***, M. Féliachi, "Generalization of the Ideal Crack Model for an Arrayed Eddy Current Sensor", COMPUMAG 2007, Aachen, Germany, 24 -28 Jun2007.
- CI. 47. **H. Menana***, M. Féliachi, "2D finite element modeling of a voltage driven pulsed eddy current sensor for nondestructive evaluation", COMPUMAG 2007, Aachen, Germany, 24 -28 Jun2007.
- CI. 48. H. Hamidi*, **H. Menana**, "New numerical simulation scheme for the optimization of electromagnetic acoustic transducer", 4th EGLEA Meeting, October 16-19, 2005, Taormina (ME), Italy.
- CI. 49. **H. Menana***, H. Hamidi, A. Badidi Bouda, "Contribution à l'optimisation de l'exploitation des EMATs", COFREND Meeting, 24 -26 May 2005, Beaune, France.

Conférences nationales

- CN. 1. **Hocine Menana***, Yazid STATRA, "Contribution à la modélisation de machines électriques supraconductrices par méthodes intégrales", Symposium de Génie Électrique, SGE2023, Lille, France, du 05 au 07 juillet 2023.
- CN. 2. Sara Fawaz*, **Hocine Menana**, Bruno Douine, "Caractérisations expérimentale et numérique des supraconducteurs HTC pour des applications en énergie électrique", Symposium de Génie Électrique, SGE2023, Lille, France, du 05 au 07 juillet 2023.
- CN. 3. W. Dirahoui*, **H. Menana**, M. Hinaje, " Modélisation magnétothermique des rubans HTC multicouches en vue de leur contrôle à température ambiante", Les 13es Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, 12 -15 octobre 2021, Aussois, France.
- CN. 4. Sara FAWAZ*, **Hocine MENANA**, Bruno DOUINE, Loïc QUEVAL, "Modélisation et caractérisation en courant continu des bobines SHTC avec une distribution non uniforme de la densité de courant", Les 13es Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, 12 -15 octobre 2021, Aussois, France.
- CN. 5. Karim ALITOUCHE, **Hocine MENANA***, Nouredine TAKORABET, Rachid SAOU, Daniel Roger, "Modélisation magnétothermique d'une MRV opérant dans un environnement thermique contraint", Symposium de Génie Electrique SGE 2020, 6-8 Juillet 2021, Nantes, France.
- CN. 6. Bruno Douine, Sara Fawaz*, **Hocine Menana**, Yazid Statra, "Caractérisation de rubans supraconducteurs pour des applications en génie électrique", Symposium de Génie Electrique SGE 2020, 6-8 Juillet 2021, Nantes, France.

- CN. 7. Yazid STATRA*, **Hocine MENANA**, Bruno DOUINE, "Etude numérique et expérimentale des propriétés électromagnétiques de bobines supraconductrices", Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, JCGE 2019, du 11 au 14 juin 2019, Ile d'Oléron, France.
- CN. 8. Bruno DOUINE*, Kévin BERGER, Jean LEVEQUE, **Hocine MENANA**, Melika HINAJE, Mohamed ELBAA, ElHadj AILAM "Ecrans et aimants supraconducteurs : performances et applications", SGE 2018, 3-5 July 2018, Nancy, France.
- CN. 9. Yazid STATRA*, Abdelhalim ZAOUI, **Hocine MENANA**, Bruno DOUINE, "Modélisation d'un dispositif de chauffage par induction avec et sans prise en compte du couplage magnétothermique", SGE 2018, 3-5 July 2018, Nancy, France.
- CN. 10. Yazid STATRA*, **Hocine MENANA**, Lamia BELGUERRAS, Bruno DOUINE, "Contribution à la caractérisation expérimentale des supraconducteurs HTC : de l'élément au système", SGE 2018, 3-5 July 2018, Nancy, France.
- CN. 11. N. Bennabi*, **H. Menana**, J-F. Charpentier, J. Y Billard, B. Nottellet, "Évaluation des capacités de freinage récupératif sur un navire électrique", SGE 2018, 3-5 July 2018, Nancy, France.
- CN. 12. Yazid STATRA*, **Hocine MENANA**, Lamia BELGUERRAS, Bruno DOUINE, "Caractérisation expérimentale des supraconducteurs HTC", 12es Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, 5-8 juin 2018, Aussois, France.
- CN. 13. Mohamad FARHAT*, **Hocine MENANA**, Melika HINAJE, Bruno DOUINE, "Modélisation du champ électromagnétique dans les rubans supraconducteurs HTC dans le domaine fréquentiel", 12es Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, 5-8 juin 2018, Aussois, France.
- CN. 14. **H. MENANA***, B. DOUINE, K. BERGER, J. LEVEQUE, M. HINAJE, "Caractérisation électromagnétique de matériaux conducteurs non conventionnels", SGE 2016, du 7 au 9 Juin 2016, Grenoble-France.
- CN. 15. K. BERGER*, F. BOUFATAH, **H. MENANA**, M. HINAJE, B. DOUINE, J. LEVEQUE, "Moteur à énergie solaire sur paliers supraconducteurs", SGE 2016, du 7 au 9 Juin 2016, Grenoble-France.
- CN. 16. **H. Menana***, H. Hamidi, A. Badidi Bouda, "Modélisation numérique des contraintes générées par un EMAT dans une tôle mince conductrice", ISESC'05, 19 -21 Jun 2005, Jijel, Algeria.
- CN. 17. **H. Menana***, "Modélisation des courants induits dans une tôle mince conductrice", Workshop MEM'05, 13 -14 April 2005, ENP – Algiers, Algeria.
- CN. 18. **H. Menana***, M. Djennah, "Mise en œuvre d'une rigidité pour le couplage entre la MEF et la BEM dans le calcul du champ magnétostatique pour une tôle mince perméable", CIGE'04, 9-12 October 2004, Setif, Algeria.
- CN. 19. **H. Menana***, M. Djennah, "Modélisation tridimensionnelle du champ magnétostatique pour une couche mince perméable", CMGE'04, 12-13 April 2004, Constantine, Algeria.

Conférences invitées

- IN. 1. Y. Statra, **H. Menana***, B. Douine, "Realization and tests of a synchronous generator with HTS armature windings", half plenary presentation, ICSM2023, 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism, Fethiye-Oludeniz, Turkey, 4-11 Mai 2023.
- IN. 2. **H. Menana*** « Les supraconducteurs et leurs applications » Conférence grand public, organisée par l'Université de la Culture Permanente de Nancy, le 06 mars 2019.
- IN. 3. **H. Menana***, K. Berger, B. Douine, M. Hinaje, J. Lévêque, "Les matériaux supraconducteurs et leurs applications en génie électrique", présentation plénière à la CGE'10, 17-18 Avril 2017, Alger, Algérie.

I.5. Conclusions et préambule au mémoire scientifique

Cette première partie constitue une synthèse de mes activités pédagogiques et de recherche scientifique, avec un bilan des enseignements effectués et des travaux de recherche réalisés ces vingt dernières années. Mon parcours, quelque peu sinueux, m'a offert l'opportunité d'exercer dans plusieurs établissements présentant des environnements pédagogiques et scientifiques différents, et, dans lesquels j'ai pu travailler sur de nombreux projets concernant notamment le contrôle et la caractérisation des matériaux conducteurs et supraconducteurs.

Répondant à des besoins spécifiques, j'ai également eu l'occasion de mener et de codiriger des projets sur la conversion et la gestion d'énergie, notamment en environnement naval. Cependant, je ne revendique pas une expertise dans ces domaines dont les portées sont bien au-delà du périmètre des aspects que j'ai pu aborder. Présentant une meilleure dimension sociétale par leur aspects applicatif, ils continueront néanmoins à faire l'objet de projets d'étudiants pour une meilleure préparation à leurs parcours professionnels, d'autant qu'on a de moins en moins d'étudiant désirant poursuivre un parcours recherche fondamentale.

La partie scientifique de ce mémoire sera limitée aux travaux réalisés sur contrôle et la caractérisation électromagnétique des matériaux supraconducteurs qui a fait l'objet de l'essentiel de mes activités d'encadrement doctoral, impliquant la modélisation du champ électromagnétique par méthodes intégrales ou intégral-différentielles. Cela dit, mes perspectives de recherche intègrent la conversion d'énergie, notamment, dans le cadre des applications des matériaux supraconducteurs.

Afin de mieux situer nos travaux, je présente dans le prochain chapitre un état de l'art sur les modèles électromagnétiques et leur application aux matériaux supraconducteur, en décrivant les spécificités de ces derniers, et en mettant l'accent sur les modèles développés et exploités dans nos travaux. Une synthèse des travaux réalisés fera alors l'objet du chapitre suivant.

II. ETAT DE L'ART SUR LES MODELES MAGNETODYNAMIQUES ET LEUR APPLICATION AUX SUPRACONDUCTEURS

II.1. Introduction

La modélisation est une étape incontournable pour la conception et l'optimisation des systèmes, ainsi que la prédiction de leur comportement sous différentes conditions de fonctionnement. Selon les phénomènes impliqués, elle peut être simple à grandeurs globales ou au contraire très complexe et très coûteuse en temps de calcul et d'espace mémoire requis pour le stockage des données. Ceci est dû à la complexité des systèmes présentant souvent des dimensions multi-échelles, et aux matériaux présentant parfois des structures hétérogènes, et des propriétés anisotropes et non-linéaires. Lorsqu'il s'agit de phénomènes multiphysique variant dans le temps, les dynamiques différentes des phénomènes rajoutent une difficulté supplémentaire à concevoir une modélisation réaliste à des temps de calcul raisonnables. La fréquence d'évolution des grandeurs dans le temps joue également un rôle important dans le choix de l'approche de modélisation adoptée qui associe une formulation du problème électromagnétique à une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles qui en découlent.

Les approches analytiques, réputées exactes, sont limitées par les complexités géométriques et celles de propriétés physiques des matériaux, et, leur exactitude n'est valable que dans le périmètre des hypothèses adoptées, qui peuvent parfois être très fortes (simplification de la géométrie, linéarisation des propriétés physique ...). L'évolution des performances des outils de calcul a permis le développement d'approches numériques de plus en plus fines et réalistes. L'effort de l'utilisateur se trouve également réduit en comparaison aux méthodes analytiques, mais, au détriment de l'augmentation des temps de calcul et de l'espace mémoire requis pour le stockage de données, notamment si des outils génériques sont utilisés de manière inadéquate dans un problème mal posé (un choix inadéquat de la formulation, des conditions aux limites, des conditions initiales...).

Dans ce chapitre, je commencerai par donner un aperçu non exhaustif des formulations et des principales méthodes numériques utilisées en électromagnétisme basse fréquence, ensuite, je présenterai un état de l'art de leur application aux matériaux supraconducteurs avec les spécificités qui caractérisent ces derniers.

II.2. Formulations des problèmes magnétodynamiques

Les formulations électromagnétiques sont basées sur les équations de Maxwell. En se basant sur travaux réalisés par de nombreux physiciens sur les phénomènes électromagnétiques, James Clerk Maxwell (1831-1879) a formulé une description complète des phénomènes électromagnétiques sous quatre équations qui lient entre eux les champs électrique et magnétique. Ces équations, dites locales, s'écrivent comme suit :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B} \quad (\text{Equation de Maxwell - Faraday}) \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \partial_t \vec{D} \quad (\text{Equation de Maxwell - Ampère}) \quad (\text{II.2})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (\text{Equation de Maxwell - Gauss}) \quad (\text{II.3})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Equation de Maxwell - Thomson}) \quad (\text{II.4})$$

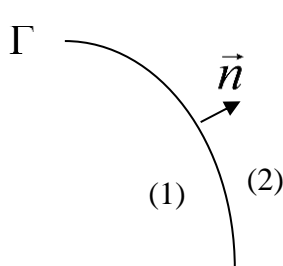
On associe à ces équations les lois constitutives suivantes :

$$\{\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}\} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$\vec{B} (T)$	le vecteur d'induction magnétique
$\vec{H} (A \cdot m^{-1})$	le vecteur champ magnétique
$\vec{E} (V \cdot m^{-1})$	le vecteur champ électrique
$\vec{J} (A \cdot m^{-2})$	le vecteur densité de courant électrique
$\vec{D} (C \cdot m^{-2})$	le vecteur d'induction électrique
$\rho_e (C \cdot m^{-3})$	la densité volumique de charge électrique
$\mu (H \cdot m^{-1})$	la perméabilité magnétique
$\sigma (S \cdot m^{-1})$	la conductivité électrique
$\varepsilon (F \cdot m^{-1})$	la permittivité électrique

Le système d'équations 2.6 donne les conditions de passage des champs électrique et magnétique entre deux milieux différents, séparés par une frontière Γ contenant une densité de courant surfacique $\vec{J}_\Gamma (A \cdot m^{-1})$ et une densité de charge surfacique $\rho_{e\Gamma} (C \cdot m^{-2})$, et sur laquelle le vecteur normal \vec{n} est dirigé du milieu (1) vers le milieu (2). Il est à noter qu'une telle densité surfacique de courant n'est introduite que dans des cas rares, comme dans la modélisation de couches minces ou dans des problèmes présentant un effet de peau est très prononcé. Si le milieu (2) est à conductivité infinie, on a $\vec{n} \times \vec{E}_2 = \vec{0}$ et $\vec{n} \times \vec{E}_1 = \vec{0}$. De même, si le milieu (2) est à perméabilité infinie, alors $\vec{n} \times \vec{H}_2 = \vec{0}$, et, en l'absence de courants de surface on aura $\vec{n} \times \vec{H}_1 = \vec{0}$ [COU81].



$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2)_\Gamma = \vec{J}_\Gamma \\ \vec{n} \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2)_\Gamma = \vec{0} \\ \vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2)_\Gamma = 0 \\ \vec{n} \cdot (\vec{J}_1 - \vec{J}_2)_\Gamma = -\partial_t \rho_{e\Gamma} \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

La perméabilité magnétique, de même que la conductivité et la permittivité électriques peuvent être non-linéaires et anisotropes selon le matériau considéré. Dans le vide : $\sigma = 0$, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H \cdot m^{-1}$, $\varepsilon = \varepsilon_0 = (36\pi \times 10^9)^{-1} F \cdot m^{-1}$. En basses fréquences, lorsqu'il

s'agit de modéliser des matériaux conducteurs ($\sigma \neq 0$), le terme $\partial_t \vec{D}$, dans l'équation de Maxwell – Ampère, est souvent négligé.

Les problèmes électromagnétiques en régime variable basse fréquence sont régis par les modèles magnétodynamiques. Ces derniers peuvent être formulés soit en termes de champs, de potentiels, ou en termes de densité de courant. Les formulations peuvent être exprimées sous forme d'équations aux dérivées partielles, ou d'équations intégrales de frontières pour les structures homogènes [KRA83, NIC83, RUC90, SHE98, ZHE90] ou encore en termes d'intégrales de volumes [ALB85, ALB88, ALB96, ALB98, ALB10, KWO03, MEU16, NGU14 ...]. Les problèmes électromagnétiques peuvent également être formulés sous forme variationnelle, en minimisant une fonctionnelle d'énergie [BOS94, COU81, PAR15...].

Le tableau II-1 résume les principales formulations utilisées pour résoudre les problèmes magnétodynamiques, dans lesquelles l'expression du terme source peut être différente selon le problème considéré. Chaque formulation présente des avantages et inconvénients, et, l'utilisation de l'une ou l'autre dépend du système modélisé, notamment des propriétés électromagnétiques des matériaux et de leur forme géométrique (problèmes de connexité). Les formulations à double potentiels sont les plus souvent utilisées.

La formulation en potentiels $\vec{A}-V$ (potentiel vecteur magnétique - potentiel scalaire électrique) [BIR89, COU81 ...] tient compte naturellement de la conservation du flux magnétique, permet un couplage avec les équations de circuits électriques : il est facile d'imposer soit un courant, soit une tension source, avec ou sans champ magnétique externe. Elle ne tient cependant pas compte naturellement de la conservation du courant électrique qu'il faut imposer de manière explicite. Récemment, une attention particulière est accordée au modèle de Darwin, qui intègre, à la fois, les effets résistifs, inductifs et capacitifs, mais néglige celui du rayonnement. Dans ce modèle, le champ électrique lié aux effets capacitifs est considéré comme irrotationnel, et la formulation $\vec{A}-V$ est modifiée comme suit, où \vec{J}_s est une densité de courant source, et ε la permittivité électrique [HEN22, KOC12, TAH22, ZHA19...]:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \times (\mu^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{A}) + \sigma \partial_t \vec{A} + (\sigma + \varepsilon \partial_t) \vec{\nabla} V = \vec{J}_s \\ \vec{\nabla} \cdot \{ \sigma \partial_t \vec{A} + (\sigma + \varepsilon \partial_t) \vec{\nabla} V \} = \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_s \end{cases} \quad (II.7)$$

La formulation en potentiels $\vec{T}-\phi$ (potentiel vecteur électrique - potentiel scalaire magnétique) [BOU90, BOU92 ...] tient compte naturellement de la conservation du courant électrique mais ne tiennent pas compte de la conservation du flux magnétique. Un terme source \vec{T}_0 est parfois rajouté pour imposer une densité de courant source \vec{J}_s , tel que $\vec{J}_s = \vec{\nabla} \times \vec{T}_0$. Pour les géométries non simplement connexes, en utilisant la formulation $\vec{T}-\phi$, l'expression du champ magnétique externe comme le gradient du potentiel scalaire ϕ le rend irrotationnel, et, de ce fait, ne permet pas de satisfaire la forme intégrale de l'équation de Maxwell-Ampère. Des traitements particuliers sont nécessaires dans ce cas [ALB90, ARS21, DUL96...].

Une formulation en potentiels vecteurs électrique et magnétique $\vec{T}-\vec{A}$ a été proposée par D. Albertz [ALB85]. Elle permet de tenir compte de manière naturelle, à la fois, de la conservation du courant électrique et de la conservation du flux magnétique. Cependant, cette formulation est

coûteuse en termes d'espace mémoire et de temps de calcul, car elle aboutit à un système de six équations au lieu de quatre pour les formulations $\vec{A}-V$ et $\vec{T}-\phi$.

Tableau II.1 : Les formulations couramment utilisées pour les problèmes de magnétodynamique

Formulation	Equations de base	Equations à résoudre
$\vec{A}-V$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B} \Rightarrow \vec{E} = -\partial_t \vec{A} - \vec{\nabla} V$	$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \times (\mu^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{A}) + \sigma (\partial_t \vec{A} + \vec{\nabla} V) = \vec{0} \\ \vec{\nabla} \cdot \{ \sigma (\partial_t \vec{A} + \vec{\nabla} V) \} = 0 \end{array} \right.$
$\vec{T}-\phi$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \Rightarrow \vec{J} = \vec{\nabla} \times \vec{T}$ $\vec{H} = \vec{T} - \vec{\nabla} \phi \quad \vec{E} = \sigma^{-1} \vec{J}$	$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \times \sigma^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{T} + \partial_t (\mu (\vec{T} - \vec{\nabla} \phi)) = \vec{0} \\ \vec{\nabla} \cdot (\mu (\vec{T} - \vec{\nabla} \phi)) = 0 \end{array} \right.$
$\vec{T}-\vec{A}$	$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ $\vec{J} = \vec{\nabla} \times \vec{T}$	$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \times (\mu^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{\nabla} \times \vec{T} \\ \vec{\nabla} \times (\sigma^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{T}) = -\partial_t \vec{\nabla} \times \vec{A} \end{array} \right.$
Champ \vec{H}	$\vec{E} = \sigma^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B}$	$\vec{\nabla} \times (\sigma^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{H}) = -\partial_t (\mu \vec{H})$
Champ \vec{E}	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B}$	$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \times (\partial_t \vec{B})$

La non linéarité des propriétés électromagnétiques peut également introduire des problèmes de convergence selon que cette non linéarité soit convexe ou concave. Ainsi, la loi $B(H)$ est concave alors que la loi $H(B)$ est convexe, et de ce fait, une formulation électrique ($\vec{A}-V$) qui implique la réductivité magnétique μ^{-1} convergerait mieux dans ce cas. Pour un matériau supraconducteur, la loi $E(J)$ est convexe (loi en puissance) alors que $J(E)$ est concave. Une formulation magnétique (\vec{H} ou $\vec{T}-\phi$) qui implique la résistivité électrique assure une meilleure convergence dans ce cas [BER06, VIN00 ...]. Lorsque le système modélisé est caractérisé par des non-linéarités des propriétés magnétiques et électriques, il est parfois judicieux d'utiliser la formulation $\vec{T}-\vec{A}$ où le potentiel vecteur électrique est utilisé dans les régions conductrices et le potentiel vecteur magnétique est utilisé dans les autres régions [BEN20].

Comme la formulation $\vec{T}-\phi$, la formulation en champ magnétique \vec{H} tient compte naturellement de la conservation du courant électrique, mais ne tient pas compte de la conservation du flux magnétique. Son utilisation est donc souvent associée aux éléments finis d'arrêtes et à des solveurs itératifs. Une résistivité électrique doit également être affectée aux régions non conductrices, où, une valeur de $1\Omega \cdot m$ est souvent choisie [GRI07-1, GRI16].

La formulation en champs électrique ne permet pas d'imposer explicitement la conservation du courant électrique. Elle ne convient donc pas pour les problèmes de magnétodynamique, sauf pour les cas bidimensionnels où le problème de conservation du courant ne se pose pas. Le développement du second membre de la formulation ($\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \times (\partial_t \vec{B})$) dépend du système modélisé. S'il implique des mouvements, le temps et l'espace deviennent dépendants, et on ne peut pas intervertir les dérivées spatiale et temporelle. Dans le cas contraire, on peut écrire $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t [\mu (\sigma \vec{E} + \vec{J}_s) + \vec{\nabla} \mu \times \vec{H}]$, et si la perméabilité est constante dans tout le système, on a : $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \partial_t (\sigma \vec{E} + \vec{J}_s)$, où \vec{J}_s est une éventuelle densité de courant source imposée. On peut aussi l'exprimer en fonction de la densité de courant : $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \sigma^{-1} \vec{J} = -\mu \partial_t (\vec{J} + \vec{J}_s)$.

L'opérateur rotationnel apparaissant dans les différentes formulations ne définit la grandeur vectorielle à laquelle il est appliqué qu'à un gradient d'une fonction scalaire près, et, de ce fait, il n'assure pas l'unicité de la solution, et conduit à des problèmes de convergence dans la résolution des systèmes matriciels issus de la discrétisation des formulations. Des conditions de jauge sont alors parfois appliquées de manière explicite ou implicite. Pour le potentiel vecteur magnétique, la jauge de Coulomb ($\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$) est la plus utilisée en basses fréquences, en annulant le terme $\vec{\nabla} \vec{\nabla} \cdot \vec{A}$ issu du développement $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} - \Delta \vec{A}$, lorsque c'est possible, ou en rajoutant un terme de pénalité ($-\vec{\nabla} \mu^{-1} \vec{\nabla} \cdot \vec{A}$) à la formulation [COU81]. Lorsqu'on utilise la méthode des éléments finis d'arrêtes, une jauge d'arrête peut aussi être utilisée pour assurer l'unicité de la solution [MAN95 ...] ; les degrés de liberté redondants du potentiel vecteur sont alors annulés sur un ensemble d'arrêtes formant un arbre du maillage. Enfin, l'utilisation d'un solveur itératif peut assurer la convergence sans condition de jauge, si le second membre de l'équation à résoudre est à divergence nulle. A chaque itération, la divergence du vecteur solution est alors définie au sens faible, égale à la divergence de la solution initiale [REN96]. Les systèmes matriciels des problèmes non-jaugés doivent cependant être compatibles, et, lorsque les problèmes sont formulés au sens faible, il est d'usage de reformuler le vecteur source comme le rotationnel d'un autre vecteur source : $\vec{B}^s = \vec{\nabla} \times \vec{A}^s$ et $\vec{J}^s = \vec{\nabla} \times \vec{T}^s$ ou $\vec{J}^s = \vec{\nabla} \times \mu^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{A}^s$ [REN96]. D'autres méthodes de jaugeage ont été également rapportées [HEN22, SUN15, TAN19...].

Il faut être prudent quant à l'exploitation directe des potentiels vecteurs en 3D. Les grandeurs physiques qui en découlent $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ ou $\vec{J} = \vec{\nabla} \times \vec{T}$ sont, quant à elles, correctement évaluées.

II.3. Résolution par des méthodes numériques

La complexité des systèmes rend l'utilisation des méthodes numériques souvent indispensable. Ces dernières sont basées sur la discrétisation partielle ou entière de l'espace d'étude en un nombre fini d'éléments, de manière structurée ou non structurée, conformes ou non conformes, selon la méthode utilisée. Il existe également des méthodes sans maillage, à l'interpolation purement nodale, sans recours à la notion d'élément. Ces méthodes sont notamment répandues dans les domaines de la mécanique du solide et la mécanique des fluides, où les contraintes de maillage sont très fortes (mouvements, déformations, ...)

En électromagnétisme, le choix de la méthode dépend de la géométrie, des phénomènes étudiés et de la fréquence de leur variation dans le temps. En effet certaines méthodes sont plus adaptées aux hautes fréquences, et vice versa. Cela est illustré dans l'exemple de la Figure II.1 qui donne qualitativement la répartition d'un courant de retour dans un plan de masse. Si la fréquence est telle que c'est la partie résistive de l'impédance du plan de masse qui est prédominante alors le courant s'étale pour occuper le maximum de surface du plan, cependant, si la fréquence est assez élevée, le courant retour suivra exactement le même chemin que celui de l'aller, de telle sorte à réduire la partie réactive, et sa pénétration dans le plan sera aussi limitée. Les approches de modélisations (formulation & méthode de discrétisation) seront alors différentes dans les deux cas.

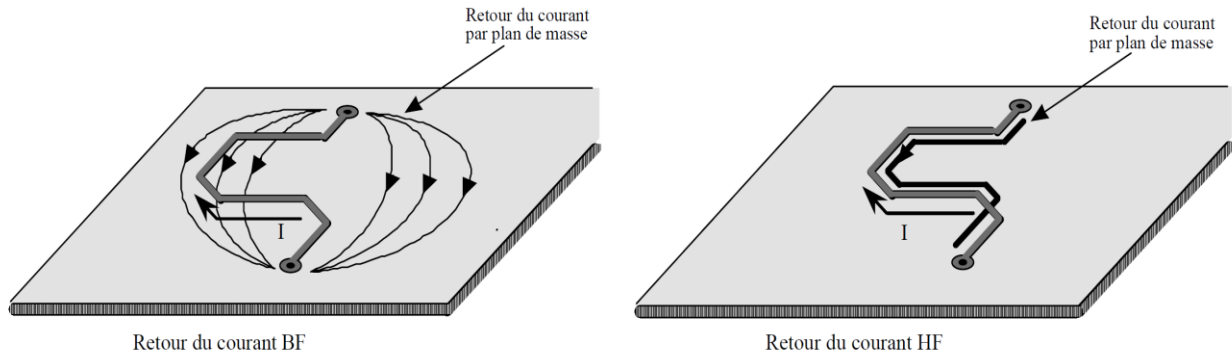


Figure II.1 : Répartition de courants de retour par un plan de masse, en basse et haute fréquences

Cette partie donne une description non exhaustive et succincte des méthodes les plus utilisées en électromagnétisme basse fréquence. On peut regrouper ces méthodes en deux catégories : les méthodes différentielles et méthodes intégrales. Dans la catégorie des méthodes différentielles, on cite : la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. Dans la catégorie des méthodes intégrales, on a la méthode des intégrales de frontières et la méthode des intégrales de volume.

II.3.1 Méthodes différentielles

La méthode des différences finies

La méthode des différences finies est basée sur le développement en série de Taylor qui stipule qu'une fonction $f(x)$, n fois dérivable au voisinage d'un point « a », peut être approchée au voisinage de ce point par une fonction polynomiale dont les coefficients ne dépendent que des dérivées successives de la fonction en ce point. On a alors :

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{(k!)^{-1}}{(k!)} (x-a)^k \partial_x^k f(a) + O(x-a)^n \quad (\text{II.8})$$

Où $O(x-a)^n$ est l'erreur de troncature.

En remplaçant x par $a \pm \Delta x$ dans l'équation précédente, on obtient :

$$f(a \pm \Delta x) = \sum_{k=0}^n \frac{(k!)^{-1}}{(k!)} (\pm \Delta x)^k \partial_x^k f(a) + O(\pm \Delta x)^n \quad (\text{II.9})$$

De ce fait, en n'importe quel point d'interpolation x , on a :

$$f(x \pm \Delta x) = \sum_{k=0}^n \frac{(k!)^{-1}}{(k!)} (\pm \Delta x)^k \partial_x^k f(x) + O(\pm \Delta x)^n \quad (\text{II.9-bis})$$

Les dérivées, première, avant, arrière et centrée, s'expriment alors comme suit :

$$\partial_x f(x) = \begin{cases} (\Delta x)^{-1} [f(x + \Delta x) - f(x)] + O(\Delta x) \\ (\Delta x)^{-1} [f(x) - f(x - \Delta x)] + O(\Delta x) \\ (2\Delta x)^{-1} [f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)] + O(\Delta x)^3 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

La dérivée centrée possède une erreur de troncature moins élevée que celles des dérivées avant et arrière.

La dérivée seconde peut alors s'exprimer comme suit :

$$\partial_x^2 f(x) = (\Delta x)^{-2} [f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)] + O(\Delta x)^3 \quad (\text{II.11})$$

La méthode des différences finies exploite la formulation sous sa forme forte. L'espace est discrétisé en un nombre de points où les opérateurs différentiels impliqués dans les formulations sont approchés à l'aide des formules décrites en haut, où Δx devient le pas du maillage suivant la direction x . C'est l'une des méthodes les plus simples à mettre en œuvre et qui conduit à des matrices creuses. Cependant, comme le montre les équations précédentes, l'erreur dépend très fortement du pas du maillage qui doit être aussi fin que possible. Des maillages structurés sont également requis, ce qui rend difficile son application aux géométries complexes. Pour les problèmes temporels, un critère de convergence lie les discrétisations spatiale et temporelle via les propriétés électromagnétique des matériaux (diffusivité magnétique), ce qui rajoute une contrainte supplémentaire [YEE66 ...].

La méthode des éléments finis

Cette méthode exploite la forme faible de la formulation ; c'est-à-dire, au lieu de résoudre directement l'équation aux dérivées partielles définie comme suit $D(u) = s$, où D est un opérateur différentiel et u l'inconnue, on la transforme en une minimisation d'une fonction intégrale sur le domaine d'étude Ω , et qui s'exprime comme suit : $\int_{\Omega} (D(u) - s) \cdot v \, d\Omega$, où v est une fonction de pondération (ou fonction test).

Le domaine est discrétisé en un ensemble d'éléments, et la variable u est interpolée de manière continue, par des fonctions de forme φ_i , sur les nœuds, arrêtes ou facettes des éléments du maillage :

$$u(x, y, z) = \sum_{i=1}^N u_i \varphi_i(x, y, z) \quad (\text{II.12})$$

Les mêmes fonctions sont généralement choisies comme fonctions de pondération, bien que ces dernières puissent être différentes. L'analyse fonctionnelle définit les propriétés de ces fonctions dans les espaces de Hilbert et de Sobolev [FER15 ...]. En particulier, elles doivent être de carrés intégrables, de même que pour leurs dérivées à un certain ordre. Ces fonctions sont de même nature que la variable u à évaluer. C'est-à-dire qu'elles sont scalaires si cette dernière l'est, et vectorielles lorsque u est une grandeur vectorielle. Les deux identités mathématiques suivantes sont souvent utilisées pour le développement des équations impliquant le Laplacien d'une fonction scalaire ($\Delta \varphi$) pour les éléments finis nodaux et le rotationnel ($\vec{\nabla} \times \alpha \vec{\nabla} \times \vec{X}$) pour les éléments finis d'arrêtes :

$$\int_{\Omega} (\psi \Delta \varphi + \vec{\nabla} \varphi \cdot \vec{\nabla} \psi) d\Omega = \int_{\partial\Omega} \psi \vec{\nabla} \varphi \cdot \vec{n} ds = \int_{\partial\Omega} \psi \partial_n \varphi ds \quad (\text{II.13})$$

$$\int_{\Omega} (\vec{\nabla} \times \alpha \vec{\nabla} \times \vec{X}) \cdot \vec{X}' d\Omega = \int_{\Omega} \alpha \vec{\nabla} \times \vec{X} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{X}' d\Omega + \int_{\partial\Omega} (\vec{n} \times \alpha \vec{\nabla} \times \vec{X}) \cdot \vec{X}' ds \quad (\text{II.14})$$

Dans les équations précédentes, Ω est le domaine d'étude et $\partial\Omega$ sa frontière avec sa normale \vec{n} dirigée vers l'extérieur.

Pour l'implémentation, l'interpolation (II.12) est réalisée dans chaque élément du maillage, et les matrices élémentaires sont construites dans chaque élément en exploitant les développements (II.13) ou (II.14). Puis la matrice globale est construite à partir des matrices élémentaires. Chaque élément (nœuds, arrêtes ou facettes) possède alors une numérotation locale dans les éléments (triangles, tétraèdres, prismes, hexaèdre...) et globale dans le maillage. Une matrice de connexion (numérotation locale et globale) est alors nécessaire.

C'est une méthode assez précise qui est utilisée dans plusieurs domaines de l'ingénierie. L'interpolation (II.12) la rend moins sensible au maillage, comparée à la méthode des différences finies. Le maillage n'est pas forcément structuré, mais doit être conforme. Elle engendre des matrices creuses, dont la taille dépend de la discrétisation. En particulier, si les systèmes présentent des dimensions multi-échelles, la discrétisation doit s'adapter à la plus petite taille, et conduirait de ce fait à des matrices de tailles élevées. Dans certains cas, elle peut être couplée avec la méthode des intégrales de frontières, à travers les intégrales sur la surface apparaissant dans les équations (II.13) et (II.14), qui sont aussi utilisés pour imposer des conditions aux limites ou les conditions de continuité d'une région à l'autre du système modélisé.

La méthode des volumes finis

Comme la méthode des éléments finis la méthode des volumes finis exploite les éléments d'un maillage. Cependant, cette dernière exploite directement la forme forte de l'équation à résoudre. Elle est basée sur la transformation d'intégrales de volumes en intégrales de surface, en utilisant ces identités [AND12, FUM08, ZOU04...] :

$$\begin{cases} \int_{\Omega} \vec{\nabla} \cdot \vec{X} d\Omega = \int_{\partial\Omega} \vec{X} \cdot \vec{n} ds \\ \int_{\Omega} \vec{\nabla} \times \vec{X} d\Omega = \int_{\partial\Omega} \vec{n} \times \vec{X} ds \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Les intégrales sur le volume de la divergence (ou du rotationnel) d'un vecteur sont transformées en intégrales de surface évaluées aux interfaces entre les volumes finis du maillage du domaine d'étude. Si l'on prend l'exemple de l'équation suivante : $\Delta \varphi = s$, son intégration sur volume élémentaire Ω_e du maillage se développe comme suit :

$$\int_{\Omega_e} \Delta \varphi d\Omega = \int_{\Omega_e} \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \varphi d\Omega = \int_{\partial\Omega_e} \vec{\nabla} \varphi \cdot \vec{n} ds = \int_{\partial\Omega_e} \partial_n \varphi ds = \int_{\Omega_e} s d\Omega \quad (\text{II.16})$$

La dérivée $\partial_n \varphi$ est alors évaluée aux frontières de l'élément par un schéma différences finies qui lie la grandeur dans l'élément à celles des éléments adjacents. Les matrices engendrées par un tel

schéma sont alors creuses. Les maillages ne sont pas nécessairement structurés. Le flux entrant dans un volume donné est égal au flux sortant du volume adjacent, c'est donc une méthode à flux conservatif.

II.3.2 Méthodes intégrales

Les méthodes intégrales exploitent le noyau de Green G , solution élémentaire (ou solution fondamentale) d'une équation aux dérivées partielles linéaire à coefficients constants, avec une source impulsionnelle : $D[G(\vec{r}, \vec{r}')] = \delta(\vec{r}, \vec{r}')$, où D est un opérateur différentiel et δ la fonction de Dirac. L'expression du noyau de Green dépend de l'opérateur différentiel appliqué et des coordonnées spatiales utilisées. Ces méthodes sont notamment très utilisées dans le domaine de la propagation d'ondes où des formes tensorielles des fonctions de Green (en anglais, dyadic Green's functions) sont généralement utilisées [VOL12 ...].

On distingue deux types : la méthode d'intégrales de frontière et la méthode d'intégrales de volume. Leurs fondements sont brièvement décrits dans ce qui suit.

Contrairement aux méthodes différentielles qui n'impliquent une interaction d'un élément qu'avec ses voisins situés à sa proximité, les méthodes intégrales impliquent une interaction directe entre tous les éléments du système modélisé engendrant des matrices pleines, ce qui constitue l'une des principales causes limitant l'utilisation de ces méthodes dans le domaine de l'énergie électrique. Cependant, les évolutions des outils de calcul, et les solutions de réduction des systèmes proposées, en exploitant notamment le fait que l'interaction entre éléments décroît avec la distance qui les sépare, ont fait que ces méthodes connaissent un regain d'intérêt ces dernières années, notamment la méthode d'intégrales de volume.

La méthode d'intégrales de frontières

La méthode d'intégrales de frontières est utilisée pour résoudre les équations aux dérivées partielles dans un domaine homogène Ω , délimité par la frontière $\partial\Omega$. Son principe est basé sur l'identité de Green suivante [NIC83, VOL12 ...] :

$$\int_{\Omega} \phi \Delta \psi - \psi \Delta \phi \, d\Omega = \oint_{\partial\Omega} \phi \frac{\partial \psi}{\partial n} - \psi \frac{\partial \phi}{\partial n} \, ds \quad (\text{II.17})$$

Pour résoudre une équation de Laplace $\Delta \phi = s$, on exploite le noyau de Green, solution de l'équation suivante :

$$\Delta G(\vec{r}, \vec{r}') = -\delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (\text{II.18})$$

En 3D, et en coordonnées cartésiennes ou sphériques, la solution de (II.18) donne :

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = (4\pi \|\vec{r} - \vec{r}'\|)^{-1} \quad (\text{II.19})$$

Si on remplace la fonction ψ par le noyau de Green dans (II.17), on obtient :

$$\int_{\Omega} \varphi \Delta G - G \Delta \varphi \, d\Omega = \oint_{\partial\Omega} \varphi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds \quad (II.20)$$

Etant donné que $\int_{\Omega} \varphi \delta(\vec{r} - \vec{r}') \, d\Omega = \varphi(\vec{r})$, en tenant compte de (2.18), la relation (II.20) devient :

$$\varphi(\vec{r}) = \oint_{\partial\Omega} G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial \varphi(\vec{r}')}{\partial n} - \varphi(\vec{r}') \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial n} ds - \int_{\Omega} G(\vec{r}, \vec{r}') s(\vec{r}') \, d\Omega \quad (II.21)$$

L'intégrale sur le volume dans (II.21) représente le terme source qui est connu dans tout le domaine. L'équation (II.21) est évaluée numériquement sur la frontière $\partial\Omega$, et, lorsque le point de calcul coïncide avec le point source ($\vec{r} = \vec{r}'$), la fonction $G(\vec{r}, \vec{r}') = (4\pi \|\vec{r} - \vec{r}'\|)^{-1}$ présente une singularité. Le traitement de cette singularité conduit à l'expression suivante [NIC83, VOL12 ...] :

$$C \varphi(\vec{r}) = \oint_{\partial\Omega(\vec{r} \neq \vec{r}')} G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial \varphi(\vec{r}')}{\partial n} - \varphi(\vec{r}') \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial n} ds - \int_{\Omega} G(\vec{r}, \vec{r}') s(\vec{r}') \, d\Omega \quad (II.22)$$

Avec :

$$C = \begin{cases} 1 & \text{si } \vec{r} \in \Omega \\ \frac{\alpha}{4\pi} & \text{si } \vec{r} \in \partial\Omega \quad (\frac{\theta}{2\pi} \text{ en } 2D) \end{cases} \quad (II.23)$$

Où α et θ représentent respectivement les angles délimités au point de singularité par la frontière du domaine sur un disque et sur une sphère, de rayons $\varepsilon \rightarrow 0$. Si la surface est régulière, alors : $C = 1/2$.

Pour l'équation d'Helmholtz, $\Delta \varphi + k^2 \varphi = s$, la fonction de Green utilisée est la solution de l'équation :

$$\Delta G(\vec{r}, \vec{r}') + k^2 G(\vec{r}, \vec{r}') = -\delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (II.24)$$

On obtient alors la même expression intégrale pour φ , mais avec une expression différente du noyau de Green qui s'exprimera en coordonnées cartésiennes ou sphériques, en 3D, comme suit [VOL12 ...] :

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = (4\pi \|\vec{r} - \vec{r}'\|)^{-1} e^{-jk\|\vec{r} - \vec{r}'\|} \quad (II.25)$$

En effet, en intégrant sur le domaine Ω , le produit de l'équation d'Helmholtz $\Delta \varphi + k^2 \varphi = s$ par le noyau de Green, on obtient :

$$\int_{\Omega} G(\Delta \varphi + k^2 \varphi) d\Omega = \int_{\Omega} G s \, d\Omega \quad (II.26)$$

En tenant compte de (II.20), on a :

$$\begin{aligned}
\int_{\Omega} G \Delta \varphi d\Omega &= -\int_{\Omega} k^2 G \varphi d\Omega + \int_{\Omega} G s d\Omega \\
&= \int_{\Omega} \varphi \Delta G d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \varphi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds
\end{aligned} \tag{II.27}$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\int_{\Omega} \varphi (\Delta G + k^2 G) d\Omega = \int_{\Omega} G s d\Omega - \oint_{\partial\Omega} \varphi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds \tag{II.28}$$

En tenant compte de (II.24), on obtient :

$$\varphi(\vec{r}) = \oint_{\partial\Omega} \varphi(\vec{r}') \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial n} - G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial \varphi(\vec{r}')}{\partial n} ds - \int_{\Omega} G(\vec{r}, \vec{r}') s(\vec{r}') d\Omega \tag{II.29}$$

Finalement, le traitement de la singularité conduit à l'expression (II.22) [VOL12].

La méthode d'intégrales de frontière n'a pas suscité beaucoup d'intérêt en électromagnétisme basse fréquence, en raison de ses limitations aux domaines homogènes et isotropes, et, en principe linéaires, car, la non linéarité introduit une hétérogénéité lorsque les distributions spatiales des champs ne sont pas uniformes. Elle a parfois été combinée avec la méthode des éléments finis pour représenter le champ électromagnétique dans l'air (vide), ce qui permet d'éviter de le mailler et d'y imposer des conditions aux limites [BOU92-2, REN92 ...].

La méthode d'intégrales de volume

La méthode d'intégrales de volume considère chaque partie active d'un système électromagnétique comme porteuse d'une source de champ électromagnétique, qui est soit imposée (connue) ou à déterminer. Les potentiels et champs électriques et magnétiques sont évalués par des équations intégrales impliquant leurs sources qui sont soit des courants ou des charges électriques ou leurs équivalents magnétiques. Seules les parties actives sont discrétisées, et, cela rend cette méthode attractive pour la modélisation des systèmes se présentant comme un ensemble de sources distribuées avec des dimensions multi-échelles (bobines par exemple), ou présentant des mouvements.

Le domaine d'étude ne doit pas être borné par une frontière (pas de conditions aux limites). Le champ ou le potentiel produit par chaque source est évalué comme si elle était seule dans l'espace libre. En effet, si on considère l'équation (II.20), lorsque la frontière du domaine d'étude s'étend à l'infini, et vu que le noyau de Green ainsi que sa dérivée s'annulent à l'infini, cette équation, qui est la solution de $\Delta \varphi = s$, devient :

$$\varphi(\vec{r}) = -\int_{\Omega} G(\vec{r}, \vec{r}') s(\vec{r}') d\Omega \tag{II.30}$$

Un potentiel scalaire (électrique ou magnétique) est créé par des charges (électriques ou magnétiques fictives), de densités surfaciques $\rho_{(e/m)s}$ et volumiques $\rho_{(e/m)v}$, et s'exprime comme suit, avec $\alpha_{(e)} = \varepsilon_0^{-1}$ et $\alpha_{(m)} = \mu_0^{-1}$:

$$\varphi_{(e/m)}(\vec{r}) = \int_{\Omega} \alpha_{(e/m)} \rho_{(e/m)v}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') d\Omega + \int_{\partial\Omega} \alpha_{(e/m)} \rho_{(e/m)s}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') ds \quad (\text{II.31})$$

Les charges magnétiques sont fictives et sont liées à l'aimantation \vec{M} du matériau comme suit, où \vec{n} est le vecteur normal à la surface $\partial\Omega$ du matériau [DUR68, KRA77, OUB14 ...] :

$$\begin{cases} \rho_{(m)v} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M} \\ \rho_{(m)s} = \vec{M} \cdot \vec{n} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Le potentiel vecteur magnétique \vec{A} créé par des densités volumiques surfaciques, de courants électriques (\vec{J} , \vec{J}_s) et magnétiques (\vec{k} , \vec{k}_s), s'exprime comme suit :

$$\vec{A}(\vec{r}) = \mu_0 \int_{\Omega} G(\vec{r}, \vec{r}') \{ \vec{J}(\vec{r}') + \vec{k}(\vec{r}') \} d\Omega + \mu_0 \int_{\partial\Omega} G(\vec{r}, \vec{r}') \{ \vec{J}_s(\vec{r}') + \vec{k}_s(\vec{r}') \} ds \quad (\text{II.33})$$

Ces densités de courants magnétiques sont fictives et sont liées à l'aimantation \vec{M} du matériau comme suit, où \vec{n} est le vecteur normal à la surface $\partial\Omega$ du matériau [DUR68 ...] :

$$\begin{cases} \vec{k} = \mu_0^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{M} \\ \vec{k}_s = \mu_0^{-1} \vec{M} \times \vec{n} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Les méthodes intégrales de volume ont été notamment utilisées en magnétostatique pour modéliser l'aimantation des navires [CHA02, NGU11, VUI08 ...] et le calcul des forces dans les systèmes à aimants permanents [AKO84, ALL09, JAN09 ...].

Une des variantes des méthodes intégrales de volume est la méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit) qui transforme le modèle électromagnétique en circuit électrique équivalent, à paramètres localisés électriques (résistances) et magnétiques (inductances et mutuelles inductances), évalués par les équations intégrales présentées en haut. Appliquée aux matériaux conducteurs, sa forme classique dérive de l'expression du champ électrique total en un point d'un conducteur, de conductivité électrique σ , qui s'exprime comme suit, où \vec{E}_i est un champ électrique incident sur le conducteur [MUS09, RUE74...]:

$$\vec{E}_i = \sigma^{-1} \vec{J}(\vec{r}, t) + \partial_t \vec{A}(\vec{r}, t) + \vec{\nabla} V(\vec{r}, t) \quad (\text{II.35})$$

Cette méthode est en particulier intéressante pour la modélisation des systèmes multiconducteurs, et, notamment pour des simulations en compatible électromagnétique, en basse et haute fréquences [ALO19 ...]. Une base de données intéressante, contenant des codes de calcul et des problèmes test, est disponible dans la référence [WEB1].

Comme les méthodes d'intégrales de frontières, les méthodes d'intégrales de volume impliquent des interactions directes entre tous les éléments du système. Ils conduisent donc à des matrices pleines, ce qui peut être très coûteux en espace mémoire et temps de calcul. Pour réduire l'espace mémoire et les temps de calcul, des solutions basées sur compression et l'approximation des matrices intégrales, peuvent être utilisées [GRE97, HAC99 ...].

II.4. Propriétés électromagnétiques des matériaux supraconducteurs et leur modélisation

II.4.1 Propriétés générales

Les recherches sur les propriétés physiques des matériaux aux températures cryogéniques ont conduit à la découverte des matériaux supraconducteurs au début du 20^{ème} siècle. Ces derniers sont caractérisés par une résistivité électrique nulle ou du moins non mesurable en dessous d'une certaine température appelée température critique (T_c). Cette propriété est complétée par un diamagnétisme parfait aux faibles champs magnétiques, jusqu'à quelques dizaines de mT , appelé effet Meisner, dû à des courants supraconducteurs surfaciques qui se développent sur une faible épaisseur de l'ordre du μm appelée épaisseur de London qui dépend de la concentration des électrons dans le matériau.

Selon la théorie BCS dont le nom est composé des premières lettres des chercheurs l'ayant développée, cette supraconductivité est due à la formation de paires d'électrons via le réseau cristallin, appelées paires de Cooper, qui se comportent comme des fermions pouvant être dans le même état quantique, et formant de ce fait une vague d'électrons dans le matériau. Cependant cette théorie n'est valable que pour un type de supraconducteurs dits de type I, et pour lesquels l'état supraconducteur disparaît avec la disparition de l'effet Meisner. Or, il existe un autre type de supraconducteurs dits de type II, qui présentent un état mixte entre l'état parfaitement supraconducteur et l'état normal, et qui sont de ce fait caractérisés par champs magnétiques critiques, H_{c1} et H_{c2} ; le premier marque la transition de l'état Meisner à l'état mixte, et le second, la transition de l'état mixte à l'état normal (perte de supraconductivité). A l'état mixte, le champ magnétique traverse le matériau dans des endroits bien spécifiques appelés vortex, de formes cylindriques. Chaque vortex est constitué d'un cœur à l'état normal, acheminant un quantum de flux ($\phi_0 = 2.0710^{-15} Wb$) entouré par des supra courants tourbillonnaires qui se développent sur une faible épaisseur caractérisée par une profondeur de pénétration de London. Le nombre de vortex par unité de surface est proportionnel au champ magnétique appliqué au matériau. Si les vortex sont libres de se déplacer dans le matériau, ils vont former entre eux un réseau triangulaire, appelé réseau d'Abrikosov. Le champ magnétique critique H_{c2} est atteint lorsque les vortex occupent pratiquement toute la surface du matériau.

Lorsqu'un courant électrique est acheminé dans ces matériaux supraconducteur de type II, il génère un champ magnétique (champ propre) qui traverse les matériaux dans des vortex. L'interaction du courant avec le flux des vortex donne naissance à une force qui s'exerce sur ces derniers. Si cette force est suffisante pour faire mouvoir les vortex, la variation du champ magnétique va donner naissance à un champ électrique dans le matériau, conduisant à un état dissipatif pouvant conduire à la perte de supraconductivité. La densité de courant critique J_c est alors celle qui génère une force suffisante pour faire mouvoir les vortex. Pour augmenter cette force, et, de ce fait, augmenter la densité de courant critique, on introduit des défauts structuraux dans le matériau pour ancrer les vortex (flux pinning). L'application d'un champ magnétique externe aura pour effet de diminuer la densité de courant critique.

L'état supraconducteur dépend alors de trois grandeurs qui présentent des valeurs critiques : la température, le champ magnétique et la densité de courant. Les valeurs critiques de ces grandeurs définissent une surface critique en dessous de laquelle le matériau est à l'état

supraconducteur.

Alors que la théorie BCS donne une limite de supraconductivité à environ 29K, des matériaux supraconducteurs de type II, fonctionnant à des température beaucoup plus élevées (avoisinant les 100K), ont été découverts au milieu des années 1980. Ces matériaux de synthèse sont essentiellement à base d'oxydes de cuivre (cuprates). Cela a relancé l'intérêt porté aux matériaux supraconducteurs et a ouvert de nouveaux champs d'applications, notamment en énergie électrique. Les supraconducteurs fonctionnant à des températures inférieures à 29K sont alors appelés supraconducteurs à basse températures critique (BTC) et les autres sont appelés supraconducteurs à haute température critique (HTC). Parmi les plus utilisés de nos jours, on cite le niobium titane NbTi et le niobium étain (NbSn) en BTC, et le diborure de magnésium (MgB₂), les oxydes mixtes de bismuth, de calcium, de cuivre et de strontium (BSCCO), et les oxydes mixtes de baryum, de cuivre et d'yttrium (YBCO), en HTC. La Figure II.2 illustre qualitativement les grandeurs critiques et leur interdépendance pour ces matériaux.

Dans la fabrication de fils, les supraconducteurs sont mélangés avec de bons conducteurs tels que le cuivre et l'argent, afin de leur conférer une certaine tenue mécanique (notamment pour les cuprates), pour certaines contraintes de fabrication en ce qui concerne le BSCCO, et pour des raisons de protection et de stabilité thermique. Les fils à base de cuprates se présentent généralement sous forme de rubans composites multifilamentaires en BSCCO (dits de première génération) où multicouches en YBCO (dits de seconde génération), comme l'illustre qualitativement la Figure II.3 [BER06, BRU89]. Les dimensions des filaments sont très faibles afin de mieux dissiper la chaleur et de réduire les pertes par hystérésis en alternatif.

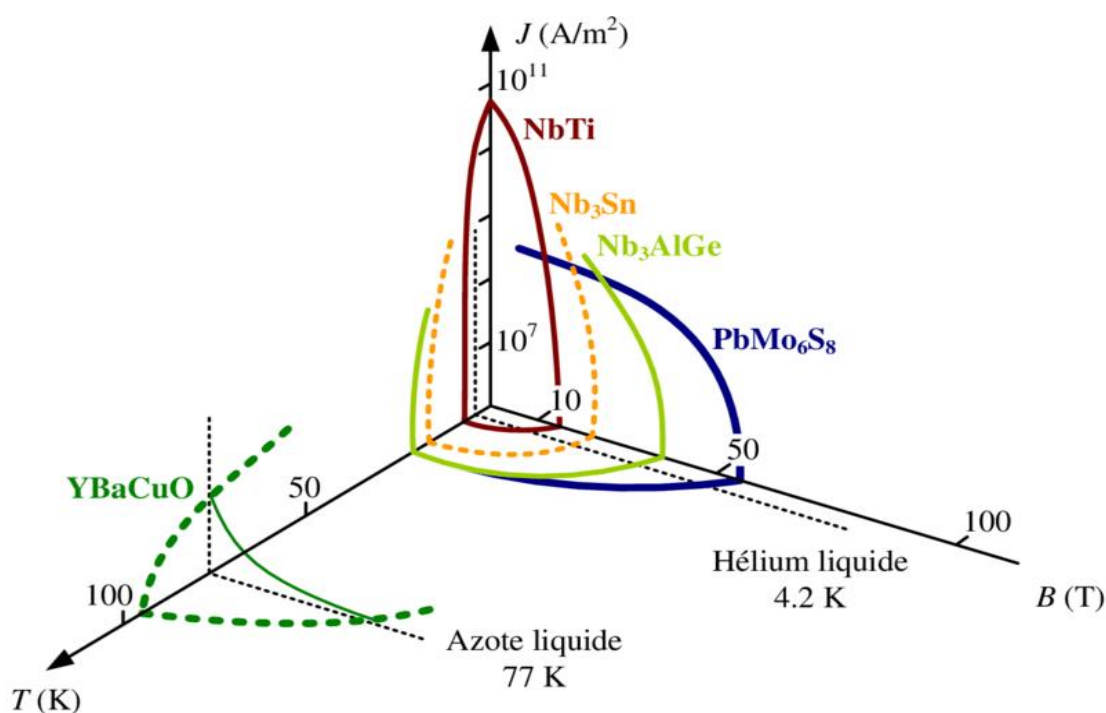


Figure II. 2 : Surfaces critiques des supraconducteurs de types II usuels [BER06].

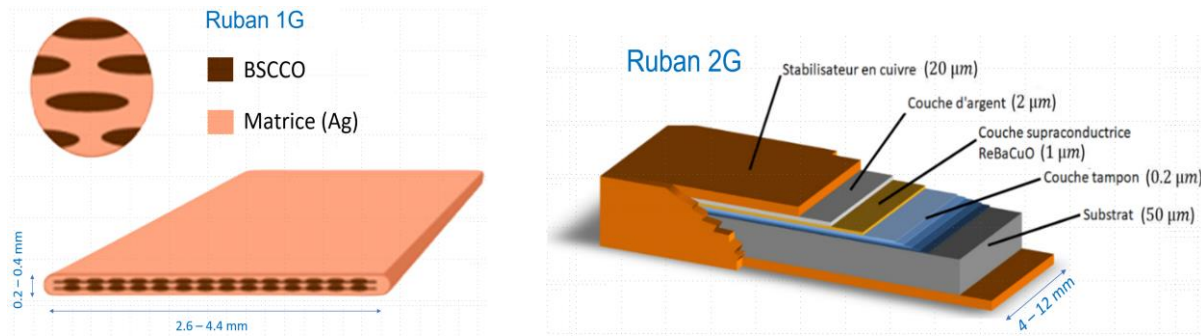


Figure II. 3 : Structures multifilamentaires et multicouches des rubans supraconducteurs 1G & 2G.

II.4.2 Propriétés électromagnétiques

Pour des applications en énergie électrique, les supraconducteurs de type II sont généralement utilisés à des champs magnétiques supérieurs à H_{c1} , et sont alors caractérisés par la perméabilité magnétique du vide μ_0 .

Lorsqu'ils sont parcourus par un courant électrique, l'apparition du champ électrique dans les supraconducteurs de type II suit un processus non linéaire, tel que l'illustre la Figure II.4.

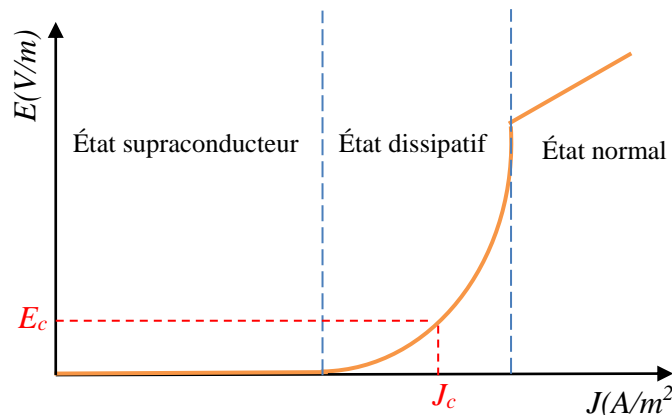


Figure II. 4 : Caractéristique typique de la relation $E(J)$ d'un supraconducteur HTC.

Pour les faibles valeurs de la densité de courant, un faible champ électrique est généré par les mouvements du réseau cristallin (agitation thermique). En augmentant la densité de courant, on passe par une phase de fluage de flux (flux creep) ; dans cette phase, le champ électrique généré commence à devenir important et le matériau devient dissipatif. En augmentant d'avantage la densité de courant, la force électromagnétique exercée sur les vortex dépasse la force d'ancrage, et ces derniers se mettent en mouvement créant un état encore plus dissipatif d'énergie, pouvant conduire à une perte de l'état supraconducteur. Concernant les matériaux HTC, par convention, la densité de courant critique est celle qui génère un champ électrique de $1\mu V/cm$, appelé champ électrique critique (E_c). Le critère est plus contraint pour les BTC qui présentent une zone d'état dissipatif beaucoup plus étroite, c-à-d une transition plus rapide de l'état supraconducteur à l'état normal. La densité de courant critique dépend par ailleurs du champ magnétique appliqué au matériau et de la température.

Deux principaux modèles sont utilisés pour représenter la relation $E(J)$ d'un supraconducteur de type II : le modèle de l'état critique (modèle de Bean) et le modèle en puissance.

Modèle de l'état critique

Le modèle de l'état critique a été proposé par Charles. P. Bean en 1964 [BEA64], pour l'étude de l'aimantation des supraconducteurs de type II qui présente un comportement hystérétique. Dans ce modèle, la densité locale de courant dans un matériau supraconducteur est soit nulle, soit égale à sa valeur critique (Figure II.5).

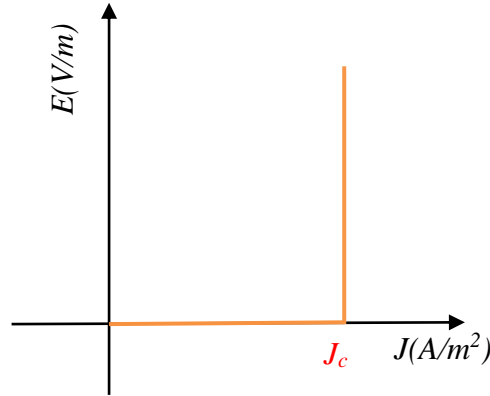


Figure II. 5 : Caractéristique $E(J)$ selon le modèle de Bean.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \|\vec{J}\| = J_c & \text{si } \vec{E} \neq \vec{0} \\ \|\vec{J}\| = 0 & \text{si } \vec{E} = \vec{0} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Cette représentation est généralement utilisée pour le développement de modèles analytiques permettant le calcul de la densité de courant critique et des pertes AC dans les supraconducteurs de géométries simples.

Modèle en puissance

Le modèle de Bean présente une discontinuité et n'est donc pas souhaitable pour être utilisé avec les modèles numériques. La loi en puissance est l'un des modèles proposés pour reproduire de manière continue le comportement non linéaire de la caractéristique $E(J)$. Cette loi s'exprime comme suit :

$$\vec{E} = E_c \left(\frac{J}{J_c(B, T)} \right)^{n(B, T)} \frac{\vec{J}}{\|\vec{J}\|} \quad (\text{II.37})$$

Où, n est le coefficient de fluage qui caractérise la raideur de la transition de l'état supraconducteur à l'état normal. Une valeur élevée de n traduit une transition brutale. La valeur de n est plus importante pour les supraconducteurs BTC.

La densité de courant critique et le coefficient de fluage dépendent du champ magnétique et de la température. Une dépendance linéaire par rapport à la température est généralement considérée [BER06] :

$$\begin{cases} J_c(T) = (1 - T/T_c)^\alpha (1 - T_0/T_c)^{-\alpha} J_c(T_0) \\ n(T) = T_0 T^{-1} n(T_0) \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Où, α est un paramètre d'adaptation aux données expérimentales.

La dépendance au champ magnétique est donnée par le modèle de Kim, comme suit [DOU10, KIM62 ...] :

$$J_c(B) = J_{c0} \left(1 + \|\vec{B}\| / B_0 \right)^{-1} \quad (\text{II.39})$$

Où : J_{c0} représentent la densité de courant critique sous champ nul, et B_0 une constante caractérisant le matériau.

En réalité, la dépendance au champ magnétique présente un caractère anisotrope dans les cuprates [DUT99, STA02]. Un champ magnétique appliqué perpendiculairement au plan (ab) de la structure cristalline (plan supraconducteur) affecte de manière plus significative la densité de courant critique qu'un champ appliqué dans le sens parallèle à ce plan. Le modèle le plus couramment utilisé pour la prise en compte de cette anisotropie dans les rubans supraconducteurs de première et seconde génération est le modèle de Kim-Anderson, séparant les champs magnétiques perpendiculaires et parallèles au plan (ab) qui est dans ce cas parallèle à la surface la plus large du ruban. Ce modèle est formulé comme suit [GRI14, GöKI06, SVGG10, ZER13 ...] :

$$\begin{cases} J_c(B_{//}, B_{\perp}) = J_{c0} \left(1 + B_{j0}^{-1} \sqrt{k^2 B_{//}^2 + B_{\perp}^2} \right)^{-\beta} \\ n(B_{//}, B_{\perp}) = n_0 \left(1 + B_{n0}^{-1} \sqrt{k^2 B_{//}^2 + B_{\perp}^2} \right)^{-1} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Où : J_{c0} et n_0 représentent respectivement, la densité de courant critique et la valeur de l'exposant n sous champ extérieur nul ; B_{j0} , B_{n0} et β sont des constantes dépendant du matériau, et k un facteur d'anisotropie ($k < 1$).

II.4.3 Pertes dans les supraconducteurs HTC

L'apparition d'un champ électrique pour une raison ou une autre conduit à un état dissipatif en présence d'une densité de courant appliquée ou induite, où la densité de puissance par unité de volume (P_v) s'exprime comme suit :

$$P_v = \vec{E} \cdot \vec{J} \quad (\text{II.41})$$

En régime continu, les pertes ne sont que résistives, et sont généralement négligeables en régime sous critique ($J < J_c$). Lorsque la densité de courant devient importante, le mouvement des

vortex engendre un champ électrique et les pertes peuvent devenir importantes. Dans les rubans supraconducteurs, une partie du courant va également circuler dans les parties non supraconductrices (cuivre ou argent).

En alternatif, les pertes sont beaucoup plus importantes. Un supraconducteur parcouru par un courant variable dans le temps ou soumis à un champ magnétique externe variable dans le temps présentera une hystérésis magnétique, à l'instar des matériaux ferromagnétique, mais son origine est différente, liée aux courants supraconducteurs et au réarrangement des vortex dans le matériau [DOU01, OOM00]. La Figure II.6 montre un exemple de cycle d'hystérésis mesuré sur un échantillon cylindrique massif d'YBCO à 77K [CEL00, STA21]. Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à la fréquence et à l'aire du cycle d'hystérésis. Ce dernier dépend de la géométrie du supraconducteur et notamment de la dimension perpendiculaire à la direction du champ magnétique. Il est alors nécessaire de réduire cette dimension afin de réduire les pertes par hystérésis.

Des pertes par courant de Foucault peuvent également apparaître dans les parties non supraconductrices des rubans supraconducteurs. Ces pertes qui sont proportionnelles au carré de l'induction et au carré de la fréquence [CAM82], sont généralement faibles en champ propre, mais peuvent être importantes en champ appliqué. Elles sont souvent négligées aux faibles fréquences [GRI14, GRI07, MAJ07, PAA96 ...].

La structure multifilamentaire des rubans en BSCCO favorise l'apparition de courants de couplage qui vont se développer entre les filaments à travers la matrice, donnant lieu à des pertes appelées des pertes par couplage [GRI14, OOM00 ...]. Il est alors nécessaire de twister les filaments pour des applications en AC.

Certains rubans supraconducteurs de seconde génération possèdent des substrats magnétiques fabriqués à base d'alliage de Nickel (Ni) [GAI13], où des pertes par hystérésis classique peuvent également apparaître. La modification de la distribution du champ magnétique va également affecter les pertes dans la partie supraconductrice.

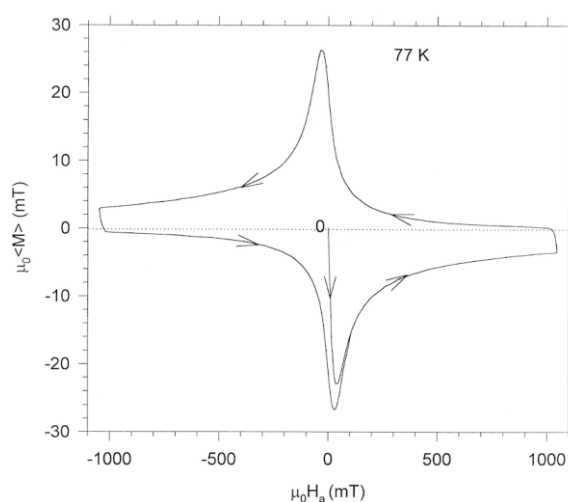


Figure II. 6 : Exemple de cycle d'hystérésis mesuré dans un échantillon supraconducteur YBCO [CEL00, STA21].

II.4.4 Modélisation des supraconducteurs HTC

Le comportement électromagnétique des supraconducteurs est complètement décrit par les équations de Maxwell.

A l'état Meisner ($H < H_{c1}$), une densité de courant supraconductrice surfacique \vec{J}_s circule dans le matériau. Cette densité de courant est considérée proportionnelle au potentiel vecteur magnétique [CAM09, COR99, COR99-2 ...]. En effet, en considérant le matériau comme un conducteur parfait, et, en appliquant les principes de mécanique classique sur un électron libre de masse m_e , on a : $m_e \partial_t \vec{v} = e\vec{E}$, et $\vec{J}_s = n_e e \vec{v}$, où n_e est la densité volumique d'électrons libre, et \vec{v} sa vitesse de dérive. De ces deux relations, on obtient [CAM09] : $m_e (n_e e^2)^{-1} \partial_t \vec{J}_s = \vec{E}$. De l'équation de Maxwell Faraday, on a : $\vec{\nabla} \times (m_e (n_e e^2)^{-1} \partial_t \vec{J}_s) = -\partial_t \vec{B} = -\partial_t \vec{\nabla} \times \vec{A}$, ce qui nous permet d'écrire : $m_e (n_e e^2)^{-1} \vec{J}_s = -\vec{A} - \vec{\nabla} V$. Dans leurs travaux, Cordier *et al.* ont exprimé le potentiel scalaire en fonction de la phase de la fonction d'onde des paires de Cooper φ , comme suit : $\vec{J}_s = -(\mu_0 \lambda_L^2)^{-1} [\vec{A} + (2\pi)^{-1} \phi_0 \vec{\nabla} \varphi]$, où ϕ_0 le quantum de flux et λ_L la longueur de London [COR99, COR99-2].

Pour les applications en énergie électrique, les niveaux de champ magnétique sont généralement supérieurs à H_{c1} , et, de ce fait, les modèles présentés dans le Tableau II-1 s'appliquent avec les relations constitutives présentées précédemment. La non linéarité électrique et les structures composites à dimensions multi échelle de ces supraconducteurs rajoutent des difficultés supplémentaires. Une modélisation numérique est alors souvent requise.

Pour des géométries simples, (formes rectangulaires ou cylindriques infiniment longues, ...), et sous des conditions bien spécifiques (champs appliqués uniformes, réaction magnétique de l'induit négligée...) des modèles analytiques ont été développés basés sur l'intégration des équations aux dérivées partielles issues des formulations électromagnétique impliquant le modèle d'état critique pour la loi $E(J)$. Ces modèles ont essentiellement pour objectif d'étudier la pénétration du champ électromagnétique dans la section du supraconducteur et d'évaluer les pertes en champ propre ou appliqué. Ils peuvent également être utilisés pour la validation d'approches de modélisation numériques ou pour vérifier la cohérence d'une mesure, car, les mesures des propriétés électromagnétiques et des pertes dans les supraconducteurs sont des opérations très délicates.

Parmi les modèles analytiques que nous avons utilisés dans nos travaux, à des fins de validation, il y a les modèles de Norris qui donnent les pertes en courant de transport sinusoïdal d'amplitude I_m dans des rubans supraconducteurs infiniment longs, de sections rectangulaire et elliptique [NOR70]. Ces modèles sont donnés par les relations (II.42), où $i = I_m / I_c < 1$. Ce sont des pertes par unité de longueur, en [W/m].

$$\begin{cases} P = \left(\frac{\mu_0 I_c J_c}{\pi} \right) \left[(1-i) \ln(1-i) + (1+i) \ln(1+i) - i^2 \right] & \text{(section rectangulaire)} \\ P = f \left(\frac{\mu_0 I_c J_c}{\pi} \right) \left[(1-i) \ln(1-i) + (2-i) \frac{i}{2} \right] & \text{(section elliptique)} \end{cases} \quad (II.42)$$

En champ appliqué, nous avons exploité le modèle de Campbell [CAM82] qui donne les pertes par couplage dans un ruban supraconducteur de première génération (de largeur W et d'épaisseur d) soumis à un champ magnétique externe uniforme et à variation sinusoïdale dans le temps, en négligeant la dépendance au champ magnétique de la densité de courant critique. Les pertes par unité de volume sont données par la relation suivante :

$$\begin{cases} P = (2\mu_0)^{-1} \chi \tau \omega^2 (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1} B_m^2 \\ \chi = \pi W (4d)^{-1} \\ \tau = \mu_0 \sigma_m L^2 (\pi^2 \chi) \end{cases} \quad (II.43)$$

Où :

- L , W et d sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur du ruban
- σ_m est la conductivité de la matrice
- χ est le facteur de démagnétisation du ruban.
- τ est la constante de temps de la pénétration du flux magnétique dans le ruban

L'hypothèse d'uniformité du champ sur la surface du ruban suggère que les courants circulent dans les filaments situés aux frontières, où la densité de courant ne doit pas dépasser sa valeur critique. Le champ magnétique ne doit alors pas dépasser le champ de pénétration d'un filament [ZOL04]. Cependant si le champ est très faible, le diamagnétisme des filaments doit être pris en compte et une perméabilité relative équivalente ($\mu_{req} = (1 - \eta)(1 + \eta)^{-1}$) tenant compte de la fraction volumique des filaments η dans le ruban doit être introduite dans le modèle [CAM82].

D'autres modèles analytiques donnant les pertes AC en champ propre et en champ appliqué dans des cylindres et plaques de longueurs infinies sont décrits dans [DOU01, MIK13, OOM00, STA21 ...].

Les méthodes numériques sont nécessaires si la géométrie est compliquée, ou si des propriétés supraconductrices plus réalistes doivent être prises en compte, ou encore si le système implique la proximité d'autres matériaux actifs comme des matériaux magnétiques.

La méthode des éléments finis est la plus utilisée, et l'utilisation des éléments d'arrêtes semble être mieux adapté aux problèmes non linéaires [GRI07-1]. Une revue des différentes formulations utilisées pour la modélisation des supraconducteurs HTS est présentée par F. Grilli [GRI16]. Parmi les formulations utilisées, la formulation en champ magnétique \vec{H} semble être favorisée [ARS21, BRA06, SHE2020, ZER13...]. La formulation $\vec{A} - V$ présente quelques problèmes de convergence, car, elle utilise une loi $J(E)$ qui est concave [CAM09, VIN00, VIN00-2]. La formulation $\vec{T} - \varphi$ [AME98], à l'instar de la formulation en \vec{H} utilise une loi $E(J)$ qui est convexe et présente de ce fait une meilleure convergence que la formulation $\vec{A} - V$, cependant l'utilisation du potentiel scalaire magnétique pour la modélisation de géométries non simplement connexes nécessite un traitement particulier [DUL96]. En présence de matériaux ferromagnétiques, la formulation $\vec{T} - \vec{A}$ semble être la mieux adaptée, pour avoir une convexité des non linéarités magnétiques et électriques, en utilisant le potentiel vecteur électrique dans les parties supraconductrices et le potentiel vecteur magnétique partout ailleurs [TAR2020].

Des formulations variationnelles, basées sur une minimisation de fonctionnelles d'énergie, et limitant la modélisation à la partie active du système ont également été proposées [BOS94, PAR15...]

Les modèles éléments finis sont souvent complexes à mettre en œuvre, et traitent mal les géométries présentant des dimensions multi-échelles. Pour des problèmes bidimensionnels, des modèles basés sur l'expression sous forme intégrale des champs et des potentiels, permettant de ne discrétiser que les parties actives, ont été proposés comme alternative aux approches différentielles. Parmi ceux-là, on peut citer le modèle de Brandt [BRA93, BRA96] qui permet le calcul de la distribution du courant et des pertes AC dans la section d'un ruban supraconducteur, sous champ appliqué, en tenant en compte du comportement non linéaire de la loi $E(J)$ qui est modélisée par la loi en puissance. Le modèle est basé sur la séparation du potentiel vecteur magnétique en ses termes source et induit ($A = A_s + A_j$), où le terme source est exprimé en fonction du champ magnétique appliqué B^a comme suit : $A_s = -xB^a$ (x étant la direction perpendiculaire à la direction de B^a). Le potentiel vecteur magnétique s'exprime alors comme suit : $A(\vec{r}) = -\int_s G(\vec{r}, \vec{r}') J(\vec{r}') ds - xB^a$, avec $G(\vec{r}, \vec{r}') = (2\pi)^{-1} \ln \|\vec{r} - \vec{r}'\|$. De la relation $E = -\partial_t A$, et, en tenant compte de l'expression du champ champs électrique par la loi en puissance, on obtient :

$$E_c (JJ_c^{-1})^n = \int_s G \partial_t J ds + x \partial_t B^a \quad (II.44)$$

Après discrétisation, l'équation (II.44) peut s'écrire sous forme matricielle comme suit :

$$\overline{\overline{C}} \overline{J}^n = Q \partial_t \overline{J} + \overline{\overline{X}} \overline{\partial_t B^a} \quad (2.45)$$

En adoptant la méthode d'Euler pour la discrétisation temporelle avec le pas de temps Δt on obtient la relation suivante :

$$\overline{J}^{(t+\Delta t)} = \overline{J}^{(t)} + \Delta t Q^{-1} \left[\left\{ \overline{\overline{C}} \overline{J}^n \right\}^{(t)} - \left\{ \overline{\overline{X}} \overline{\partial_t B^a} \right\}^{(t)} \right] \quad (II.46)$$

L'expression du potentiel vecteur magnétique source en fonction du champ magnétique appliqué exige le choix de l'axe $x = 0$ au milieu du ruban. Une extension de l'approche à la prise en compte de courants de transport et l'application de champs magnétiques dans n'importe quelle orientation ont été proposées [YAZ98, RHY98]. Une extension pour des géométries rectangulaires tridimensionnelles a été également proposée, avec une formulation intégrale du champ magnétique ce qui permet d'assurer la conservation du courant qui est supposé circuler dans le plan perpendiculaire au champ magnétique appliqué, et où la relation $E(J)$ est représentée par une résistivité électrique équivalente [BOU04].

Un modèle permettant la modélisation par équations intégrales, de supraconducteurs de sections rectangulaires et cylindriques, sous champ propre (courants de transport), a été récemment proposé [OTT19], où des formules analytiques permettant l'intégration des équations sur les éléments du maillage sont fournies.

Un modèle 2D basé sur une formulation intégrale similaire à celle du modèle de Brandt, utilisant des éléments triangulaires pour représenter des géométries complexes, telles que la formes d'un supraconducteur dans un ruban HTS 1G, a été développé par Sirois et al. [SIR07].

Un modèle basé sur une expression intégrale du champ magnétique, exploitant les polynômes de Chebyshev pour l'interpolation de la densité de courant, permettant également un meilleur traitement de la singularité à la source, et une rapidité d'exécution a également été récemment proposé [SOK20, PRI21].

Des évaluations analytiques des intégrales de volume sur des éléments de forme rectiligne et cylindriques à section rectangulaire en 2D et 3D, en n'importe quel point de l'espace, sont présentées dans les travaux suivants : [CAP14, CLE07, DUR53, OTT19, URA82, URA82-2,]. Ces formules permettent notamment d'éviter la singularité des intégrales à la source.

Un groupe de travail sur la modélisation des supraconducteurs à haute température critique s'est constitué et partage des codes et des résultats de calculs sur des problèmes test. Les éléments partagés sont accessibles sur le site internet du groupe " htsmodeling" [WEB2].

II.5. Conclusion

Les problèmes électromagnétiques peuvent être formulés de différentes manières, et, pour chaque problème, il convient d'adopter une modélisation associant des choix judicieux de la formulation et de la méthode de résolution. Ainsi, la non linéarité des propriétés électriques des supraconducteurs favorise les modèles formulés en champ magnétique en raison de la convexité de la loi de comportement qu'elle implique.

Les modèles analytiques n'ont que des applications très limitées en raison des hypothèses sur la géométrie et les propriétés physiques, parfois fortes, requises pour leur développement. Une modélisation numérique est alors souvent requise. Les modèles tridimensionnels, basés sur la méthode des éléments finis, sont cependant complexes à mettre en œuvre et demeurent très coûteux en temps de calcul. Des approches bidimensionnelles sont alors souvent adoptées lorsque cela est possible. Par ailleurs, la complexité structurelle des rubans supraconducteurs, se présentant comme des composites multifilamentaires ou multicouches, nécessite souvent leur homogénéisation.

Les modèles, dits semi analytiques, basés sur les intégrales de volume, sont très attractifs pour la modélisation des supraconducteurs dans leurs applications, où ils se présentent souvent comme des systèmes multiconducteurs. En effet, ces modèles permettent de ne discrétiser que les parties actives du système, et, traitent, de ce fait, plus facilement les dimensions multi échelles et les mouvements. L'interaction directe entre éléments du système les rend particulièrement adaptés pour les problèmes d'optimisation. Les évolutions des outils numériques ont également permis de repousser les limites en termes de capacité de stockage de données requises par ces modèles qui conduisent à des matrices pleines, en raison de l'interaction directe entre éléments. Des solutions de réduction de modèles peuvent également être appliquées lorsque cela est nécessaire.

Une part importante de nos travaux a concerné le développement d'approches rapides de modélisation appliquée au contrôle et à la caractérisation de matériaux conducteurs, composites et supraconducteurs. Les systèmes modélisés ont présenté des dimensions multi-échelles, des mouvements de pièces ou de capteurs, ainsi que des non linéarités et anisotropies des propriétés électriques et magnétiques. Les approches intégrales, et intégro-différentielles en 3D, ont alors prouvé leur efficacité. Une synthèse d'une partie de ces travaux, concernant la modélisation des supraconducteurs, est fournie dans le chapitre suivant.

III. SYNTHESE DES TRAVAUX REALISES SUR LA MODELISATION DES SUPRACONDUCTEURS EN VUE DE LEUR CARACTERISATION ET CONTROLE

III.1 Introduction

La caractérisation des propriétés électromagnétiques des supraconducteurs est une étape clé pour le dimensionnement des systèmes de puissance qui les intègrent. En effet, étant des matériaux de synthèse, leurs propriétés électromagnétiques ne sont pas connues de manière précise à l'avance, et doivent être déterminées en post-fabrication. Cette caractérisation se fait généralement de manière expérimentale, sur des échantillons en Laboratoire. La loi en puissance est généralement adoptée comme relation constitutive $E(J)$, et, la caractérisation consiste principalement à déterminer le courant critique et le paramètre de fluage, ainsi que leur dépendance au champ magnétique et à la température, en DC, et, les pertes en courant alternatif (AC). Pour les rubans 1G et 2G, en champ propre, les méthodes électriques sont généralement utilisées, où on injecte un courant dans un échantillon du ruban et on mesure la différence de tension entre deux prises de potentiel dont les positions sont soigneusement choisies. Ces différences de potentiel sont de l'ordre du nano ou du micro volt, ce qui rend les mesures particulièrement délicates, notamment en AC, car les propriétés des supraconducteurs, ainsi que les mesures, sont fortement impactées par l'environnement électromagnétique. La caractérisation combine alors souvent expérimentation et modélisation. La modélisation aide, d'une part, à interpréter les résultats de mesure et vérifier leur cohérence, et, d'autre part, à extrapoler les modèles aux situations difficiles ou impossibles à reproduire en Laboratoire. En effet, le comportement électromagnétique d'un élément supraconducteur dépend fortement de son environnement électromagnétique qui n'est pas toujours reproductible en Laboratoire (comportement au sein d'une machine électrique par exemple). Les pertes en champ appliqué sont quant à elles plus difficiles à caractériser expérimentalement, et la modélisation est souvent le seul recours.

Outre la caractérisation des lois constitutives et des pertes dans les supraconducteurs, la caractérisation de leur intégrité structurelle est également d'un intérêt majeur, notamment celle des rubans 2G qui présentent des structures multicouches et dont le processus de fabrication peut engendrer des imperfections ou défauts structuraux : inhomogénéités, inclusions, délaminages... Là encore, la modélisation joue un rôle capital pour la prédiction et l'interprétation des résultats de mesure.

Les structures en composites et les propriétés électromagnétiques non linéaires des supraconducteurs, ainsi que les dimensions multi-échelles des systèmes qui les intègrent, rendent la modélisation délicate. Il convient alors d'adopter des stratégies de modélisation associant des choix judicieux des formulations et des méthodes de résolution. Dans nos travaux sur la modélisation des supraconducteurs, nous avons développé des approches de modélisation par méthodes intégrales en 2D et intégrodifférentielles en 3D, pour le contrôle et la caractérisation de rubans et bobines supraconductrices sous différentes configurations, à différents régimes d'alimentation, et en présence de matériaux actifs (conducteurs, aimants permanents et matériaux ferromagnétiques),

ce qui constitue l'une des contributions majeures de nos travaux à l'état de l'art.

Ce chapitre donne une synthèse de ces travaux, avec la description des approches de modélisation et la présentation des principaux résultats obtenus.

III.2 Approches de modélisation

Selon l'application considérée, les systèmes modélisés peuvent contenir une ou plusieurs des régions illustrées dans la figure III.1 qui compte une région supraconductrice siège de courants imposés ou soumise à l'action de champs magnétiques créés par des sources externes, comme des sources résistives ou des aimants permanents, et qui peut être située à proximité de matériaux ferromagnétiques influençant la répartition du champ magnétique. Les différentes parties du système peuvent être statiques ou en mouvement.

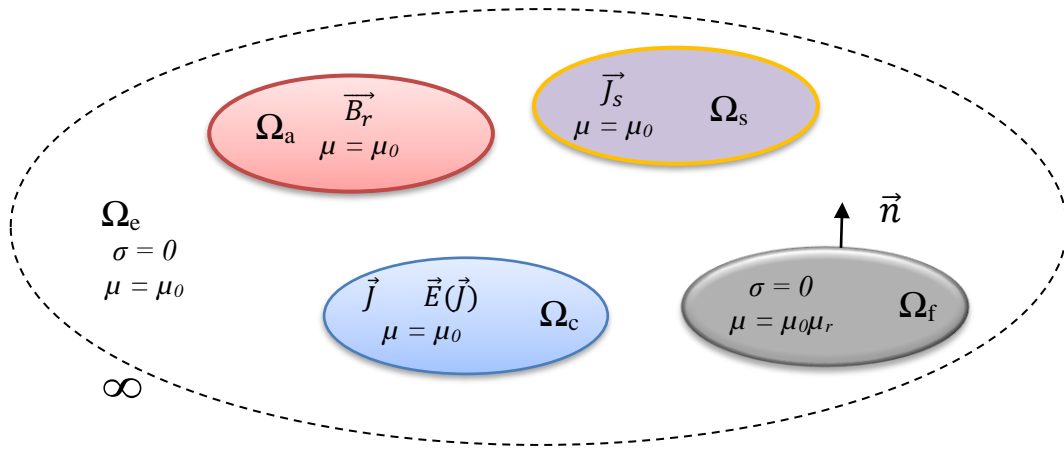


Figure III. 1 : Différentes parties des systèmes modélisés

Toutes les régions sont caractérisées par la perméabilité magnétique du vide μ_0 , hormis la région ferromagnétique Ω_f qui est caractérisée par une perméabilité relative μ_r constante ou dépendante du champ magnétique. Jusque-là, nous avons ignoré les courants induits dans cette région, et l'avons, de ce fait, caractérisée par une conductivité électrique nulle ($\sigma = 0$).

Les aimants permanents représentés par la région Ω_a sont considérés rigides, ayant une induction rémanente B_r . Les courants induits sont également négligés dans cette région qu'on caractérise également par une conductivité électrique nulle ($\sigma = 0$).

La région supraconductrice Ω_c est caractérisée par une conductivité électrique non linéaire, représentée par la loi en puissance. Cette région est supposée refroidie à des températures inférieures à la température critique. Nous avons alors ignoré la dépendance à la température des grandeurs caractéristiques de la loi de comportement électrique (courant critique et coefficient de fluage).

La région Ω_s est une source de champ magnétique statique ou variable dans le temps. La densité de courant J_s est imposée dans cette région.

La région d'air Ω_e qui s'étend à l'infini, est caractérisée par une conductivité électrique nulle et la perméabilité magnétique du vide.

III.2.1 Modélisation des sources de courant

Le potentiel vecteur et l'induction magnétiques produits par une source de courant occupant un domaine Ω , siège d'une densité de courant \vec{J} , s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} \vec{A}(\vec{r}) = \mu_0 \int_{\Omega} \vec{J}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') dv \\ \vec{B}(\vec{r}) = \mu_0 \int_{\Omega} \vec{J}(\vec{r}') \times \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') dv \end{cases} \quad (III.1)$$

III.2.2 Modélisation des aimants permanents

Afin de mieux s'adapter aux formulations, le modèle ampérien est utilisé pour représenter le champ magnétique produit par les aimants (Figure III.2). L'aimantation de l'aimant permanent, d'induction rémanente \vec{B}_r , est représentée par des densités de courants fictifs volumiques \vec{J}_a et surfacique \vec{k}_a , tel que :

$$\begin{cases} \vec{J}_a = \vec{\nabla} \times \vec{M}_a = \mu_0^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{B}_r \\ \vec{k}_a = \vec{M}_a \times \vec{n} = \mu_0^{-1} \vec{B}_r \times \vec{n} \end{cases} \quad (III.2)$$

Le potentiel vecteur magnétique et l'induction magnétique produits par l'aimant occupant un domaine Ω , de frontière $\partial\Omega$ s'expriment alors comme suit :

$$\begin{cases} \vec{A}(\vec{r}) = \mu_0 \int_{\Omega} \vec{J}_a(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') dv + \mu_0 \int_{\partial\Omega} \vec{k}_a(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') ds \\ \vec{B}(\vec{r}) = \mu_0 \int_{\Omega} \vec{J}_a(\vec{r}') \times \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') dv + \mu_0 \int_{\partial\Omega} \vec{k}_a(\vec{r}') \times \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') ds \end{cases} \quad (III.3)$$

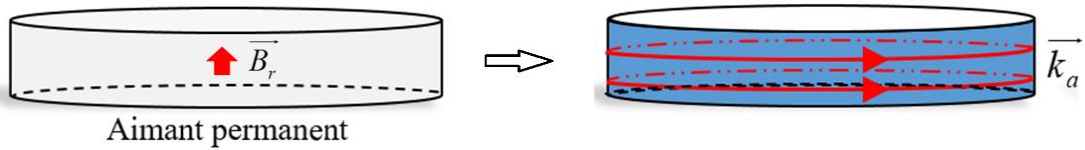


Figure III. 2 : Modélisation d'un aimant permanent par un modèle ampérien

III.2.3 Modélisation des matériaux ferromagnétiques

La prise en compte des matériaux ferromagnétiques, avec une perméabilité finie, linéaire et non linéaire, dans les méthodes intégrales de volume est l'une des majeures contributions à l'état de l'art, réalisée dans le cadre des travaux de thèse de Yazid STATRA [STA21], où, nous avons également adopté un modèle ampérien décrit ci-dessous.

L'aimantation \vec{M} dans un matériau ferromagnétique s'exprime en fonction du champ et de l'induction magnétiques comme suit :

$$\vec{M} = (\mu_r - 1) \vec{H} = (\mu_0 \mu_r)^{-1} (\mu_r - 1) \vec{B} \quad (III.4)$$

En négligeant les courants induits dans le matériau ferromagnétique, et, en considérant une perméabilité relative μ_r constante et isotrope, l'aimantation \vec{M} peut être représentée uniquement par la densité surfacique de courant \vec{k} :

$$\vec{k} = \vec{M} \times \vec{n} = (\mu_0 \mu_r)^{-1} (\mu_r - 1) \vec{B} \times \vec{n} \quad (\text{III.5})$$

En effet, dans ce cas, on a $\vec{\nabla} \times \vec{M} \propto \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{0}$ dans le matériau. Les relations de passage du champ et de l'induction magnétique, à travers la frontière Γ entre le matériau ferromagnétique et l'air, sont alors modifiées comme l'indique la figure III.3.

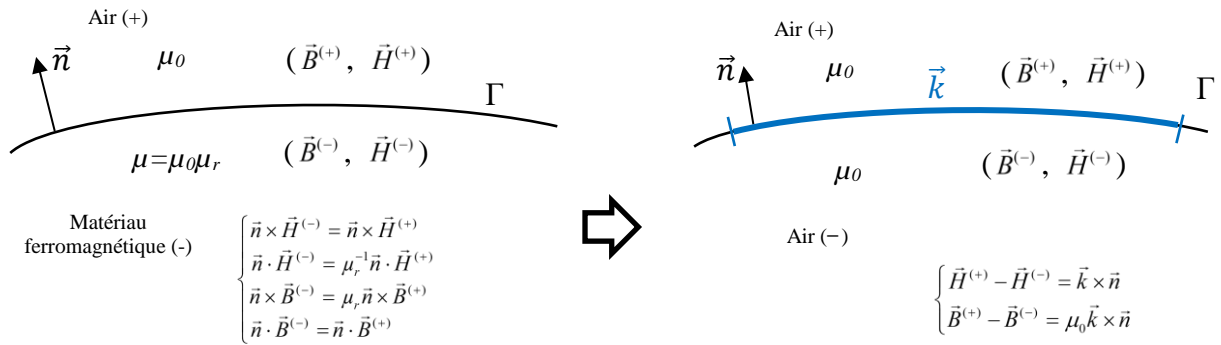


Figure III. 3 : Représentation de l'aimantation d'un matériau ferromagnétique par une densité de courant surfacique fictive et les relations de passage associées

En tenant compte des relations de passage, la densité surfacique de courant \vec{k} s'exprime comme suit :

$$\vec{k} = (\mu_0 \mu_r)^{-1} (\mu_r - 1) \vec{B}^{(-)} \times \vec{n} = \mu_0^{-1} (\mu_r - 1) \vec{B}^{(+)} \times \vec{n} \quad (\text{III.6})$$

Après évaluation de la singularité à la source, sur la frontière Γ , la composante tangentielle de l'induction sur la frontière s'exprime comme suit, où $\vec{B}^s(\vec{r})$ est le champ magnétique produit par d'autres sources [DUR68] :

$$\vec{n}(\vec{r}) \times \vec{B}^{(+)}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{2} \vec{k}(\vec{r}) + \mu_0 \int_{\Gamma(\vec{r}' \neq \vec{r})} \vec{n}(\vec{r}') \times \left\{ \vec{k}(\vec{r}') \times \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') \right\} d\Gamma + \vec{n}(\vec{r}) \times \vec{B}^s(\vec{r}) \quad (\text{III.7})$$

En introduisant (III.6) dans (III.7), on obtient l'équation suivante qui permet d'évaluer la densité surfacique de courant fictif \vec{k} :

$$\vec{k}(\vec{r}) + \frac{2(\mu_r - 1)}{\mu_r + 1} \int_{\Gamma(\vec{r}' \neq \vec{r})} \vec{n}(\vec{r}') \times \left\{ \vec{k}(\vec{r}') \times \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') \right\} d\Gamma = \frac{2(\mu_r - 1)}{\mu_0(\mu_r + 1)} \vec{B}^s(\vec{r}) \times \vec{n}(\vec{r}) \quad (\text{III.8})$$

Prise en compte de la non linéarité magnétique

Les courants de surface ne sont pas suffisants pour prendre en compte la non linéarité magnétique qui engendre une hétérogénéité des propriétés magnétiques dans le matériau. Des densités de courant volumiques fictives $\vec{J}_m = \vec{\nabla} \times \vec{M}$ doivent être introduites dans ce cas. Nous avons alors développé une stratégie dans laquelle toute la structure du matériau ferromagnétique est discrétisée en éléments (Figure III.4). Chaque élément porte une certaine perméabilité relative homogène. En exploitant la relation $\int_{\Omega} \vec{\nabla} \times \vec{M} d\Omega = \int_{\partial\Omega} \vec{n} \times \vec{M} ds \Rightarrow \int_{\Omega} \vec{J}_m d\Omega = - \int_{\partial\Omega} \vec{k} ds$, nous avons alors introduit des densités de courants d'interface entre éléments, en complément aux densités de courant de surface.

La densité de courant d'interface entre deux éléments i et j , séparés par la frontière Γ_{ij} , avec son vecteur normal \vec{n}_{ij} dirigé de l'élément i vers l'élément j , s'exprime comme suit :

$$\vec{k}(\vec{r} \in \Gamma_{ij}) = (\vec{M}_i - \vec{M}_j) \times \vec{n}_{ij} = \left\{ \frac{(\mu_{ri} - 1)}{\mu_0 \mu_{ri}} \vec{B}_i - \frac{(\mu_{rj} - 1)}{\mu_0 \mu_{rj}} \vec{B}_j \right\} \times \vec{n}_{ij} \quad (\text{III.9})$$

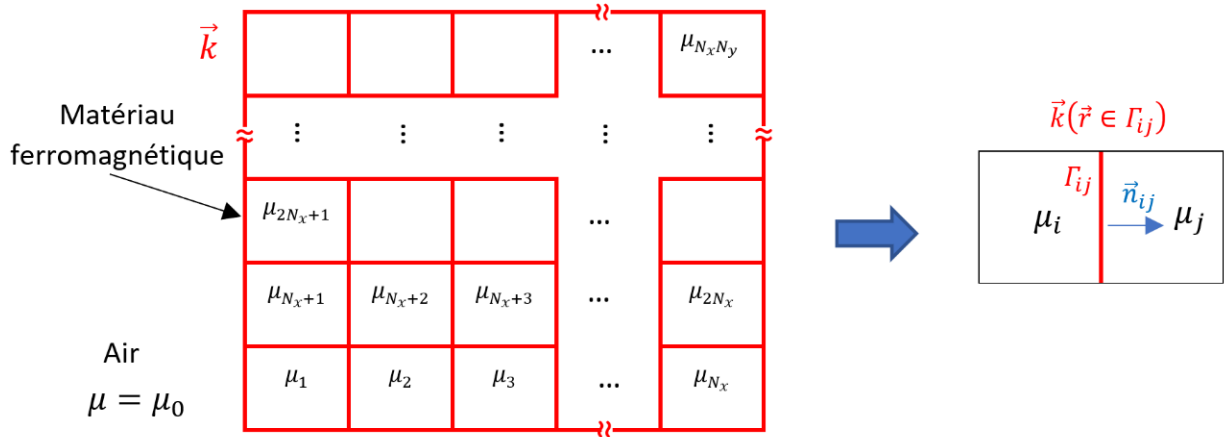


Figure III. 4 : Courants de surface et d'interfaces dans le cas non linéaire

Des développements similaires à ceux des densités surfaciques de courant conduisent alors à l'équation suivante :

$$\vec{k}(\vec{r} \in \Gamma_{ij}) + \frac{2(\mu_{ri} - \mu_{rj})}{\mu_{ri} + \mu_{rj}} \vec{n}_{ij} \times \int_{\Gamma(\vec{r}' \neq \vec{r})} \vec{k}(\vec{r}') \times \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') d\Gamma = \frac{2(\mu_{ri} - \mu_{rj})}{\mu_0(\mu_{ri} + \mu_{rj})} \vec{B}_s(\vec{r}) \times \vec{n}_{ij} \quad (\text{III.10})$$

La perméabilité magnétique relative est évaluée par une procédure itérative, explorant la valeur la courbe $B(H)$ du matériau considéré. En partant d'une valeur initiale μ_r^0 l'équation III.10 est résolue pour obtenir les densités de courants d'interface \vec{k} , utilisées par la suite pour le calcul de l'induction magnétique dans les éléments du maillage, pour obtenir une nouvelle perméabilité relative μ_r^* à partir de la courbe $B(H)$. Pour accélérer la convergence, un facteur de relaxation α est utilisé et la perméabilité à l'itération $i+1$ est obtenue comme suit : $\mu_r^{i+1} = \alpha \mu_r^* + (1-\alpha) \mu_r^i$. Le test de convergence est basé sur l'évaluation de l'erreur moyenne sur les N_e éléments du maillage

comme suit : $\varepsilon = N_e^{-1} \sum_{j=1}^{N_e} (\mu_{rj}^{i+1})^{-1} \|\mu_{rj}^{i+1} - \mu_{rj}^i\|$.

III.2.4 Stratégies globales de modélisation en DC et AC

La modélisation DC, en 2D et 3D, d'éléments supraconducteurs (rubans, bobines), est basée sur l'utilisation simultanée des équations suivantes :

$$\begin{cases} E = E_c J_c^{-n(B)}(B) J^{n(B)} \\ J_c(B_{//}, B_{\perp}) = J_{c0} \left(1 + B_{j0}^{-1} \sqrt{k^2 B_{//}^2 + B_{\perp}^2} \right)^{-\beta} \\ n(B_{//}, B_{\perp}) = n_0 \left(1 + B_{n0}^{-1} \sqrt{k^2 B_{//}^2 + B_{\perp}^2} \right)^{-1} \\ \vec{B}(\vec{r}) = \mu_0 \int_{\cup \Omega} \vec{J}(\vec{r}') \times \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') d\vec{v} + \mu_0 \int_{\cup \partial \Omega} \vec{k}(\vec{r}') \times \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') ds \\ \vec{A}(\vec{r}) = \mu_0 \int_{\cup \Omega} \vec{J}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') d\vec{v} + \mu_0 \int_{\cup \partial \Omega} \vec{k}(\vec{r}') G(\vec{r}, \vec{r}') ds \end{cases} \quad (III.11)$$

La modélisation AC implique les équations précédentes combinées avec une formulation en potentiel vecteur magnétique $\vec{A}-V$ en 2D, et une formulation en potentiel vecteur électrique en 3D :

$$(III.11) \rightarrow \begin{cases} \vec{E} = -\partial_t \vec{A} - \vec{\nabla} V & (2D) \\ \vec{\nabla} \times (\sigma^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{T}) = -\partial_t \vec{B} & (3D) \end{cases} \quad (III.12)$$

III.3 Application à l'évaluation des pertes par courants induits dans les rubans supraconducteurs multifilamentaires

Dans ce travail qui a été réalisé dans le cadre de la thèse de Mohamad FARHAT [FAR19], nous avons repris un modèle que j'avais développé dans mes travaux de thèse de doctorat [MEN09] pour la modélisation des courants induits en 3D dans les matériaux composites à fibres de carbone, et, nous l'avons adapté à la modélisation des pertes par courants induits dans les rubans supraconducteurs multifilamentaires, présentant une structure similaire à celle des composites à fibres de carbone.

III.3.1 Système modélisé

Le système modélisé est présenté dans la figure III.5. Un ruban supraconducteur multifilamentaire en BSCCO est soumis à l'action d'un champ magnétique appliqué \vec{B}^a , variable dans le temps.

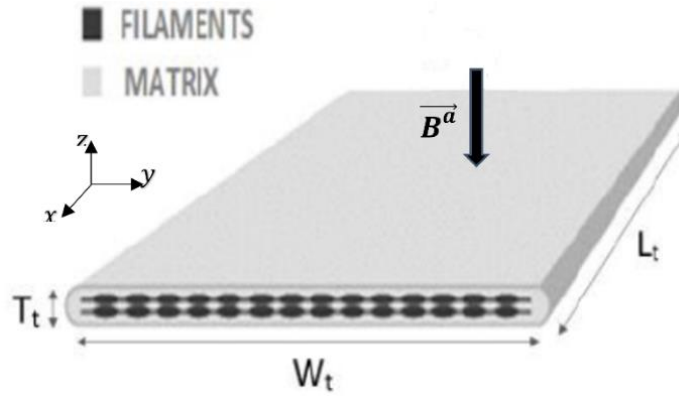


Figure III. 5 : Ruban supraconducteur multifilamentaire soumis à un champ magnétique variable dans le temps

Une modélisation à l'échelle du filament serait très coûteuse, et, de ce fait, un tenseur de conductivité électrique homogénéisé est défini pour le ruban, donné par III.13, où σ_{\parallel} et σ_{\perp} sont, respectivement, les conductivités parallèle et transversale aux filaments supraconducteurs.

$$\begin{cases} \bar{\bar{\sigma}}(J) = \text{diag}(\sigma_{\parallel}(J), \sigma_{\perp}, \sigma_{\perp}) \\ \sigma_{\parallel}(J) = \eta_s J_{\parallel} E_{\parallel}^{-1} + (1 - \eta_s) \sigma_m \\ \sigma_{\perp} = (1 + \eta_s) \sigma_m \\ E_{\parallel} = E_c J_c^{-n} J_{\parallel}^n \\ J_c(B) = J_{c0} B_0 (1 + B)^{-1} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

La non-linéarité est reportée uniquement sur σ_{\parallel} , impliquant la fraction volumique η_s des filaments supraconducteurs et la conductivité de la matrice σ_m . La loi en puissance est utilisée pour représenter le comportement non linéaire de la caractéristique $E(J)$ du supraconducteur et la loi de Kim isotrope est utilisée pour décrire la dépendance du courant critique au champ magnétique.

III.3.2 Modèle électromagnétique

De l'équation de Maxwell Faraday, $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial_t \vec{B}$, associée à l'expression de la densité de courant en fonction du potentiel vecteur électrique $\vec{J} = \vec{\nabla} \times \vec{T}$, et à l'expression intégrale du champ magnétique, on obtient la formulation intégro-différentielle suivante :

$$\vec{\nabla} \times \bar{\bar{\sigma}}^{-1}(J, B) \vec{\nabla} \times \vec{T}(\vec{r}) = -\partial_t \left\{ \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega_c} \frac{\vec{\nabla} \times \vec{T}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} d\Omega_c + \vec{B}^a \right\} \quad (\text{III.14})$$

Le ruban est discrétisé en N_v volumes élémentaires. La méthode des différences finies est utilisée pour la discrétisation de la partie différentielle de l'équation (III.14), et sa partie intégrale est discrétisée par une méthode de collocation par éléments. Le système matriciel qui en découle s'exprime comme suit :

$$\bar{\bar{\ell}}_m \cdot \left(\bar{\bar{C}}\bar{\bar{R}}\bar{\bar{C}} + \partial_t(\bar{\bar{M}}\bar{\bar{C}}) \right) \bar{T} = -\partial_t \bar{B}^a \cdot \bar{\ell}_s \quad (\text{III.15})$$

Le produit (\cdot) dans III.15 désigne le produit de Hadamard, défini comme suit : $(\bar{\bar{A}} \cdot \bar{\bar{B}})_{i,j} = \bar{\bar{A}}_{i,j} \times \bar{\bar{B}}_{i,j}$.

La matrices $\bar{\bar{C}}$, et $\bar{\bar{M}}$ sont de dimensions $(3N_v \times 3N_v)$, et, représentent respectivement les discrétisations de l'opérateur rotationnel et de la partie intégrale. La matrice $\bar{\bar{R}}$, de dimension $(3N_v \times 3N_v)$, contient le tenseur de résistivité dans chaque élément du maillage. La matrice $\bar{\bar{\ell}}_m$ de dimension $(3N_v \times 3N_v)$, et le vecteur $\bar{\ell}_s$, de dimension $(3N_v)$ sont introduits pour imposer les conditions aux limites $\bar{n} \times \bar{T} = \bar{0}$ sur la frontière.

En considérant un pas temporel Δt , le temps est discrétisé en une suite de N_t instants : $(t^n = t^0 + n\Delta t)_{n \in N_t}$. A chaque instant t , la discrétisation temporelle de l'équation III.13 aboutit alors à l'équation matricielle suivante :

$$\bar{\bar{\ell}}_m \cdot \left(\bar{\bar{C}}\bar{\bar{R}}^{(t)}\bar{\bar{C}} + (\Delta t)^{-1}\bar{\bar{M}}\bar{\bar{C}} \right) \bar{T}^{(t)} = (\Delta t)^{-1} \left\{ \bar{B}^{a(t-\Delta t)} - \bar{B}^{a(t)} + \bar{\bar{M}}\bar{\bar{C}}\bar{T}^{(t-\Delta t)} \right\} \cdot \bar{\ell}_s \quad (\text{III.16})$$

Afin d'améliorer la convergence, nous avons amélioré le conditionnement de la matrice globale et appliqué une technique de relaxation, [HAD00]. Le système matriciel à résoudre peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \bar{\bar{G}}^{(t)} \bar{T}^{(t)} = \bar{S}^{(t)} \\ \bar{\bar{G}}^{(t)} = \bar{\bar{\ell}}_m \cdot \left(\bar{\bar{C}}\bar{\bar{R}}^{(t)}\bar{\bar{C}} + (\Delta t)^{-1}\bar{\bar{M}}\bar{\bar{C}} + \text{diag}(\bar{\bar{M}}\bar{\bar{C}}) \right) \\ \bar{S}^{(t)} = \alpha(\Delta t)^{-1} \left\{ \bar{B}^{a(t-\Delta t)} - \bar{B}^{a(t)} + (\bar{\bar{M}}\bar{\bar{C}} + \text{diag}(\bar{\bar{M}}\bar{\bar{C}}))\bar{T}^{(t-\Delta t)} \right\} \cdot \bar{\ell}_s + (1-\alpha)\bar{S}^{(t-\Delta t)} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

$\alpha \in]0, 2]$ est le facteur de relaxation.

La formulation III.17 est non jaugée, et, il convient dans ce cas d'utiliser une méthode de résolution itérative pour assurer la convergence, du moment que le second membre est à divergence nulle [REN96].

La méthode de Newton Raphson (NR) peut être utilisée pour accélérer la convergence. A chaque instant, on introduit un vecteur résidu : $\bar{r}^{(t)} = \bar{\bar{G}}^{(t)} \bar{T}^{(t)} - \bar{S}^{(t)}$, et on exécute l'algorithme III.18, où $\bar{D}(\bar{r}_i^{(t)})$ est la Jacobienne de $\bar{r}^{(t)}$ et β un facteur d'amortissement choisi de telle sorte à satisfaire la condition $\|\bar{r}_i^{(t)}\| < \|\bar{r}_{i-1}^{(t)}\|$. L'algorithme de résolution dans ce cas est décrit dans la figure III.6.

$$\begin{cases} \bar{T}_0^{(t)}, \beta = 1, \\ \bar{T}_{i+1}^{(t)} = \bar{T}_i^{(t)} - \frac{\beta}{2^{(i-1)}} \left(\bar{D}(\bar{r}_i^{(t)}) \right)^{-1} \bar{r}_i^{(t)} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

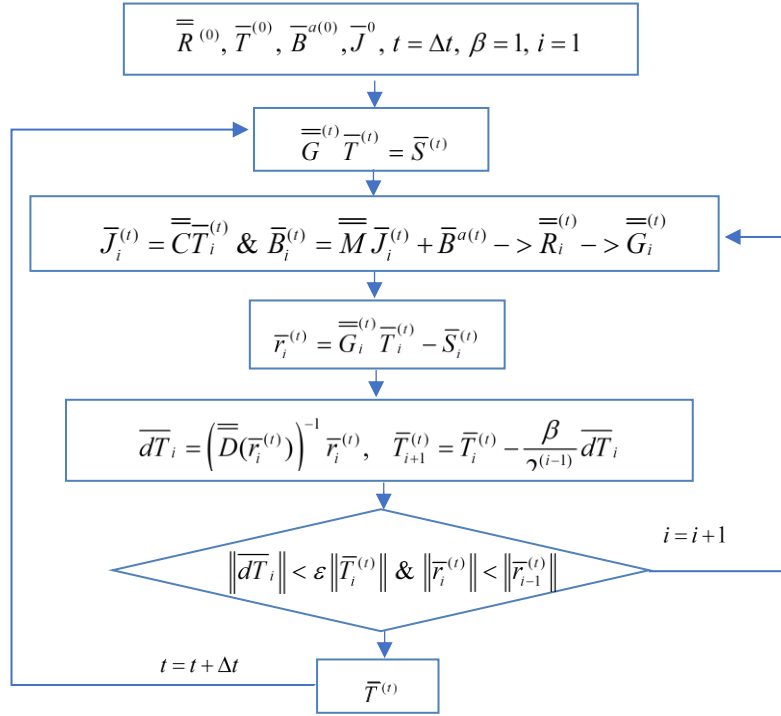


Figure III. 6 : Algorithme de résolution en utilisant la méthode de NR

La jacobienne de $\bar{r}^{(t)}$ peut être développée comme suit :

$$\bar{D}(\bar{r}^{(t)}) = \bar{G}^{(t)} + \bar{T}^{(t)} \cdot \left(\partial_{\bar{T}} \bar{G} \right)^{(t)} = \bar{G}^{(t)} + \bar{T}^{(t)} \cdot (\partial_{\bar{T}} \bar{G})^{(t)} \bar{C} \quad \text{III.19}$$

III.3.3 Résolution dans le domaine fréquentiel dans le cas d'une excitation sinusoïdale

Dans le cas d'une excitation sinusoïdale, nous avons proposé une approche originale de calcul des pertes par courants de Foucault, dans le domaine fréquentiel, tout en tenant compte de la non linéarité de la loi E(J) et de la dépendance du courant critique au champ magnétique. Dans le domaine fréquentiel, l'équation III.15 s'écrit comme suit, où ω est la pulsation de la source.

$$\bar{\ell}_m \cdot \left(\bar{C} \bar{R} \bar{C} + i\omega (\bar{M} \bar{C}) \right) \bar{T} = -i\omega \bar{B}^a \cdot \bar{\ell}_s \quad \text{III.20}$$

Afin d'éviter de stocker la matrice intégrale, nous avons adopté la stratégie de résolution décrite dans l'algorithme suivant :

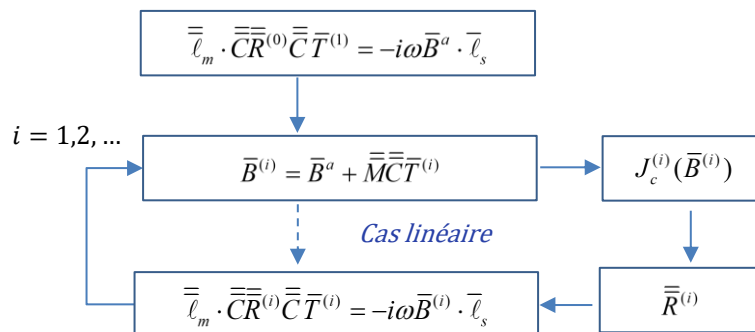


Figure III. 7 : Algorithme de résolution dans le domaine fréquentiel

III.3.4 Principaux résultats obtenus

Le ruban est soumis à un champ magnétique à variation sinusoïdale dans le temps, perpendiculaire à sa surface la plus large $\vec{B}^a(t) = B_m^a \sin(\omega t) \vec{e}_z$ (Fig. III.5). Les spécifications des paramètres du système modélisé sont fournies dans le Tableau III.1. Le ruban est subdivisé en $20 \times 10 \times 3$ éléments de volume suivant sa longueur, sa largeur et son épaisseur, respectivement. Un pas temporel fixe $\Delta t = 10^{-5} s$ est utilisé.

La répartition des courants induits est représentée dans la figure III.8. Comme on peut le remarquer, en raison de la conductivité élevée suivant la longueur (direction des filaments supraconducteurs), les courants induits circulent dans la périphérie du ruban suivant cette direction, et se rebouclent sur toute la surface du ruban suivant la direction transversale aux filaments supraconducteurs.

Les pertes instantanées sont représentées dans la figure III.9 pour différentes valeurs du facteur de relaxation α . Le facteur de relaxation affecte le régime transitoire, et introduit un léger déphasage. Le temps de calcul des pertes instantanées sur deux périodes est de 2.3 minutes sans relaxation ($\alpha = 1$) et est de 1,3 minutes pour $\alpha = 0,6$. L'ordinateur utilisé est sous Windows 7 professionnel 64 bits, avec un processeur : Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1650 v3 @ 3.50 GHz, 32.0 Gb RAM.

Tableau III.1 : Spécifications des paramètres du système modélisé [FAR19]

Paramètres	Valeurs
$L_t \mid W_t \mid T_t$	6.5mm 3.2mm 0.25mm
f	50Hz
η_s	0.32
σ_m	$6.3 \times 10^7 S.m^{-1}$
J_{c_0}	$9.65 \times 10^7 A.m^{-2}$
B_0	0.3 T
n	15
$\chi \mid \tau$	9.8 0.32 ms

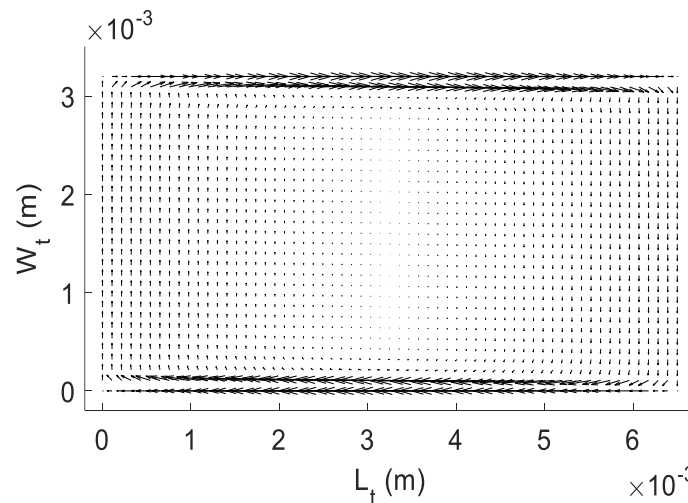


Figure III. 8 : Répartition des courants induits dans le ruban à ($B_m^a = 1mT$)

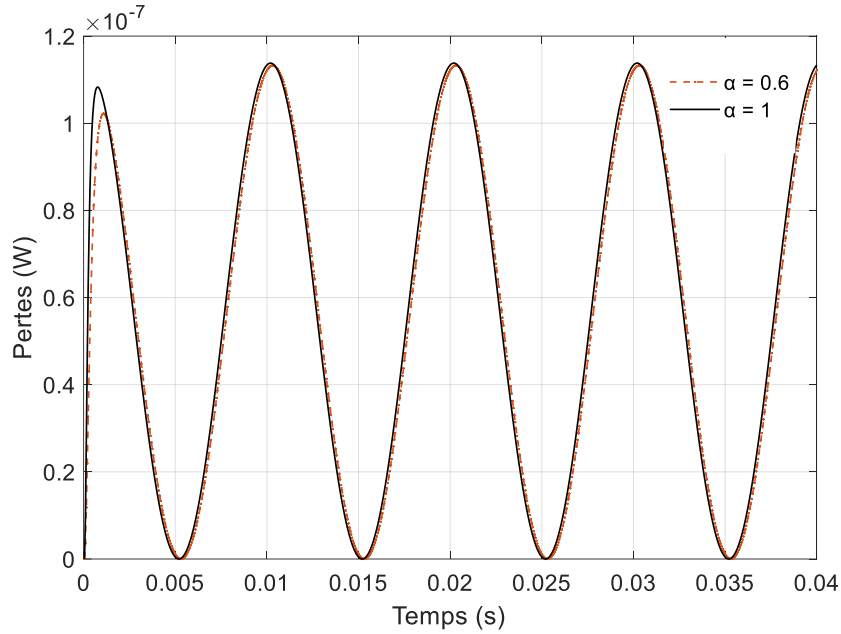


Figure III. 9 : Pertes instantanées avec et sans relaxation ($B_m^a = 1mT$) [FAR19].

Les résultats de modélisation numérique des pertes par courants de Foucault dans le ruban, dans le domaine temporel et fréquentiel sont comparés à ceux obtenus par le modèle de Campbell (Eq. II.43) [CAM82], utilisé avec les valeurs mesurées des paramètres χ et τ , données dans [ZOL04]. La figure III.10 présente une comparaison entre les calculs numérique et analytique (modèle de Campbell) des pertes moyennes dans le ruban. La comparaison est effectuée dans les limites de la validité du modèle de Campbell (Chap. II). Les pertes moyennes, dans le domaine temporel, sont calculées sur la deuxième période pour éviter le régime transitoire. Comme on peut le constater, les résultats du modèle fréquentiel se rapprochent plus du calcul analytique qui est aussi développé dans le domaine fréquentiel. La petite différence entre les résultats du modèle fréquentiel et ceux du modèle analytique est due à la dépendance $J_c(B)$ qui n'est pas pris en compte dans ce dernier. Les pertes obtenues par le modèle numérique dans le domaine temporel sont plus faibles, et s'écarte des deux autres. Les sources d'erreurs viennent des deux côtés : l'approche temporelle est plus sujette aux erreurs numérique, mais, elle est plus réaliste que les modèles fréquentiels dans la prise en compte de la non linéarité des propriétés électriques du supraconducteur dans le ruban.

La figure III.11 présente les résultats de calcul des pertes instantanées dans le ruban avec et sans prise en compte de $J_c(B)$. Comme on peut le remarquer les pertes avec la prise en compte de $J_c(B)$ sont plus faibles, notamment aux valeurs élevées du champ magnétique appliquée, car, la conductivité du ruban diminue dans ce cas suivant les deux axes, conduisant à une diminution des courants induits.

Les résultats obtenus confirment la validité du modèle, qui a pour vocation d'aller au-delà des limites des approches analytiques en termes de niveaux de champs appliqués et de leur variation dans le temps, considérant n'importe quel type de signal. Le modèle est simple à mettre en œuvre et les temps de calcul sont très réduits. La formulation tient compte, de manière naturelle, de la conservation des densités de courant et du flux magnétique, et permet de limiter la discrétisation parties actives du système, grâce à sa partie intégrale, ce qui facilite la prise en compte des dimensions multi-échelles.

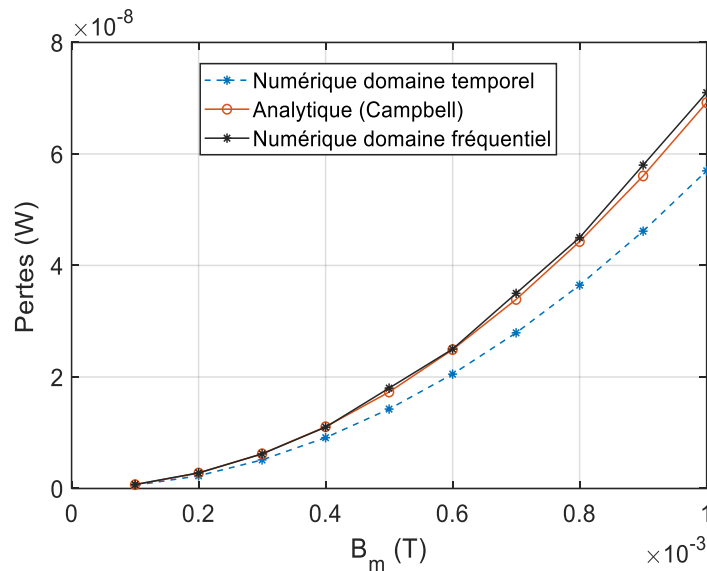


Figure III. 10 : Comparaison entre les calculs numériques (fréquentiel et temporel) et analytique des pertes dans le ruban ($f = 50\text{Hz}$) [FAR19].

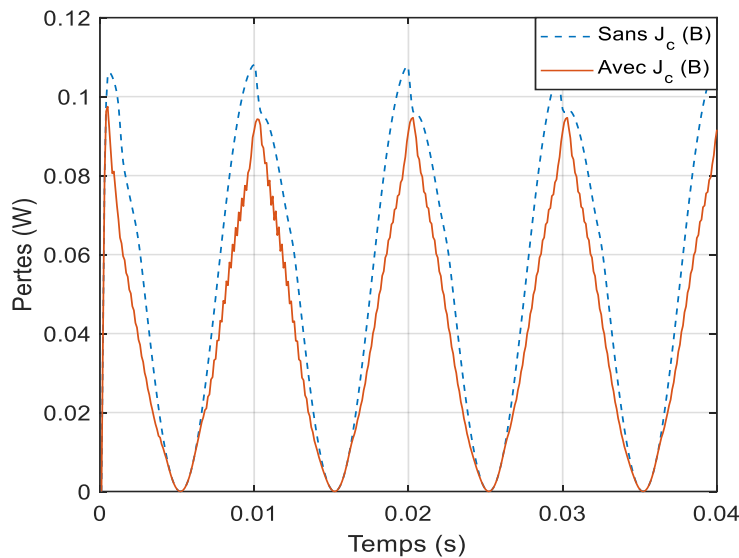


Figure III. 11 : Influence de $J_c(B)$ dans le calcul des pertes instantanées ($B_m^a = 1\text{T}$, $f = 50\text{Hz}$) [FAR19].

III.3.5 Publications liées à l'application

- H. Menana, M. Farhat, M. Hinaje, B. Douine, "An Integro-Differential Time Domain Scheme for Electromagnetic Field Modeling in HTS Materials", IEEE Trans. Mag., Vol. 56, N. 3, 7514504, March 2020.
- H. Menana, M. Farhat, M. Hinaje, K. Berger, B. Douine, and J. Lévêque, "Eddy current modeling in linear and nonlinear multifilamentary composite materials", Open Phys. 2018; 16:183–18. DOI: 10.1515/phys-2018-0026.
- H. Menana, M. Féliachi, "An Integro-Differential model for 3D Eddy Current Computation in CFRPs", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, NO. 4, pp. 756 – 763, April 2011. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2102770.
- Hocine Menana, Mohamad Farhat, Melika Hinaje, "Integrodifferential modelling of the electromagnetic field in HTS Bulks", COMPUMAG 2021, Jan 2022, Cancun, Mexico.
- H.Menana, M. Farhat, M. Hinaje and B. Douine, "An Integro-Differential Time Domain Scheme for Electromagnetic Field Modeling in HTS Materials", COMPUMAG2019, 15-19 July 2019, Paris, France.
- M. FARHAT, H. MENANA, M. HINAJE, B. DOUINE, "Modélisation du champ électromagnétique dans les rubans supraconducteurs HTC dans le domaine fréquentiel", Les 12es Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, 5-8 juin 2018, Aussois, France.
- H. Menana, K. Berger, B. Douine, M. Hinaje and J. Lévêque, "Eddy current modeling in composite materials: CFRPs and multifilamentary HTS tapes", ISEF 2017, Lodz, Poland, 14-16 September 2017.
- Hocine Menana, Kévin Berger, Bruno Douine, Melika Hinaje, Jean Lévêque, "Electromagnetic field modeling in HTS composite tapes in the frequency domain", 9ème Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme (NUMELEC 2017), 15-17 Nov 2017, Paris, France.
- H. Menana, B. Douine, K. Berger, J. Lévêque, M. Hinaje, « Eddy current modeling in multifilamentary superconductive tapes submitted to external time varying magnetic field », HTS Modelling Workshop, Bologna-Italy, 15 - 17 Juin 2016.

III.4 Application au contrôle par thermographie inductive des rubans supraconducteurs multicouches

Dans ce travail qui a été réalisés dans le cadre de la thèse de Walid DIRHAOUI [DIR22], nous avons développé une méthode de contrôle de rubans supraconducteurs multicouches (2G), par thermographie inductive, à température ambiante. En effet, la très faible épaisseur de ces rubans limite la possibilité de leur contrôle avec les méthodes classiques. Cela concerne notamment la détection de défauts dans les parties non supraconductrices dans une approche contrôle qualité à la construction. En effet, leur processus de fabrication et leur structure multicouches favorisent l'apparition de défauts, notamment des délaminages [GEO15, MAT18]. Jusque-là, le contrôle de ce type de rubans était limité à la partie supraconductrice, par des techniques de cartographie de champ magnétique, à températures cryogéniques [HIG17, WEL16].

III.4.1 Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été développé dans lequel nous avons utilisé un inducteur mobile constitué d'une roue magnétique rotative pour éviter les perturbations thermiques des inducteurs alimentés en courant (Figure III.12).

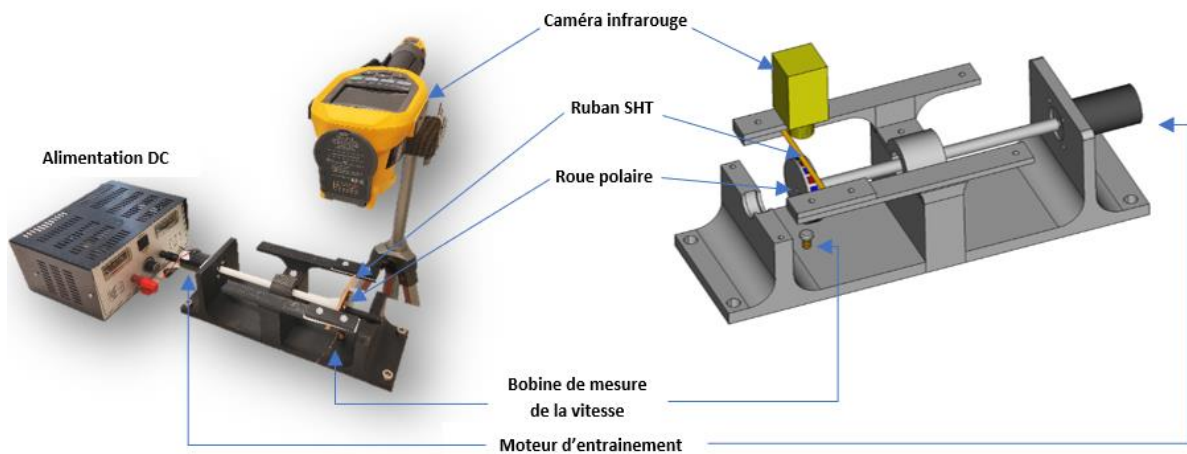


Figure III. 12 : Structures réelle et conceptuelle du dispositif expérimental [DIR22].

Nous avons développé une approche rapide de modélisation magnétothermique 3D pour l'interprétation des résultats et la simulation de situations non reproductibles expérimentalement. Il permet également de vérifier les limites de détection en fonction de la forme et de la localisation des défauts dans les différentes couches du ruban, sans mise en œuvre expérimentale, d'autant plus qu'il est difficile d'obtenir des défauts structuraux contrôlés dans ce type de rubans.

III.4.2 Développement du modèle magnétothermique

Le système modélisé est illustré dans la figure III.13. Un ruban supraconducteur multicouche (2G) est soumis à l'action d'un champ magnétique variable produit par des aimants permanents disposés sur une roue tournante à une vitesse angulaire Ω .

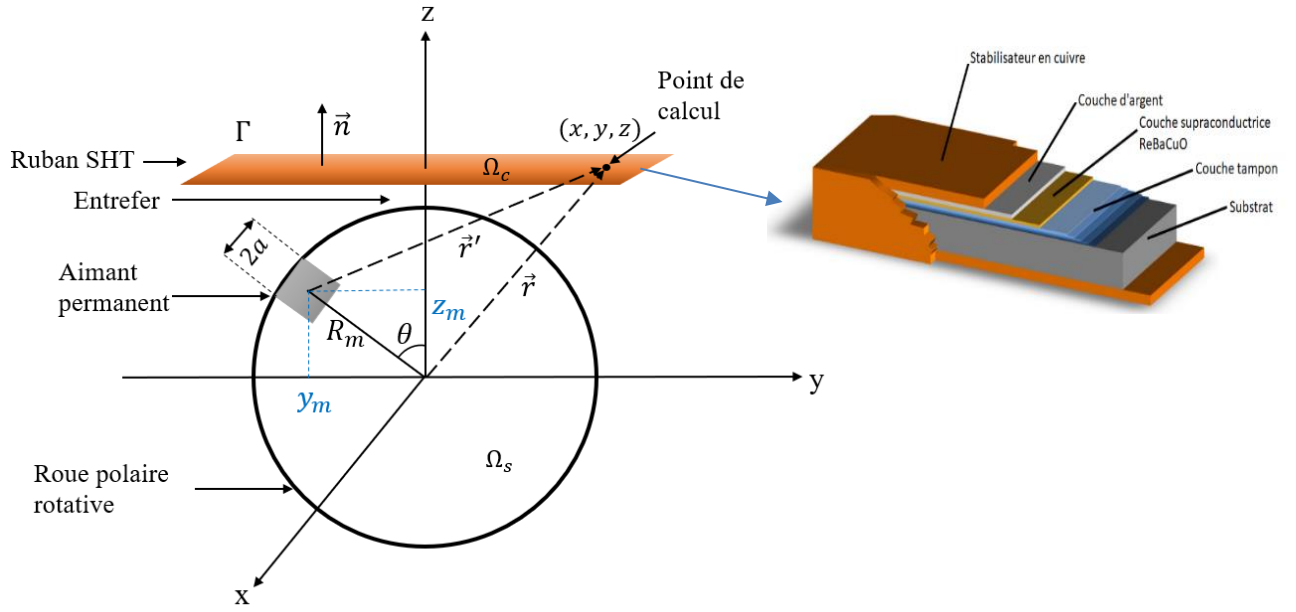


Figure III. 13 : Système modélisé [DIR22].

La modélisation magnétothermique développée est basée sur une formulation intégral-différentielle en potentiel de vecteur électrique, pour l'évaluation des courants induits créés dans le ruban par le champ magnétique variable, dans le temps, produit par la rotation de la roue magnétique, combiné à un modèle de diffusion thermique pour évaluer la répartition de la température dans le ruban.

Les aimants constituant la roue polaire sont de forme cubique, de côté $(2a)$, et caractérisés par une induction rémanente B_r . Les composantes du champ magnétique produit par chaque aimant au point de calcul repéré par les coordonnées (x, y, z) sont donnée par les équations III.21 [AKO84, ALL09, JAN09], que nous avons adaptées à la rotation des aimants à la vitesse Ω , en introduisant l'angle de rotation $\theta = \Omega t$. Dans III.21, R_m représente la distance entre le centre de l'aimant et le centre de la roue polaire. Le champ total produit au point de calcul résulte de la contribution de tous les aimants constituant la roue.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_x^a = \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \log(R-W) \\ B_y^a = \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \log(R-S) \\ B_z^a = \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \log(SW-RU) \\ \left| \begin{array}{l} S = x - (-1)^i a \\ W = y + R_m \sin(\theta) - (-1)^i a \\ U = z + R_m \cos(\theta) - (-1)^i a \\ R = \sqrt{S^2 + W^2 + U^2} \\ \theta = \Omega t \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (\text{III.21})$$

En raison de la structure mince du ruban, les courants de Foucault sont supposés circuler uniquement dans le plan x-y, conformément au repère montré dans la figure III.13. La formulation du problème électromagnétique est alors donnée par (III.22), impliquant uniquement la composante normale du potentiel vecteur électrique (\vec{T}_z), et la composante normale du champ magnétique appliqué \vec{B}_z^a . La composante normale du potentiel vecteur électrique est annulée aux bordures Γ du ruban afin d'annuler la composante normale de la densité de courant sur ces dernières.

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \times \vec{\sigma}^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{T}_z(\vec{r}) = -\partial_t \left\{ \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\vec{\nabla} \times \vec{T}_z(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} d\Omega + \vec{B}_z^a \right\} \\ \vec{T}_z(\vec{r}) = \vec{0} \quad (\vec{r} \in \Gamma) \end{cases} \quad (III.22)$$

Les phénomènes thermiques provoqués par les pertes joules dans le ruban sont régis par l'équation de diffusion de la chaleur donnée en (III.23), où : P , λ , γ , C_p , h , T_e , $\partial\Omega$ et \vec{n} sont, respectivement, la puissance par unité de volume créée par les courants induits, la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité calorifique spécifique, le coefficient d'échange par convection, la température du milieu environnant, la surface du ruban et le vecteur normal en tout point de celle-ci.

$$\begin{cases} \gamma C_p \partial_t T = \partial_x (\lambda \partial_x T) + \partial_y (\lambda \partial_y T) + \partial_z (\lambda \partial_z T) + P \\ \lambda \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h(T_e - T) \quad \text{sur } \partial\Omega \end{cases} \quad (III.23)$$

Pour réduire les temps de calcul, une homogénéisation des couches de propriétés thermiques similaires (du même ordre) est adoptée pour le modèle thermique (Figure III.14). Ainsi, les couches de cuivre et d'argent sont ainsi assimilées à une couche nommée Cu-Ag, et les couches d'YBCO et d'Hastelloy sont assimilées à une couche nommée Hast-YBCO. Les propriétés X des nouvelles couches sont déterminées au prorata des épaisseurs (e) des couches initiales, comme suit :

$$X_{1-2} = (X_1 e_1 + X_2 e_2) (e_1 + e_2)^{-1} \quad (III.24)$$

Les effets aérodynamiques dus à la rotation de la roue magnétique provoquent un refroidissement important et non uniforme de la surface inférieure du ruban (surface qui fait face à la roue). Cette contrainte est prise en compte en adaptant la valeur des coefficients de convection selon l'axe z (Tableau III.2).

Pour l'analyse numérique, le ruban est discrétisé en un ensemble de N_v volumes élémentaires. Le terme différentiel de la formulation électromagnétique (III.22) est discrétisé par la méthode des différences finies et le terme intégral est discrétisé en utilisant la méthode de collocation par élément. Nous obtenons le système matriciel (III.25), où les matrices ont la même définition qu'en section III.3.2, mais ne sont que de dimension $(N_v \times N_v)$.

$$\bar{\ell}_m \cdot \left(\bar{\bar{C}} \bar{\bar{R}} \bar{\bar{C}} + (\Delta t)^{-1} \bar{\bar{M}} \bar{\bar{C}} \right) \bar{T}_z^{(t)} = (\Delta t)^{-1} \left\{ \bar{B}_z^{a(t-\Delta t)} - \bar{B}_z^{a(t)} + \bar{\bar{M}} \bar{\bar{C}} \bar{T}_z^{(t-\Delta t)} \right\} \cdot \bar{\ell}_s \quad (III.25)$$

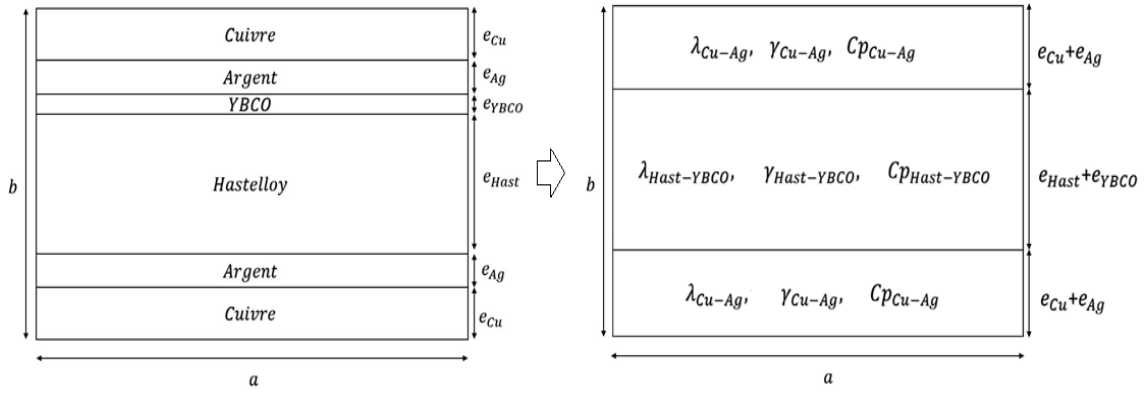


Figure III. 14 : Sections originale et homogénéisée du ruban HTC.

Le modèle thermique (III.23) est discrétisé par la méthode des différences finies. La Figure III.15 illustre la stratégie de discrétisation sur un volume élémentaire.

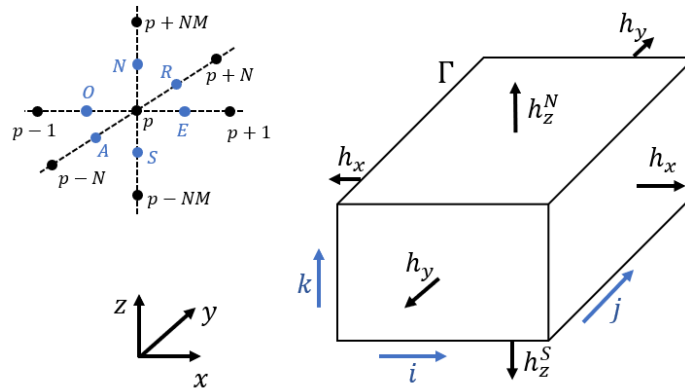


Figure III. 15 : Stratégie de discrétisation par la méthode des différences finies en 3D [DIR22].

En utilisant une numérotation globale p des volumes élémentaires :

$$p = i + (j-1)N + (k-1)NM \quad (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M, 1 \leq k \leq L) \quad (\text{III.25})$$

On a :

$$\begin{cases} \partial_x(\lambda \partial_x T) = (\Delta x)^{-1} \left\{ \lambda_E \partial_x T|_E - \lambda_O \partial_x T|_O \right\} = \frac{\lambda_{p+1} + \lambda_p}{2(\Delta x)^2} (T_{p+1} - T_p) - \frac{\lambda_{p-1} + \lambda_p}{2(\Delta x)^2} (T_p - T_{p-1}) \\ \partial_y(\lambda \partial_y T) = (\Delta y)^{-1} \left\{ \lambda_R \partial_y T|_R - \lambda_A \partial_y T|_A \right\} = \frac{\lambda_{p+N} + \lambda_p}{2(\Delta y)^2} (T_{p+N} - T_p) - \frac{\lambda_{p-N} + \lambda_p}{2(\Delta y)^2} (T_p - T_{p-N}) \\ \partial_z(\lambda \partial_z T) = (\Delta z)^{-1} \left\{ \lambda_N \partial_z T|_N - \lambda_S \partial_z T|_S \right\} = \frac{\lambda_{p+NM} + \lambda_p}{2(\Delta z)^2} (T_{p+NM} - T_p) - \frac{\lambda_{p-NM} + \lambda_p}{2(\Delta z)^2} (T_p - T_{p-NM}) \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Lorsque les points intermédiaires "E, O, R, A, N, S" appartiennent à surface $\partial\Omega$ (car, les points p sont définis aux centres des éléments), on a :

$$\begin{cases} \lambda_E \partial_x T|_E = h_x (T_e - T_p) \quad , \quad -\lambda_O \partial_x T|_O = h_x (T_e - T_p) \\ \lambda_R \partial_y T|_R = h_y (T_e - T_p) \quad , \quad -\lambda_A \partial_y T|_A = h_y (T_e - T_p) \\ \lambda_N \partial_z T|_N = h_z^N (T_e - T_p) \quad , \quad -\lambda_S \partial_z T|_S = h_z^S (T_e - T_p) \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

La discrétisation temporelle de III.23 peut être réalisée par des schémas implicite ou explicite. Pour le schéma explicite, aucune inversion de matrice n'est nécessaire, car, la solution à l'instant $t + \Delta t$ est directement évaluée en utilisant celle de l'instant t , cependant, le pas temporel doit satisfaire un critère de stabilité liant le pas spatial au pas temporel [ÖZ17]. Or, il a été rapporté dans la littérature que les problèmes de diffusion sont mieux traités par des schémas implicites [PRE92]. Un schéma implicite est donc adopté pour la discrétisation temporelle de III.23. Le schéma est inconditionnellement stable, cependant, cela ne garantit un pas temporel inadapté peut conduire à une solution imprécise. En tenant compte des conditions aux limites III.27, où T_e représente la température du milieu externe, la forme matricielle de l'équation III.23, peut s'écrire comme suit, avec $\bar{T}^{(0)} = \bar{T}_e$:

$$\left\{ (\Delta t)^{-1} \bar{\gamma} \bar{C}_p - \bar{D}_h \right\} \bar{T}^{(t)} = \bar{P}^{(t)} + (\Delta t)^{-1} \bar{\gamma} \bar{C}_p \bar{T}^{(t-\Delta t)} + \bar{h} \bar{T}_e \quad (\text{III.28})$$

III.4.3 Validation

Pour vérifier la validité de l'approche de modélisation, les résultats de simulations sont comparés aux mesures sur un ruban 2G en YBCO fourni par Shanghai Superconductor. Les spécifications des différents paramètres sont fournies dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Spécifications des paramètres du système modélisé [DIR22]

Paramètre	Description	Valeur
Propriétés géométriques et mécaniques		
L_t	Longueur du ruban SHT-2G	50 mm
W_t	Largeur du ruban SHT-2G	4 mm
T_t	Epaisseur du ruban SHT-2G	0,1 mm
w_d	Epaisseur des rainures entre les filaments	430 μm
a	Demi-longueur du côté des aimants permanent	2,5 mm
θ_{N-S}	Ouverture angulaire entre deux aimants successifs	$\pi/10$
R_m	Distance entre le centre d'un aimant et celui de la roue polaire	22,5 mm
γ_{Al}	Masse volumique de l'aluminium	2,710 kg/m ³
Propriétés électromagnétiques		
σ_{Cu-Ag}	Conductivité électrique de la couche Cu-Ag	5,66×10 ⁷ S/m
$\sigma_{Hast-YBCO}$	Conductivité électrique de la couche Hast-YBCO	7,86×10 ⁵ S/m
σ_{Al}	Conductivité électrique de l'aluminium	3,7×10 ⁷ S/m
B^r	Champ magnétique rémanent des aimants permanent	1,4 T
Ω	Vitesse angulaire de la roue polaire	826,73 rad/s
Propriétés thermiques		
λ_{Al}	Conductivité thermique de l'aluminium	239 W/(m·K)
Cp_{Al}	Capacité thermique massique de l'aluminium	900 J/(kg·K)
h_x, h_y	Coefficient de convection suivant les axes x et y	15 W/(m ² ·K)
h_z^N	Coefficient de convection de la surface supérieure suivant l'axe z	30 W/(m ² ·K)
h_z^S	Coefficient de convection de la surface inférieure suivant l'axe z	210 W/(m ² ·K)
Discrétisation		
$N \mid M \mid L$	Discrétisations suivant x, y et z	71 29 11

La Figure III.16 montre la répartition des courants induits dans les couches Hast-YBCO et Cu-Ag, et leur évolution dans l'espace en fonction de la position de la roue polaire. Les courants induits dans la couche Hast-YBCO sont plus faibles que ceux de la couche Cu-Ag, et sont étirés vers les extrémités du ruban, borné par une couche de cuivre de conductivité électrique beaucoup plus élevée (non montrée dans la figure III.14). La périodicité spatiale des courants induits est équivalente à la largeur des aimants permanents, et sont orientés de telle sorte à s'opposer à la variation du champ magnétique produits par ces derniers.

Une comparaison des profils de température, simulé et mesuré, suivant la longueur du ruban à mi largeur, au régime établi, est présentée dans la Figure III.17. Les résultats de mesures et de simulation sont en bon accord. On constate, cependant, une dissymétrie, aux extrémités du ruban, concernant le profil de température mesuré. Cette dissymétrie est due aux effets aérodynamiques imposés par la rotation de la roue polaire, car, dans un sens la roue aspire l'air et dans l'autre elle l'expulse. Cette constatation a été vérifiée en inversant le sens de rotation de la roue. Ce phénomène n'est pas pris en compte dans la modélisation.

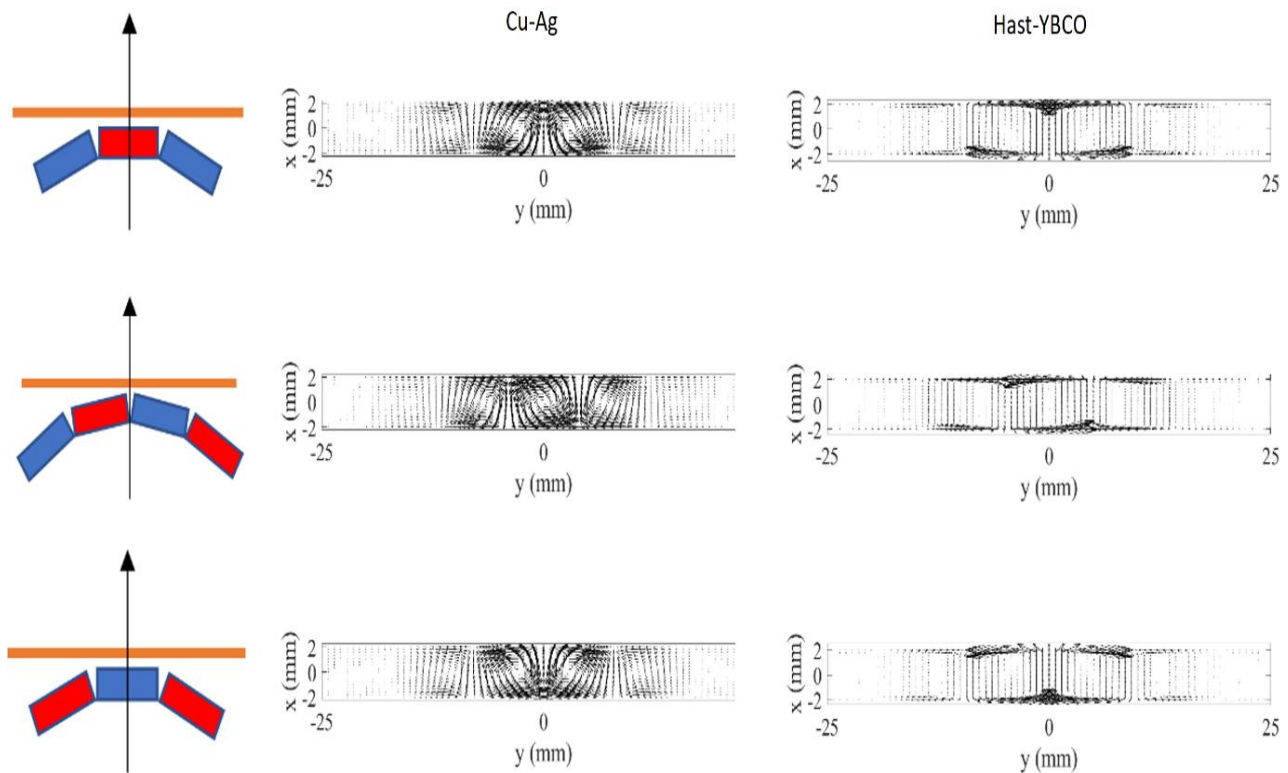


Figure III. 16 : Répartition spatiale des courants induits en fonction de la position de la roue polaire, dans les couches Hast-YBCO, et Cu-Ag du modèle homogénéisé [DIR22].

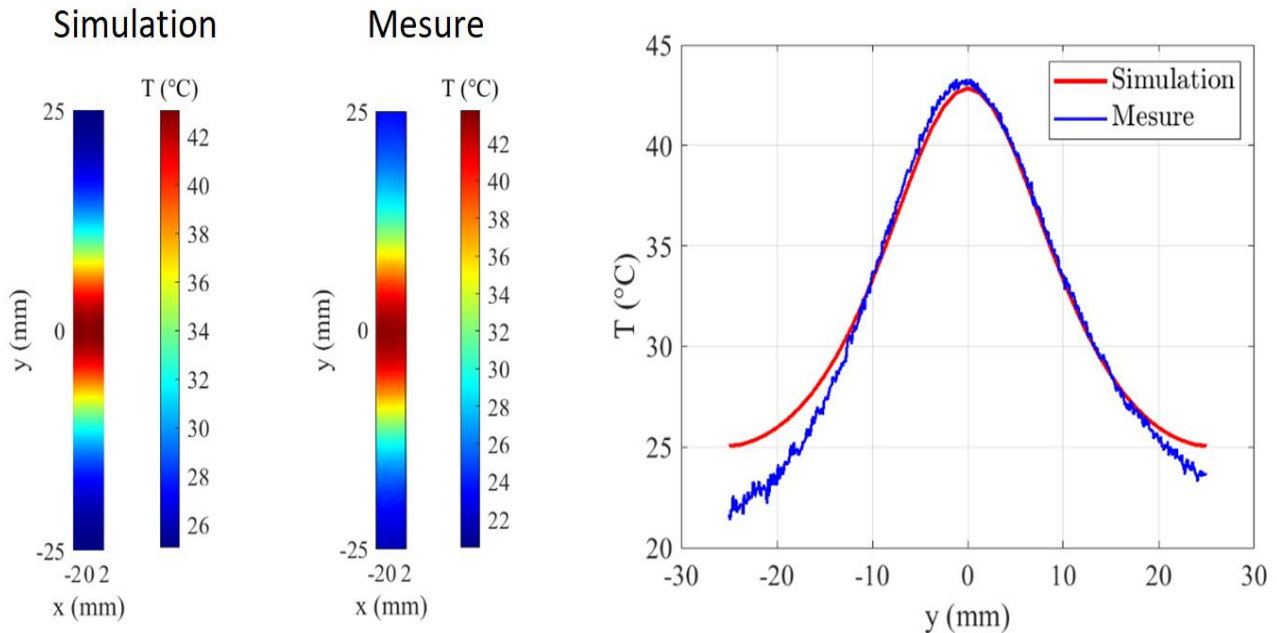


Figure III. 17 : résultats de simulation et de mesure de la répartition spatiale de la température et son profil suivant la longueur du ruban à mi-largeur [DIR22].

III.4.4 Caractérisation de défauts

Nous n'avons pas pu introduire des défauts structuraux étalonnés afin d'apprécier les performances de la méthode pour leur caractérisation. Comme solution alternative, nous avons construit des rubans multicouches en aluminium dans lesquels nous avons introduit des défauts de délaminage et de manque de matière (pore). A titre d'exemple, les résultats numériques expérimentaux pour un défaut de manque de matière sont présentés dans les Figures III-18 en termes de variation de température (ΔT) entre le ruban sain et défectueux. Le défaut de manque de matière affecte localement les courants induits et le flux de chaleur. Il en résulte une diminution significative de la température au niveau du défaut en comparaison au ruban non-défectueux. La forme du défaut est également visible. Une différence entre les résultats de simulation et de mesure est observée au niveau du défaut ; cela peut être dû aux imperfections de réalisation du défaut dans le ruban d'aluminium.

La caractérisation expérimentale de différents types de défauts sur les rubans d'aluminium a permis d'apprécier les performances de la méthode qui a ensuite été appliquée numériquement à la caractérisation de défauts hypothétiques dans des rubans supraconducteurs multicouches [DIR22].

Dans le futur, nous envisageons d'améliorer la structure de l'inducteur afin d'avoir une répartition plus homogène de la température sur le ruban, ce qui permettrait de mieux distinguer les formes des défauts. On envisage également de mieux exploiter les transitoires thermiques pour la caractérisation de défauts. La réalisation de défauts étalonnés dans ce type de rubans peut être réalisé en collaboration avec un de leur constructeurs.

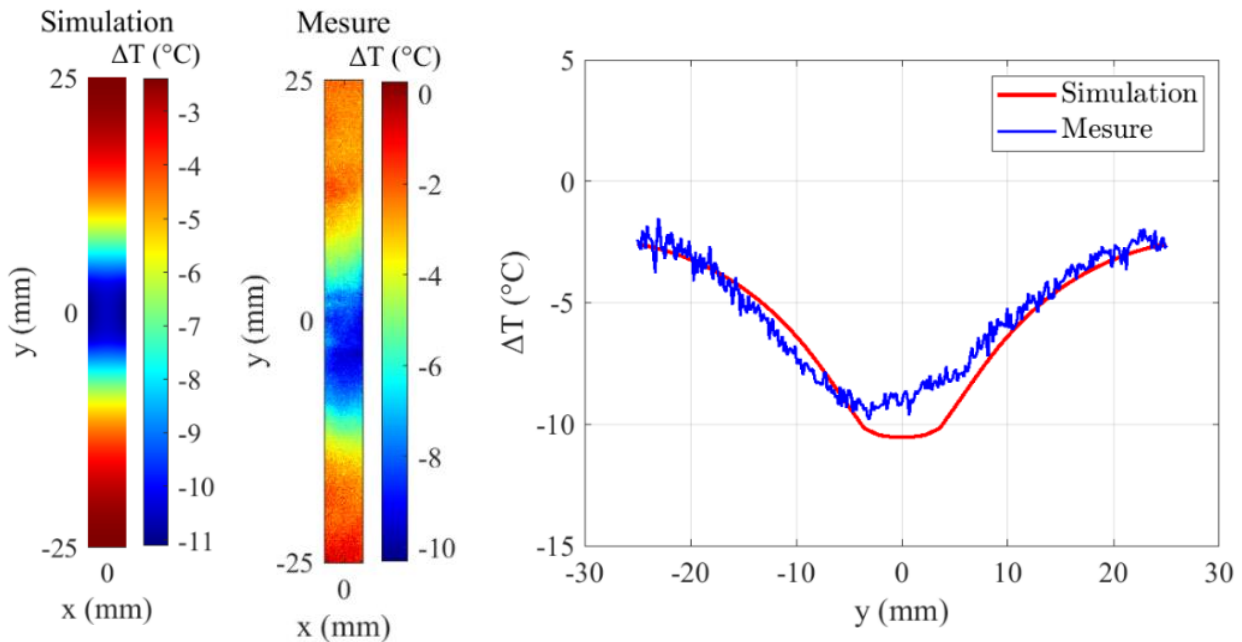


Figure III. 18 : résultats de simulation et de mesure de la répartition spatiale de la température et son profil suivant la longueur du ruban à mi- largeur [DIR22].

III.4.6 Publications liées à l'application

- Walid Dirahoui, Hocine Menana, "Numerical and Experimental Investigations of Flaws Detection in Multilayer HTS Tapes by Magnetothermal Technique", IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, Vol. 8, pp. 233 - 240, May 2023. DOI: 10.1109/JMMCT.2023.3275321.
- Walid Dirahoui, Hocine Menana, Melika Hinaje, "Nondestructive Testing of Multilayer HTS Tapes by Using Eddy Current Thermography", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 32 (8), 6602607, August 2022. (10.1109/TASC.2022.3197382)
- Walid Dirahoui, Hocine Menana, Melika Hinaje, Jean Lévêque, "Magnetothermal modeling of multilayer HTS tapes for quality control at room temperature", Physica C: Superconductivity and its Applications, Elsevier, 600, 1354101, July 2022. (10.1016/j.physc.2022.1354101)
- W. Dirahoui, H. Menana*, M. Hinaje, "Eddy current thermography NDT of multilayer HTS tapes", 11th International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM2023), Avril 2023, Cannes, France.
- Walid Dirahoui, Hocine Menana, Melika Hinaje, "Numerical and Experimental Investigations on the Structural Control of REBCO HTS Tapes Using Eddy Current Thermography", International Conference on Quantum Materials and Technology (ICQMT), Oct 2022, Bodrum, Turkey.
- Walid Dirahoui, Hocine Menana, Melika Hinaje, Jean Lévêque, "Magnetothermal modeling of multilayer HTS tapes for their control at room temperature", 8th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, Jun 2022, Nancy, France.
- Hocine Menana, Walid Dirahoui, Yazid Statra, Malika Hinaje, Bruno Douine, "Contribution to the modeling of eddy current losses in HTS tapes", 7th International Workshop on Numerical Modeling of High Temperature Superconductors (HTS Modeling Workshop), Nancy, 22-23 June 2021.
- W. Dirahoui, H. Menana, M. Hinaje, " Modélisation magnétothermique des rubans HTC multicouches en vue de leur contrôle à température ambiante", Les 13es Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, 12 -15 octobre 2021, Aussois, France.

III.5 Application à la caractérisation de bobines supraconductrices sous champ propre et à proximité de matériaux actifs

Les bobines supraconductrices sont utilisées dans différentes applications en énergie électrique, soit pour la génération d'un champ magnétique (bobines inductives) ou, au contraire pour le minimiser dans les fils constituant ces bobines (bobines non inductives). Dans cette dernière configuration, le courant circule dans des sens opposés dans deux spires adjacentes. L'inductance de la bobine serait alors plus faible que celle du fil la constituant dans sa configuration rectiligne. Cette configuration trouve son application dans les limiteurs-stabilisateurs de réseaux DC [HUA16].

Les approches de caractérisation combinent modélisation et mesures. Les mesures, en DC et AC ont été effectuées par des méthodes électriques qui consistent à faire circuler, dans l'élément supraconducteur (ruban, bobine), un courant continu ou alternatif, et mesurer la tension à ses bornes. Les mesures en DC sont utilisées pour obtenir la loi $E(J)$ à partir de mesures à grandeurs globales $U(I)$, et les mesures en AC sont utilisées pour évaluer les pertes et d'autres paramètres comme l'inductance de l'élément caractérisé. Les mesures sont délicates, car, il s'agit souvent de forts courants et de très faibles tensions, de l'ordre du nano ou du micro volt, dans un environnement électromagnétiquement perturbé. Ainsi, les mesures à la fréquence du réseau sont par exemple à éviter. En alternatif, la partie de la tension liée aux pertes (partie résistive) est plusieurs centaines de fois plus petite que la partie inductive. Une stratégie de compensation de cette dernière est alors adoptée pour l'évaluation des pertes.

Afin de mieux interpréter les résultats de mesure et notamment obtenir la répartition des grandeurs locales, nous avons développé des approches de modélisation par méthodes d'intégrales de volumes, exploitant les équations III.11, combinées avec l'équation $\vec{E} = -\partial_t \vec{A} - \vec{\nabla} V$.

En 2D, dans le cas d'une alimentation en courant, le terme $\vec{\nabla} V$ est inutile. Cependant il faut assurer la conservation du courant, et, dans chaque spire, on doit imposer la relation suivante, où S est la section d'une spire (ruban HTS), et I_a le courant appliqué :

$$\iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = I_a \quad (\text{III.29})$$

Ne disposant que d'une seule variable, qui est la densité de courant, nous avons eu recours aux multiplicateurs de Lagrange pour tenir compte de la condition (III.29). La formulation s'écrit alors dans chaque ruban constituant la bobine comme suit :

$$\partial_t A + E_c \left| \frac{J}{J_c(B)} \right|^{n(B)} + \gamma \iint_S (J - J_a) dS = 0 \quad (\text{III.30})$$

Où, J_a est la densité de courant source, supposée uniforme dans la section de chaque ruban, et γ le multiplicateur de Lagrange supposé constant.

Après discrétisation, et, en tenant compte de l'expression intégrale du potentiel vecteur magnétique, nous obtenons le système matriciel suivant :

$$\bar{\bar{G}} \partial_t \bar{J} + E_c \{ \bar{J}^n \cdot \bar{J}_c^{-n} \} + \gamma \bar{S} \{ \bar{J} - \bar{J}_a \} = \bar{0} \quad (\text{III.31})$$

Le produit (\cdot) dans III.31 désigne le produit de Hadamard. Le solveur non linéaire « ode15 » de Matlab a été utilisé pour résoudre l'équation III.30, en tenant compte des relations III.11.

Dans ce qui suit, je présente quelques exemples que nous avons traités dans les thèses de doctorat de Yazid Statra et Sara Fawaz.

Dans la thèse de Yazid Statra [STA21], nous avons, entre autres, développé des approches de caractérisation de bobines inductives en présence de matériaux actifs (matériaux ferromagnétiques et aimants permanents), de manière séparée ou simultanée, afin de reproduire l'environnement électromagnétique d'une bobine supraconductrice dans une machine électrique.

La discrétisation de l'équation III. 8 sur la surface du matériau ferromagnétique conduit à l'équation matricielle suivante :

$$\begin{cases} \left[\bar{I} + \mu_0 \nu \overline{\overline{M_{FF}}} \right] \bar{k} = \nu \bar{B}^s \\ \Rightarrow \bar{k} = \nu \left[\bar{I} + \mu_0 \nu \overline{\overline{M_{FF}}} \right]^{-1} \bar{B}^s \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Où $\nu = 2(\mu_r - 1) [\mu_0 (\mu_r + 1)]^{-1}$, et $\overline{\overline{M_{FF}}}$ une matrice intégrale liant les éléments de discrétisation de la surface du matériau ferromagnétique.

En exprimant le champ magnétique source en fonction de ses différentes sources, on obtient :

$$\bar{k} = \nu \left\{ \bar{I} + \mu_0 \nu \overline{\overline{M_{FF}}} \right\}^{-1} \left\{ \overline{\overline{M_{FC}}} \bar{J} + \overline{\overline{M_{FA}}} \bar{k}_a + \overline{\overline{M_{FS}}} \bar{J}_s \right\} \quad (\text{III.33})$$

Où $\overline{\overline{M_{FC}}}$, $\overline{\overline{M_{FA}}}$ et $\overline{\overline{M_{FS}}}$ sont, respectivement, des matrices intégrales liant les éléments de discrétisation de la surface du matériau ferromagnétique au éléments de discrétisation du volume du supraconducteur, de la discrétisation de la surface d'un éventuel aimant permanent, et de la discrétisation du volume d'une éventuelle source de courant externe.

En exprimant le potentiel vecteur magnétique en fonction de ses différentes sources, l'équation III.30, résolue dans le domaine du supraconducteur, devient :

$$\partial_t \left\{ \bar{G} \bar{J} + \bar{G}_{CA} \bar{k}_a + \bar{G}_{CS} \bar{J}_s + \bar{G}_{CM} \bar{k} \right\} + E_c \left\{ \bar{J}^n \cdot \bar{J}_c^{-n} \right\} + \gamma \bar{S} \left\{ \bar{J} - \bar{J}_a \right\} = \bar{0} \quad (\text{III.34})$$

En tenant compte de III.33, et, dans le cas général où la perméabilité du matériau ferromagnétique dépend du champ magnétique, on obtient :

$$\begin{aligned} \partial_t \left\{ \left(\bar{G} + \bar{G}_{CM} \left\{ \bar{I} + \mu_0 \nu \overline{\overline{M_{FF}}} \right\}^{-1} \overline{\overline{M_{FC}}} \right) \bar{J} \right\} + E_c \left\{ \bar{J}^n \cdot \bar{J}_c^{-n} \right\} + \gamma \bar{S} \left\{ \bar{J} - \bar{J}_a \right\} = \\ -\partial_t \left\{ \bar{G}_{CA} \bar{k}_a + \bar{G}_{CS} \bar{J}_s + \bar{G}_{CM} \left[\bar{V} \left(\bar{I} + \mu_0 \nu \overline{\overline{M_{FF}}} \right)^{-1} \left(\overline{\overline{M_{FA}}} \bar{k}_a + \overline{\overline{M_{FS}}} \bar{J}_s \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (\text{III.35})$$

Si le système modélisé ne comporte qu'un domaine supraconducteur et un domaine ferromagnétique, le second membre de l'équation III. 35 devient nul. Dans le cas d'un matériau ferromagnétique à perméabilité constante, la dérivée temporelle ne s'appliquera qu'au vecteurs.

En DC, l'interaction entre le supraconducteur et les autres sources de champ magnétique ne se fait que via la dépendance de la densité de courant critique au champ magnétique ($J_c(B)$).

Différentes configurations ont été modélisées en DC et AC [STA21]. Dans l'exemple décrit dans la figure III.19, un empilement de (n_t) rubans supraconducteurs HTC de deuxième génération (YBCO) est placé à la proximité d'une plaque ferromagnétique. Afin de réduire la taille des matrices intégrales, la bobine supraconductrice est traitée comme un monobloc homogénéisé anisotrope d'une épaisseur (a) et d'une largeur (w). En partant du courant de transport (I_a) dans chaque ruban, une densité de de courant uniforme est alors définie dans le domaine homogénéisé, comme suit : $J_a = n_t (aw)^{-1} I_a$. Dans un repère cartésien, la discrétisation suivant la direction y devient alors indépendante du nombre de rubans, optimisée de sorte à ne discrétiser finement que les parties où le champ magnétique est supposé varier de manière significative. Ainsi, le bloc est discrétisé en $N_C = n_t \times n_x$ surfaces élémentaires Δs_i . La relation III.29 est imposée dans chaque couche issue de la discrétisation suivant y. Les spécifications du système modélisé sont données dans le Tableau III.3.

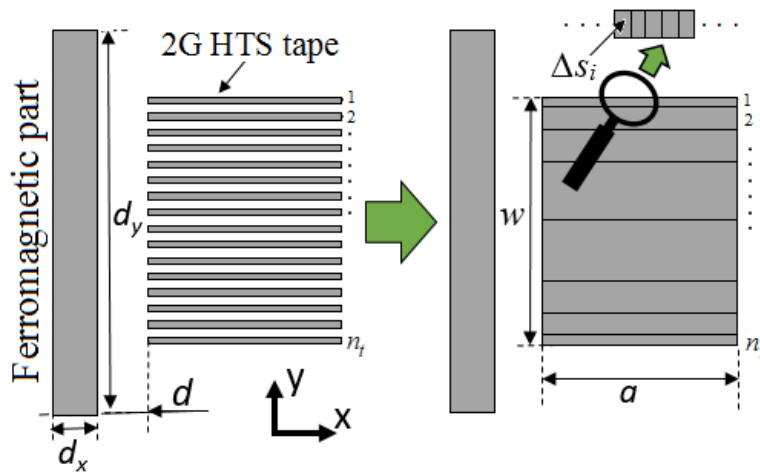


Figure III. 19 : Système modélisé dans ses configurations réelle et homogénéisée.

Tableau III.3 : Spécifications des paramètres utilisés dans les simulations [STA21].

Paramètres	Description	Unité	Valeur
h_Y	Épaisseur de la couche d'YBCO	μm	1
h_T	Épaisseur du ruban	μm	93
h_C	Épaisseur de la cellule unitaire (ruban + air)	μm	293
J_{c0}	Densité de courant critique à champ nul	GA/m^2	28
$J_{c,eq}$	Densité de courant critique équivalente	A/m^2	$J_{c0} \times h_Y / h_C$
a	Largeur du ruban	mm	4
n_t	Nombre de rubans	-	32
w	Largeur de la bobine	μm	$n_t \times h_C$
E_c	Champ électrique critique	$\mu V/cm$	1
n	Exposant de la loi en puissance	-	38
n_l	Nombre de couches dans la configuration homogénéisée	-	18
n_x	Discrétisation des couches suivant l'axe x	-	50
f	Fréquence du courant appliqué	Hz	50
λ	Constante assurant la conservation du courant	$V/(A.m)$	100
k	Constantes utilisées dans les relations III.11	-	0.29515
Bj_0		mT	42.65
β		-	0.7
μ_r	Perméabilité relative de la partie ferromagnétique (dans le cas linéaire)	-	1000
d	Distance entre la bobine et la partie ferromagnétique	mm	1
d_x, d_y	Épaisseur et largeur de la partie ferromagnétique	mm	5, 10
$\Delta \Gamma$	Pas de la discrétisation du contour Γ du matériau ferromagnétique suivant x et y	mm	0.5

A des fins de validation, des simulations par éléments finis (MEF) sur le logiciel COMSOL ont été également effectuées pour deux configurations :

- La configuration réelle, où toutes les couches du ruban 2G sont modélisées. Les résultats obtenus dans ce cas sont considérés précis et utilisés comme référence pour la comparaison.
- La configuration homogénéisée, où les mêmes paramètres que dans l'approche intégrale sont utilisés.

Les résultats ont montré des répartitions du champ magnétique et des courants similaires à chaque instant, dans les trois modélisations (modèle intégral pour la configuration homogénéisée, et modèles éléments finis pour les configurations homogénéisée et réelle) [STA21].

La figure III.20 montre les résultats des pertes AC obtenus dans les trois cas d'étude, où la perméabilité du matériau ferromagnétique est considérée constante. L'homogénéisation semble conduire à une légère surestimation des pertes, car, elle augmente l'épaisseur du supraconducteur par endroits, ce qui affecte les pertes par hystérésis dans ce dernier. Cet écart se creuse légèrement en augmentant le courant comme le montre la figure III.21 qui donne l'évolution des pertes moyennes en fonction du courant.

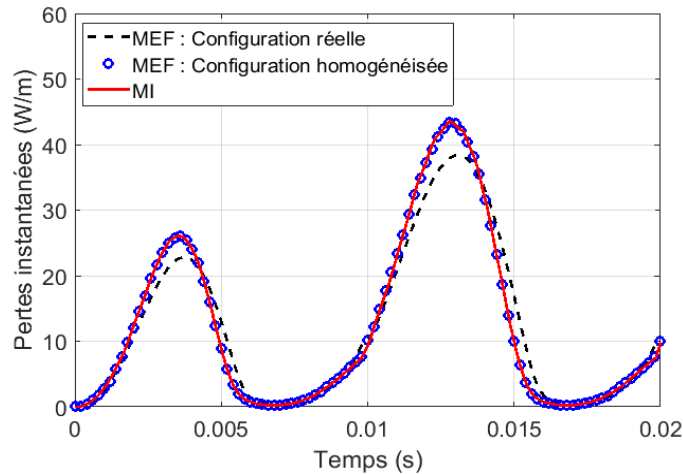


Figure III. 20 : Évolution des pertes instantanées dans les rubans HTC pour les trois cas d'étude ($\mu_r=1000$, $I_{am}=60A$, $f=50Hz$) [STA21].

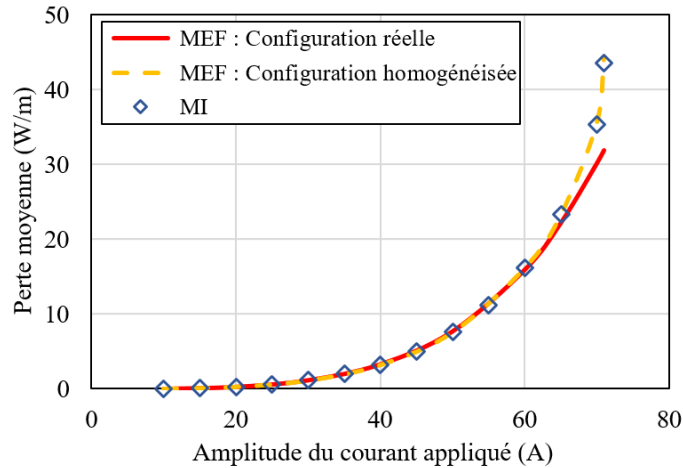


Figure III. 21 : Évolution des pertes moyennes en fonction du courant de transport ($\mu_r=1000$, $f=50Hz$)

La figure III. 22 donne l'évolution des pertes moyennes dans les rubans supraconducteurs en fonction de la perméabilité de la plaque ferromagnétique, pour les trois configurations. L'erreur relative indiquée sur la figure correspond à l'écart entre les résultats obtenus avec la MEF pour le système réel et les résultats issus du modèle intégral (MI). L'augmentation de la perméabilité relative (μ_r) influe sur la répartition du champ magnétique et conduit, dans le cas considéré, à la diminution de la densité de courant critique, ce qui conduit à l'augmentation des pertes. Au-delà d'une certaine valeur de μ_r , la répartition du champ magnétique n'évolue plus ; il en est de même pour les pertes dans les rubans supraconducteurs.

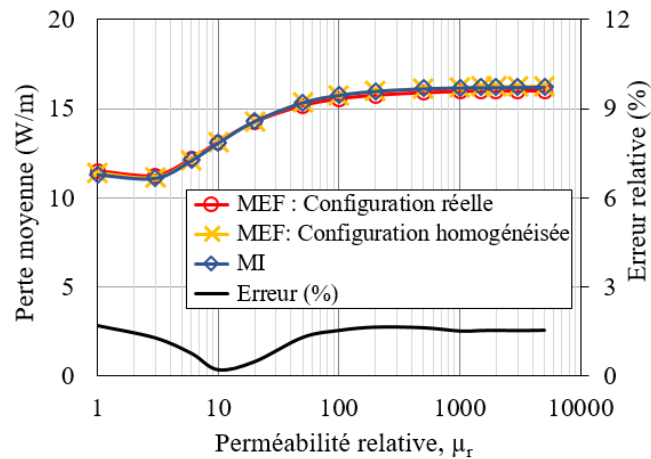
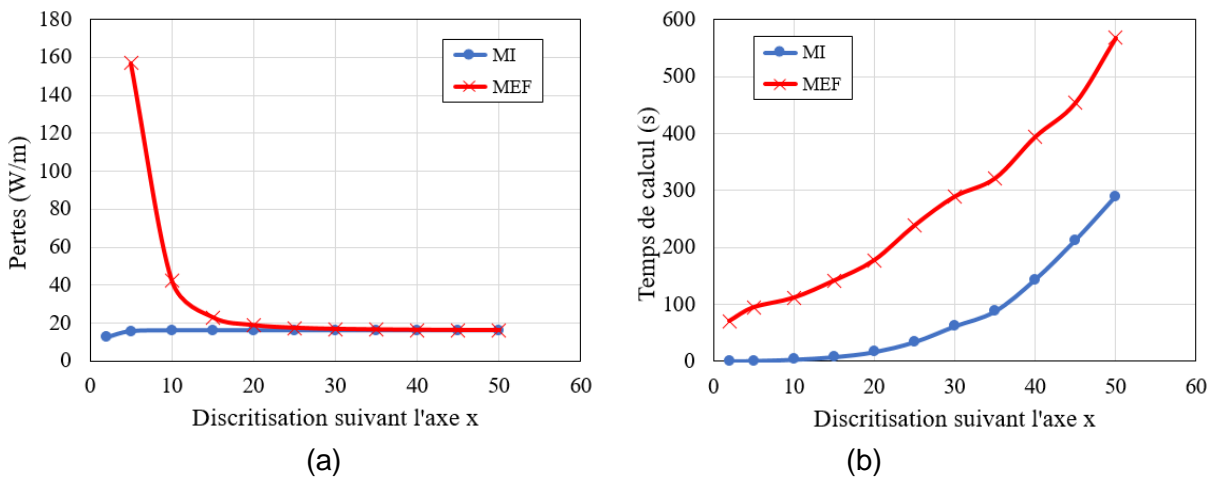


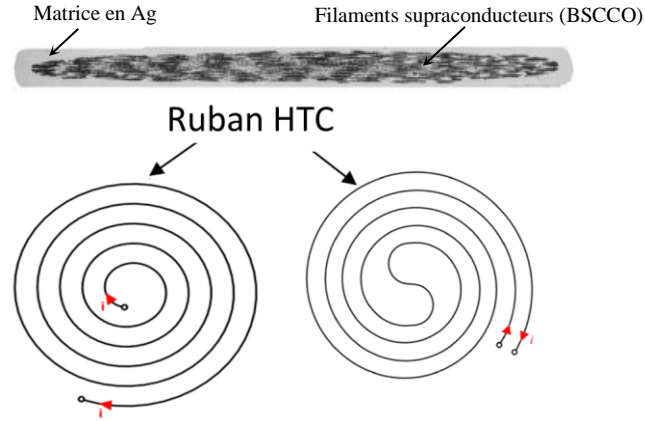
Figure III. 22 : Évolution des pertes moyennes dans les rubans HTC en fonction de la perméabilité relative de la plaque ferromagnétique ($I_{am}=60A$, $f=50Hz$) [STA21].

Les figures suivantes donnent les évolutions des pertes moyennes dans les rubans HTC et des temps de calcul pour les méthodes MEF et MI, en fonction de la discrétisation suivant l'axe x, pour la configuration homogénéisée. Selon les résultats obtenus, la MI présente un avantage certain comparée à la MEF, pour le cas considéré, car, elle présente de meilleures performances en précision et temps de calcul. Le cas d'une perméabilité non linéaire a également été considéré, et, là encore, les résultats de la MI sont en excellente concordance avec ceux de la MEF, avec des temps de calcul beaucoup plus réduits pour la MI [STA21]. Cependant, l'augmentation de la taille du système pourrait inverser la situation, et la limite reste à vérifier...



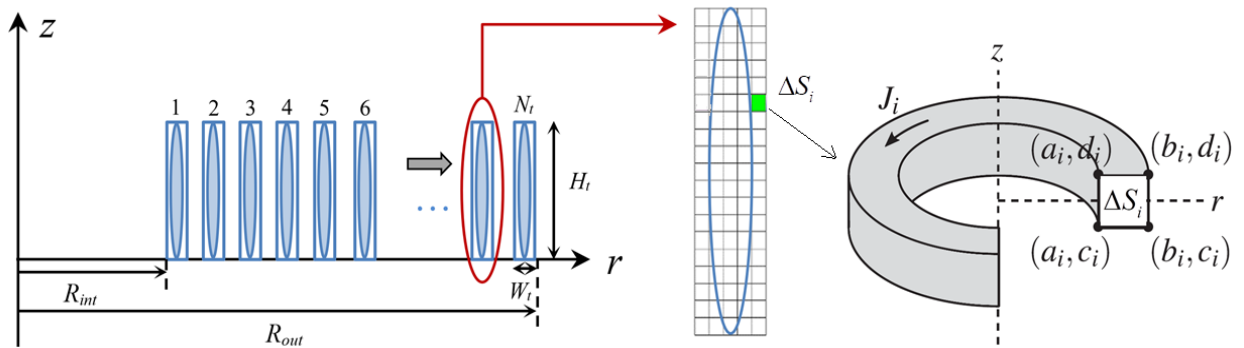
Figures III. 23 : Évolutions - (a) des pertes moyennes dans les rubans HTC et - (b) du temps de calcul pour les méthodes MEF et MI, en fonction de la discrétisation suivant l'axe x ($\mu_r=1000$, $I_{am}=60A$, $f=50Hz$) [STA21].

Dans la thèse de S. Fawaz [FAW23], nous avons appliqué la formulation III.31 pour la modélisation de bobines inductives et non inductives, de grande taille, à base de ruban HTS de première génération (en BSCCO). La structure multi filamentaire de ce type de rubans, et, les structures des bobines considérées, ne sont pas favorable à une homogénéisation, notamment lorsqu'il s'agit de bobines non inductives, où les courants circulent dans des sens opposés dans deux spires consécutives (Figure III.24). Nous avons au contraire développé une modélisation plus fine et plus réaliste, prenant en compte la forme du supraconducteur dans la section d'un ruban.



Figures III. 24 : Structures des bobines inductive et non inductive considérées

Adoptant une approximation axisymétrique de la géométrie, chaque ruban est discrétisé en un certain nombre d'éléments de surface ΔS_i , suivant les directions axiale (z) et radiale (r). Dans chaque élément est définie une densité de courant constante (J_i). Le supraconducteur est supposé occuper une section elliptique pleine, définie à l'intérieur de la section rectangulaire du ruban. Si les coordonnées (r_i, z_i) du centre d'un élément ΔS_i sont situées à l'intérieur de l'ellipse, alors, on lui affecte les propriétés du supraconducteur ; dans le cas contraire, il se voit affecter les propriétés de la matrice en argent.



Figures III. 25 : Discrétisation des spires des bobines

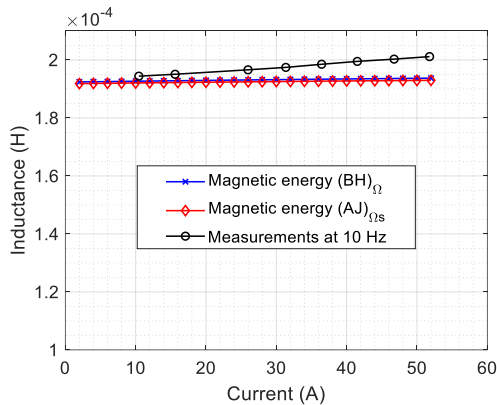
Conformément à la figure III.25, le potentiel vecteur évalué au centre de l'élément ΔS_i ayant les coordonnées (r_i, z_i) , produit par les N surfaces élémentaires issues de la discrétisation de toutes les spires de la bobine, s'exprime alors comme suit [OTT19] :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{j=1}^N K_{ij} J_j \\ K_{ij} = \int_0^\pi \int_{a_j}^{b_j} \ln \left(\frac{z_i - c_j + \sqrt{r_i^2 + r^2 - 2r_i r \cos(\theta) + (z_i - c_j)^2}}{z_i - d_j + \sqrt{r_i^2 + r^2 - 2r_i r \cos(\theta) + (z_i - d_j)^2}} \right) \cos(\theta) r dr d\theta \\ r_i = (a_i + b_i) / 2 \quad ; \quad z_i = (c_i + d_i) / 2 \end{array} \right. \quad \text{III.36}$$

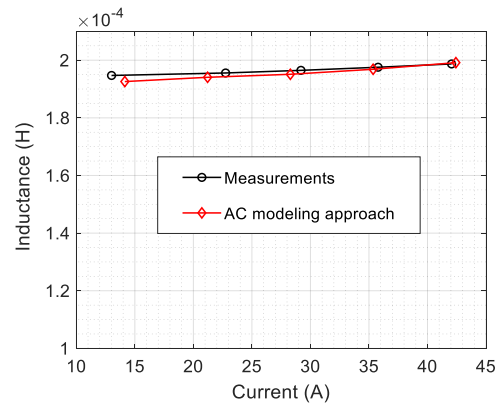
Dans l'exemple d'application suivant, nous avons caractérisé l'évolution de l'inductance d'une bobine inductive en fonction du courant, et, nous avons montré qu'une modélisation DC n'est pas suffisante pour une telle caractérisation, contrairement à ce qui est annoncé dans certains travaux dans la littérature. Les spécifications des paramètres de la bobine modélisée sont données dans le Tableau III.4. Les figures III.26 (a) et (b) montrent les évolutions de l'inductance de la bobine, en fonction du courant, obtenues par une modélisation DC (a), et par une modélisation AC (b), comparées aux mesures. Les résultats montrent clairement qu'une approche de modélisation DC ne permet pas de reproduire une telle évolution de l'inductance qui est liée à la dynamique de pénétration du champ magnétique dans les rubans supraconducteurs.

Tableau III.4 : Spécifications des paramètres pour la bobine inductive dans l'air

Paramètre	Valeur	Description
I_c (77K)	70 A	Courant critique en champ propre
L	10.15 m	Longueur totale du ruban formant la bobine
R_{in}/R_{out}	35/50 mm	Rayons interne et externe de la bobine
W_t/H_t	0.33/2.8 mm	Epaisseur et largeur du ruban
N_t	38	Nombre de spires
E_c	1 $\mu\text{V}/\text{cm}$	Champ électrique critique
n_0	11	Paramètre de fluage à zéro champ
J_{c0}	75.7 A/mm ²	Densité de courant critique à champ nul
k	0.14	Paramètres utilisés dans l'expression de $J_c(B)$, (Eq. III.11)
B_0/β	0.14 T / 2.28	
B_{n0}	59.7 mT	
γ	100 V/(A.m)	Multiplicateur de Lagrange



(a)



(b)

Figures III. 26 : Evolution de l'inductance de la bobine en fonction du courant :

(a) modélisation DC, (b) modélisation AC [FAW23].

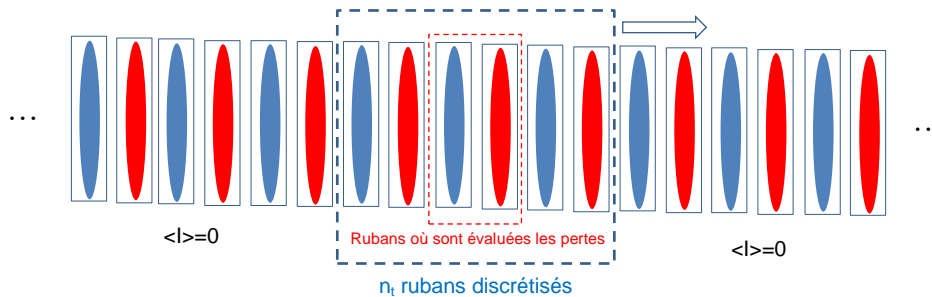
Dans un autre exemple de modélisation d'une bobine non inductive, nous avons mis en évidence l'importance de la prise en compte de la section elliptique du supraconducteur dans les

rubans de première génération. Les spécifications des paramètres de la bobine modélisée sont données dans le Tableau III.5.

Tableau III.5 : Spécifications des paramètres pour la bobine non inductive dans l'air

Paramètre	Valeur	Description
I_c (77K)	170 A	Courant critique en champ propre
I_{c0}	184.51 A	Courant critique en champ nul
L	102 m	Longueur totale du ruban formant la bobine
W_t/H_t	0.23/4.3 mm	Epaisseur et largeur du ruban
a/b	1.895/0.0875 mm	Semi-axes de la section elliptique du supraconducteur
R_{int}/R_{out}	9/27 cm	Rayons interne et externe de la bobine
N_t	92	Nombre de spires
N_r/N_z	9/13	Discretisation suivant les axes r et z
E_c	1 μ V/cm	Champ électrique critique
n	15	Coefficient de fluage
k	0.14	Paramètres utilisés dans l'expression de $J_c(B)$, (Eq. III.11)
B_0/β	0.14 T/2.25	
γ	100 V/(A.m)	Multiplicateur de Lagrange
ρ_{Ag} (@77K)	27×10^{-10} $\Omega.m$	Résistivité de l'argent à 77K [EKI06]

La bobine étant de grande taille, pour la modélisation des pertes AC, nous avons adopté une approche de modélisation séquentielle d'un ensemble (n_t) pair de rubans, où les pertes AC sont calculées dans les deux rubans situés au centre de cet ensemble (Figure III.27). En effet, la contribution des éléments lointains est négligeable en raison de la nature non inductive de la bobine. La modélisation globale de la bobine (92 spires) est alors transformée en une succession de 44 modélisations de 6 spires où les pertes sont calculées dans les deux spires centrales, sauf aux extrémités des bobines où les pertes sont évaluées dans les 4 rubans situés aux extrémités. A chaque itération, l'ensemble est décalé de deux spires. Cela a permis de réduire le temps de calcul de 12h (pour la bobine entière) à 2h.



Figures III. 27 : Stratégie de modélisation séquentielle d'une bobine inductive de grande taille.

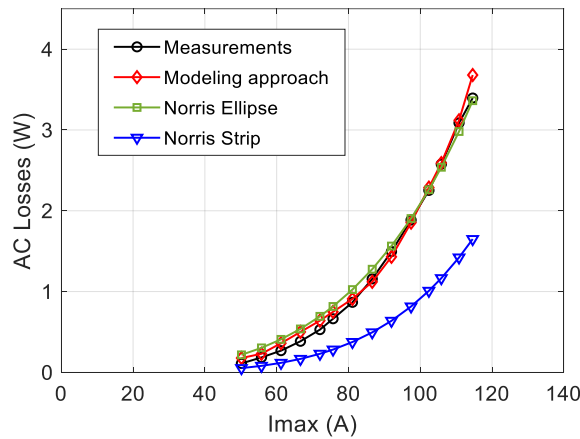
La figure III.28 montre l'évolution des pertes AC en fonction du courant, obtenues par l'approche de modélisation décrite ci-dessus, comparées à celles mesurée sur la bobine en Laboratoire, ainsi qu'aux résultats de calcul en utilisant les modèles de Norris pour des sections elliptique et rectangulaire. Une très bonne concordance est obtenue entre les résultats de modélisation et de mesures, ainsi que ceux obtenus par le modèle de Norris pour une section elliptique, alors que ceux obtenus pour une section rectangulaire s'écartent nettement des autres résultats. Cela permet, d'une part, de valider l'approche de modélisation, et, d'autre part, de mettre en évidence l'importance de la prise en compte de la section elliptique du supraconducteur dans la modélisation. L'utilisation du modèle de Norris est justifiée par le fait que les niveaux de champ magnétique dans les rubans d'une telle bobine se rapprochent du champ propre d'un échantillon de

ruban supraconducteur isolé.

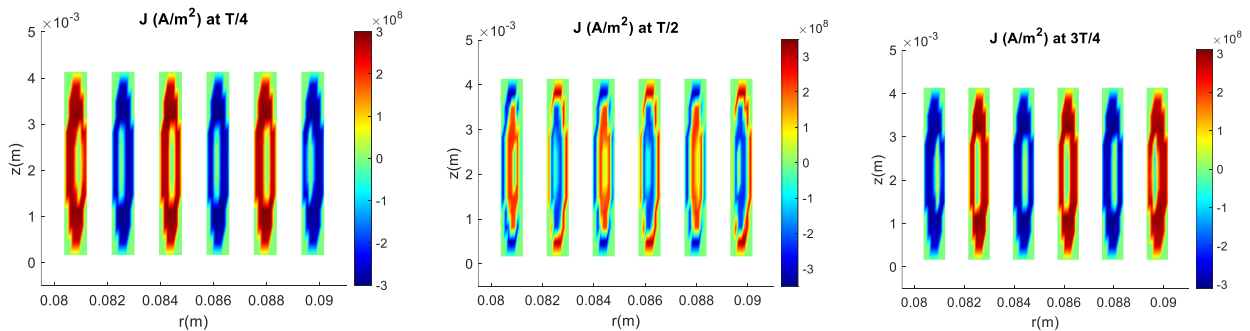
Les figures III.29 montrent les répartitions du courant dans la section des rubans formant la bobine, à différents instants. Le courant appliqué varie de manière sinusoïdale dans le temps, et, à la demi période il est nul, alors que localement, la densité de courant dans la section des rubans ne l'est pas ; c'est son intégrale sur la section d'un ruban qui devient nulle. Il est également utile de signaler que dans ce type de bobines, c'est la composante axiale du champ magnétique dans les rubans qui est prédominante, alors que dans les bobines inductives, c'est plutôt la composante radiale. Cela justifie une discrétisation plus fine des rubans suivant la direction radiale.

Un cas intéressant est montré dans la figure III.30, où, à faible courant, pour minimiser l'énergie magnétique, deux rubans adjacents sont mis à contribution, se comportant comme un seul ruban à $T/2$.

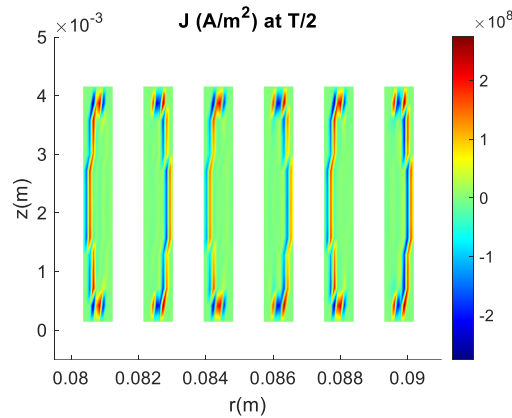
Les investigations ont été étendues à l'étude de différents régimes d'alimentation (DC, AC, AC+DC). Il a été montré qu'une faible valeur d'un courant DC rajouté à un courant AC prédominant n'influe pas de manière significative sur les pertes, qui peuvent également être séparées ($I_{AC+DC} = I_{AC} + I_{DC}$), alors qu'un courant AC rajouté à un courant DC prédominant influe de manière significative sur les pertes, qui ne peuvent être séparées dans ce cas [FAW23].



Figures III. 28 : Pertes AC dans la bobine en fonction du courant ($f=40\text{Hz}$), obtenues, comparées aux mesures et aux pertes calculées par les modèles de Norris pour des sections elliptique et rectangulaire. [FAW23]



Figures III. 29 : Distribution de la densité de courant dans les rubans à différents instants ($I_{\text{max}}=120\text{A}$, $F=40\text{Hz}$) [FAW23].



Figures III. 30 : Distribution de la densité de courant dans les rubans à T/2 ($I_{\max}=50A$, $F=40Hz$) [FAW23].

III.5.1 Publications liées à l'application

- Sara FAWAZ, Hocine MENANA, Bruno DOUINE, Loïc QUEVAL, "Fast modeling approach of large-scale non-inductive HTS coils under different current supply ", Phys. Scr. 98 045503, 2023. (<https://doi.org/10.1088/1402-4896/acbbag>)
- Sara Fawaz, Hocine Menana, Bruno Douine, "Numerical and Experimental Investigations of HTS Coils Inductance", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 58, no 9, 8401804, September 2022. ([10.1109/TMAG.2022.3167566](https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3167566))
- Yazid Statra, Sara Fawaz, Hocine Menana, Bruno Douine, "Experimental Electromagnetic Characterization of High Temperature Superconductors Coils Located in Proximity to Electromagnetically Active Materials", Fluid Dynamic and Material Process, Tech Science Press, Vol. 18, no. 5, pp. 1529-1537, February 2022. (<http://dx.doi.org/10.32604/fdmp.2022.021827>)
- Bruno Douine, L. Queval, F. Trillaud, S. Fawaz, H. Menana, et al., "Characterization of a Superconducting Power Filter for Embedded Electrical Grid Application", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 32, no.4, 5900604, June 2022. ([10.1109/TASC.2022.3152678](https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3152678))
- Yazid Statra, Hocine Menana, Bruno Douine, "Integral Modeling of AC Losses in HTS Tapes with Magnetic Substrates", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 32, no. 2, 5900407, March 2022. ([10.1109/TASC.2021.3139383](https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3139383))
- Sara Fawaz, Hocine Menana, Bruno Douine and Loïc Queval, "DC modeling and characterization of HTS coils with non uniform current density distribution", Supercond. Sci. Technol. 34 124001, November 2021. ([10.1088/1361-6668/ac336c](https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac336c))
- H. Menana, "3-D FEM-BEM Coupling for the Magnetic Field Computation in Thin Shells: Application to the Evaluation of Ship Magnetic Signature," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 6, 7402206, June 2021. ([10.1109/TMAG.2021.3062563](https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3062563))
- Yazid STATRA, Hocine MENANA and Bruno DOUINE, "Semi-Analytical Modeling of AC Losses in HTS Stacks Near Ferromagnetic Parts", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 31, no. 1, 5900306, January 2021. ([10.1109/TASC.2020.3033697](https://doi.org/10.1109/TASC.2020.3033697))
- Y. Statra, H. Menana, and B. Douine, "Contribution to the Experimental Characterization of the Electromagnetic Properties of HTS," Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 93, 137-144, 2020. ([10.2528/PIERM20050705](https://doi.org/10.2528/PIERM20050705))
- Yazid Statra, Hocine Menana, Lamia Belguerras, Bruno Douine, "A volume integral approach for the modelling and design of HTS coils", COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 38 No. 4, pp. 1133-1140, August 2019. ([10.1108/COMPEL-10-2018-0392](https://doi.org/10.1108/COMPEL-10-2018-0392))
- Sara Fawaz, Hocine Menana, Bruno Douine, "Losses in Large Scale Non-Inductive High Temperature Superconducting Coils", The 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2023), Fethiye-Oldeniz, Turkey, 4-11 Mai 2023.
- Sara Fawaz, Hocine Menana, Bruno Douine, "Caractérisations expérimentale et numérique des supraconducteurs HTC pour des applications en énergie électrique", Symposium de Génie Électrique, SGE2023, Lille, France, du 05 au 07 juillet 2023.
- Sara FAWAZ, Hocine MENANA and Bruno DOUINE, "Fast integral modeling approach for the characterization of a superconducting stabilizer in DC electric grid", Symposium on Advanced Technologies in Electrical Systems, 22-23 Mars 2023, Arras, France.
- Hocine MENANA, Yazid STATRA, « Contribution à la modélisation de machines électriques supraconductrices par méthodes intégrales », Symposium de Génie Électrique, SGE2023, Lille, France, du 05 au 07 juillet 2023.
- Sara Fawaz, Hocine Menana, Bruno Douine, « Caractérisations expérimentale et numérique des supraconducteurs HTC pour des applications en énergie électrique », Symposium de Génie Électrique, SGE2023, Lille, France, du 05 au 07 juillet 2023.
- Sara Fawaz, Hocine Menana, Bruno Douine, "Numerical and Experimental Investigations of the Electromagnetic Parameters of Superconducting Coils", International Conference on Quantum Materials and Technology (ICQMT), Oct 2022, Bodrum, Turkey.
- Sara Fawaz, Hocine Menana, Bruno Douine, "Fast integral modeling approach of large-scale non-inductive HTS coils", 8th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors, Jun 2022, Nancy, France.
- Sara Fawaz, Hocine Menana, Yazid Statra, Bruno Douine, "Numerical modeling and experimental study of HTS coils inductance. 23rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields", COMPUMAG 2021, Jan 2022, Cancun, Mexico.
- Frederic Trillaud, Bruno Douine, Sara Fawaz, Hocine Menana, Nicolai Ivanov, "AC losses in non-inductive high temperature superconducting coils: modeling and measurements", 23rd Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG 2021, Jan 2022, Cancun, Mexico.
- Sara FAWAZ, Hocine MENANA, Bruno DOUINE, Loïc QUEVAL, "DC characterization of HTS coils with non-uniform current density distribution using E(J) and Jc(B) dependency", 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism, 21-27 October, 2021, Bodrum, Turkey.
- Bruno Douine, Loïc Quéval, Frederic Trillaud, Sara Fawaz, Hocine Menana, Isabelle Schwenker, Olivier Despouys, Nickolay Ivanov, "Characterization of Superconducting Power Filter for embedded electrical grid application", 15th European Applied Superconductivity Conference, EUCAS, September 5-9, 2021, Moscow, Russia (Virtual).
- Yazid Statra, Hocine Menana, Bruno Douine, "Fast Modelling Approach for Computing AC Losses in HTS Stacks and Coils Near Ferromagnetic Parts ", 7th International Workshop on Numerical Modeling of High Temperature Superconductors (HTS Modeling Workshop), Nancy, 22-23 June 2021.
- Sara FAWAZ, Hocine MENANA, Bruno DOUINE, Loïc QUEVAL, "DC modeling & characterization of HTS coils with non uniform current density distribution", 7th International Workshop on Numerical Modeling of High Temperature Superconductors (HTS Modeling Workshop), Nancy, 22-23 June 2021.
- Y. Statra, S. Fawaz, H. Menana, B. Douine, "Experimental characterization of the electromagnetic properties of HTS coils in self field and with the proximity of electromagnetically active materials", International Conference on MATERIALS & ENERGY, ICOM2021, JUNE 09-11, 2021, METZ – FRANCE.
- Hocine Menana, "3D FEM-BEM coupling for electromagnetic field computation in thin shells", ISEF 2019, ISEF 2019, 29-31 August 2019, Nancy, France.
- Y. Statra, H. Menana, B. Douine, "AC losses computation in HTS coils in the frequency domain", EUCAS 2019, Glasgow, 1-5 Sept. 2019.
- Yazid Statra, Hocine Menana, Lamia Belguerras, Bruno Douine, "HTS Coils Characterization for DC applications – Modelling and Measurements", EPNC 2018, 26-29 Jun 2018, Arras, France (Oral)
- Bruno Douine, Hocine Menana, Yazid Statra, Elhadj Ailam "Caractérisation de rubans supraconducteurs HTC", CISTEM2018, 28-31 October 2018, Algiers, Algeria.
- Sara FAWAZ, Hocine MENANA, Bruno DOUINE, Loïc QUEVAL, "Modélisation et caractérisation en courant continu des bobines SHTC avec une distribution non uniforme de la densité de courant", Les 13es Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, 12 -15 octobre 2021, Aussois, France.
- Bruno Douine, Sara Fawaz, Hocine Menana, Yazid Statra, « Caractérisation de rubans supraconducteurs pour des applications en génie électrique », Symposium de Génie Électrique SGE 2020, 6-8 Juillet 2021, Nantes, France.
- Yazid STATRA, Hocine MENANA, Bruno DOUINE, « Etude numérique et expérimentale des propriétés électromagnétiques de bobines supraconductrices », Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Électrique, JCCE 2019, du 11 au 14 juin 2019, Ile d'Oléron, France.
- Yazid STATRA, Hocine MENANA, Lamia BELGUERRAS, Bruno DOUINE, « Contribution à la caractérisation expérimentale des supraconducteurs HTC : de l'élément au système », SGE 2018, 3-5 July 2018, Nancy, France.
- Yazid STATRA, Hocine MENANA, Lamia BELGUERRAS, Bruno DOUINE, « Caractérisation expérimentale des supraconducteurs HTC », 12es Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, 5-8 juin 2018, Aussois, France.

III.6 Application à la modélisation et l'optimisation de machines supraconductrices

L'une des applications concernées par l'intégration des matériaux supraconducteurs HTC est la conversion d'énergie électromécanique. L'intégration peut se faire dans les machines classiques, où les inducteurs en cuivre dans les machines synchrones sont remplacés par des bobines supraconductrices, permettant l'augmentation des niveaux de champ magnétique dans l'entrefer, et, de ce fait, l'augmentation du couple et de la puissance massiques [GAM11, HAR17, MOU10, NIC07, SON20]. Les propriétés des supraconducteurs permettent également de concevoir des structures originales de machines sans fer, ou réduisant considérablement la quantité de fer utilisé, présentant, de ce fait, des puissances massiques plus élevées. L'utilisation de supraconducteurs massifs en tant qu'écrans permet notamment de réaliser une modulation spatiale du champ magnétique, qui est à la base de la conversion de l'énergie électromécanique. C'est particulièrement dans cette voie que les recherches sur les machines supraconductrices sont orientées au sein du Laboratoire GREEN, où, différentes machines basées les principes de la modulation de flux [AIL06, COL20, MAS02,] ou de sa déviation [MOU10, ALH15], utilisant des supraconducteurs à haute température critique sous formes massive, ont été développées et réalisées. L'évolution des supraconducteurs HTC a également permis d'envisager le développement des machines totalement supraconductrices [KOV20, SEK12], ou à induit supraconducteur [MES19, QU14, SON13, SUG07], même si les pertes AC demeurent un frein majeur à leur développement.

Le dimensionnement et l'optimisation de ce type de machines et basé sur l'évaluation de grandeurs électromagnétiques locales, en raison de la forte dépendance des performances des supraconducteurs HTC au champ magnétique auquel ils sont soumis, d'une manière non linéaire et anisotrope. Des approches tridimensionnelles sont alors nécessaires.

Dans la thèse de Y. Statra [STA21], nous avons utilisé la modélisation par méthodes d'intégrales de volume pour le prédimensionnement d'une machine à induit supraconducteur, qui a été réalisée et testée en Laboratoire, et pour le dimensionnement et l'optimisation d'une structure virtuelle d'une machine totalement supraconductrice.

III.6.1 Modélisation et l'optimisation d'une structure virtuelle d'une machine totalement supraconductrice

La structure de la machine étudiée est décrite dans la Figure III 31. C'est une machine synchrone à flux axial composée de bobinages supraconducteurs HTC de forme triangulaire montés sur des supports non magnétiques, au stator et au rotor. Les bobines de l'inducteur, qui constitue la partie tournante, sont alimentées par des courants continus de manière à obtenir des pôles nord-sud alternés. Le stator avec un bobinage concentrique est alimenté par des courants triphasés. Les enroulements de la machine sont montés sur des supports en résine époxy (G11).

Une modélisation magnétostatique a permis d'évaluer les forces et le couple statique, tenant compte de la dépendance $J_c(B)$. Le couple (Γ_c) et la force axiale (F_z) sont obtenus par l'intégration du tenseur de de Maxwell sur une surface (S) située au milieu de l'entrefer entre les disques formant le stator et le rotor :

$$\begin{cases} \Gamma_c = -\frac{1}{\mu_0} \iint_S (B_y B_z x - B_x B_z y) dx dy \\ F_z = \frac{1}{\mu_0} \iint_S \frac{1}{2} (B_z^2 - B_x^2 - B_y^2) dx dy \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

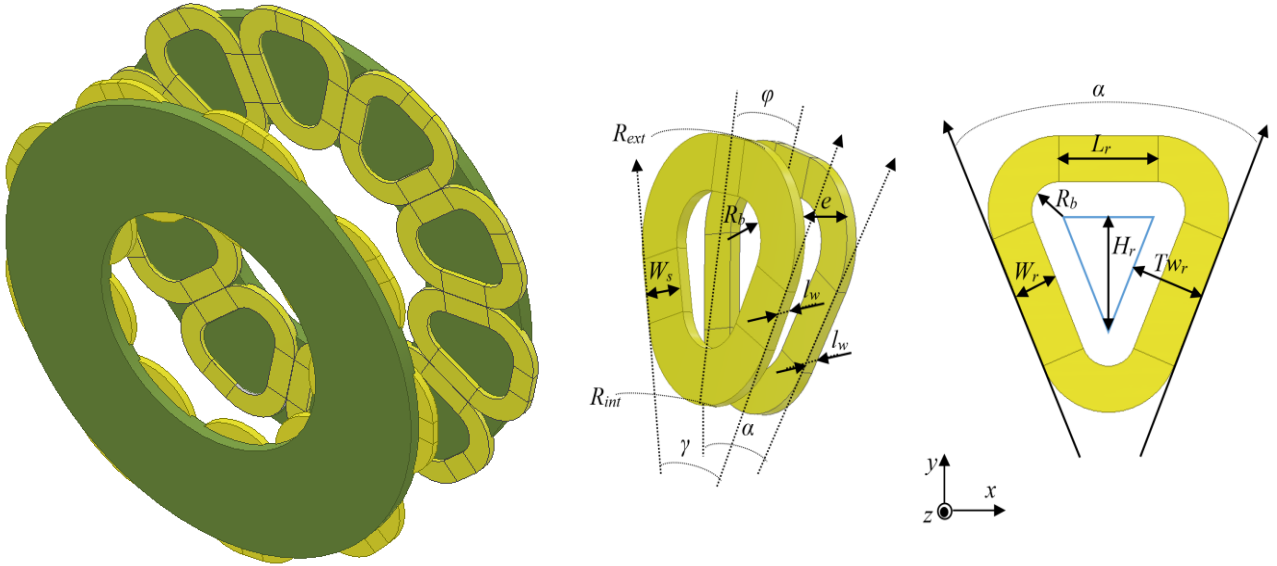


Figure III. 31 : Configuration de la machine étudiée, avec les spécifications géométriques des bobines de l'inducteur et de l'induit

Pour l'évaluation des composantes du champ magnétique produits par les bobinages statorique et rotorique, les bobines sont subdivisées en éléments de volume rectangulaires et en forme d'arc avec des sections transversales rectangulaires (Figure III.32). Pour accélérer les calculs et réduire la taille des matrices intégrales, nous avons utilisé des formules analytiques donnant directement le potentiel et champ magnétiques produits par ces géométries élémentaires, sans avoir à les discrétiser [CAP14, URA82, URA82-2]. Le champ magnétique créé par une bobine triangulaire formant le bobinage de l'inducteur ou de l'induit, en un point, est alors la superposition des champs magnétiques produits par ces éléments de base, en ce point.

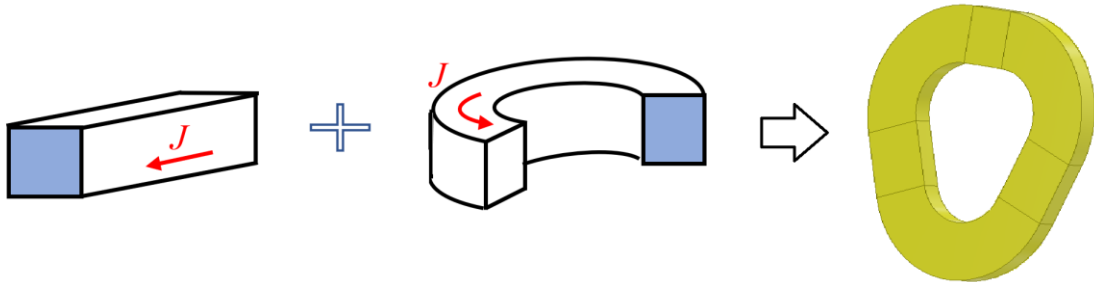


Figure III. 32 : Blocs élémentaires formant les bobines de l'inducteur et de l'induit

Une optimisation de la structure a été effectuée en couplant le modèle d'intégrales de volume aux algorithmes génétiques sur Matlab. Les paramètres fixes de la machine sont donnés dans le Tableau III.6, et, les propriétés du ruban BSCCO utilisé sont fournies dans le Tableau III.7.

Tableau III.6 : Paramètres fixes de la machine

Paramètre	Description	Valeur
R_{ext}	Rayon extérieur	350 mm
l_w	Épaisseur des bobines	4.3 mm
E	Épaisseur de l'entrefer	5 mm
k_e	Coefficient de remplissage	0.83

Tableau III.7 : Propriétés du ruban supraconducteur BSCCO utilisé, @30K

Paramètre	J_{c0}	B_{j0}	β	k	n_0	B_{n0}
Valeur	537 A/mm ²	1.01 T	0.87	0.182	31	2 T

L'optimisation donne la longueur minimale du ruban supraconducteur à utiliser pour un couple donné. Les variables d'optimisation sont fournies dans le Tableau III.8, avec comme contraintes le courant ne dépassant pas 80% de sa valeur critique qui dépend du champ magnétique, et, le rayon de courbure critique des rubans supraconducteurs (35 mm). La Figure III.33 représente les fronts de Pareto obtenus pour plusieurs générations.

Tableau III.8 : Intervalles de variation des variables d'optimisation [STA21]

Variable	Description	Intervalle	Nature
p	Nombre de paires de pôles	[2-8]	Entier
$x_1=R_{int}/R_{ext}$	Coefficient définissant le rayon interne	[0.1-0.6]	Réel
$x_2= W_s/TW_s$	Coefficient définissant la largeur de la bobine supraconductrice coté stator	[0.1-0.6]	Réel
$x_3= W_r/TW_r$	Coefficient définissant la largeur de la bobine supraconductrice coté rotor	[0.1-0.7]	Réel

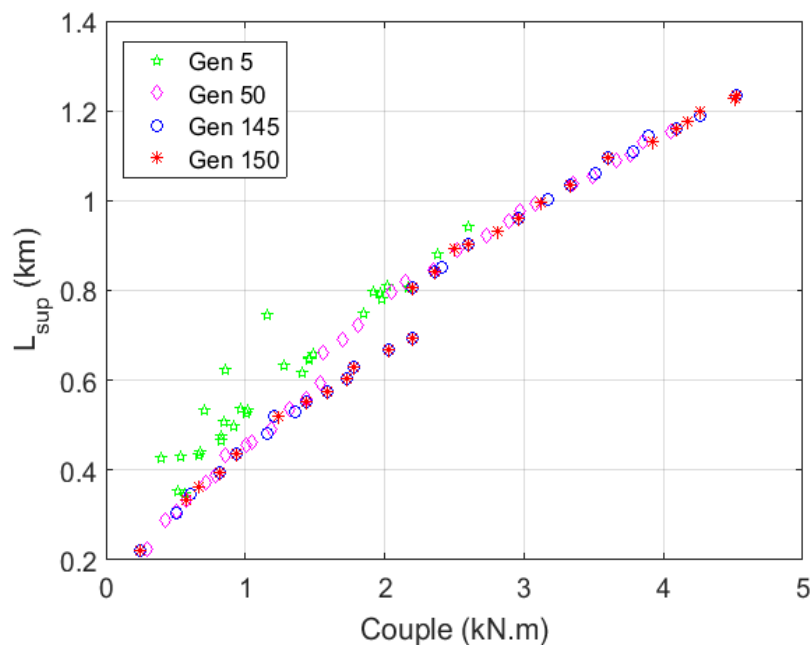


Figure III.33 : Fronts de Pareto obtenus pour plusieurs générations [STA21].

Pour la valeur maximale du couple (4.52 kN.m), la structure optimale obtenue possède un diamètre interne de 298 mm et une longueur de fil supraconducteur de 1,23 km. Les bobines supraconductrices sont caractérisées par une densité de courant de 268,22 A/mm². Les figures III.34 donnent les évolutions du couple statique ainsi que de la force axiale, en fonction de l'angle de rotation du rotor, obtenues pour la structure optimale, en utilisant la méthode d'intégrales de volume (MI) et la méthode des éléments finis (MEF) sur COMSOL. Pour un point de calcul, le temps de calcul est de quelques secondes avec l'approche intégrale (MI), alors qu'il est d'une dizaine de minutes pour le MEF.

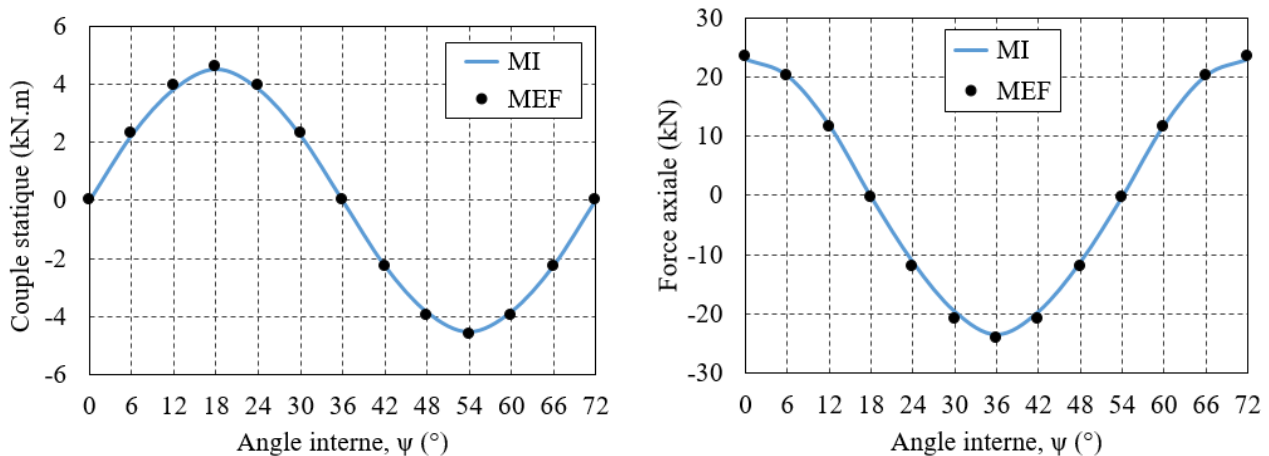


Figure III.34 : évolutions du couple statique de la force axiale, en fonction de l'angle de rotation du rotor [STA21].

III.6.2 Prédimensionnement, réalisation et tests d'une machine à induit supraconducteur

L'approche de modélisation par méthodes intégrales de volume développée a été également un outil performant pour le dimensionnement et la modélisation d'un prototype de machine synchrone à induit supraconducteur à flux axial.

Le prototype est composé d'un rotor à aimants permanents et d'un stator supportant un bobinage supraconducteur triphasé refroidi à l'azote liquide (77 K). Le rotor est constitué de quatre aimants permanents de forme cylindrique de type NdFeB montés sur une culasse ferromagnétique, au niveau du rayon moyen ($R_m=8.5\text{cm}$), formant quatre pôles magnétiques ($p = 2$). La culasse cylindrique en acier doux E24, est dimensionnée de telle sorte à éviter la saturation magnétique (Figure III.35). L'induit supraconducteur est composé de trois bobines supraconductrices montées sur une culasse ferromagnétique (en FeSi), au niveau du rayon moyen. La culasse ferromagnétique est feuilletée dans la direction radiale pour limiter les pertes par courant de Foucault. Les spécifications des paramètres des paramètres sont fournies dans le Tableau III.9.

Il s'agit d'un premier prototype d'une machine à induit supraconducteur réalisée au GREEN. La structure du prototype est réalisée en recyclant les pièces d'un prototype d'accouplement supraconducteur à flux axial réalisé dans le cadre de précédents travaux au GREEN [BEL14, DOL15]. Elle n'est, de ce fait, pas optimisée.

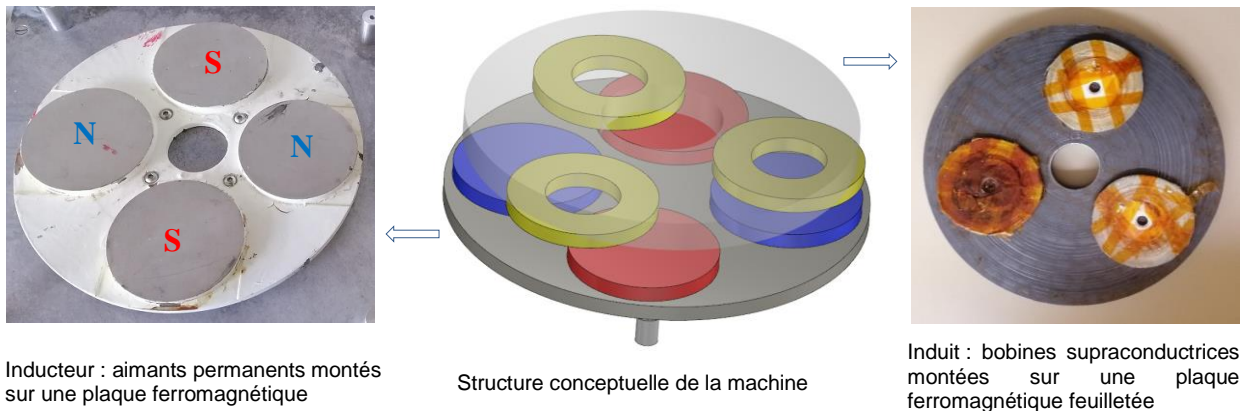


Figure III.35 : Structure de la machine synchrone à flux axial, à induit supraconducteur, développée .

Tableau III.6 : Paramètres de la machine

	Paramètre	Valeur
	Nombre de paires de pôles	2
	Entrefer France	10 mm
	Rayon moyen	85mm
Induit supraconducteur	Rayon externe de la culasse	152 mm
	Rayon interne de la culasse	25 mm
	Epaisseur de la culasse	20 mm
	Rayon externe d'une bobine	50±1 mm
	Rayon interne d'une bobine	25 mm
	Epaisseur de la bobine	3.1±0.2 mm
Rotor à aimants	Rayon externe de la culasse	140 mm
	Rayon interne de la culasse	25 mm
	Epaisseur de la culasse	10 mm
	Rayon d'un aimant permanent	50 mm
	Epaisseur d'un aimant permanent	10 mm
	Induction rémanente des aimants (NdFeB)	1.25T

Le courant critique des bobines supraconductrices a été déterminé avant et après leur montage au sein de la machine, mettant en évidence l'influence de l'environnement électromagnétique qu'impose les parties actives de machine à ces dernières. Ainsi, après leur montage dans la machine, leurs caractéristiques électriques $U(I)$ ont été mesurées et modélisées à couple nul (angle interne $\psi = 0^\circ$) et pour un entrefer de 10 mm. Les trois bobines supraconductrices sont alors alimentées avec les courants : $I_{B1}=I$, $I_{B2}=I_{B3}=-I/2$. La mesure $U(I)$ concerne la bobine qui est parcourue par l'intensité la plus élevée (I). Les résultats de mesure et de simulation par méthodes intégrales sont fournis dans la figure III.36, montrant d'une par une bonne concordance entre les résultats de mesure et de simulation, où, l'écart maximal est inférieur à 0.5 A, soit une différence relative de 1.5 %, et, d'autre part l'influence de l'environnement magnétique de la machine qui a réduit le courant critique dans les bobines (dans la machine) à 33.7A, alors que celui du ruban est de 70A. Les simulations ont également permis de vérifier l'influence de la position du rotor sur le courant critique, où une diminution de 10% de sa valeur a été relevée, à couple maximal, en se basant sur un critère local, où le champ électrique critique est fixé à $1\mu\text{V/cm}$.

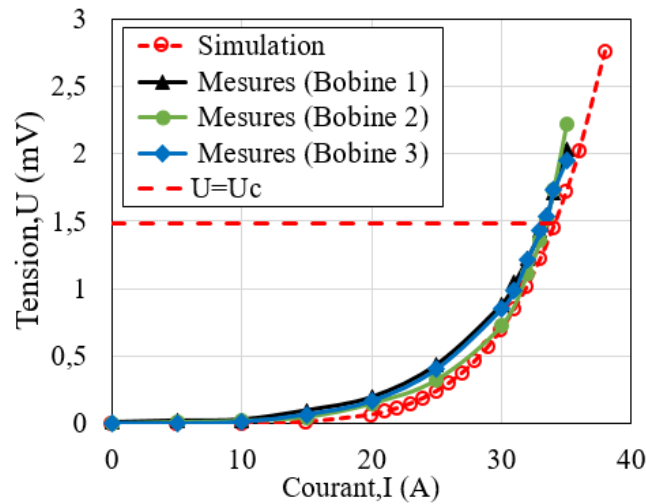


Figure III.36 : Courbes $U(I)$ mesurées et simulées des bobines supraconductrices au sein de la machine, à couple nul [STA21].

La figure III.37 donne les résultats de mesure et de simulations du couple statique, en fonction de l'angle interne, pour un courant appliqué $I = 25A$ ($I_a = I$ et $I_b = I_c = -I/2$), pour des valeurs d'entrefer de 10 et 15 mm, respectivement. Les écarts entre la mesure et le calcul sont essentiellement liés aux incertitudes sur les mesures de l'entrefer et de l'angle de rotation du rotor, ainsi qu'au couple résistant engendré par les roulements à billes placés à proximité du cryostat, qui n'est pas pris en compte dans la modélisation.

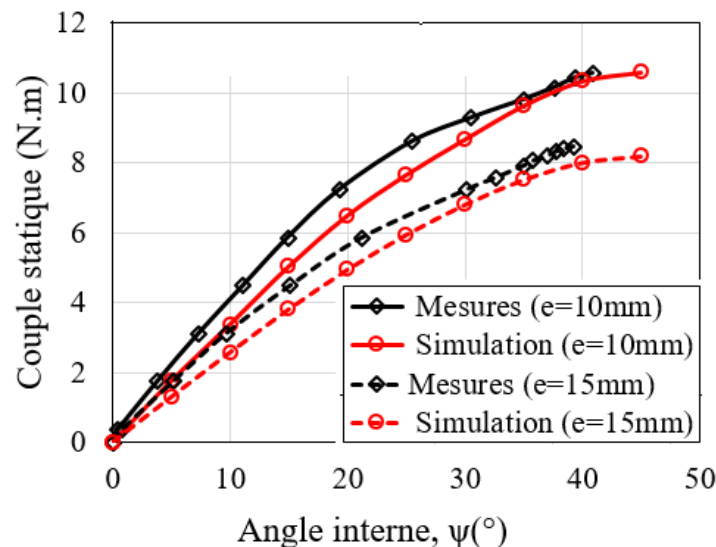


Figure III.37 : Evolution du couple statique en fonction de l'angle interne pour deux valeurs de l'entrefer [STA21].

Les résultats de mesure et de simulation de la FEM induite aux bornes d'une bobine, pour un entrefer de 10mm et une vitesse de rotation du rotor de 600rpm, sont fournis dans la Figure III.38. La FEM simulée est obtenue en dérivant le flux magnétique vu par une bobine en fonction de la position du rotor. Un bon accord est obtenu entre les simulations et les mesures, et, l'écart est essentiellement dû à l'incertitude sur la détermination de l'entrefer réel de la machine. L'entrefer élevé de la machine permet de limiter les harmoniques d'espace, et, une forme quasi sinusoïdale de la tension est obtenue.

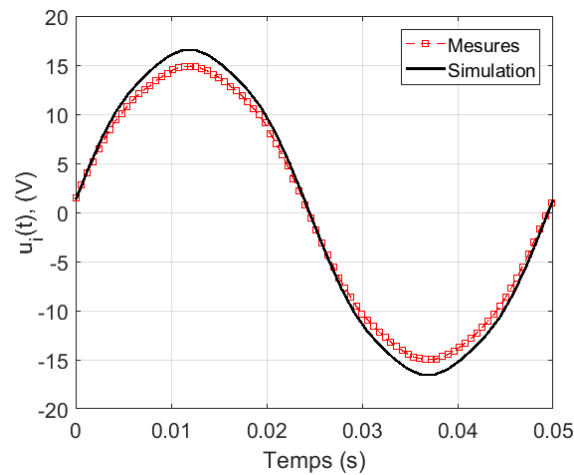


Figure III.38 : FEM induite aux bornes d'une phase pour une vitesse de 600 tr/min, et un entrefer de 10mm [STA21].

Un essai en charge de la machine a également montré des résultats concluants, et, une excellente concordance entre les résultats de mesure et de simulation, mettent en évidence l'efficacité de l'approche par intégrales de volume pour la modélisation de telles structures.

Les simulations peuvent prédire les pertes dans les bobines supraconductrices, et, leur extension à la prise en compte des pertes fer dans la partie ferromagnétique est envisagée. La mesure et la séparation des pertes dans une telle machine demeure cependant un verrou technique à lever.

III.6.3 Publications liées à l'application

- Yazid Statra, Hocine Menana, Bruno Douine, Thierry Lubin, "Axial-Field Synchronous Machine With HTS Armature Windings: Realization and Preliminary Tests", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 32, no. 4, 5200405, June 2022. (10.1109/TASC.2022.3145321)
- Yazid Statra, Hocine Menana, Bruno Douine, "3D Semi-analytical Modeling and Optimization of Fully HTS Ironless Axial Flux Electrical Machines", Physica C: Superconductivity and its Applications, Vol. 574, 15, 1353660, July 2020. (10.1016/j.physc.2020.1353660)
- Hocine Menana*, Yazid STATRA, « Contribution à la modélisation de machines électriques supraconductrices par méthodes intégrales », Symposium de Génie Électrique, SGE2023, Lille, France, du 05 au 07 juillet 2023.
- Y. Statra, H. Menana*, B. Douine, "Realization and tests of a synchronous generator with HTS armature windings", half plenary presentation, ICSM2023, 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism, Fethiye-Oludeniz, Turkey, 4-11 Mai 2023.
- Hocine MENANA*, Yazid STATRA and Bruno DOUINE, "Realization and preliminary tests of an axial-flux synchronous machine with HTS armature windings", Symposium on Advanced Technologies in Electrical Systems, 22-23 Mars 2023, Arras, France.
- Y. Statra, H. Menana, B. Douine, "Notes on the realization and preliminary tests of an axial-flux synchronous machine with HTS armature windings", 7th International Conference on Superconductivity and Magnetism, 21-27 October, 2021, Bodrum, Turkey.
- Yazid STATRA, Hocine MENANA, Bruno DOUINE, Thierry LUBIN, "Axial-field synchronous machine with HTS armature windings: Realization and preliminary results", 15th European Applied Superconductivity Conference, EUCAS, September 5-9, 2021, Moscow, Russia (Virtual).
- Yazid Statra, Hocine Menana, Bruno Douine, "3D semi-analytical modelling of magnetic forces between HTS coils", ISEF 2019, 29-31 August 2019, Nancy, France.
- Hocine MENANA, Yazid STATRA and Bruno DOUINE, "Realization and preliminary tests of an axial-flux synchronous machine with HTS armature windings", Symposium on Advanced Technologies in Electrical Systems, 22-23 Mars 2023, Arras, France.
- Y. Statra, H. Menana, B. Douine, "Realization and tests of a synchronous generator with HTS armature windings", ICSM2023, 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism, 4-11 Mai 2023, Fethiye-Oludeniz, Turkey.

IV. BILAN ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

J'ai entamé mon parcours dans la recherche scientifique en génie électrique il y a une vingtaine d'années. J'ai eu l'occasion d'aborder plusieurs applications du champ électromagnétique, tels que le magnétisme du navire, le contrôle non destructif, la caractérisation des matériaux, et, à moindre mesure, la conversion d'énergie électromécanique et magnétohydrodynamique. Les projets réalisés ont eu une part importante de modélisation, où, j'ai proposé et développé des modèles, essentiellement numériques, pour le calcul du champ électromagnétique dédiés aux applications concernées. Les stratégies de modélisation ont eu pour objectif de satisfaire le meilleur compromis entre précision et rapidité d'exécution, répondant à des besoins clairement identifiés dans l'état de l'art de ces systèmes. La part expérimentale de ces projets n'a souvent servi qu'à des fins de validation des modèles de calcul et des approches de caractérisation développées. Pour répondre à des besoins d'encadrement, j'ai également codirigé des projets dans des domaines qui s'écartent un peu de mon domaine d'expertise. C'était une opportunité d'élargir mon spectre de compétences, même si le périmètre des aspects abordés dans ces projets ne permet pas d'afficher une réelle expertise dans ces domaines.

Depuis que j'ai intégré l'Université de Lorraine, et, le Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy (GREEN), en septembre 2015, en parallèle à une activité d'enseignement parfois assez soutenue et à des responsabilités pédagogiques tout aussi prenantes, et, conformément à mon projet d'intégration, j'ai recentré l'essentiel de mes activités de recherche autour de la caractérisation des supraconducteurs à haute température critique (SHTC), en vue de leur intégration dans les systèmes de puissance. Ce domaine a notamment constitué l'essentiel de mon encadrement doctoral.

Les propriétés exceptionnelles des supraconducteurs, et, la possibilité de leur fonctionnement à des températures cryogéniques facilement atteignables (SHTC), offrent de nouvelles possibilités de conception des systèmes de conversion d'énergie électrique. Selon l'application considérée, les matériaux supraconducteurs peuvent être utilisés pour conduire ou piéger des forts courants, produire un champ magnétique élevé ou au contraire l'écranter pour réaliser une modulation spatiale de ce dernier ... Cependant, la forte dégradation de leurs performances électriques (densité de courant critique) sous l'effet local du champ magnétique, qui est pourtant l'un des principaux vecteurs de l'énergie électrique et de sa transformation, ainsi que pertes en courant alternatif, qui peuvent conduire à des coûts cryogéniques insoutenables, sont des verrous scientifiques et techniques à lever. La caractérisation des propriétés électromagnétiques de ces matériaux sous différentes formes et à différentes conditions de fonctionnement est alors primordiale, et constitue l'un des axes majeurs de recherche dans ce domaine. Si les objectifs et les actions à mener peuvent sembler clairs, le choix et la mise en œuvre des méthodes et outils, tant sur le plan théorique qu'expérimental, ainsi que l'interprétation et l'exploitation des résultats, ne sont pas des tâches triviales. Il en est de même pour la conception et le dimensionnement des systèmes intégrant des supraconducteurs qui exigent également des approches de modélisation à grandeurs locales, nécessitant le développement de modèles qui réalisent le meilleur compromis entre réalisme, précision et temps de calcul qui doit être aussi réduit que possible ; les modèles étant souvent exécutés plusieurs fois dans des processus itératifs d'optimisation. Là, on se heurte aux difficultés imposées par les structures hétérogènes et les propriétés non linéaires des matériaux

supraconducteurs et les dimensions multi échelle des systèmes, allant de la dixième de micromètre au mètre.

Alors que les travaux sur la caractérisation des SHTC au GREEN, en particulier dans leurs formes de rubans, ou de bobines pour des applications en énergie électrique, étaient essentiellement menés sur le plan expérimental, en association à des modèles analytiques, à grandeurs globales, limités aux formes simples et basés sur des hypothèses parfois fortes sur les propriétés physiques et l'homogénéité des répartitions des grandeurs physiques, j'ai redynamisé cet axe de recherche en étendant la caractérisation à la prise en compte des variations des grandeurs locales, grâce à des méthodes et stratégies de modélisation numériques rapides et réalistes que j'ai mises en place. J'ai également œuvré à l'extension de la caractérisation à la prise en compte de la proximité de matériaux actifs, reproduisant progressivement l'environnement électromagnétique d'un système de conversion d'énergie qui intégrerait l'élément supraconducteur. Cette caractérisation s'est alors appuyée sur des approches expérimentales et numériques combinées. Le comportement de ces matériaux étant fortement dépendant de leur environnement électromagnétique, la modélisation a servi d'une part à interpréter les résultats de mesures qui sont très délicats à obtenir, s'agissant souvent de mesures de tensions continues ou alternatives de l'ordre du nano ou du micro volt, dans un environnement électromagnétique parfois contraint et perturbé, et, d'autre part, à simuler des situations difficiles, voire impossible à reproduire en Laboratoire. Pour ce faire, la modélisation se doit d'être rapide et aussi réaliste que possible, alors que ces systèmes présentent des dimensions multi échelles, des anisotropies et des propriétés électromagnétiques non linéaires. J'ai alors investi un effort de recherche sur le développement de modèles basés sur les méthodes d'intégrales de volume qui ont particulièrement montré leur efficacité pour la modélisation de ce type de systèmes. En effet, ce type de méthodes présente l'avantage de ne discrétiser que les parties actives séparées les unes des autres, ce qui permet de mieux traiter les dimensions multi échelles.

La caractérisation consiste essentiellement à déterminer les grandeurs critiques en courant continu ainsi que les pertes en courant alternatif. Parmi nos contributions les plus significatives :

- Le développement d'une modélisation 3D rapide pour le calcul des pertes sous champ appliqué dans les rubans SHTC multifilamentaires, où nous avons proposé des approches permettant de simplifier le problème à résoudre, en adaptant des modèles que j'avais précédemment développés pour la simulation du champ électromagnétique dans les matériaux composites à fibres de carbone.
- La prise en compte de l'effet de la proximité de matériaux ferromagnétiques sur l'évolution des pertes dans les SHTC, et l'extraction, à partir de la mesure des pertes totales, la partie liée au SHTC afin de mieux dimensionner le système cryogénique. L'extension des méthodes d'intégrales de volume à la prise en compte des matériaux magnétiques linéaires et non linéaires constitue un de nos apports les plus significatifs à l'état de l'art.
- La caractérisation du courant critique et des pertes dans des bobines non inductives où les niveaux du champ magnétique sont inférieurs au champ propre d'un ruban, rendant invalides les modèles donnant l'évolution du courant critique en fonction du champ magnétique. Nous avons alors développé une caractérisation basée sur un processus itératif associant modélisation et mesures. Nous avons également observé et illustré quelques phénomènes physiques intéressants liés à la répartition des densités de courant dans ces bobines.

- La caractérisation de l'évolution de l'inductance des bobines supraconductrices en fonction du courant. En effet, lors de nos investigations expérimentales, nous avons remarqué que l'inductance d'une bobine supraconductrice variait de manière assez significative avec le courant, et, nous avons montré qu'une modélisation AC est nécessaire pour reproduire une telle variation, alors que certains travaux dans la littérature adoptent une approche en DC. En effet, cette variation s'est avérée être liée à la dynamique de pénétration du courant et du champ magnétique dans les rubans constituant la bobine.
- La mise en évidence de l'importance de la prise en compte la forme exacte du supraconducteur dans un ruban multifilamentaire. Nous avons alors montré que la prise en compte de la section elliptique du supraconducteur dans les rubans multifilamentaires était nécessaire pour une modélisation précise des pertes dans ces derniers, alors que la majorité des travaux rencontrés dans la littérature adoptent une homogénéisation, considérant que la partie supraconductrice occupe toute la section rectangulaire de ces rubans, tenant simplement compte de la fraction volumique du supraconducteur dans la détermination de la densité de courant critique.
- La caractérisation de bobines supraconductrices dans un environnement électromagnétique complexe. Un prototype de machine synchrone à flux axial à induit supraconducteurs a été réalisé pour illustrer l'effet de l'environnement électromagnétique sur les SHTC à l'échelle du système. Les résultats de mesure ont alors confirmé la validité des modèles développés. Cela a aussi permis de montrer que les SHTC peuvent être utilisés comme induits dans les machines à courant alternatif, à des fréquences dans la gamme de celles des machines classiques, alors qu'ils sont généralement confinés au rôle d'inducteurs.

Pour ces développements, les perspectives à court terme seraient :

- La prise en compte des courants induits dans la modélisation par méthodes intégrales des matériaux ferromagnétiques, et des aimants permanents.
- L'extension de la modélisation par méthodes intégrales des matériaux ferromagnétiques aux cas 3D, considérant la contrainte de conservation du flux magnétique et des courants fictifs.
- L'introduction de méthodes de réduction de modèles pour limiter les coûts en termes d'espace mémoire et temps de calcul, lorsqu'il s'agit de modéliser des systèmes de grande taille.
- La modélisation des pertes dans des bobines HTS non isolées. En effet, afin d'améliorer les transferts thermiques, l'isolant entre spires dans les bobines HTS est supprimé dans certaines applications DC. Si le courant en régime établi est supposé ne circuler que dans les parties supraconductrices, séparées par les parties conductrices des rubans, la répartition des courants peut être plus complexe dans les régimes transitoires, ou lorsque ces bobines sont soumises à un champ magnétique externe variable dans le temps, et, les effets locaux peuvent conduire à une perte de supraconductivité. Un modèle thermique associé semble donc nécessaire.
- L'étude des répartitions des courants dans les jonctions entre les parties supraconductrices et les amenées de courant, afin de les optimiser, car, les pertes peuvent être conséquentes à leur niveau, engendrant des coûts cryogéniques élevés.
- Sur un plan purement expérimental, la mesure des pertes AC dans les SHTC en polyphasé ainsi qu'à l'échelle d'une machine électrique demeurent des verrous à lever.

Plus récemment, au-delà de la caractérisation des propriétés électromagnétiques des SHTC, j'ai entrepris une voie originale de caractérisation de leur intégrité structurelle, par des méthodes

non destructives et à température ambiante, dans une démarche contrôle qualité et de fiabilité ; des facteurs qui limitent leur intégration dans les systèmes de puissance. L'expérience que j'ai eue dans le domaine du contrôle non destructif (CND) m'a permis de proposer une approche originale de caractérisation de rubans supraconducteurs multicouches, développée dans le cadre de la thèse de Walid Dirahoui. En effet, la structure et le process de fabrication de ce type de rubans favorisent l'apparition de défauts structurels comme des délaminages, des manques de matière ou encore des inclusions. La littérature ne ressent dans ce contexte que quelques travaux concernant le contrôle de l'homogénéité de la couche supraconductrice par des balayages magnétiques à températures cryogéniques. Par ailleurs, la structure multicouche très fine de ces rubans limite les possibilités d'un contrôle étendu aux autres couches, par les méthodes classiques. Nous avons alors développé une approche de contrôle, à température ambiante, par thermographie inductive impliquant un inducteur à aimants permanents en mouvement. Un banc expérimental et une modélisation numérique dédiée, associant des modèles électromagnétique et thermique, ont été développés, et, les résultats obtenus sont très encourageants. Il a cependant été difficile d'introduire des défauts étalonnés dans ce type de rubans et de mesurer l'évolution de la température dans le temps. Comme perspectives à ce projet j'envisage :

- L'amélioration de la structure de l'inducteur, afin d'obtenir une répartition spatiale plus homogène de la température, ce qui favoriserait la détection de défauts
- L'exploitation de la dynamique de l'évolution de la température pour la détection de défauts. En effet, le contraste thermique entre les parties saines et les défauts est plus prononcé avant le régime établi où la température dans le système tend à s'homogénéiser.
- La réalisation de défauts étalonnés, ce qui peut se faire en collaboration avec les constructeurs de ces rubans, et l'acquisition d'une caméra thermique plus performante pour suivre la dynamique d'évolution de la température dans la pièce contrôlée.

Le bilan présenté ci-dessus m'a permis d'énoncer mes perspectives de recherche à court terme liées aux applications considérées. Mes perspectives de recherche, à moyen et à long terme, concernent alors deux principaux aspects liés à l'application des supraconducteurs en énergie électrique : la conversion d'énergie électromécanique et la fiabilité des systèmes supraconducteurs dans leurs applications en énergie électrique. Les perspectives concernent à la fois le développement de modèles de simulation, de méthodes de caractérisation et le dimensionnement de systèmes.

Application des supraconducteurs à la conversion d'énergie électromécanique

L'introduction des supraconducteurs dans les systèmes de conversion d'énergie électromécanique a d'abord été envisagée dans les structures conventionnelles de machines synchrones, où, l'inducteur en cuivre a été remplacé par un inducteur supraconducteur. Tant que la puissance de la machine supraconductrice reste nettement supérieure à la puissance de sa partie cryogénique, cette solution demeure attrayante, car, pour la même puissance, elle conduit à une réduction significative du volume et de la masse de la machine, grâce à l'augmentation des niveaux d'induction dans l'entrefer, siège de la conversion d'énergie électromécanique. C'est une solution attractive pour les secteurs où les problèmes de volume et de masse sont importants, comme l'aéronautique et l'éolien. Ainsi, des projets d'ampleur, comme le projet européen Ecoswing, ont abouti à la réalisation de machines supraconductrices de plusieurs MW.

Les propriétés non conventionnelles des supraconducteurs offrent pourtant la possibilité d'envisager de nouvelles structures de machines supraconductrices, encore plus légères et à des niveaux d'induction plus élevés, en supprimant partiellement ou totalement les circuits magnétiques, grâce au pouvoir des supraconducteur à écranter des champs magnétiques, même si cela requiert généralement des fonctionnements à des températures plus basses que celles auxquelles le supraconducteur en question aurait fonctionné s'il devait servir de conducteur. C'est notamment dans cette direction que sont orientés les projets de recherche sur les machines supraconductrice au GREEN, qui a capitalisé plusieurs années d'expertise dans ce domaine. Des structures innovantes de machines électriques supraconductrices ont été développées, souvent en partenariat avec le secteur industriel, notamment l'aéronautique.

Récemment j'ai envisagé le développement de structures plus adaptées à la propulsion navale. Ce sont des structures homopolaires, ne nécessitant pas de convertisseurs de fréquence, assurant une discrétion acoustique et favorisant l'utilisation de sources à faible tension et à fort courant telles que les piles à combustibles, avec les avantages que cela représente en termes de discrétion et de suppression des émissions de polluants.

Des méthodes de conception dédiées sont alors requises, et, les approches de modélisation par méthodes intégrales que nous avons développé s'y prêtent parfaitement. Une extension des modèles à la prise en compte des matériaux ferromagnétiques en 3D pourrait alors être nécessaire pour la modélisation d'éventuelles pièces ferromagnétiques qui serviraient pour la canalisation ou le confinement du champ magnétique.

A titre d'exemple, j'ai proposé une structure originale d'un moteur-hélice intégrée homopolaire à inducteur supraconducteur, dont le concept est présenté dans la figure IV.1. L'hélice conductrice joue à la fois le rôle du rotor de la machine et le rôle du propulseur hydrodynamique. Elle permet d'éliminer l'arbre de transmission machine-hélice dans une architecture classique, et de constituer une propulsion externe.

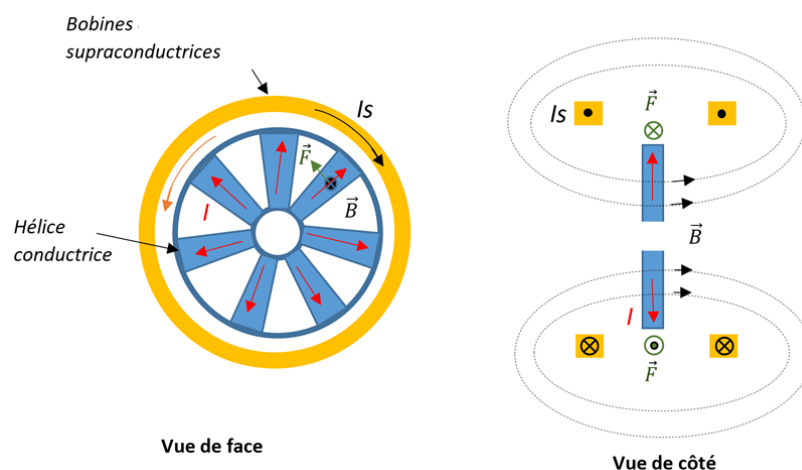


Figure IV. 1 : Concept d'un moteur-hélice intégrée homopolaire à inducteur supraconducteur

Elle a le mérite de soulever plusieurs verrous scientifiques et techniques comme l'alimentation du rotor de la machine par un courant continu en assurant une répartition homogène de ce dernier dans les pales, et l'étude de l'interaction entre les phénomènes électromagnétiques, thermiques et hydrodynamiques au niveau des pales, ce qui pourrait soulever des problématiques originales sur le plan modélisation, mais également sur le plan physique (quel serait l'influence de

l'échauffement des pales par effet Joule sur leurs performances hydrodynamiques... ?). Le dimensionnement de l'enceinte cryogénique qui fonctionnera dans un milieu aquatique et qui sera potentiellement soumise à une pression externe est aussi d'un certain intérêt scientifique, car, il est bien connu que l'augmentation de la pression est en faveur de la supraconductivité et engendre une augmentation la température critique ...

Des discussions avancées avec l'entreprise Naval Group ont permis de d'aboutir à la proposition d'un projet de développement d'un prototype pour un cahier des charges répondant aux exigences d'une propulsion sous-marine externe. J'envisage d'engager par la suite une thèse CIFRE dans la continuité du projet.

Fiabilité des systèmes supraconducteurs dans leurs applications en énergie électrique

La fiabilité des systèmes supraconducteurs est l'un des freins majeurs à leur utilisation dans les systèmes de puissance, à l'échelle industrielle. C'est du moins ce qui sort des discussions que j'ai pu avoir avec des acteurs industriels, notamment ceux du secteur naval. Ainsi, je pense qu'il serait intéressant de développer cet aspect qui est, pour le moment, absent de l'état de l'art ; la majorité des efforts de recherche étant essentiellement concentrés sur les principes et possibilités offertes par l'intégration des supraconducteurs à haute température critique pour l'optimisation énergétique des systèmes.

La démarche intègrerait la prise en compte de l'effet du vieillissement, considérant notamment les possibilités de *réemploi* de certains éléments supraconducteurs (câbles, bobines ...), ayant un vécu dans un système en fin de vie, dans un autre système en construction, afin d'optimiser leur bilan carbone et leurs coûts de production qui peuvent être très élevés. En effet, lors de nos travaux, nous avons, par exemple, pu recycler avec succès des bobines supraconductrices que nous avons récupérées d'un accouplement magnétique et réutilisées pour la construction d'un prototype de machine synchrone à induit supraconducteur, qui a pu fonctionner correctement en mode générateur, à vide et en charge. Une caractérisation préalable de ces bobines réutilisées a montré un léger écart de performances en comparaison à la fiche du constructeur. Il serait de ce fait intéressant d'étendre les méthodes de caractérisation utilisées au GREEN à la prise en compte du vieillissement des matériaux supraconducteurs, notamment après plusieurs cycles thermiques variant des températures ambiantes aux températures cryogéniques, même si une formalisation de ce paramètre ne paraît pas évidente. La construction de jumeaux numériques avec le concours de l'intelligence artificielle me semble être une piste crédible.

L'étude de fiabilité concerne également la caractérisation d'éventuels défauts et l'étude de leur impact sur les performances des éléments supraconducteurs. Dans ce contexte, je compte poursuivre les travaux que nous avons entamés sur la caractérisation de rubans multicouches par thermographie inductive, par la mise en place d'une plateforme de contrôle associant différentes méthodes (courants de Foucault, thermographie inductive ...). Je pense notamment à une autre méthode originale exploitant les forces de Lorenz, pour un contrôle en ligne profitant du mouvement des rubans supraconducteurs à la chaîne de production. Des collaborations avec les constructeurs de rubans supraconducteurs sont alors envisagées.

Ces quelques paragraphes résument les grandes lignes de mes perspectives de recherche, avec ma vision actuelle des choses. Certains points pourraient évoluer, et, d'autres idées pourraient apparaître au fur et à mesure que les projets avancent.

BIBLIOGRAPHIE

- [AKO84] G. Akoun, J.-P. Yonnet, "3D Analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets", IEEE Transactions on Magnetism, Vol. MAG-20, no. 5, pp. 1962-1964, Sept. 1984.
- [AIL06] E. H. Ailam, »Machine synchrone à plots supraconducteurs : Etude et réalisation », Thèse, Génie Electrique, Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [ALB10] R. Albanese, et al., "Electromagnetic Disruption Loads on ITER Blanket Modules", IEEE Transactions on Magnetism, vol. 46, no. 8, pp. 2935-2938, Aug. 2010.
- [ALB85] R. Albanese, R. Martone, G. Miano, G. Rubinacci, « A T formulation for 3D finite element Eddy current computation », IEEE Transactions on Magnetism, vol. 21, no. 6, pp. 2299-2302, Nov. 1985.
- [ALB88] R. Albanese, G. Rubinacci, "integral formulation for 3D eddy-current computation using edge elements", IEEE Proceedings, vol. 135, Pt. A, No. 7, pp. 457-462, September 1988.
- [ALB90] R. Albanese, G. Rubinacci, "Treatment of multiply connected regions in two-component electric vector potentials formulations", IEEE Transactions on Magnetism, vol. 26, no. 2, pp. 650-653, March 1990.
- [ALB96] R. Albanese, F.I. Hantila, G. Rubinacci, "A Nonlinear Eddy Current Integral Formulation in Terms of a Two-Component Current Density Vector Potential", IEEE Transactions on Magnetism, vol. 32, no. 3, pp. 784-787, May 1996.
- [ALB98] R. Albanese, G. Rubinacci, F.I. Hantila, G. Preda, "A Nonlinear Eddy-Current Integral Formulation for Moving Bodies", IEEE Transactions on Magnetism, vol. 34, no. 5, pp. 2529-2534, Sept. 1998.
- [ALB98] D. Albertz and G. Henneberger, "Calculation of 3D eddy current fields using both electric and magnetic vector potential in conducting regions", IEEE Transactions on Magnetism, vol. 34, no. 5, pp. 2644-2647, Sept. 1998.
- [ALH15] R. Alhasan, « Etude et réalisation d'une nouvelle structure d'un moteur synchrone supraconducteur », Thèse, Génie Electrique, Université de Lorraine, 2015.
- [ALL09] H. Allag, J.-P. Yonnet, "3-D Analytical Calculation of the Torque and Force Exerted Between Two Cuboidal Magnets", IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 45, no. 10, pp. 3969-3972, Oct. 2009.
- [ALO19] P. Alotto, P. Bettini, F. Moro, R. Torchio, D. Voltolina, "A circuit interpretation of the volume integral equation method: the partial equivalent circuit approach", ICS Newsletter, Vol. 26, no. 3, Nov. 2019.
- [AME98] N. Amemiya, K. Miyamoto, S. Murasawa, H. Mukai, K. Ohmatsu, "Finite element analysis of AC loss in non-twisted Bi-2223 tape carrying AC transport current and/or exposed to DC or AC external magnetic field" Physica C 310, pp. 30-35, 1998.
- [AND12] B. Andreianov, M. Bendahmane; F. Hubert; S. Krell, "On 3D DDFV discretization of gradient and divergence operators. I. Meshing, operators and discrete duality", IMA Journal of Numerical Analysis, Vol. 32, n° 4, Oct. 2012.
- [ARS21] A. Arsenault, B. S. Alves, F. Sirois, "COMSOL Implementation of the H- ϕ -Formulation With Thin Cuts for Modeling Superconductors With Transport Currents", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 31, n°6, 6900109, Sept. 2021.
- [BEA64] C. P. BEAN, "Magnetization of high-field superconductors", Reviews of modern physics, pp.31-39, Janvier 1964.
- [BEN20] T. Benkel, et al. "T-A-Formulation to Model Electrical Machines With HTS Coated Conductor Coils", IEEE Trans. App. Supercond., Vol30, n°6, 5205807, Sept. 2020.
- [BER06] K. Berger « Etude des phénomènes couplés magnétothermiques dans les Supraconducteurs à Haute Température », Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [BIR89] O. Bíró, K. Preis, "On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents", IEEE Transactions on Magnetism, vol. 25, no. 4, pp. 3145-3159, July 1989.
- [BOS94] A. Bossavit, "Numerical Modelling of Superconductors in Three Dimensions: A Model and a Finite Element Method", IEEE Trans. Magn., vol. 30, no. 5, pp. 3363-3366, 1994.
- [BOU04] M. Costa Bouzo, F. Grilli, Y. Yang, "Modelling of coupling between superconductors of finite length using an integral formulation", Supercond. Sci. Technol., Vol. 17, pp. 1103-1112, 2004.
- [BOU90] F. Bouillault, Z. Ren and A. Razek, "Calculation of 3D eddy current problems by an hybrid T-Q method", IEEE Transactions on Magnetism, vol. 26, no. 2, pp. 478-481, March 1990.
- [BOU92] F. Bouillault, "T-Q Formulation by hybrid F.E.M.-B.I.M. and its gauges for 3D electromagnetic calculations", IEEE Transactions on Magnetism, vol. 28, no. 2, pp. 1208-1211, March 1992.
- [BOU92-2] F. Bouillault, "TR formulation by hybrid F.E.M.-B.I.M. and its gauges for 3D electromagnetic calculations", IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 28, n°2, pp. 1208-1211, March 1992.
- [BRA06] R. Brambilla, F. Grilli, and L. Martini, "Development of an edge-element model for AC loss computation of high-temperature superconductors", Supercond. Sci. Technol., vol. 20, no. 1, pp. 16-24, 2006.
- [BRA93] E. H. Brandt and M. Indenbom, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field", Physical Review B, vol. 48, pp. 12893, 1993.
- [BRA96] E. H. Brandt, "Superconductors of finite thickness in a perpendicular magnetic field: Strips and slabs", Physical Review B, vol. 54, pp. 4246-4263, 1996.

- [BRU89] Y. Brunet, « Les supraconducteurs », Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D2700, 1989.
- [CAM09] A. M. Campbell, "A direct method for obtaining the critical state in two and three dimensions", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 3, p. 034005, 2009.
- [CAM82] Campbell A. M., "A general treatment of losses in multifilamentary superconductors", *Cryogenics*, 1982, 22, 3-16.
- [CAP14] A. Capelluto, M. Nervi and P. Molino, "Algorithm for the Fast Calculation of Magnetic Fields Generated by Arc-Shaped Conductors with Rectangular Cross Section", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 24, no. 6, pp. 1-5, Dec. 2014.
- [CEL00] S Çelebi, A Öztürk, E Yanmaz, A.İ Kopya, "Determination of the material parameters of a melt-textured YBCO superconductor by DC magnetization analysis", *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 298, Issues 1–2, 2000.
- [CHA02] O. Chadebec, J.-L. Coulomb, J.-P. Bongiraud, G. Cauffet, P. Le Thiec, "Recent Improvements for Solving Inverse Magnetostatic Problem Applied to Thin Shells", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 1005-1008, March 2002.
- [CLE07] J. R. Clem et al., "AC losses in a finite z stack using an anisotropic homogeneous-medium approximation", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 12, 2007.
- [COL20] A. Colle, « Etude d'une machine supraconductrice à flux axial pour une application aéronautique », Thèse, Génie Electrique, Université de Lorraine, 2020.
- [COR99] C. Cordier, S. Flament, C. Dubuc, "A 3-D Finite Element Formulation for Calculating Meissner Currents in Superconductors", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 9, n°1, pp. 1-6, March 1999.
- [COR99-2] C. Cordier, S. Flament, C. Dubuc, "Finite-Element Calculation of Meissner Currents in Multiply Connected Superconductors", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 9, n°4, pp. 1-6, Dec. 1999.
- [COU81] J-L. Coulomb, « Analyse tridimensionnelle des champs électriques et magnétiques par la méthode des éléments finis », Thèse de doctorat ès-sciences physiques, INP Grenoble, 1981.
- [DIR22] W. Dirahoui, « Caractérisations numérique et expérimentale de défauts structurels dans les rubans supraconducteurs multicouches par thermographie inductive », Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, Oct. 2022.
- [DOU01] B. Douine, « Etude des pertes dans les supraconducteurs à haute température critique », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, novembre 2001.
- [DOU10] B. Douine, J. Leveque and S. Mezani, "Jc(B) Determination Method With the Help of the Virgin Magnetization Curve of a Superconducting Cylinder", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, no. 2, pp. 82-86, 2010.
- [DUL96] P. DULAR, "Modélisation du champ magnétique et des courants induits dans des systèmes tridimensionnels non linéaires", Thèse de Doctorat, Université de Liège 1996.
- [DUR53] E. Durand, « Electrostatique et Magnétostatique », Masson et Cie, 1953.
- [DUR68] E. DURAND, « Magnétostatique », Masson et Cie. 1968.
- [DUT99] B. Dutoit, M. Sjöström, and S. Stavrev. "Bi(2223) Ag sheathed tape Ic and exponent n characterization and modelling under DC magnetic field", *IEEE Transactions on Applied Supercond.*, vol. 9 (2), pp. 809-812, 1999.
- [EKI06] J. W. Ekin J W "Experimental Techniques for Low Temperature Measurements", Oxford University Press, 2006.
- [FAR19] M. Farhat, « Contribution à la modélisation 3D du champ électromagnétique dans les supraconducteurs à haute température critique », Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, Sept. 2019.
- [FAW23] Sara FAWAZ, "Etudes numériques et expérimentales de bobines supraconductrices HTC pour des applications en énergie électrique", Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, 2023.
- [FER15] P. FERROUILLAT, "Développement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique : application aux machines asynchrones en mouvement", Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2015.
- [FUM08] C. Fumeaux, D. Baumann, G. Almpanis, E.P. Li, R. Vahldieck "Finite-Volume Time-Domain Method for Electromagnetic Modelling: Strengths, Limitations and Challenges", *International Journal of Microwave and Optical Technology*, Vol. 3, n°3, July 2008.
- [GAI13] U. Gaitzsch et al., "Highly alloyed Ni-W substrates for low AC loss applications", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 8, pp. 85 024-85 029, Aug. 2013.
- [GAM11] B. Gamble, G. Snitchler, et T. MacDonald, "Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, n° 3, pp. 1083-1088, juin 2011.
- [GEO15] A. Gorospe et al., "Delamination Characteristics in Wide REBCO Coated Conductor Tapes Under Transverse Loading," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, pp. 1-5, Art no. 7200205, June 2015.
- [GöKI06] F. Gömöry et B. Klinčok, "Self-field critical current of a conductor with an elliptical cross-section", *Superconductor Science and Technology*, vol. 19, no. 8, p. 732-737, août. 2006
- [GRE97] L. Greengard and V. Rokhlin, "A new version of the fast multipole method for the Laplace equation in three dimensions," *Acta Numerica*, Vol. 6, pp. 229–269, 1997.
- [GRI07] F. Grilli and S. P. Ashworth, "Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 8, pp. 794-799, Aug. 2007.
- [GRI07-1] F. Grilli, R. Brambilla, L. Martini, "Modeling High-Temperature Superconducting Tapes by Means of Edge Finite Elements", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, n°2, 0500408, Apr. 2007.

- [GRI14] F. Grilli, F. Sirois, V. M. Zermeno, and M. Vojenčiak, "Self-consistent modeling of the IC of HTS devices: How accurate do models really need to be?," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 6, pp. 1–8, Dec. 2014.
- [GRI14] F. Grilli, E. Pardo, A. Stenvall, D. N. Nguyen, W. Yuan and F. Gömöry, "Computation of Losses in HTS Under the Action of Varying Magnetic Fields and Currents", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 1, pp. 78-110, 2014.
- [GRIL16] F. Grilli, "Numerical Modeling of HTS Applications", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, n°3, 0500408, Apr. 2016.
- [HAC99] W. Hackbusch, "A Sparse Matrix Arithmetic Based on H-Matrices. Part I: Introduction to H-Matrices", *Computing*, 62(2):89–108, Apr. 1999.
- [HAD00] A. Hadjidimos, "Successive overrelaxation (SOR) and related methods", *Journal of Computational and Applied Mathematics* 123, no. 1-2, pp. 177–199, Nov. 2000.
- [HAR17] K. S. Haran et al., "High power density superconducting machines – development status and technology roadmap", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 12, pp. 1-30, 2017.
- [HEN22] M-L. Henkel, F. Kasolis, M. Clemens, M. Günther, S. Schöps, "Implicit Gauging of Electromagneto-Quasistatic Field Formulations", *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 58, n°9, 7001604, Sept. 2022.
- [HIG17] K. Higashikawa, D. Uetsuhara, M. Inoue et al., "Characterization of Local Critical Current Distribution in Multifilamentary Coated Conductor Based on Reel-to-Reel Scanning Hall-Probe Microscopy", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, pp. 1-4, Art no. 6603004, June 2017.
- [HUA16] G.B. Huang, B. Douine, K. Berger, G. Didier, I. Schwenker, J. Lévêque, "Increase of stability margin in embedded DC electric grid with super-conducting stabilizer", *IEEE Trans. on Applied Supercond.*, vol. 26, no. 4, June 2016.
- [JAN09] J. W. Jansen, J. L. G. Jansen, J. M. M. Rovers, J. J. H. Paulides, E. A. Lomonova, "(Semi-) analytical models for the design of high-precision permanent magnet actuators", *ICS Newsletter*, Vol. 16, no. 2, Jul. 2009.
- [KIM62] Y. B. Kim, C. F. Hempstead, et A. R. Strnad, "Critical Persistent Currents in Hard Superconductors", *Physical Review Letters*, vol. 9, no. 7, p. 306-309, oct. 1962.
- [KOC12] S. Koch, H. Schneider, T. Weiland, "A Low-Frequency Approximation to the Maxwell Equations Simultaneously Considering Inductive and Capacitive Phenomena", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 48, no. 2, pp. 511-514, Feb. 2012.
- [KOV20] K Kovalev et al. "Development and testing of 10 kW fully HTS generator", *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1559, 2020,
- [KRA77] I. P. Krasnov, "Integral equation for magnetostatic problems with thin plates or shells *Soviet Physics*", *Technical Physics* 22 811-7, 1977.
- [KRA83] L. Krähenbühl, "La méthode des équations intégrales de frontière pour la résolution des problèmes de potentiel en électrotechnique, et sa formulation axisymétrique", *Thèse de Docteur Ingénieur*, Ecole Centrale de Lyon, 1983.
- [KWO03] O-M. Kwon, M. V. K. Chari, S.J. Salon, K. Sivasubramaniam, "Development of integral equation solution for 3-D eddy current distribution in a conducting body", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 39, no. 5, pp. 2612-2614, September 2003.
- [MAJ07] M. Majoros, L. Ye, A. V. Velichko, T. A. Coombs, M. D. Sumption, and E. W. Colling, "Transport AC losses in YBCO coated conductors", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 9, pp. S299–S304, 2007.
- [MAN95] J.B. Manges, Z.J. Cendes, "A generalized tree-cotree gauge for magnetic field computation", *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 31, no. 3, pp. 1342-1347, May 1995.
- [MAS02] P. MASSON, "Étude d'écrans supraconducteurs à haute température critique massifs. Application à la réalisation d'une machine électrique de conception originale", *Génie Electrique*, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2002.
- [MAT18] T. Matsuda, T. Okamura, M. Hamada et al., "Degradation of the Performance of an Epoxy Impregnated REBCO Solenoid due to Electromagnetic Forces," *Cryogenics*, vol. 90, pp. 47–51, Mar. 2018.
- [MEN09] H. Menana, "Modélisation 3D simplifiée pour l'évaluation non destructive des matériaux composites anisotropes", *Thèse de doctorat de l'Université de Nantes*, Nov. 2009.
- [MES19] G. Messina, E. Tamburo De Bella and L. Morici, "HTS Axial Flux Permanent Magnets Electrical Machine Prototype: Design and Test Results", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, pp. 1-5, 2019.
- [MEU16] G. Meunier, et al. "A–T Volume Integral Formulations for Solving Electromagnetic Problems in the Frequency Domain", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 52, no. 3, 7001404, March 2016.
- [MIK13] G. P. Mikitik, Y. Mawatari, A. T. S. Wan and F. Sirois, "Analytical Methods and Formulas for Modeling High Temperature Superconductors", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 2, pp. 1-20, 2013.
- [MOU10] R. MOULIN, "Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs", *Génie Electrique*, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [MUS09] A. Müsing, J. Ekman, and J. W. Kolar, "Efficient Calculation of Non-Orthogonal Partial Elements for the PEEC Method", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 45, no. 3, pp. 1140-1143, March 2009.
- [NGU11] T.-S. Nguyen, J.-M. Guichon, O. Chadebec, P. Labie, and J.-L. Coulomb, "Ships Magnetic Anomaly Computation With Integral Equation and Fast Multipole Method", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 47, no. 5, pp. 1414-1417, May 2011.
- [NGU14] T-T. Nguyen, G. Meunier, J-M. Guichon1, O. Chadebec, T-S. Nguyen, "An Integral Formulation for the Computation of 3-D Eddy Current Using Facet Elements", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 50, no. 2, 7013504, Feb. 2014.
- [NIC07] W. Nick, M. Frank, G. Klaus, J. Frauenhofer, et H.-W. Neumuller, "Operational experience with the world's first 3600 rpm 4 MVA generator at Siemens", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, n° 2, p. 2030–2033, 2007.