

DOSSIER CIFRE: THESE EDF- L2EP

Titre : Développement de méthodes adaptées à la modélisation électromagnétique de réseaux généraux de terre

✓ Directeur de thèse :	Yvonnick Le Menach (L2EP-ULille)
✓ Co-directeur :	Stéphane Clénet (L2EP-ENSAM)
✓ Encadrant industriel :	François-Xavier Zgainski
✓ Responsables scientifiques industriels :	Jean-Pierre Ducreux (EDF R&D), Jérémy NicolasGuizon (EDF Hydro / DTG)
✓ Laboratoire :	L2EP
✓ Ecole doctorale :	ENGSYS

CONTACT :

Yvonnick Le Menach : yvonnick.le-menach@univ-lille.fr

Stéphane Clénet : Stephane.CLENET@ENSAM.eu

François-Xavier Zgainski : francois.zgainski@edf.fr

Jean-Pierre Ducreux : jean-pierre.ducreux@edf.fr

1. CONTEXTE

Un réseau de terre sert à fixer le potentiel d'un site. Il contribue à dissiper dans le sol des courants de défaut de l'installation, des courants de foudre. Il permet à certaines protections de fonctionner. S'il est insuffisant ou dégradé (mauvaise résistance de terre), une élévation de potentiel du site, intolérable, peut apparaître lors d'un défaut Haute Tension. Ceci constitue un risque pour les personnes par tension de pas et/ou de contact et pour les installations. De plus, l'énergie de la foudre peut provoquer des dégâts directs sur le matériel et sur l'environnement. Les protections peuvent dysfonctionner.

Il est construit habituellement à partir d'un maillage de câbles de cuivre enterrés, de piquets ou électrodes forées (puits de terre), de liaisons de cuivre en fond de fouille ou immergées.

Le contrôle d'un réseau de terre est une obligation réglementaire. EDF Hydro dispose de ses propres méthodologies d'essai validées par des cabinets d'expertise¹. Ces vérifications sont réalisées initialement puis tous les dix ans. Elles passent par la mesure de l'impédance globale, une vérification de l'équipotentialité, et les mesures des tensions de pas et de contacts (aux besoins).

En ce qui concerne la mesure de l'impédance globale, la norme NF C 13-200 ainsi que les directives Types Postes RTE exigent une valeur inférieure ou égale à 1 Ω . Elle est réalisée à partir de la méthode dite à « Quatre pointes » ou « Quatre pointes sélective ». C'est une mesure très importante pour la sécurité des personnes et du matériel. Elle est en lien direct avec l'élévation de potentiel sur défaut.

¹ Comme Bureau Veritas (Aix en Provence)

On mesure l'impédance globale en étudiant sa variation en fonction de la fréquence entre 40Hz et 5kHz. L'objectif est de contrôler le comportement selfique du réseau de terre dans les hautes fréquences ou l'existence d'autre système de terre ou «terre de fait» raccordés en parallèle.. Cette analyse est très importante pour connaître le comportement du réseau de terre sur choc de type foudre.

Une mesure d'impédance sélective permet de mesurer l'impédance d'un puits seul ou d'exclure son impédance sur la mesure globale. Les points importants sont les mêmes que pour l'impédance globale.

On réalise aussi une variation en fréquence.

En conclusion sur la mesure d'impédance, cette mesure apporte des informations déterminantes sur la capacité et la réaction du réseau de terre sur défaut ou choc foudre. Elle est obligatoire pour réaliser une expertise de qualité sur le Réseau Général de Terre (RGT).

Pour ce qui est des mesures d'équipotentialité, en environnement Basse Tension, la norme NF C 15 105 indique un seuil max de 2Ω . D'après le retour d'expérience d'EDF Hydro, en environnement HTB, le seuil de $10\text{ m}\Omega$ garantit la sécurité de l'équipotentialité. La mesure passe par l'utilisation de la méthode 4 fils avec pince Kelvin avec injection en courant continu, la compensation en température à 25°C étant prise en compte (répétabilité des mesures).

Les mesures sont réalisées dans l'intégralité de l'aménagement par respect de la procédure validée en GAAT, GPF et Organisme de contrôle, car il s'agit d'un contrôle initial. (Aucun contrôle réalisé depuis de nombreuses années sur l'aménagement hydroélectrique)

Les mesures permettent de détecter essentiellement des problèmes de connexion, de faible section ou de non-raccordement au RGT. Des renforcements et resserrages suffisent à résoudre en grande partie les points faibles.

On peut aussi demander un renforcement du RGT, si on détecte un maillage faible.

Les mesures de tension de pas et de contact sont capables de confirmer ou infirmer un risque potentiel détecté avec les mesures d'équipotentialité (ces gains sont non négligeables en cas de travaux). Elles peuvent contrôler la véracité d'une étude. Ce sont les meilleures mesures pour la sécurité des personnes. Ces mesures permettent de valider ou non, le transfert de potentiel en cas de défaut. Elles sont complémentaires aux mesures d'équipotentialité et d'impédance.

Depuis plusieurs années, le calcul de champs électromagnétiques est utilisé dans l'industrie pour analyser le fonctionnement des dispositifs électromagnétiques (alternateurs, moteurs, transformateurs, évaluation non destructive par courants de Foucault, ...). L'étude de ces dispositifs électromagnétiques demande, notamment en vue d'un diagnostic précis, une très grande finesse de modélisation. Pour cela, les équations de Maxwell en électromagnétisme sont résolues à l'aide de méthodes numériques, comme la méthode des Éléments Finis (EF), pour obtenir des grandeurs d'intérêt locales ou globales. Dans le cas de la modélisation des réseaux de terre, des modèles de calcul de champs électromagnétiques existent dans des logiciels commerciaux. Cependant ces outils doivent être utilisés en boîte noire et ne permettent pas de maîtriser les éléments du calcul et, donc, de les faire évoluer à notre guise.

La simulation dans le métier RGT revêt un réel intérêt en partant du besoin d'optimisation et de conception (nous avons des mesures d'impédance de terre qui dépassent les seuils et qui nous obligent à trouver des solutions qui pourraient être obtenues par simulation).

La performance des outils de simulation EF disponible à EDF R&D donne aujourd'hui accès à une finesse de résolution spatiale qui est supérieure à ce que l'on rencontre dans le commerce. Ainsi, il devient pertinent de concevoir la géométrie réelle du dispositif à étudier comme l'une des variantes possibles de sa géométrie nominale. En général, cette variante doit être considérée comme incertaine dans la mesure où l'on ne dispose pas d'un relevé géométrique suffisamment précis de la configuration réelle. Il en est de même des paramètres décrivant le comportement électromagnétique des matériaux (conductivité électrique, permittivité ? électrique...) qui ne sont pas toujours accessibles à la mesure. Dans le cas de dispositifs industriels de réseaux de terre, il est important de pouvoir évaluer l'influence de ces incertitudes sur les résultats comparatifs aux essais de manière à mieux contrôler la précision de la mesure et d'en évaluer la fiabilité.

De la même manière, la nature d'un sol est a priori incertaine et les paramètres caractérisant sa forme sont probabilistes. La distribution de ces valeurs est alors fournie par un modèle de nature probabiliste (éventuellement physique) ou, plus directement, par une statistique de leur évolution historique. Il faut donc coupler ces modèles de description d'évaluation de sols au modèle EF décrivant le réseau de terre.

Si on souhaite évaluer par simulation les capacités atteignables de mesures d'impédance ou de tension de pas ou de toucher expérimentalement en vue de les améliorer ou faciliter la conception de nouveaux indicateurs, il est nécessaire que les modèles EF de réseaux de terre soient capables de prendre en compte les différentes sources d'incertitudes ainsi que des formes complexes de conducteurs dans le sol.

2. OBJECTIFS DE LA THESE

L'objectif est de développer un modèle de réseaux de terre prenant en compte des incertitudes de différentes natures lié aux matériaux, aux dimensions des composants du dispositif à tester. Ce modèle permettra :1) de valider des solutions techniques de réseau de terre 2) sera validé par comparaison essais/simulation des réseaux de terre sur les sites d'EDF et d'identifier les difficultés liées à la détection et à la caractérisation de ces mesures. Les méthodes développées permettront de minimiser l'erreur de mesure due aux incertitudes matériaux et géométriques intrinsèques. Elles permettront également de se positionner par rapport aux capacités de contrôle atteignables par la voie expérimentale. La simulation permettra de tester de nouvelles configurations : elle apportera une aide à la conception et une réponse à des écarts de mesures.

Ce travail s'effectuera dans le cadre d'une thèse CIFRE financée par EDF Hydro / DTG, L'étudiant développera et testera les méthodes dans l'environnement de code_Carmel² co-développé par EDF R&D et le L2EP et effectuera sa thèse dans le cadre académique du laboratoire commun LAMEL.

A l'issue de ces travaux, une méthodologie la plus générale possible sera dégagée pour construire un démonstrateur d'un outil métier validé par des mesures, simple et convivial à la portée des ingénieurs et techniciens de l'équipe RGT de EDF Hydro / DTG.

3. ETAT DE L'ART

Il est actuellement possible de modéliser finement le problème des réseaux de terre en utilisant la méthode des moments dans le cadre de paramètres parfaitement connus (outil commercial CDEGS®). Cette démarche est déjà utilisée par EDF R&D / LME [1].

En pratique, de nombreuses informations ne sont pas nécessairement accessibles comme les caractéristiques des matériaux du sol ou la position des grilles de MALT par rapport aux points de mesures, qui n'est pas toujours parfaitement maîtrisée. Les paramètres du modèle ne sont pas alors nécessairement ceux du réseau de terre réel et apparaissent alors comme incertains. Il peut apparaître alors un décalage entre simulation et expérience. Pour être donc plus réaliste, il est nécessaire de prendre en compte ces incertitudes. Dans le cadre de paramètres non déterministes, l'approche stochastique reste la plus utilisée dans le domaine de la modélisation EF en électromagnétisme basse fréquence pour la prise en compte des incertitudes [2-4]. Cette approche consiste à modéliser les paramètres d'entrée incertains par des variables aléatoires. Cette démarche est très difficilement, voire pas du tout, envisageable avec un outil commercial.

² <https://code-carmel.univ-lille.fr/>

Les grandeurs d'intérêt comme la mesure d'impédance deviennent alors des variables ou des champs aléatoires qu'il convient de caractériser. Cette caractérisation nécessite plusieurs étapes qui sont :

- a-le développement d'un modèle EF paramétrique
- b-le choix des paramètres d'entrée et leur modélisation
- c-la propagation des incertitudes au travers du modèle
- d-la caractérisation de la quantité d'intérêt et l'analyse de sensibilité

a Développement d'un modèle EF paramétrique

La prise en compte de paramètres incertains dans un modèle EF ne pose pas de difficulté particulière lorsque ceux-ci sont liés aux caractéristiques des matériaux en particulier dans le cas linéaire. En revanche, lorsqu'il s'agit de paramètres géométriques, le problème est tout autre puisqu'il faut être capable de prendre en compte le déplacement de frontières entre milieux de nature différente et où apparaissent des discontinuités des champs électromagnétiques. Une première approche pour la prise en compte de ce déplacement de frontières est de remailler le problème complètement ou partiellement. Cette méthode permet de traiter des déformations complexes. Toutefois, elle accroît les temps de calcul dû au remaillage et introduit un bruit numérique qui peut être particulièrement néfaste dans le cas de mesures sur les réseaux de terre si la quantité d'intérêt est du même ordre de grandeur que le bruit numérique [5]. Pour éviter le remaillage et limiter le bruit numérique, une autre approche consiste à déformer le maillage de manière à ce que celui-ci soit toujours conforme aux frontières. Dans ce cas la discontinuité des champs est naturellement prise en compte par contre la déformation du maillage doit être contrôlée de manière à limiter la variation du bruit numérique [6,7].

b-Choix des paramètres d'entrée et modélisation

Pour qu'un problème stochastique soit précis, il faut bien entendu que les lois probabilistes des paramètres d'entrée soient représentatives. Une détermination fine de ces lois nécessite un grand nombre de données qui ne sont pas souvent disponibles, on est alors amené à se reposer sur des « dire d'expert » pour déterminer ces lois. Pour que le modèle stochastique soit exploitable, il est nécessaire aussi que les paramètres aient une signification physique pour que l'on puisse, dans la phase de caractérisation et d'analyse de sensibilité (phase d), être capable d'établir simplement un lien physique entre la cause et l'effet. Par exemple, l'analyse de sensibilité permet d'identifier les paramètres d'entrée influençant la variabilité de la quantité d'intérêt. Si on souhaite réduire cette variabilité, il faut alors réduire la variabilité des paramètres influents. La mise en œuvre d'action visant à réduire cette variabilité seront d'autant plus simple à déterminer que le paramètre est « physique » (une dimension, une caractéristique de matériau...) plutôt qu'un simple objet mathématique, issu par exemple d'une combinaison linéaire de paramètres physiques.

Le choix des paramètres d'entrée est donc un élément important qu'il convient d'effectuer de manière appropriée pour bien poser le problème stochastique au sens où celui-ci soit précis (bon modèle probabiliste des paramètres d'entrée) et exploitable (paramètres ayant un sens physique).

D'autres éléments sont aussi à prendre à compte comme la facilité avec laquelle il est possible d'intégrer ces paramètres dans le modèle développé dans la *phase a* ainsi que la réduction du nombre de paramètres pour limiter les temps de calcul dans la *phase c*.

Dans le cadre des réseaux de terre, les paramètres ont toujours une signification physique et portent soit sur les caractéristiques de matériaux soit sur des dimensions de conducteurs. A ce jour il ne semble pas y avoir de modèles réalistes de génération de sols avec conducteurs paramétrés couplés à un modèle EF pour le calcul de réseaux de terre.

c-Propagation d'incertitudes

Dans le cas d'un modèle EF, il existe différentes techniques pour propager les incertitudes sur les paramètres d'entrée pour caractériser la grandeur d'intérêt qui est aléatoire. Il existe les techniques

d'échantillonnage de type Monte Carlo permettant d'estimer différentes statistiques de la grandeur d'intérêt. Ces méthodes sont très robustes et faciles à mettre en œuvre mais peuvent conduire à des temps de calcul élevés du fait de vitesse de convergence faible [8]. Il existe des méthodes de perturbation qui consiste à effectuer un développement de Taylor du modèle EF autour de la moyenne des paramètres. Si la variabilité des paramètres d'entrée est réduite, ces approches permettent d'obtenir de bons résultats concernant les moments ou de ce qui se passe autour de la moyenne. Mais ces démarches peuvent être très peu fiables quand on s'intéresse aux queues de distribution par exemple. Enfin, il y a les techniques d'approximation qui consistent à construire un métamodèle en utilisant des fonctions d'approximation adaptées de type Chaos Polynomial [9,10]. Ces méthodes sont bien adaptées si la quantité d'intérêt est une fonction assez régulière des paramètres d'intérêt. Cette méthode peut aussi atteindre ces limites si le nombre de paramètres est trop élevé conduisant à une croissance exponentielle du nombre de calculs nécessaires mais des techniques peuvent permettre de réduire ces calculs en utilisant des approches adaptives basées sur des approximations creuses par exemple.

Dans le cadre du LAMEL, les méthodes intrusives et non-intrusives ont été analysées et l'approche non-intrusive se révèle plus compétitive [14] dans le cas où le nombre de paramètres d'entrée est plus grand que 6. En effet, les méthodes intrusives (implémentées dans code_Carmel spectral) limitent le nombre de paramètres influents et on ne connaît pas a priori leur nombre.

On privilégiera donc les méthodes non-intrusives. Parmi ces dernières, les méthodes familières sont des méthodes d'approximation utilisant une base polynomiale multidimensionnelle (Chaos Polynomial) dont les coefficients sont calculés par différentes techniques comme les méthodes de Régression ou Projection utilisant des techniques de troncation hyperbolique [15] ou de bases « creuses » [16] pour limiter l'effet de « fleau de la dimension ». La plateforme OPENTURNS, développée par EDF, s'inscrit dans ce cadre et sera donc utilisée de façon privilégiée.

Dans le cas des réseaux de terre, les techniques d'échantillonnage et d'approximation peuvent être mises à profit pour propager les incertitudes sans qu'apparaisse de difficultés majeures mais toujours avec un nombre de paramètres inférieur à la dizaine [4,11-13]. Pour un nombre plus élevé de paramètres, aucune méthodologie n'a été proposée.

d-Characterisation de la grandeur d'intérêt et analyse de sensibilité

La propagation d'incertitudes ayant été effectuée, il est alors possible d'évaluer certaines caractéristiques de la grandeur d'intérêt comme la moyenne, l'écart type, la probabilité d'être au-dessus d'un certain seuil... Une analyse de sensibilité globale peut aussi être effectuée et permet de déterminer les paramètres d'entrée qui contribuent le plus à la variabilité de la quantité d'intérêt. Cette analyse peut se faire par exemple au travers de la détermination des indices de Sobol par exemple si les paramètres d'entrée sont indépendants. Cette analyse de sensibilité peut être mise à profit par exemple pour réduire la variabilité de la quantité d'intérêt en ciblant la réduction de variabilité sur les paramètres les plus influents.

Dans le cas de l'évaluation non destructive par courants de Foucault, il a été montré dans [10] l'apport de l'approche stochastique pour déterminer quelles caractéristiques de matériau il fallait mieux connaître pour réduire l'incertitude sur la quantité d'intérêt et ainsi améliorer la précision du modèle. Dans [4], une approche par modèle a été proposée pour évaluer la PoD (Probabilité of Detection) qui correspond à la probabilité de détecter un défaut compte tenu des incertitudes du processus de mesure. Une analyse de sensibilité sur cette grandeur a permis de déterminer le paramètre du processus de manière à pouvoir améliorer la PoD.

4. VEROUS SCIENTIFIQUES

Au vu de l'état de l'art, la prise en compte des incertitudes liés aux caractéristiques des matériaux sous-entend deux difficultés. La première consiste à déterminer les grandeurs physiques caractéristiques du sol (en fonction de l'hydrométrie, par exemple). La littérature sur ce sujet est riche à la R&D d'EDF et en général [35]. Un second point ne pose actuellement pas de problème puisque on se place pour les réseaux de terre dans un cadre linéaire électriquement parlant. La prise en compte d'incertitudes géométriques liées aux dimensions des éléments (tube, plaque ...) à tester ainsi que liées à la position et aux caractéristiques physiques ont été partiellement traitées dans la littérature. Les techniques de déformation de maillages comme celles présentées dans [6] devraient pouvoir être appliquées. Par contre, la prise en compte de forme de grille de MALT réaliste reste à ce jour un problème ouvert dans la modélisation électromagnétique des réseaux de terre et est un véritable verrou pour atteindre les objectifs fixés dans la thèse. Pour le lever et en se basant sur la littérature et les experts de réseaux de terre, il faudra tout d'abord proposer un modèle paramétrique de génération de grilles qui permettent de générer des formes de tubes de nature et de niveau de corrosion différente. Les paramètres de ce modèle devront avoir une signification physique et être en particulier liés au niveau de « vieillissement » de la grille de MALT pour pouvoir permettre une réelle interprétation des résultats obtenus par le modèle de réseaux de terre. Ce modèle sera ensuite couplé au modèle EF de sol pour le réseau de terre. Cela nécessitera la mise en œuvre de méthodes numériques particulière basées sur des techniques de couche mince « stochastiques » prenant en compte cet aspect partiellement conducteur et mal connu de la grille. La complexité du problème conduira à un modèle avec un grand nombre de paramètres incertains qui donnera lieu à des temps de calcul prohibitifs lors de la phase de propagation d'incertitudes. Il sera donc nécessaire de mettre en œuvre des méthodes permettant de sélectionner les paramètres les plus influents sur la base de dire d'expert ou de méthodes peu consommatrice de temps de calcul comme des approches sur la variation d'un paramètre (One at a Time) par exemple. Cette étape d'analyse étant effectuée, on appliquera différentes méthodes disponibles dans la littérature pour déterminer celle qui semble la plus appropriée pour effectuer la propagation d'incertitudes.

5. SITUATION DES TRAVAUX DANS LE LABORATOIRE PARTENAIRE (L2EP)

Le travail s'effectuera en collaboration avec le L2EP, qui est un laboratoire de Génie Electrique, et plus particulièrement au sein de l'équipe Outils et Méthodes Numériques (OMN). Cette équipe travaille sur le développement de modèles numériques et de méthodologies efficaces pour la conception optimale et l'étude de dispositifs électromagnétiques dans leur environnement. Elle est composée de 12 enseignants – chercheurs, 6 post-docs, 14 doctorants et 2 ingénieurs de recherche.

L'équipe OMN collabore depuis de nombreuses années avec EDF R&D dans le cadre du laboratoire commun LAMEL (Laboratoire de Modélisation du Matériel Electrique) qui a été officiellement créé en 2006 pour une durée de quatre ans. Il a été renouvelé en 2010 puis en 2014 et 2018 pour 5 années.

Ce laboratoire commun a pour objectifs en particulier :

- d'effectuer des recherches avancées en modélisation numérique,
- de capitaliser le savoir-faire au sein de code_Carmel, code de calcul de champs électromagnétiques par la méthode des éléments finis.

Les travaux de thèse s'intègrent donc parfaitement dans le cadre du laboratoire commun.

Par ailleurs, l'équipe OMN possède une longue expérience dans le domaine de la quantification d'incertitudes et en particulier sur la résolution numérique des problèmes stochastiques en ingénierie. Les premières méthodes de résolution ont été introduites dans le domaine des mathématiques appliquées, de la mécanique et du génie civil dans les années 90. Dans le domaine du calcul de champ électromagnétique basse fréquence, l'équipe OMN a été l'un des précurseurs dans le développement et l'application de l'approche stochastique. Le travail de recherche sur la quantification des incertitudes a commencé en 2004 avec la thèse de R. Gaignaire (doctorat présenté en 2008) où un modèle stochastique en électromagnétisme statique a été développé [19,20] dans le cadre d'une thèse avec EDF R&D. Par la suite, quatre autres doctorants du L2EP ont poursuivi dans ce domaine :

-K. Beddek sur l'extension des travaux de R. Gaignaire en régime quasi-statique avec une application à l'END-CF. Cette thèse a été financée par EDF R&D et le programme belge IPOLFE IAP [11-12,17]. Il est à noter que K. Beddek travaille au sein de EDF R&D

-H. Mac sur les incertitudes de nature géométrique pour prendre en compte les imperfections de fabrication sur les performances des machines électriques. Ce travail a été effectué dans le cadre d'une bourse CIFRE avec la société VALEO [18-20].

-R. Ramarotafika sur le développement de modèles stochastiques des matériaux ferromagnétiques doux des machines électriques [21-23].

-S. Liu sur l'influence des incertitudes sur les dimensions des alternateurs à griffes sur leurs performances. Ce travail a été effectué dans le cadre d'une bourse CIFRE avec la société VALEO [24].

Des recherches ont été effectuées sur l'application de l'approche stochastique dans de nombreux domaines comme les machines électriques, les capteurs magnétoélectriques ou les piles à combustible [25-28]. On peut noter aussi un travail collaboratif avec l'université de Biskra dans le cadre de la thèse de Djamel Abdelli et de la détermination de la Probabilité de Détection [13]. Le L2EP a également travaillé intensivement sur l'estimation des erreurs numériques pour prendre en compte à la fois les erreurs de discrétisation des dimensions spatiales (dus au maillage) et des dimensions aléatoires (dus à la troncature du chaos polynomial) avec une équipe de recherche en mathématiques appliquées (P. Painlevée) [29].

Plus récemment, une méthode de déformation de maillage basé sur l'utilisation de fonctions radiales a été testée pour l'END-CF permettant de réaliser des fissures de forme complexe en limitant la dégradation de la forme des éléments source d'erreur numérique [6].

6. CV SYNTHETIQUE DU DIRECTEUR DE THESE

Yvonnick Le Menach est Professeur des Universités depuis 2016 à l'université de Lille (FST, département EEA et L2EP

1999-2002: Maître de conférences à l'université d'Artois (I.U.T de Béthune et LSEE)

Diplômes universitaires

2012 :Habilitation à diriger des recherches en Génie Électrique de l'université de Lille 1

Contribution à la Modélisation numérique des systèmes électrotechniques 3D

1999 :Thèse de Doctorat en Génie Électrique de l'université de Lille 1

Contribution à la Modélisation numérique des systèmes tridimensionnelle électrotechniques :

Responsabilités recherches

Depuis 2015 : Membre nommé au conseil scientifique du L2EP

Depuis 2016 : Coordinateur de la tâche 4 du projet CE2I

Depuis 2016 : Membre élu au conseil du laboratoire L2EP

Responsabilités administratives collectives

Depuis 2015 Directeur du LAMEL laboratoire commun entre EDF et le L2EP

Depuis 2016 Directeur adjoint du département EEA en charge de pôle Energie Energie

Depuis 2020 Chargé de mission patrimoine sur la cité scientifique d'Ulille

Contribution à la valorisation de la recherche

- Développement du code_Carmel
- Participation à l'organisation de conférences NUMELEC 2006, EPNC 2008, EPE 2013 Compumag 2019
- Membre du Steering Committee de EPNC
- Membre des comités de lecture pour les conférences internationales COMPUMAG et CEFC
- Relecteur pour les revues internationales IEEE Transactions on Magnetics et European Physics Journal (Applied Physics)

Bilan Chiffré

11 Direction de thèse de doctorat (1 en cours)

9 Encadrement de thèse de doctorat

10 Participation à jurys de thèse hors direction et encadrement

59 publications de revues internationales de rang A

81 communications des conférences internationales à comité de lecture.

7. PLANNING PREVISIONNEL ET ELEMENTS CONTRACTUELS

a Répartition géographique des travaux

Compte tenu de la partie importante réservée à la modélisation dans code_Carmel et traitement des incertitudes au L2EP (et en partie à EDF R&D) et de la présence de compétences en réseaux de terre à EDF Hydro, il est prévu que le doctorant passe 50% de son temps au L2EP, 5% à EDF R&D et 45% à EDF Hydro / DTG. Une attention particulière sera portée lors du lancement de la thèse afin de construire une base de travail solide entre le doctorant et le directeur du thèse.

Le lotissement se fait sur la base d'un travail annuel résumé ci-dessous. Certaines actions pourront être menées en parallèle.

b Planning

Le travail se décomposera en cinq étapes principales qui seront (T0 marque la date du début de la thèse):

- T0 à T0+6 mois : Une première partie de l'état de l'art sera effectuée sur l'analyse de la physique des phénomènes, de la bibliographie des documents émis par LME. Quelques exemples de textes figurent en [30-34] Une seconde partie portera sur la modélisation de réseaux de terre par la méthode EF (formulation en potentiel, prise en compte des tubes filaires, couches de sol...) ainsi que la définition et la simulation par Code_Carmel de cas académiques et industriels qui serviront d'exemples de test et d'application durant toute la durée de la thèse (calage et validation des modèles). Cette première étape consiste à choisir, en fonction de son champ d'application potentiel, le modèle mathématique du phénomène mis en jeu et son mode de résolution. Dans notre cas, ce modèle sera basé sur la résolution des équations de l'électromagnétisme basse fréquence par la méthode des éléments finis. Il faudra développer et implanter des méthodes permettant de prendre en compte les propriétés des conducteurs filaires.
En parallèle, un état de l'art sur les techniques de propagation d'incertitudes dans le cas de modèles EF sera effectué avec une prise en main d'outils comme OPENTURNS³ existant sous la plateforme SALOME. Enfin, une ou deux prestations sur site avec l'équipe RGT de DTG sont à prévoir.
- T0+6 mois à T0+12 mois : Il s'agira de développer un modèle paramétrique de génération de d'éléments filaires dont la représentation finale soit compatible avec une prise en compte par un modèle EF. Ce modèle pourra se baser sur des modèles issus de la littérature. Cette partie est surtout théorique.
- T0+12 mois à T0+24 mois : Durant cette étape, le modèle de génération de tubes ou d'éléments filaires sera couplé avec code_Carmel. Il faudra alors être capable de prendre en compte des arêtes représentant un conducteur traversé par une densité de courant. Dans le cas où le maillage est conforme avec l'arête (c'est-à-dire que l'arête est constituée d'un ensemble d'arêtes du maillage), l'imposition d'une telle condition n'est pas complexe et peut être immédiate pour certaines formulations. Les méthodes développées seront testées sur des exemples académique et industriel en tirant partie du retour d'expérience acquis par EDF sur le terrain (LME et DTG). La prise en compte de la conductivité partielle et probabiliste de cette partie conductrice sera aussi abordée en fonction du temps disponible.
- T0+24 mois à T0+30 mois : Il s'agira durant cette étape de mettre en place une méthodologie de traitement d'un problème industriel réseau de terre. Il faudra tout d'abord compléter le modèle électromagnétique développé dans l'étape précédente de manière à prendre en compte des incertitudes sur les caractéristiques du sol, les dimensions des couches du sol et aussi la position de la grille de MALT. Autant la prise en compte des incertitudes sur les matériaux est immédiate puisque on travaille en régime linéaire, autant celles sur la géométrie vont nécessiter la mise en œuvre de technique de déformation de maillage. A ce stade, toutes les briques seront disponibles pour traiter un problème industriel prenant en compte les divers types d'incertitudes que l'on peut rencontrer en modélisation des réseaux de terre. Il faudra mettre en place une méthode permettant de déterminer parmi les paramètres incertains ceux qui sont les plus influents. Cette méthode sera basée sur l'exploitation de dires d'experts et d'outils rapides d'analyse utilisant le modèle de réseau de terre. Ensuite, il faudra mettre en œuvre la méthode de propagation en se basant sur les

³ <https://openturns.github.io/openturns/latest/index.html>

Rayonnement scientifique prévu au démarrage de la thèse

Conférence et/ou lieu de publication	Echéances
CEFC 2024	T0+12
IEEE Transactions on Magnetics	T0+18
Compumag 2025	T0+24
IEEE Transaction on Magnetics	T0+30

c Livrables

Les livrables envisagés sont les suivants :

- L1.** Compte rendu de réunion de lancement **T0**
- L2.** CR bibliographique sur l'expérience acquise coté LME et la modélisation par EF des conducteurs filaires et sur la propagation d'incertitudes **T0+6mois**
- L3.** Rapport annuel (premier modèle théorique paramétrique de génération de conducteurs filaires): **T0+12mois** –
- L4.** Rapport annuel (implémentation de modèles paramétriques de sols et de conducteurs filaires dans code_Carmel) + Livraison d'une première version du logiciel: **T0 + 24 mois**
- L5.** CR sur la prise en compte des incertitudes dans le modèle paramétrique + Livraison d'une seconde version du logiciel: **T0 + 30 mois**
- L6.** Manuscrit de thèse + Livraison de la version finale du logiciel: **T0 + 36 mois**

c Comité Technique

Le comité technique de suivi de la thèse sera constitué,

- Pour le laboratoire : Yvonnick Le Menach (directeur de thèse), **XXXXXXX** (co-encadrants)
- Pour EDF : François-Xavier Zgainiski (encadrant), Jean-Pierre DUCREUX, Jérémy Nicolas-Guizon (co-encadrants).

Le comité technique se réunira autant de fois que nécessaire et a minima 3 fois par an. Il donnera lieu à des CR d'avancement.

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Baraton, In. Adouni ,“ Étude et optimisation du réseau de terre de EPR de Penly en vue d'assurer la sécurité des personnes en cas de court-circuit 50Hz”, note technique EDF R&D, 6125-2014-2021-03563-FR, aout 2022.
- [2] A. Galetzka, Z. Bontinck, U. Römer and S. Schöps, "A Multilevel Monte Carlo Method for High-Dimensional Uncertainty Quantification of Low-Frequency Electromagnetic Devices," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 8, pp. 1-12 (2019)
- [3] L. Codecasa and L. Di Rienzo, "Model order reduction approach to uncertainty quantification in eddy current problems," *2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy (ACES)*, (2017)
- [4] L. Le Gratiet, B. Iooss, G. Blatman, T. Browne, S. Cordeiro, B. Goursaud, “Model assisted probability of detection curves: New statistical tools and progressive methodology”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 36 (2017)

- [5] G. Krebs, A. Abakar and S. Clenet, "Comparison of Error Estimators in Eddy Current Testing," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 968-971 (2009)
- [6] T. Henneron, A. Pierquin and S. Clénet, "Mesh Deformation Based on Radial Basis Function Interpolation Applied to Low-Frequency Electromagnetic Problem," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 6, pp. 1-4, (2019)
- [7] Mac, H.; Clénet, S.; Mipo, J.C., "Transformation method for static field problem with Random Domains", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, N°5, (2011)
- [8] Hammersley, J. M.; Handscomb, D. C. , *Monte Carlo Methods*, Chapman and Hall, London & New York, (1964)
- [9] Xiu, D.; Karniadakis, G, The Wiener Askey polynomial chaos for stochastic differential equations, *SIAM J. Sci. Comput.*, Vol. 24, No. 2, pp. 619-644, (1999)
- [10] Le Maitre O. P.; Knio O.M.; Najm H.N.; Ghanem R.G., Uncertainty propagation using Wiener-Haar expansions, *Journal of computational Physics*, N. 197, pp 28-57, (2004)
- [11] Beddek K.; Clenet S.; Moreau O.; Le Menach Y. , "Solution of large stochastic finite element problems-application to ECT-NDT", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, N. 5 (2013)
- [12] Beddek, K.; Clenet, S.; Moreau, O.; Costan, V.; Le Menach, Y.; Benabou, A., "Adaptive method for non-intrusive spectral projection application on a stochastic eddy current NDT problem", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, N°2, (2012)
- [13] D. E. Abdelli, T. T. Nguyen, S. Clénet and A. Cheriet, "Stochastic Metamodel for Probability of Detection Estimation of Eddy-Current Testing Problem in Random Geometric," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 6, pp. 1-4 (2019)
- [14] Nguyen, T.T., Mac, D.H., Clenet, S., Uncertainty Quantification Using Sparse Approximation for Models with a High Number of Parameters: Application to a Magnetolectric Sensor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 52, N. 3 (2016)
- [15] G. Blatman and B. Sudret. «Adaptive sparse polynomial chaos expansion based on Least Angle Regression ». *J. Comput. Phys.*, 230, pp. 2345–2367, 2011.
- [16] Thu Trang NGUYEN, Hung MAC, Stéphane CLENET and Eilin GUILLOT, "Global sensitivity analysis applied to an hydrogenerator," *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, Miami, FL, 2016.
- [17] Beddek, K.; Le Menach, Y.; Clenet, S.; Moreau, O., "Stochastic Spectral Finite Element Method in static electromagnetism using vector potential formulation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, N°5, (2011)
- [18] Mac H., Clenet S., Mipo J.C., Tsukerman I., "A priori error indicator in the transformation method for problems with geometric uncertainties", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, N. 5, pp. 1597-1600 (2013)
- [19] Mac, H., Clénet, S., Mipo, J.C., "Comparison of two approaches to compute magnetic field in problems with random domains", *IET Science, Measurement & Technology*, doi: 10.1049/iet-smt.2011.0123, (2012)
- [20] Mac, H.; Clénet, S.; Mipo, J.C.; Moreau, O., "Solution of Static Field Problems with Random Domains", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, N°8, (2010)
- [21] Ramarotafika, R.; Benabou, A.; Clénet, S., Stochastic Jiles-Atherton model accounting for soft magnetic material variability, *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 32 (5) (2013)
- [22] Ramarotafika, R.; Benabou, A.; Clénet, S., "Stochastic Modeling of Soft Magnetic Properties of Electrical Steels: Application to Stators of Electrical Machines", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, N. 10 (2012)
- [23] Ramarotafika, R.; Benabou, A.; Clénet, S.; Mipo, J.C., "Experimental characterization of the iron losses variability in stators of electrical machines", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, N°4 (2012)
- [24] Liu, S., Mac, H.D., Clenet, S., Coorevits, T., Mipo, J.-C., Study of the Influence of the Fabrication Process Imperfections on the Performance of a Claw Pole Synchronous Machine Using a Stochastic Approach, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 52, N. 3 (2016)

- [25] Belahcen, A., Rasilo, P., Nguyen, T.-T., Clénet, S., Uncertainty propagation of iron loss from characterization measurements to computation of electrical machines, *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 34, N. 3, pp. 624-636 (2015)
- [26] Offermann, P., Mac, H., Nguyen, T.T., Clénet, S., De Gersem, H., Hameyer, K., Uncertainty quantification and sensitivity analysis in electrical machines with stochastically varying machine parameters, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.51, N.3 (2015)
- [27] TT Nguyen, S Clénet, "Influence of Material and Geometric Parameters on the Sensor Based on Active Material"s, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, N.3 (2018)
- [28] D Zhou, TT Nguyen, E Breaz, D Zhao, S Clénet, F Gao, "Global parameters sensitivity analysis and development of a two-dimensional real-time model of proton-exchange-membrane fuel cells", *Energy Conversion and Management* 162 (2018)
- [29] Mac, D.H., Tang, Z., Clénet, S., Creusé, E., "Residual-based a posteriori error estimation for stochastic magnetostatic problems", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 289, pp. 51-67 (2015)
- [30] G. Riquel, "PROTECTION ELECTRIQUE DE CHANTIER PAR POSE DE MALT Partie 1 : Phénomènes d'induction », note technique EDF, H-M23-2006-02294-FR, 10/07/2006.
- [31] G. Riquel, « MONTEE EN POTENTIEL DU SOL SUITE A DEFAUT PHASE-TERRE ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS SUR LA LIGNE 225 KV BREUIL-MOLE 2 », note technique EDF, H-M23-2012-01514-FR, 07/09/2012.
- [32] G. Riquel, « EVALUATION DES MONTEES EN POTENTIEL DE TERRE SUITE A UN DEFAUT MONOPHASE LORS DES TST SUR LE RESEAU AERIEN HTA », note technique EDF, H-M23-2008-01186-FR, 27/06/2008.
- [33] P. Baraton, « Etude de la montée en potentiel du réseau de terre d'EPR FLA3 suite à un coup de foudre », note technique EDF, H-M2A-2007-03471-FR, 16/04/2008.
- [34] P. Baraton, I. Adouni, "Étude et optimisation du réseau de terre de EPR de Penly en vue d'assurer la sécurité des personnes en cas de court-circuit 50Hz », note technique EDF, 6125-2014-2021-03563-FR, 22/08/2022.
- [35] X. Legrand « Modélisation des systèmes de mise à la terre des lignes électriques soumis à des transitoires de foudre », Thèse de doctorat présentée à l'Ecole Centrale de Lyon, décembre 2007.