



Thèse Laboratoire IADI – Inserm U1254, Université de Lorraine

Simulation électromagnétique pour l'étude de la compatibilité IRM des dispositifs médicaux

Résumé

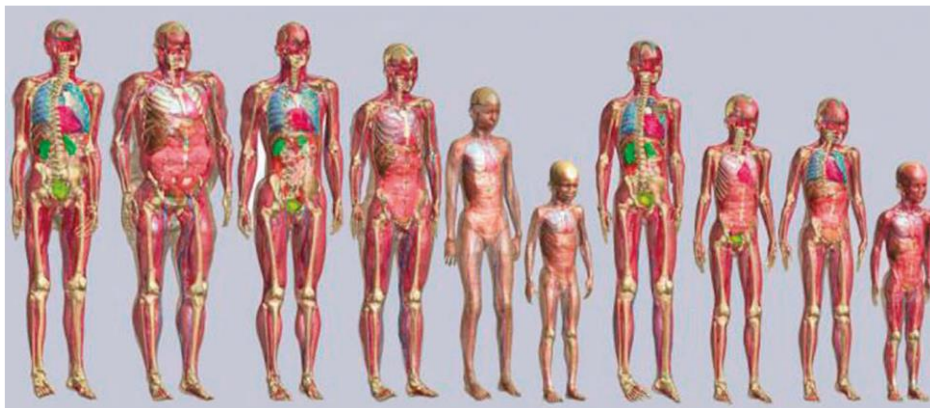
Le projet de thèse vise à développer et valider des méthodes de simulation électromagnétique pour l'étude de la sécurité de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) en présence de dispositifs médicaux implantés. L'imageur IRM utilise des ondes radiofréquences (RF) qui induisent un échauffement dans les tissus. La simulation électromagnétique permet de prédire ces échauffements, qui sont augmentés en présence de matériaux conducteurs tels que des dispositifs implantés. Les progrès récents dans ce domaine se traduisent dans les normes internationales, qui recommandent de plus en plus le recours aux techniques de simulation. L'objectif de la thèse est d'étudier différents aspects méthodologiques concernant la précision des simulations, la sensibilité au modèle de patient (niveau de détails anatomiques, résolution, valeurs de propriétés électriques des tissus, validité des résultats pour différentes morphologies de patients, etc...), la méthodologie d'intégration du modèle de dispositif (simulation conjointe ou séparée du patient et du dispositif), et la relation entre les mesures expérimentales (sur objets tests) et les résultats de la simulation.

Summary

The PhD project aims at developing and validating electromagnetic simulation methods for investigating magnetic resonance imaging (MRI) safety in the presence of implanted medical devices. The MRI scanner uses radiofrequency (RF) waves which induce heating in the tissues. Electromagnetic simulation allows this heating to be predicted, which is increased in the presence of conductive material such as implanted devices. Recent progress in this field are translated into the international standards, which increasingly recommend implementing simulation techniques. The objective of the PhD is to study various methodological aspects regarding the accuracy of simulation, the sensitivity to the patient model (level of anatomical details, resolution, electrical property values in the tissues, validity of the results for different patient morphologies etc.), the methodology of integration of the device model (combined or separate simulation), and the relation between experimental measurements (on test objects) and simulation results.

Contexte scientifique

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une modalité d'imagerie médicale sûre pour le patient, qui n'utilise pas de rayonnements ionisants. Cependant elle utilise des champs électromagnétiques dynamiques, dans la gamme des radiofréquences (RF, 128 MHz sur un système IRM clinique à 3T), afin de générer le signal à l'origine des images. Il est donc nécessaire de limiter la quantité d'énergie RF absorbée par les tissus, qui est caractérisée par le débit d'absorption spécifique (DAS). La présence de dispositifs accessoires ou implantés pendant l'examen IRM crée un risque additionnel d'échauffement dans les tissus voisins (à l'interface avec le dispositif), où le champ électrique est maximisé, causant une augmentation du DAS dans les tissus. Des normes internationales ont été développées afin d'évaluer ces risques d'échauffement, que ce soit dans le cas de dispositifs passifs (ASTM F2182) ou actifs (ISO/TS 10974). Une mesure expérimentale de l'élévation de température locale peut être réalisée en immergeant le dispositif dans un gel test simulant le patient. Cependant, un tel banc de test ne permet pas de reproduire les conditions exactes d'une acquisition réelle chez un patient. C'est pourquoi la simulation électromagnétique est de plus en plus utilisée en complément, et est de plus en plus recommandée dans les dernières évolutions des normes (ASTM F2182-19e2, ISO/TS 10974:2018). De telles simulations requièrent un modèle de l'antenne RF d'émission du système IRM, un modèle du dispositif médical (1,2), mais aussi un modèle du patient (3,4), incluant la géométrie des organes, les classes de tissus et les valeurs des propriétés électriques (conductivité et permittivité). Des bases de données de modèles humains existent (IT'IS, www.itis.ethz.ch). Cependant, les valeurs propriétés électriques pour un tissu donné sont les mêmes pour tous les modèles, et sont basées sur des valeurs de la littérature, principalement mesurées ex-vivo ou chez l'animal (5).



Exemple de base de données de modèles humains utilisés pour la simulation électromagnétique en IRM (www.itis.ethz.ch)

Originalité et perspectives scientifiques

Le projet de thèse sera réalisé en collaboration avec la société Healtis (voir section Environnement de travail ci-après).

L'objectif de la thèse est de développer et de valider une méthodologie pour la simulation électromagnétique du corps humain en IRM, dans le but d'étudier la sécurité IRM des dispositifs médicaux. En particulier la sensibilité au modèle de patient et aux valeurs de propriétés électriques des tissus sera étudiée. Les travaux récents suggèrent un effet des propriétés électriques relativement important pour les nouveau-nés par rapport aux adultes pour l'imagerie cérébrale (6). Peu d'études de ce genre existent dans le cas de l'IRM en présence de dispositifs médicaux implantés.

Ce projet de thèse s'inscrit dans le projet ANR ELECTRA (Imagerie des propriétés électriques par IRM : application à la compatibilité IRM des dispositifs médicaux), dans lequel de nouvelles méthodes sont développées afin de cartographier les propriétés électriques in-vivo (7). La nouvelle base de données



qui sera constituée dans ce projet offrira de nouvelles perspectives de simulation sur des modèles conducteurs du corps humain personnalisés.

Description sommaire des étapes de thèse

Le début de la thèse sera dédié à l'étude des outils de simulation et de mesure expérimentale disponibles au laboratoire, chez le partenaire industriel (Healtis) et dans la littérature.

La première étape consistera à développer et valider la méthodologie de simulation corps entier (sans le dispositif médical). Le modèle existant d'antenne de transmission du système IRM 3T clinique disponible à Nancy (3T Prisma, Siemens Healthcare, Erlangen) sera validé en comparant des cartes de champ magnétiques obtenues en simulation puis mesurées par IRM (séquences de cartographie B1+). Dans un premier temps, on utilisera un objet test dont les propriétés électriques sont connues. Les simulations seront ensuite réalisées avec différents modèles issus des bases de données existantes (telles que ceux de la fondation IT'IS) et issus de la base de données ELECTRA, qui prévoit d'inclure 120 sujets, répartis en 3 tranches d'âges : 6-12 ans, 20-40 ans, >70 ans. Dans cette base de données, les données anatomiques pourront être utilisées avec des valeurs de propriétés électriques homogènes, spécifiques à chaque classe principale de tissu, ou en utilisant directement des cartes de propriétés électriques in-vivo. Des outils de segmentation automatiques ou semi-automatiques pourront être mis en œuvre pour identifier les classes de tissus. Une cartographie du champ d'émission mesurable par IRM (B1+) sera également incluse chez chaque sujet pour la validation. Finalement la relation entre le DAS et l'élévation de température réelle sera prise en compte, par exemple en utilisant l'équation de la chaleur dans les tissus biologiques (équation de Penne), prenant en compte l'effet de la perfusion des tissus.

Dans une étape suivante, la simulation sera adaptée pour l'étude des dispositifs passifs. La norme ASTM F2182 requiert des mesures expérimentales dans un gel test homogène aux propriétés connues, avec et sans le dispositif. Les élévations de températures mesurées permettent ainsi d'obtenir l'échauffement local pour un champ électrique incident donné. Dans un patient réel, le champ électrique vu par le dispositif sera différent en raison des hétérogénéités des propriétés tissulaires dans le corps. En estimant le champ incident dans le patient, par simulation électromagnétique du patient sans le dispositif, il est possible d'appliquer un facteur correctif. Un exemple d'application concerne la sécurité IRM des dispositifs pour la biopsie ou la thérapie du sein guidée par l'IRM. La dernière étape concerne l'application aux dispositifs actifs. Les normes actuelles (ISO /TS 10974) recommandent deux étapes séparées pour la modélisation du DAS, en raison des difficultés pratiques de réaliser ces simulations complexes : (i) simulation du dispositif avec une géométrie fine, dans une région limitée du patient incluant seulement les tissus voisins ; (ii) simulation corps entier sans le dispositif. La première étape permet d'estimer la fonction de transfert du dispositif. Ensuite le champ électrique incident (et donc le DAS), en présence du dispositif, est calculé en intégrant le produit entre champ électrique incident sans le dispositif et la fonction de transfert. L'influence des propriétés électriques des tissus dans ce calcul sera étudiée. Ces valeurs à l'interface avec le dispositif (où le champ électrique est maximal) sont particulièrement importantes. Un exemple d'application possible concerne les neurostimulateurs, les implants cochléaires, et les pacemakers.

Environnement de travail

Le **laboratoire IADI** (unité Inserm U1254), dirigé par le Pr. Jacques FELBLINGER, Université de Lorraine - INSERM IADI (Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnelle) est spécialisée dans le développement d'instrumentation compatible IRM, et dans les méthodes d'acquisition et reconstruction d'image en IRM.

Basée au sein du CHRU de Nancy-Brabois, le IADI bénéficie du support du CIC-IT (Centre d'Investigation Clinique – Innovation Technologique) et entretient des liens privilégiés avec les différents services du Pôle Imagerie, Neurologie et Cardiologie du CHRU de Nancy. Ces structures disposent de temps



recherche sur deux IRM du CHU de Nancy (1,5T et 3T) permettant ainsi une mise en œuvre et une validation rapides des méthodes de recherche développées.

La **société Healtis** (Nancy), partenaire industriel de ce projet de thèse, est un laboratoire d'essais de sécurité et de compatibilité IRM des dispositifs médicaux (www.healtis.com). Healtis possède notamment une expertise en mesure expérimentale d'échauffements des dispositifs médicaux en IRM, et en simulation électromagnétique.

Le projet s'inscrit dans un projet collaboratif (ANR ELECTRA), qui inclut deux laboratoires supplémentaires : ICube (Strasbourg) et le Laboratoire de Mathématiques de Reims. Les échanges réguliers au sein du consortium permettront d'échanger sur les problématiques de recherche communes : la simulation électromagnétique, les méthodes numériques, les aspects de modélisation de la physique et de l'instrumentation IRM.

Encadrement de la thèse

Directeur (50%): Freddy ODILLE, PhD-HDR (Chargé de recherche Inserm)

Co-directeur (50%) : Jacques Felblinger, PhD-HDR (Professeur Université de Lorraine)

Encadrant industriel (Healtis) : Pauline Ferry

Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

Accès aux systèmes d'imagerie IRM cliniques du CHRU de Nancy (2 jours/semaine pour le laboratoire). Formation sécurité IRM fournie en début de thèse. Recrutement de volontaires sains/patients organisée par le Centre d'Investigation Clinique et d'Innovation Technologique (CIC-IT 1433). Contrat de collaboration avec le constructeur IRM (Siemens), accès aux spécifications techniques du système IRM à son environnement de programmation. Autres équipements recherche disponibles : objets tests spécifiques pour l'IRM, banc de test pour la mesure des échauffements dans l'IRM (sondes de mesure de température et de champ électrique), analyseur de réseau vectoriel.

Le doctorant bénéficiera d'un poste de travail avec un ordinateur, avec un accès aux différentes ressources matérielles (stations de travail pour le calcul haute-performance), à un logiciel de simulation électromagnétique (licence CST Studio Suite, Dassault Systems), un client « ArchiMed » pour l'accès aux bases de données d'images IRM du laboratoire. Les doctorants du laboratoire sont regroupés à plusieurs par bureau (2 à 4), afin d'éviter leur isolement. Des réunions scientifiques sont organisées de manière hebdomadaire : elles ont pour but de pouvoir discuter avec l'ensemble des chercheurs du labo des problèmes rencontrés dans les projets respectifs. Les doctorants/stagiaires ont également leurs propres réunions, qu'ils organisent hebdomadairement pour discuter entre eux, sans permanents, de concepts scientifiques, de leurs projets ou de difficultés qu'ils peuvent rencontrer.

Profil et compétences recherchées

- Formation : Ingénieur ou M2 dans une des disciplines suivantes : physique, génie électrique, mathématiques, sciences de l'information. Une expérience (stage M2) dans le domaine de l'IRM ou de la simulation numérique serait un plus.
- Dynamique, autonome, présentant un vif intérêt pour la recherche et l'imagerie médicale.
- Bonne maîtrise de l'anglais et des outils de programmation scientifique (notamment Matlab).
- Bonnes capacités de communication.

Financement

ANR (projet ELECTRA financé, en cours).



Contact

Envoyer CV et lettre de motivation à Freddy Odille (freddy.odille@inserm.fr) et Jacques Felblinger (j.felblinger@chru-nancy.fr).

Bibliographie

1. Missoffe A, Aissani S. Experimental setup for transfer function measurement to assess RF heating of medical leads in MRI: Validation in the case of a single wire. *Magn Reson Med*. 2018;79(3):1766–72.
2. Missoffe A, Kabil J, Vuissoz P, Felblinger J. Transmission Line Model of an Implanted Insulated Cable for Magnetic Resonance Imaging Radiofrequency Hazard Evaluation. *IEEE J Electromagn RF Microw Med Biol*. 2018 Sep;2(3):201–7.
3. Jin J, Liu F, Weber E, Crozier S. Improving SAR estimations in MRI using subject-specific models. *Phys Med Biol*. 2012 Nov;57(24):8153–71.
4. Homann H, Börnert P, Eggers H, Nehrke K, Dössel O, Graesslin I. Toward individualized SAR models and in vivo validation. *Magn Reson Med*. 2011;66(6):1767–76.
5. Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. *Phys Med Biol*. 1996 Nov 1;41(11):2251.
6. Malik SJ, Hand JW, Satnarine R, Price AN, Hajnal JV. Specific absorption rate and temperature in neonate models resulting from exposure to a 7T head coil. *Magn Reson Med*. 2021 Sep;86(3):1299–313.
7. Soullié P, Missoffe A, Ambarki K, Felblinger J, Odille F. MR electrical properties imaging using a generalized image-based method. *Magn Reson Med*. 2021;85(2):762–76.