

Cartographie des propriétés électriques du corps humain en imagerie par résonance magnétique (IRM)

Résumé

Le projet de thèse vise à développer de nouvelles méthodes en imagerie par résonance magnétique (IRM) visant à l'acquisition, la reconstruction et l'analyse d'images pour la cartographie des propriétés électriques des tissus dans le corps humain. Les propriétés électriques (conductivité et permittivité) caractérisent le comportement du milieu en réponse à une stimulation électromagnétique, et sont influencées par la composition des tissus, leur structure, le contenu en eau, la concentration ionique etc... Les techniques récentes de cartographie en 3D par IRM offrent de nouvelles perspectives pour de nombreuses applications biomédicales diagnostiques, comme la caractérisation des lésions pathologiques/tumorales, ou interventionnelles, comme le calcul de la dose électromagnétique délivrée aux tissus (débit d'absorption spécifique, DAS) lors d'une procédure de thermo-ablation par micro-ondes. Ces techniques présentent néanmoins certaines limites, sur lesquelles le travail de thèse se concentrera : 1) la résolution spatiale effective des cartes de conductivité reste modeste (5 à 10 mm) au regard du potentiel de l'IRM (< 1 mm) : 2) dans les organes de la cage thoracique et de l'abdomen, les mouvements respiratoires et cardiaques imposent des contraintes supplémentaires sur la résolution spatiale. Pour résoudre ces défis, de nouvelles techniques de calcul numérique seront étudiées pour l'étape de reconstruction des images, et de nouvelles stratégies de programmation des séquences d'acquisition seront mises en œuvre. Enfin, de nouveaux modèles électromagnétiques seront créés pour les applications diagnostiques et pour l'estimation du DAS.

Electrical property mapping of the human body using magnetic resonance imaging (MRI)

Summary

The PhD project aims to develop new methods in magnetic resonance imaging (MRI) for the acquisition, reconstruction, and analysis of images to map the electrical properties of tissues in the human body. Electrical properties (conductivity and permittivity) characterize the behavior of a medium in response to electromagnetic stimulation and are influenced by tissue composition, structure, water content, ion concentration, etc. Recent 3D MRI mapping techniques offer new perspectives for many diagnostic biomedical applications, such as the characterization of pathological/tumoral lesions, or for interventional applications, such as calculating the electromagnetic dose delivered to tissues (specific absorption rate, SAR) during a microwave thermo-ablation procedure. However, these techniques have certain limitations, which the thesis work will address: 1) the effective spatial resolution of conductivity maps remains modest (5 to 10 mm) compared to the potential of MRI (< 1 mm); 2) in the organs of the thorax and abdomen, respiratory and cardiac motions impose additional constraints on spatial resolution. To overcome these challenges, new numerical computation techniques will be investigated for the image reconstruction step, and new programming strategies for acquisition sequences will be implemented. Finally, new electromagnetic models will be developed for diagnostic applications and for SAR estimation.

Contexte scientifique

Les propriétés électriques des tissus biologiques caractérisent la manière dont ceux-ci réagissent lorsqu'ils sont soumis à des champs électromagnétiques. Ces propriétés sont nommées la conductivité et la permittivité électriques. En particulier, la conductivité électrique, notée σ , traduit l'aptitude des charges électriques se trouvant dans les tissus à se déplacer et à générer un courant électrique ($\vec{j} = \sigma \vec{E}$).

La connaissance des propriétés électriques est requise dans de nombreuses applications biomédicales et industrielles. Les propriétés électriques des tissus étant dépendantes de la structure des tissus et de leur composition (eau, concentration ionique, structure cellulaire...), elles peuvent être modifiées lors de l'altération du tissu suite à une pathologie (par exemple une tumeur ou un kyste dans le foie, cf Fig. 1) et ainsi fournir des informations diagnostiques, également appelées des **biomarqueurs** (1). De plus, lors de l'interaction entre un champ électromagnétique et un tissu biologique - comme c'est le cas en téléphonie mobile, ou lors d'un examen d'imagerie par résonance magnétique (IRM) - il est nécessaire d'estimer la quantité d'énergie électromagnétique absorbée (ou débit d'absorption spécifique, DAS) pour la **sécurité** de l'utilisateur ou du patient. De même, lors d'un traitement de thermo-ablation d'une lésion par micro-ondes, une modélisation plus précise de cette énergie délivrée à la lésion cible et aux tissus sains environnants est nécessaire pour optimiser l'**efficacité du traitement**. Ces estimations d'énergie absorbée requièrent de **connaître précisément la conductivité** des tissus (2).

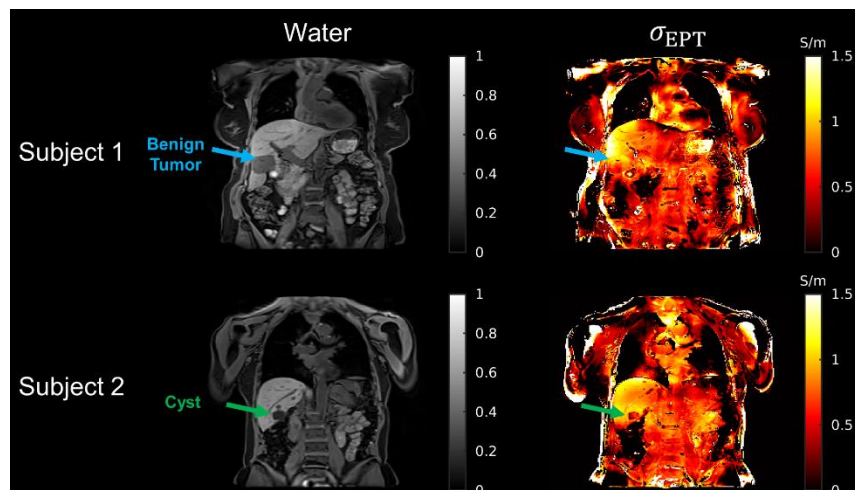


Figure 1 - Images IRM conventionnelles en pondération T1 (à gauche) et cartes de conductivité électrique reconstruites (à droite), chez un sujet présentant une tumeur hépatique bénigne (Subject 1) et un kyste (Subject 2). Travaux du laboratoire IADI, Z. He et al., ISMRM 2024.

En raison de son principe physique fondée sur l'électromagnétisme, l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) offre la possibilité d'imager ces propriétés électriques (3) et ceci à une résolution proche du centimètre, voire du millimètre. En IRM, des antennes radiofréquences (RF) émettant une impulsion RF à la fréquence de Larmor (64 MHz à 1.5 T, 128 MHz à 3 T) sont utilisées pour créer le signal IRM. Les images obtenues sont complexes (module et phase) et dépendent notamment de l'interaction électromagnétique entre l'onde RF émise et le sujet imagé. Cette « signature » RF dans les images IRM est fonction de la conductivité et de la permittivité des tissus, et toute l'essence de la Magnetic Resonance Electrical Properties Tomography (MR-EPT) consiste à extraire cette signature RF des images pour ainsi quantifier la conductivité et permittivité des tissus. Au cours des travaux précédents du laboratoire (cf Fig. 2), nous avons validé les mesures par IRM par rapport à la méthode

de référence (4), et nous avons obtenu des résultats préliminaires concernant les valeurs observées in-vivo et leurs variations dans la population (5).

Les limites des techniques précédemment développées sont : 1) la résolution spatiale effective des cartes de conductivité reste modeste (5 à 10 mm) au regard du potentiel de l'IRM (< 1 mm) : 2) dans les organes de la cage thoracique et de l'abdomen, les mouvements respiratoires et cardiaques imposent des contraintes supplémentaires sur la résolution spatiale.

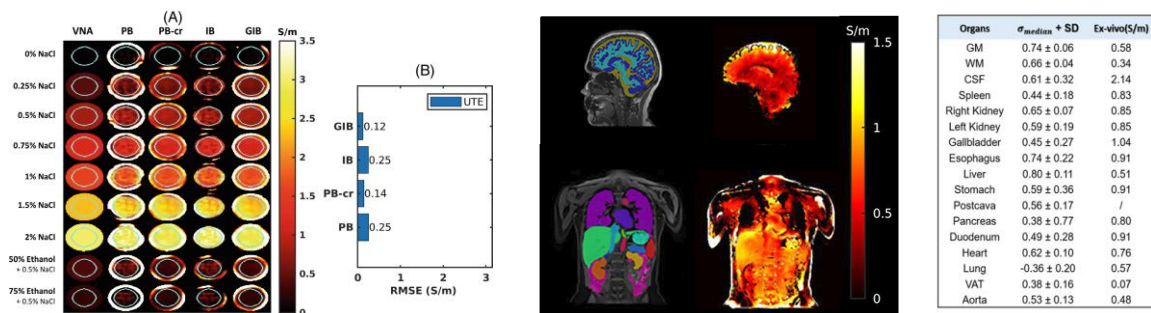


Figure 2 – A gauche : validation sur gels-test des mesures de conductivité électrique par IRM avec différentes techniques de reconstruction (PB, PB-cr, IB, GIB) par rapport à la vérité terrain mesurée par un analyseur de réseau (VNA). A droite : exemple de carte de conductivité et de régions anatomiques étudiées, et table de valeurs mesurées in-vivo par IRM dans une petite population d'adultes sains. Travaux du laboratoire IADI, Z. He et al., Magn Reson Med 2024 & Sci Rep 2024.

Originalité et perspectives scientifiques

L'objectif de la thèse est de développer de nouvelles méthodes d'acquisition et de reconstruction des images permettant d'optimiser la qualité des cartes de conductivité. Nous nous baserons sur les bases de données existantes et en cours d'acquisition pour établir un atlas des valeurs normales, puis nous étudierons de nouvelles applications des cartographies de conductivité électrique, telles que la sécurité du patient en IRM et la planification des interventions de thermo-ablation par micro-ondes.

Description sommaire des étapes de thèse

Le travail de thèse pourra être organisé autour de trois axes de recherche complémentaires.

Axe 1 : Acquisition des images

Dans cet axe on comparera différentes techniques d'acquisition par IRM des images du champ RF nécessaires à la reconstruction des propriétés électriques. La séquence d'acquisition actuellement utilisée est basée sur une technique appelée UTE (ultra-short time of echo), permettant de réceptionner le signal IRM le plus tôt possible après l'excitation RF. Dans les organes en mouvement (torso et abdomen), actuellement une acquisition courte, de résolution modeste (2 x 2 x 2.5 mm) est réalisée en apnée. Une acquisition plus longue, utilisant une synchronisation respiratoire, sera envisagée pour atteindre une résolution s'approchant du millimètre, comme dans le cerveau. Une acquisition alternative (séquence bSSFP à cyclage de phase) a été développée au laboratoire et sera également adaptée pour les organes en mouvement. Les résultats seront comparés à la technique UTE.

Axe 2 : Reconstruction des propriétés électriques

Cet axe vise à l'optimisation des algorithmes de reconstruction sur les bases de données existantes (sujets sains et pathologiques). On se basera sur différents algorithmes de reconstruction précédemment développés au laboratoire. Dans sa version simplifiée (méthodes « phase-based » ou « complex-image-based »), la reconstruction repose sur l'estimation du laplacien de la cartographie

acquise en 3D du champ RF. Une première approche repose sur une reconstruction basée sur une segmentation des différentes classes de tissus, de façon à estimer le laplacien à l'aide d'un support adaptatif, évitant ainsi les inconsistances aux frontières entre tissus (6). Une autre approche, plus générale, modélise de façon plus fidèle le comportement du champ RF aux frontières, et repose sur la résolution d'un problème inverse (7). Enfin une modélisation plus complète des équations de Maxwell est envisageable (8) – cette approche doit permettre, en théorie, d'améliorer encore les résultats, mais n'a pas encore été testée sur données réelles.

Axe 3 : Post-traitement des images

Une segmentation automatique des organes ou classes de tissus dans les images anatomiques permet de compléter l'analyse, et in fine de créer une base de données de patients virtuels disponibles pour la simulation électromagnétique du corps humain. En effet cette segmentation des tissus est nécessaire pour caractériser la distribution des propriétés électriques, à la fois dans le corps humain et dans la population. Ceci permet d'obtenir des valeurs moyennes par organes et de quantifier la variabilité en fonction de l'âge, du sexe, de la fraction grasseuse du sujet etc... Au cours de nos travaux précédents (5), une première segmentation a été proposée pour la tête (substance blanche et grise du cerveau) et pour les principaux organes du tronc (cœur, poumons, foie etc...). Nous compléterons ces données de façon à estimer les valeurs d'autres organes d'intérêt pour la modélisation électromagnétique du corps humain (applications en sécurité IRM), notamment les muscles périphériques. Une évaluation des modèles électromagnétiques ainsi générés sera également envisagée au moyen d'une simulation électromagnétique afin d'estimer le DAS dans une application donnée (échauffement RF lors d'un examen IRM, calcul de la dose délivrée lors d'une procédure d'ablation micro-ondes, etc...).

Environnement de travail

Le **laboratoire IADI** (unité Inserm U1254), codirigé par Freddy ODILLE, Julien OSTER et Jacques FELBLINGER, Université de Lorraine - INSERM IADI (Imagerie Adaptation Diagnostique et Interventionnelle) est spécialisé dans le développement d'instrumentation compatible IRM, et dans les méthodes d'acquisition et reconstruction d'image en IRM.

Localisé 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, le service d'hépatogastroentérologie du CHRU de Nancy. Le laboratoire IADI et le CIC-IT disposent de temps recherche sur trois IRM du CHU de Nancy (1,5T et 3T cliniques ; 3T à usage non-clinique) permettant ainsi une mise en œuvre et une validation rapide des méthodes de recherche développées.

Encadrement de la thèse

Directeur de thèse : Freddy ODILLE, directeur de recherche Inserm.

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 sur IRM clinique ; 100% sur l'IRM non-clinique). 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 à l'environnement de programmation des séquences d'acquisition (IDEA). Autres équipements recherche disponibles : stations de calcul haute performance pour la reconstruction et l'analyse d'image, licence Matlab pour le prototypage des codes de reconstruction et de traitement d'image, licence CST Studio pour la simulation électromagnétique.

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), un client « ArchiMed »

Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnelle - Inserm (U1254), Université de Lorraine

Bâtiment Recherche (IRIS), CHRU de Nancy Brabois, 54511, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<https://iadi.univ-lorraine.fr/>



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 discuter avec l'ensemble des chercheurs du laboratoire des problèmes rencontrés dans les projets respectifs.

Profil et compétences recherchées

- Formation : M2 ou ingénieur dans une des disciplines suivantes : sciences de l'ingénieur, ingénierie biomédicale, physique, mathématiques, sciences des données. Une expérience (stage M2) dans le domaine de l'IRM ou de l'imagerie médicale est un plus.
- Curieux, autonome, dynamique, présentant un vif intérêt pour la recherche et l'imagerie médicale.
- Bonne maîtrise de l'anglais et des outils de programmation scientifique (notamment Matlab ou Python).
- Bonnes capacités de communication.

Financement

Contrat doctoral (financement acquis).

Date de début : octobre 2026

Contact

Envoyer CV et lettre de motivation à Freddy Odille (freddy.odille@inserm.fr).

Bibliographie

1. Zhang X, Liu J, He B. Magnetic-resonance-based electrical properties tomography: a review. *IEEE Rev Biomed Eng.* 2014;7:87–96. doi:10.1109/RBME.2013.2297206 PubMed PMID: 24803104; PubMed Central PMCID: PMC4113345.
2. Katscher U, Voigt T, Findekklee C, Vernickel P, Nehrke K, Dössel O. Determination of Electric Conductivity and Local SAR Via B1 Mapping. *IEEE Trans Med Imaging.* 2009 Sep;28(9):1365–74. doi:10.1109/TMI.2009.2015757
3. Haacke EM, Petropoulos LS, Nilges EW, Wu DH. Extraction of conductivity and permittivity using magnetic resonance imaging. *Phys Med Biol.* 1991 Jun;36(6):723–34. doi:10.1088/0031-9155/36/6/002
4. He Z, Lefebvre PM, Soullié P, Doguet M, Ambarki K, Chen B, et al. Phantom evaluation of electrical conductivity mapping by MRI: Comparison to vector network analyzer measurements and spatial resolution assessment. *Magn Reson Med.* 2024 Jun;91(6):2374–90. doi:10.1002/mrm.30009 PubMed PMID: 38225861.
5. He Z, Soullié P, Lefebvre P, Ambarki K, Felblinger J, Odille F. Changes of in vivo electrical conductivity in the brain and torso related to age, fat fraction and sex using MRI. *Sci Rep.* 2024 Jul 12;14(1):16109. doi:10.1038/s41598-024-67014-9
6. He Z, Chen B, Lefebvre PM, Odille F. An Adaptive Savitzky-Golay Kernel for Laplacian Estimation in Magnetic Resonance Electrical Property Tomography*. In: 2023 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC) [Internet]. 2023 [cited 2026 Mar 31]. p. 1–4. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10341200> doi:10.1109/EMBC40787.2023.10341200
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. doi:<https://doi.org/10.1002/mrm.28458>
8. Lohrengel S, Milano C, Salmon S. Electrical properties reconstruction from MRI data: theoretical and numerical aspects. *Inverse Probl Imaging.* 2025 Nov 12;23(0):123–51. doi:10.3934/ipi.2025057