HAL
open science

Mesure et cartographie du champ électrique radiofréquence d'une bobine RMN en utilisant une sonde électro-optique

Isabelle Saniour, Gwenaël Gaborit, Lionel Duvillaret, Anne-Laure Perrier, Olivier Beuf

To cite this version:

Isabelle Saniour, Gwenaël Gaborit, Lionel Duvillaret, Anne-Laure Perrier, Olivier Beuf. Mesure et cartographie du champ électrique radiofréquence d'une bobine RMN en utilisant une sonde électro-optique. 20èmes Journées Nationales Microondes (JNM), May 2017, Saint-Malo, France. hal-01693499

HAL Id: hal-01693499

https://hal.science/hal-01693499v1

Submitted on 21 Jun 2018

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.

Mesure et cartographie du champ électrique radiofréquence d'une bobine RMN en utilisant une sonde électro-optique

Isabelle Saniour[1], Gwenaël Gaborit[2, 3], Lionel Duvillaret[3], Anne-Laure Perrier[2], et Olivier Beuf[1]

[1]*Univ. Lyon, CREATIS ; CNRS UMR 5220 ; INSERM U1206 ; INSA-Lyon ; UJM-Saint Etienne ; Université Lyon1 ; 69616 Villeurbanne, France*

[2]*Univ. Savoie Mont-Blanc, IMEP-LAHC, UMR 5130, 73376 Le Bourget-du-Lac, France*

[3]*KAPTEOS, 73800 Sainte-Hélène-du-Lac, France*

isabelle.saniour@creatis.insa-lyon.fr

Résumé *– Durant un examen d'imagerie par résonnance magnétique (IRM), le champ magnétique (B_1) radiofréquence (RF) d'émission est toujours accompagné d'un champ électrique (E). Ce dernier induit des courants de même fréquence que B_1 dans les conducteurs causant des échauffements locaux dangereux pour le patient. Pour la sécurité du patient, il est important de contrôler et maîtriser le taux d'absorption spécifique (TAS) local par une mesure du champ E ou de l'élévation de la température durant un examen IRM. Dans ce papier, nous présentons des mesures quantitatives du champ E dans une bobine à résonance magnétique nucléaire (RMN) en utilisant une sonde électro-optique (EO). Des simulations numériques de ce champ E ont été effectuées pour être comparées aux valeurs expérimentales. Les résultats expérimentaux confirment l'excellente linéarité entre le champ E détecté et le champ B_1 généré par la bobine RMN. Les cartographies démontrent que le champ E n'est pas uniforme le long de la bobine et que de fortes concentrations de champ sont localisées essentiellement à proximité des condensateurs. Finalement, les résultats expérimentaux sont bien en accord avec les simulations.*

1. Introduction

L'imagerie par résonnance magnétique (IRM) est une modalité d'imagerie médicale largement utilisé pour l'obtention des images anatomiques et fonctionnelles bien détaillées. Dans un système RMN, un problème notable est le risque d'échauffement local du patient causé par le champ électrique (*E*) radiofréquence (RF) accompagnant le champ magnétique B_1 surtout à proximité de conducteurs (capteurs radiofréquences, câbles coaxiaux, implants,…) [1]. Pour la protection du patient lors d'un examen IRM, il est indispensable de quantifier le taux d'absorption spécifique (TAS) absorbé par les tissus biologiques. Le TAS est lié principalement au carré du champ électrique (*E)* comme le montre l'équation (1). Il peut être déterminé indirectement en mesurant la variation de la température en fonction du temps suivant l'équation (2).

$$TAS = \frac{\sigma E^2}{\rho} \text{(W/ kg)} \tag{1}$$

$$TAS = c\frac{\delta T}{\delta t}\Big|_{t=0} \text{(W/kg)} \tag{2}$$

σ, ρ et c correspondent respectivement à la conductivité électrique, la densité du milieu biologique et la capacité spécifique d'échauffement. *E* est le champ électrique induit et $\delta T/\delta t$ est la variation de la température par rapport au temps.

Pour déterminer et étudier le TAS local, des techniques de mesure de température sont largement utilisées car elles sont adaptées à l'environnement de l'IRM et facile à mettre en œuvre [2]. Cependant, les mesures de variation de température sont longues et peuvent comprendre des erreurs dues à la convection et la diffusion de la chaleur dans le milieu à proximité. De plus, la sensibilité et la dynamique des mesures sont limitées par la méthode de mesure et le capteur utilisé. En revanche, les capteurs utilisés pour la mesure du champ *E* présentent une réponse plus rapide et une sensibilité bien supérieure aux capteurs thermiques. Dans la littérature, les capteurs de champ *E* les plus utilisés lors d'un examen IRM sont les dipôles électriques [3]-[5]. Cependant, ces derniers peuvent perturber le champ électromagnétique et le milieu environnant par leurs structures métalliques et la résolution spatiale est limitée par les dimensions de ces capteurs. Des études récentes ont proposées des méthodes de mesure basées sur la conversion électro-optique (EO) pour évaluer la distribution du champ *E* dans des fantômes à proximité de structures métalliques durant un examen IRM. Néanmoins aucune mesure quantitative de la valeur du champ électrique n'a été obtenue et seule une composante du champ *E* a été étudiée [6], [7].

Dans la suite du papier, les performances en termes de linéarité de sensibilité de deux types de sonde EO sont

démontrées. Ensuite, les mesures quantitatives des trois composantes du champ *E*, dans l'air, à l'intérieur d'une bobine RMN pour un système RM préclinique à 4,7 Teslas sont présentées. Finalement, nous présentons, dans la dernière partie de ce papier, les cartographies expérimentales et simulées du champ électrique.

2. Méthodes

2.a. Mesure du champ électrique

Pour la mesure du champ *E* dans un système RM, les sondes EO utilisées sont constituées principalement de cristaux non-centrosymétriques qui changent leurs indices de réfraction en fonction du champ *E* appliqué. Un faisceau laser ayant une polarisation rectiligne (λ = 1,55 µm) est émis vers le cristal. La variation des indices de réfraction du cristal induit une modulation de l'état de polarisation du laser qui est analysée en temps réel et convertie en un signal électrique analogique par l'intermédiaire de composants optoélectroniques [8]. Deux types de sondes ont été utilisés, une sonde transverse qui mesure les composantes E_x et E_y du champ électrique et une deuxième sonde longitudinale qui mesure la composante longitudinale (E_z). En effet, le type de la sonde dépend de la coupe et de l'orientation du cristal utilisé [9]. Les deux sondes ont été calibrées dans l'air à l'extérieur du système RM en utilisant une cellule transverse électromagnétique (TEM) dans le but de déterminer le facteur de proportionnalité (facteur d'antenne) entre le champ *E* et le signal EO détecté. Le facteur d'antenne est spécifique à chaque sonde et pour chaque milieu (air, eau, …).

Les expériences ont été réalisées en utilisant un système RM préclinique Bruker à 4,7 Teslas comme le montre la figure 1. La bobine à résonnance magnétique nucléaire (RMN) d'émission/réception utilisée est une cage d'oiseau ayant un diamètre intérieur de 60 mm (voir figure 2). La sonde EO a été fixée sur une tige en plastique et installée sur un banc de translation triaxial afin de cartographier précisément le champ *E* à l'intérieur de la bobine RMN. Le signal EO détecté a été visualisé par un analyseur de spectre. Pour cette expérience une séquence IRM FLASH a été utilisée et les impulsions d'excitation sont de forme Hermite avec une durée de 1ms.

2.b. Simulation numérique du champ électrique

Une simulation électromagnétique du champ électrique dans l'air à l'intérieur d'une bobine RMN de type cage d'oiseau a été effectuée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. La géométrie de la bobine cage d'oiseau utilisé dans l'expérience a été modélisée avec le logiciel en respectant les dimensions des pistes de cuivre et les valeurs des capacités d'accord et d'adaptation. Une photographie et la modélisation de la géométrie de la bobine cage d'oiseau sont montrées dans la figure 2. Les simulations sont basées sur la méthode des éléments finis et des éléments vectoriels pour la résolution des équations de Maxwell.

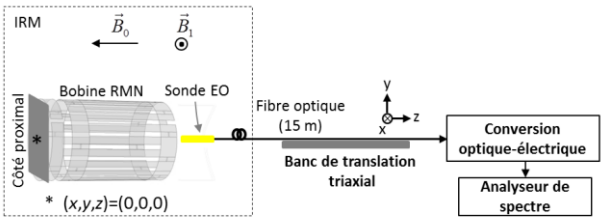

Figure 1. Schéma de l'expérience de la mesure du champ électrique durant un examen IRM avec une sonde EO. Le signal optique est analysé à l'aide des composants optoélectroniques puis converti en un signal électrique par l'intermédiaire d'une photodiode rapide afin d'être visualisé par un analyseur de spectre.

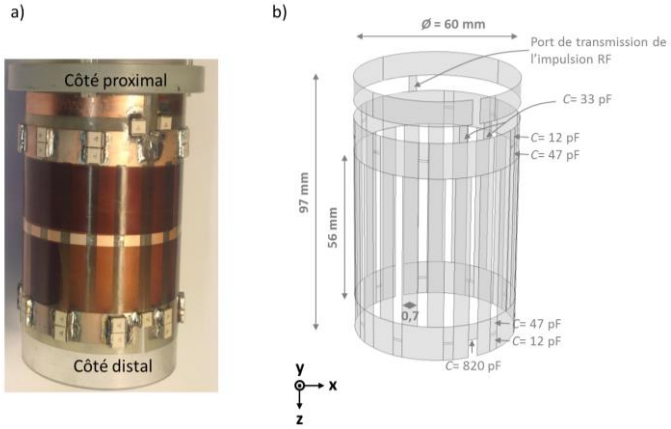

Figure 2. a) La photographie et la modélisation de la bobine RMN de type cage d'oiseau utilisée dans l'expérience.

3. Résultats et discussion

Tout d'abord, une caractérisation de la sonde EO a été effectuée dans l'environnement de l'IRM. Pour un point fixe choisi, une étude de la corrélation entre les champs magnétique et électrique a été effectuée pour les sondes transverse et longitudinale. La figure 3 présente l'amplitude du champ électrique détecté par la sonde EO en fonction de l'amplitude du champ magnétique B_1 délivré par la bobine d'excitation. L'amplitude du champ magnétique a été estimée à partir des paramètres de la séquence IRM utilisée (l'angle de bascule et la durée d'excitation du champ B_1). Les résultats vérifient l'excellente linéarité de la détection électro-optique en utilisant les deux types de sonde. Les valeurs maximales des composantes radiale et longitudinale du champ *E* sont respectivement 1078 V/m et 488 V/m. La sensibilité vaut 0.27 V/m.Hz$^{-1/2}$ pour la sonde transverse et 0.087 V/m.Hz$^{-1/2}$ pour la sonde longitudinal. Ces résultats montrent que la sonde longitudinale est la plus sensible. Et finalement, la dynamique de mesure dépasse les 1000 V/m.

Pour vérifier la compatibilité de la sonde EO avec l'environnement de l'IRM, deux images RM d'un fantôme ont été acquises sans et avec la présence de la

sonde. Aucune déformation de l'image en présence de la sonde n'a été discernée. Ce résultat vérifie que la sonde EO entièrement diélectrique ne déforme ni le champ électromagnétique ni le milieu environnant.

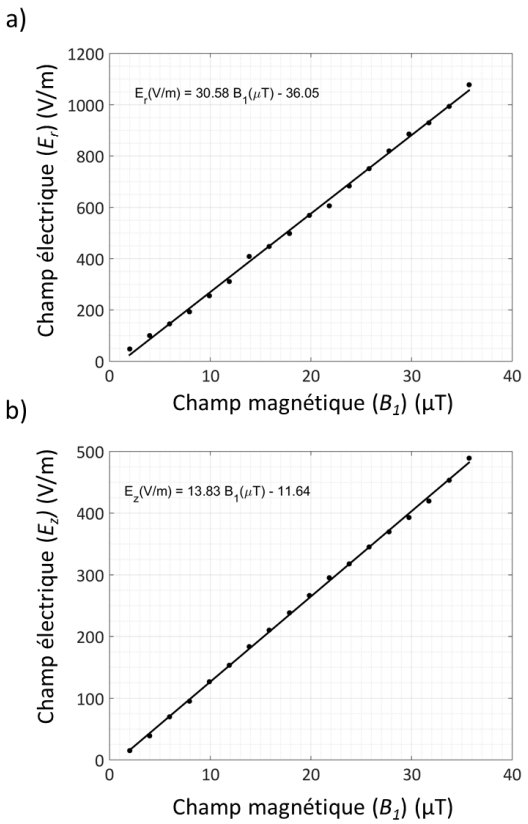

Figure 3. L'amplitude du champ *E* mesurée en fonction de l'amplitude du champ B_1 générée par la bobine RMN a) Mesure de la composante radiale E_r par la sonde transverse b) Mesure de la composante E_z par la sonde longitudinale.

En utilisant les deux sondes EO, les trois composantes du champ *E* ont été mesurées pour le point (*x*,*y*,*z*)= (-25,0,*z*) en déplaçant la sonde le long de l'axe *z* avec un pas de 10 mm. La figure 4 montre que les fortes concentrations du champ électrique sont localisées principalement à deux endroits (*z* = 45 mm et *z* = 110 mm). De plus, nous remarquons que la composante E_y est plus importante que les autres; en effet le champ magnétique B_1 est linéaire et émis suivant l'axe *x*.

En utilisant la sonde transverse bien orientée pour la mesure de la composante E_y du champ électrique, des mesures locales du champ *E* ont été réalisées à l'intérieur de la bobine cage d'oiseau dans le but d'étudier la distribution du champ *E*. Les cartographies 2D expérimentales et simulées du champ *E* sont illustrées respectivement dans la figure 5 a) et 5 b). Deux plans sont présentés: *xz* et *yz*. La distribution du champ électrique est non-uniforme à l'intérieur de la bobine cage d'oiseau. Les deux plans expérimentaux montrent que les fortes concentrations du champ électrique se trouvent aux positions *z* = 45 mm et *z* = 110 mm ce qui correspond à l'emplacement des condensateurs de la structure de la bobine cage d'oiseau.

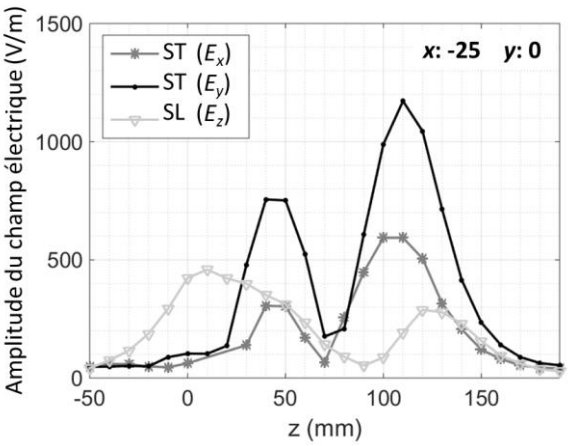

Figure 4. Les trois composantes du champ *E* mesurées par la sonde transverse (ST) ou par la sonde longitudinale (SL) le long de l'axe z.

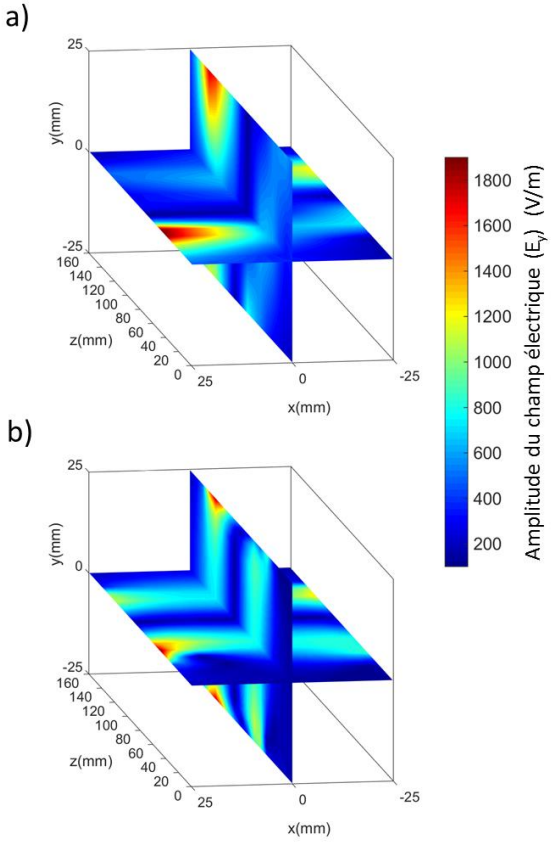

Figure 5. a) Cartographies expérimentales de l'amplitude de la composante y du champ *E* (plans *xz* et *yz*). b) Cartographies simulées de l'amplitude de la composante y du champ *E* (plans *xz* et *yz*).

D'autre part, les résultats de la simulation numérique du champ électrique montre aussi que la distribution du

champ électrique n'est pas uniforme à l'intérieur de la bobine. Les points de concentration du champ électrique se trouvent à proximité des condensateurs ce qui est en accord avec les résultats expérimentaux. A ces endroits, la valeur du champ électrique est maximale (autour de 1900 V/m) puis diminue progressivement pour atteindre 100 V/m au centre de la bobine. Les simulations montrent aussi que la concentration du champ électrique est forte au voisinage du composant modélisant le câble coaxial transmettant l'impulsion RF.

4. Conclusion

La sonde EO proposée a permis de mesurer les trois composantes du champ *E*, de manière quantitative, en temps réel lors d'un examen IRM, sans aucune altération du champ magnétique ni du milieu environnant. Cette sonde EO présente une excellente linéarité et elle est sensible aux variations du champ *E* avec une dynamique qui excède 1000 V/m. La distribution et la valeur du champ E mesurée par la sonde EO sont similaires aux simulations. Les fortes concentrations du champ E sont situées à proximité des condensateurs et surtout à côté du port de l'excitation RF qui modélise le câble coaxial. Ces premiers résultats obtenus dans l'air prouve que la sonde est suffisamment sensible pour être utilisée dans un milieu biologique et effectuer des mesures de TAS. Dans ce cas, une calibration de la sonde est nécessaire pour chaque milieu donné.

5. Remerciements

Nous remercions la région Rhône-Alpes (ADR ARC) et la DGA pour leur soutien financier. Ce travail a été mené dans le cadre du LabEX PRIMES de l'Université de Lyon, au sein du programme «Investissements d'Avenir» (ANR-11-IDEX-0007). Nous remercions également l'anses pour le soutien financier associé au projet DOSIT (Programme Environnement-Santé-Travail de l'Anses avec le soutien des ministères chargés de l'écologie et du travail (2013/2/20)).

Références

[1] C. Armenean, *et al.*, « RF induced temperature elevation near metallic wires in clinical magnetic resonance imaging », Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 501–504, 2003.

[2] T. Kawamura, *et al.*, « Specific Absorption Rate Measurement of Birdcage Coil for 3.0-T Magnetic Resonance Imaging System Employing Thermographic Method », IEEE Trans. on Microw. Theory Techn., vol. 57, n° 10, pp. 2508–2514, Oct. 2009.

[3] H. C. Taylor, *et al.*, « Experimental verification of numerically predicted electric field distributions produced by a radiofrequency coil », Phys. Med. Biol., vol. 42, n° 7, p. 1395–1402, 1997.

[4] A. Kangarlu, *et al.*, « Electric field measurements and computational modeling at ultrahigh-field MRI », Magn. Reson. Imaging, vol. 25, n° 8, pp. 1222–1226, Oct. 2007.

[5] P. Nordbeck, *et al.*, « Spatial distribution of RF-induced E-fields and implant heating in MRI », Magn. Reson. Med., vol. 60, n° 2, pp. 312–319, Aug. 2008.

[6] S. Reiss, *et al.*, « An optical setup for electric field measurements in MRI with high spatial resolution », Phys. Med. Biol., vol. 60, n° 11, pp. 4355–4369, Jun. 2015.

[7] B. Loader, *et al.*, « Evaluation of an optical electric field sensor for measurement of specific absorption rate (SAR) during magnetic resonance imaging », 2012 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), pp. 1–4, 2012.

[8] I. Saniour *et al.*, « Direct optical measurement of the RF electrical field for MRI », Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med. 24, pp. 2212, 2016.

[9] G. Gaborit, *et al.*, « Single Shot and Vectorial Characterization of Intense Electric Field in Various Environments With Pigtailed Electrooptic Probe », IEEE trans. Plasma Sci., vol. 42, n°5, pp. 1265–1273, May 2014.