



HAL
open science

Caractérisation des champs électromagnétiques des systèmes rayonnants par thermo-fluorescence

Raphael Flor, Stéphane Fauré, Daniel Prost, Jean-François Bobo

► **To cite this version:**

Raphael Flor, Stéphane Fauré, Daniel Prost, Jean-François Bobo. Caractérisation des champs électromagnétiques des systèmes rayonnants par thermo-fluorescence. CEM 2023, Jun 2023, Toulouse, France. hal-04169749v2

HAL Id: hal-04169749

<https://hal.science/hal-04169749v2>

Submitted on 17 Jun 2024 (v2), last revised 16 Dec 2024 (v3)

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.

CARACTERISATION DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES DES SYSTEMES RAYONNANTS PAR THERMO-FLUORESCENCE

R. Flor¹, D. Prost², J. F. Bobo³

¹ANYFIELDS, 3 rue Alaric II, 31000 Toulouse, raphael.flor@anyfields.eu

²ONERA / DEMR, Université de Toulouse, F-31055 Toulouse, daniel.prost@onera.fr

³CEMES CNRS, 29 rue Jeanne Mavig, 31055 Toulouse, jfbobo@cemes.fr

Résumé. La mesure du champ électromagnétique émis par diverses sources (antenne, radar) permet leur caractérisation et est utile en CEM (détection de fuites). Au-delà d'une mesure ponctuelle du champ proche, l'imagerie par thermographie permet une cartographie sur une surface, en un temps très court. La thermographie infrarouge a ainsi été développée par l'ONERA sous l'appellation EMIR : le rayonnement chauffe un film mince et cet échauffement, mesuré par une caméra infrarouge, donne l'amplitude du champ. Plus récemment, nous avons développé une technique de thermographie dérivée d'EMIR, appelée EMVI (ElectroMagnetic Visible Imaging). Là encore un film mince s'échauffe sous l'effet du champ. Mais ici, le film est recouvert par un fluorophore, dont l'émission dépend de la température, donc du champ. La cartographie du champ est ainsi obtenue avec une caméra optique. Nous rappelons ici des premiers résultats illustrant cette méthode et présentons des voies d'amélioration.

I. INTRODUCTION

Nous présentons ici une méthode originale de mesure et d'imagerie du champ électromagnétique. En effet, dans le contexte actuel du fort développement des technologies microondes (GPS, communications, téléphone, télédétection, aéronautique, médecine...), les interactions entre sources rayonnantes et avec l'environnement doivent être considérées, notamment du point de vue de la CEM. Il existe différentes approches pour caractériser le champ rayonné. La première consiste à utiliser des sondes électromagnétiques [1, 2] en matrice ou avec un système de balayage. Les principaux inconvénients sont le long temps d'acquisition, le comportement intrusif et la taille importante du système de balayage. Une autre approche est la thermographie du champ. Celle-ci utilise des films thermosensibles dont l'échauffement, lié au champ, est mesuré directement par une caméra infrarouge [3, 4] (on parle alors de thermographie infrarouge, utilisée notamment par la société ANYFIELDS [5]) ou bien modifie l'émission fluorescente d'un dépôt appliqué sur le film, émission mesurée par une caméra optique (il s'agit alors de la thermographie par fluorescence) [6, 7]. Le film est un absorbant électrique ou magnétique recouvert d'une couche thermo-fluorescente. En présence d'un champ électromagnétique, l'énergie absorbée par le film est convertie en chaleur, ce qui entraîne une variation de l'intensité de la fluorescence. La variation de l'intensité

de fluorescence (ΔFluo) est enregistrée et post-traitée pour obtenir le champ incident. La modulation basse fréquence du signal RF, couplée à la démodulation synchrone du signal de fluorescence, permet d'annuler les phénomènes de conduction et de convection qui dégraderaient la visualisation du champ.

II. METHODOLOGIE

Nous présentons ici la méthode de mesure et de cartographie du champ électromagnétique par thermographie de fluorescence. Cette méthode est utilisable pour toute fréquence du champ électromagnétique (du continu au THz).

II.1. Méthodologie

Le film est recouvert d'un fluorophore (dont le dépôt requiert certaines précautions, voir paragraphe §IV.1), et placé devant la source rayonnante, Fig. 1. Il est en outre éclairé par des LEDs à la longueur d'onde optimale pour l'absorption et le rendement quantique du fluorophore (soit $\lambda = 535$ nm). L'intensité de fluorescence est mesurée à l'aide d'une caméra S-CMOS (Dhyana400D 4 Megapixel), sur laquelle on place un filtre passe-haut ($\lambda > 580$ nm) qui permet d'éliminer la lumière réfléchie venant des LEDs tout en conservant le signal de fluorescence (autour de $\lambda = 600$ nm).

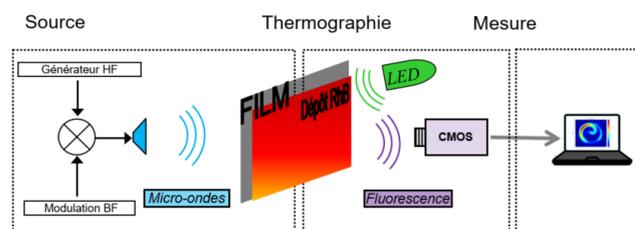


Fig.1. Synoptique de la mesure par thermographie de fluorescence.

Remarque sur le film

- Pour la mesure du champ électrique, nous utilisons un film à pertes électriques, c'est-à-dire qu'en présence d'un champ électrique nous aurons un échauffement proportionnel à la puissance absorbée. Un film adéquat n'absorbera qu'une fraction limitée de la puissance rayonnée afin de ne pas perturber le champ.

L'amplitude de E se déduit alors facilement de l'échauffement, en tout point du film, par la relation :

$$|E| = k_E \sqrt{\Delta T_{avg}} \quad (1)$$

où k_E est une constante que l'on peut calculer à partir des caractéristiques du film, ou bien obtenir directement par une mesure de calibration.

- Pour la mesure du champ magnétique, nous utilisons un film à pertes ferromagnétiques (pertes fer par hystérésis ou bien pertes par résonance ferromagnétique, selon la fréquence du champ) :

$$|H| = k_H \sqrt{\Delta T_{avg}} \quad (2)$$

où, de même, k_H est une constante que l'on peut calculer ou obtenir par calibration.

L'alimentation de la source rayonnante est modulée en tout ou rien, à une fréquence de l'ordre du Hz. Lors de la mesure, nous enregistrons sur plusieurs périodes et nous obtenons donc une série temporelle d'images qu'il est aisé de filtrer à la fréquence de modulation (détection synchrone). Cela permet d'éliminer les phénomènes thermiques parasites (convection, variation de l'environnement) sur l'image finale démodulée, qui ne reflète donc la variation de fluorescence liée au champ.

III. EXEMPLES DE MESURES

Nous présentons ici quelques exemples ayant permis de valider la méthode, en micro-ondes (bandes S, C) ainsi qu'en HF (quelques centaines de kHz). Précisons que ces derniers ont fait l'objet de publications qui sont citées en référence.

III.1. Mesure d'une surface à haute impédance (HIS)

La thermographie a permis une visualisation rapide des régimes passant et résonnant (selon la fréquence) d'une surface à haute impédance [8]. Sur la Fig. 2 on voit, pour ces deux régimes, la cartographie en champ électrique E et en magnétique H . Notons que la résolution spatiale des images est largement inférieure à la longueur d'onde : un pixel représente environ $100 \mu\text{m}$, soit $\lambda/1500$.

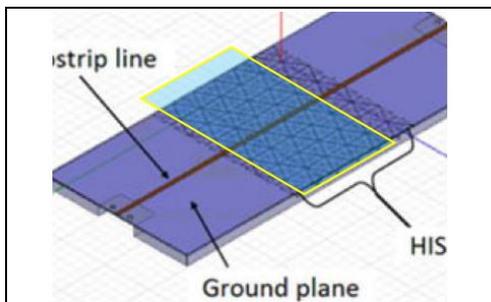


Fig.2. Schéma de la structure de la surface haute impédance.

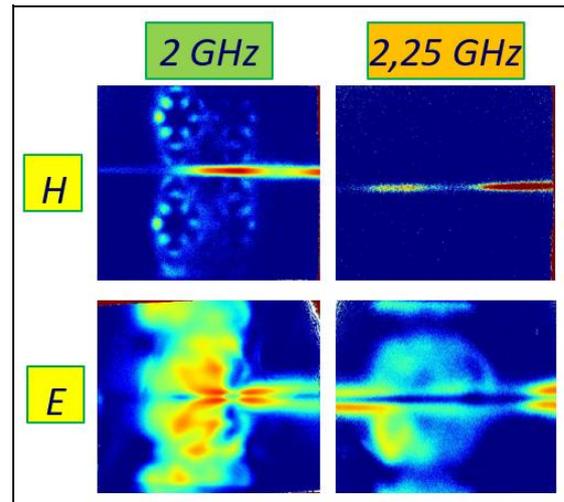


Fig.3. Images des champs E et H pour des fréquences résonnantes et passantes d'une surface haute impédance.

III.2. Mesure d'une antenne « zero order » (ZOR)

Les antennes de type « Zero Order » permettent entre autres une très forte miniaturisation avec une taille globale de l'antenne très inférieure à la longueur d'onde. La visualisation du champ proche est alors très difficile voire impossible avec un capteur dont la taille serait de l'ordre de λ .

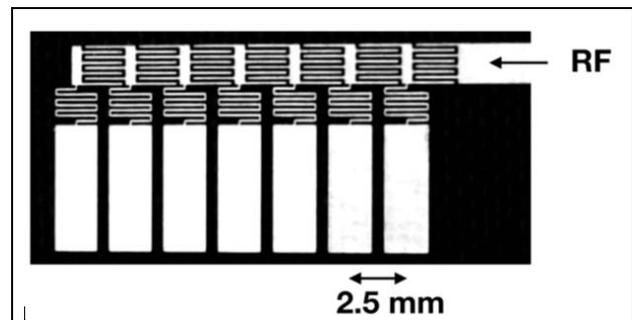


Fig.4. Structure de l'antenne ZOR : ligne de transmission avec éléments capacitifs et inductifs inter-digités.

La thermographie permet ainsi une visualisation de la structure du champ (électrique ici) [9], à une échelle inférieure à $\lambda/100$, Fig.5. On donne également des profils du champ qui font apparaître un bruit dont la minimisation devra être menée à bien (cf. paragraphe §IV.2).

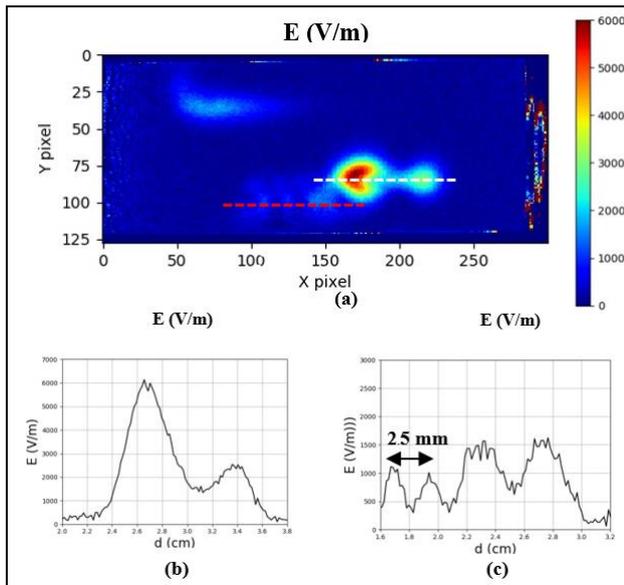


Fig.5. (a): Image du champ E à 4,29 GHz, et profils sur deux axes (blanc : (b), rouge : (c)).

III.3. Mesure d'une bobine d'induction

La thermographie permet aussi la mesure en BF, par exemple ici à 272 kHz. A cette fréquence seul le champ magnétique est détectable, et nous utilisons donc un film à pertes ferromagnétiques [10]. Le champ attendu au dessus d'une telle bobine est bien connu, la mesure a donc essentiellement été réalisée afin de montrer la possibilité d'obtenir des cartographies de champ en basse fréquence.



Fig.6. Bobine d'induction, diamètre 10 cm

La cartographie correspond tout à fait au champ attendu, à ceci près que nous ne mesurons que la composante tangente au film. Celui-ci étant parallèle à la bobine, le champ au centre est perpendiculaire au film et donc mesuré proche de 0.

On note comme au paragraphe précédent un niveau de bruit sur les profils qui reste excessif (de l'ordre de -15 à -20 dB).

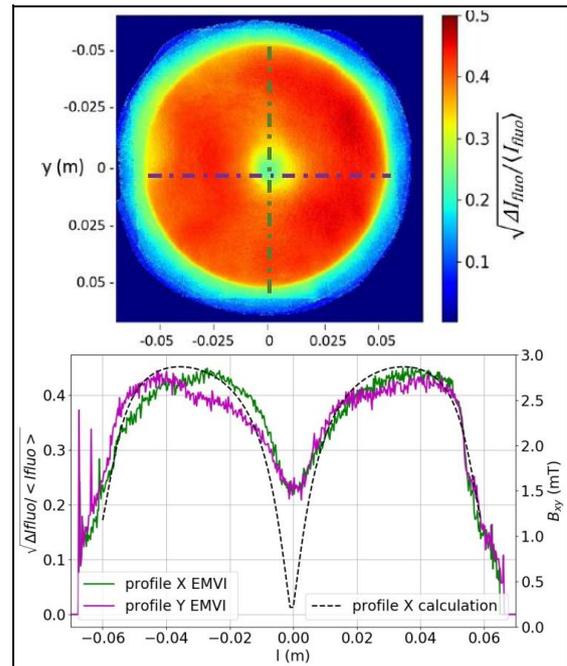


Fig.7. Images du champ B (tangentielle au film) et profils V et H , comparés au calcul théorique (en pointillés).

IV. VOIES D'AMELIORATIONS

IV.1. Dépôt du fluorophore

Sur les exemples donnés ci-dessus, le dépôt de fluorophore était réalisé par enduction, à la spatule, ce qui ne permet ni une reproductibilité satisfaisante ni une homogénéité de l'épaisseur du dépôt. La sérigraphie est une piste qui a été explorée mais elle s'est révélée inadaptée à cause de la forte viscosité de la résine époxy. Finalement nous avons obtenu de bons résultats avec un simple applicateur de film « Baker », Fig. 8. En utilisant cet instrument sur un film de largeur 20 cm et de longueur équivalente, nous obtenons une épaisseur de dépôt de $50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, avec un écart-type limité à $0,35 \mu\text{m}$.



Fig.8. Dosage de la RhB, dilution dans l'éthanol, mélange avec la résine puis dépôt sur le film mince.

IV.2. Amélioration du rapport signal à bruit

Les résultats présentés au paragraphe §III semblent prometteurs mais la mesure reste encore améliorable, notamment sous l'aspect du rapport signal à bruit. Les profils de champ notamment montrent un rapport de 20 dB qui peut être amélioré. En effet la rhodamine B est un très bon candidat car sa fluorescence dépend fortement de la température, mais d'autres fluorophores devront être explorés, en particulier la fluorescéine. Par ailleurs nous

avons commencé à appliquer des techniques de filtrage des images ; celles-ci doivent être optimisées en fonction des niveaux de puissance du signal émis.

Un banc dédié à l'étude systématique de l'influence de ces paramètres a été réalisé, Fig.9. Il nous permet de mieux comprendre et d'étudier finement les phénomènes thermiques et optiques afin d'optimiser la mesure. L'échauffement est simplement obtenu en faisant circuler un courant (ce qui permet de se passer d'une source microondes).

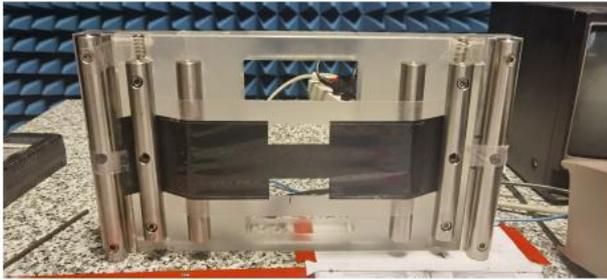


Fig.9. Banc de mesure : film tendu et alimenté par un courant continu (échauffement Joule).

Des premiers résultats encourageants ont été obtenus en jouant sur les paramètres de la caméra (nombre d'images par seconde, temps d'intégration) mais aussi sur ceux de la modulation synchrone (la difficulté étant que tous ces paramètres sont interdépendants) ; nous améliorons ainsi la qualité de l'image, Fig.10.

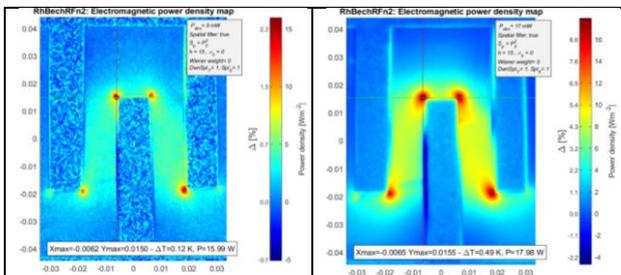


Fig.10. Amélioration de l'image par optimisation des paramètres (à droite).

Enfin, outre la modulation de la source, il est possible de moduler les LEDs (stroboscope). Cela présente plusieurs avantages, notamment d'éviter tout échauffement lié à la lumière excitatrice (les LEDs ne sont allumées que lors de l'acquisition d'une image), ou encore de disposer d'une image de normalisation (sans excitation lumineuse) actualisée pour chaque image enregistrée. Nous poursuivons les investigations sur ce thème et avons obtenu une amélioration du SNR qui reste à confirmer et à évaluer précisément.

Ainsi toutes les images du paragraphe III pourront être améliorées lorsque l'optimisation des paramètres de mesure aura été à son terme. Nous disposerons alors d'une méthode de mesure et caractérisation du champ avec une

dynamique que nous évaluons aujourd'hui à environ 30 dB, permettant des cartographies avec une résolution d'1 mégapixel (soit autant de points de mesure), cela en quelques secondes, et pour toute fréquence de source rayonnante.

REFERENCES

- [1] H.I. Bassen, G.S. Smith, "Electric Field Probes", IEEE transactions on antenna and propagation, VOL.AP-31, NO.5, September 1983
- [2] J. Lenz, A.S. Edelstein, "Magnetic sensors and their applications", IEEE Sensors Journal, VOL. 6, NO. 3, June 2006
- [3] P. Levesque, L. Leyeikian, "Capteur vectoriel de champs électromagnétique par thermographie infrarouge", French Patent n°9816079, 1998
- [4] Prost, F. Issac, F. lemaître and J.P. Parmentier, "Infrared Thermography of Microwave Electromagnetic Fields", International Symposium on electromagnetic compatibility (EMC EUROPE), 2012.
- [5] <https://anyfields.eu/>.
- [6] S. Faure, J.F. Bobo, J. Carrey, F. Issac and D. Prost, "Composant sensible pour dispositif de mesure de champ électromagnétique par thermofluorescence, procédés de mesure et de fabrication correspondants", French Patent, n°1758907, 2017.
- [7] S. Faure, J-F. Bobo, D. Prost, F. Issac, and J. Carrey, "Electromagnetic Field Intensity Imaging by Thermofluorescence in the Visible Range", Phys. Rev. Applied 11, 054084, 2019
- [8] H. Ragazzo, D. Prost, F. Issac, "Thermo-fluorescent images of electric and magnetic near-fields of a High Impedance Surface", International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC-Europe 2019.
- [9] H. Ragazzo, S. Faure, J. Carrey, F. Issac, D. Prost, J.F. Bobo, "Detection and Imaging of Magnetic Field in the Microwave Regime With a Combination of Magnetic Losses Material and Thermofluorescent Molecules", IEEE Transactions On Magnetism, vol. 55, 2019.
- [10] H. Ragazzo, D. Prost, J-F. Bobo, S. Faure, A. Chevalier, "Detection and imaging of magnetic field in the low frequency regime using a ferromagnetic thin film coated with a thermo-fluorescent layer", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 3, pp. 1-6, March 2021.