



HAL
open science

Antibes Juan-Les-Pins Caractérisation d'une antenne fractale par thermographie de fluorescence

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

► **To cite this version:**

Raphael Flor, Jean-François Bobo, Stéphane Fauré, Daniel Prost. Antibes Juan-Les-Pins Caractérisation d'une antenne fractale par thermographie de fluorescence. JNM 2024, Jun 2024, Antibes, France. hal-04712518

HAL Id: hal-04712518

<https://hal.science/hal-04712518v1>

Submitted on 27 Sep 2024

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.

Caractérisation d'une antenne fractale par thermographie de fluorescence

R. Flor¹, J.F. Bobo², S. Fauré¹, D. Prost³

¹ ANYFIELDS, 55 Boulevard de l'Embouchure, 31200 Toulouse, France

² CEMES CNRS, 29 rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse

³ ONERA / DEMR, Université de Toulouse, F-31055 Toulouse

Résumé – La mesure du champ proche émis par une antenne permet un diagnostic de son bon fonctionnement, et révèle le cas échéant d'éventuels défauts de fabrication. Contrairement aux systèmes de type 'scanning' (déplacement pas à pas d'un capteur ponctuel), la thermographie du champ électromagnétique (EM) permet une cartographie sur une surface en quelques secondes. La thermographie infrarouge (IR) a ainsi été développée à l'ONERA sous l'appellation EMIR : le rayonnement EM chauffe un film mince, et une caméra IR mesure cet échauffement qui est proportionnel à la densité de puissance EM et donc donne l'amplitude du champ. Plus récemment, une technique de thermographie dérivée d'EMIR, appelée EMVI (ElectroMagnetic Visible Imaging) a été développée. Le film mince est désormais recouvert par un fluorophore, dont l'intensité de fluorescence dépend de la température, et donc du champ. Ainsi, une simple caméra optique permet d'obtenir une cartographie du champ EM. Après quelques rappels sur cette méthode, nous présentons sa mise en œuvre dans le cadre de la mesure d'une antenne fractale.

1. Introduction

L'avènement des technologies micro-ondes, telles que le GPS, les communications mobiles, la télédétection, ainsi que leurs applications dans des domaines variés allant de l'aéronautique à la médecine, souligne l'importance croissante des interactions électromagnétiques dans notre environnement technologique. Ces interactions, souvent complexes, nécessitent une compréhension approfondie des champs électromagnétiques impliqués, ce qui impose des défis significatifs en termes de mesure et d'imagerie. La caractérisation précise de ces champs est cruciale non seulement pour optimiser les performances des technologies existantes, mais aussi pour anticiper et minimiser leurs éventuels effets indésirables, notamment en termes de compatibilité électromagnétique. Les méthodes conventionnelles de mesure du champ électromagnétique [1, 2], telles que l'utilisation de sondes électromagnétiques en matrices ou avec des systèmes de balayage, présentent des limitations substantielles, notamment en termes de temps d'acquisition, d'intrusivité, et de dimensions des dispositifs de balayage. La thermographie du champ, une alternative à ces méthodes, exploite soit des films thermosensibles observés par caméra infrarouge [3, 4] (utilisée notamment

par la société ANYFIELDS [5]), soit la modification de l'émission fluorescente d'un film recouvert d'un dépôt sensible au champ, observée par caméra optique. Cette dernière technique, connue sous le nom de thermographie par fluorescence [6, 7] repose sur l'utilisation de films légèrement absorbants aux champs électromagnétiques, couplés à un fluorophore sensible à la température. L'énergie absorbée par le film, lorsqu'il est exposé à un champ électromagnétique, est convertie en chaleur, entraînant une variation de l'intensité de fluorescence. Cette variation, directement corrélée à l'amplitude du champ électromagnétique incident, est ensuite enregistrée et analysée. La combinaison d'une modulation basse fréquence du signal radiofréquence et d'une démodulation synchrone du signal de fluorescence permet de surmonter les défis posés par les phénomènes de conduction et de convection, qui pourraient autrement compromettre la fidélité de la visualisation du champ.

2. La méthode EMVI

Nous présentons ici la méthode de mesure et de cartographie du champ électromagnétique par thermographie de fluorescence dans le cas particulier d'une antenne fractale, qui a l'avantage de présenter une structure complexe de champ proche et des contrastes d'amplitude élevés. Notons cependant que la méthode est générale et utilisable pour toute fréquence du champ électromagnétique (du continu au THz).

2.a. Principe de la mesure

La méthodologie repose sur l'utilisation d'un film mince légèrement conducteur, recouvert d'un fluorophore spécifique. Ce dépôt de fluorophore, dont la procédure de mise en œuvre est détaillée dans le paragraphe §2.c, joue un rôle central dans le processus de mesure.

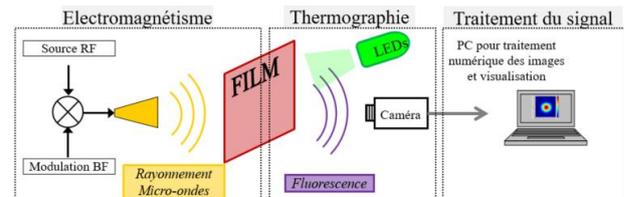


Figure 1 - Synoptique de la méthode de thermographie par fluorescence

Le film est placé en face de la source rayonnante, comme illustré Figure 1, et est exposé à un éclairage

provenant de LEDs. La détection de la fluorescence est réalisée à l'aide d'une caméra sCMOS haute résolution (Dhyana 400D) de 4 MPx, équipée d'un filtre passe-haut ($\lambda > 580$ nm). Ce filtre est crucial pour éliminer la lumière réfléchiée par les LEDs, tout en préservant le signal de fluorescence. Les variations de fluorescence capturées par la caméra sont directement proportionnelles à la température du film, qui augmente sous l'effet du champ électromagnétique incident. En effet, le film mince sur lequel on dépose le fluorophore possède une très faible conductivité, représentée par sa résistance de surface (ou par carré) $Z_s = 1/\sigma e$, où e est l'épaisseur du film et σ sa conductivité. Avec une résistance de surface de quelques milliers d'ohms, le film absorbe quelques pourcents de la puissance incidente, et cette densité de puissance est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique :

$$P_{abs} = \frac{E^2}{2Z_s} \quad (1)$$

Pour limiter les échauffements parasites, non liés au champ incident (conduction dans le film, convection naturelle, variations de température), nous utilisons une technique de détection synchrone (ou lock-in) –c'est la raison de la modulation BF indiquée dans la Figure 1- ; c'est-à-dire que la source est modulée en tout ou rien. Ainsi, l'échauffement oscille avec une amplitude (constante) dont on démontre [7] qu'elle est directement reliée à la puissance absorbée :

$$\Delta T_{mod} = \frac{P_{abs}}{4h} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha/2} \right) \quad (2)$$

Avec :

$$\alpha = e^{-1/(2f_{mod}\tau)} \quad (3)$$

Où h est le coefficient de convection, f_{mod} la fréquence de modulation et τ la constante de temps thermique $\tau = \rho C_p e / 2h$ (ρ densité et C_p capacité calorifique). Ainsi nous obtenons l'amplitude du champ en fonction de la variation de fluorescence ΔF_{mod} :

$$E = \sqrt{Z_s \frac{8h(1-\alpha/2)}{\alpha}} \sqrt{\Delta T_{mod}} = k \sqrt{\Delta F_{mod}} \quad (4)$$

2.b. Rappels sur la fluorescence

Le phénomène de fluorescence, qui est au cœur de notre technique de visualisation des champs électromagnétiques, est illustré dans les Figures 2 et 3. Cette méthode exploite une propriété unique des fluorophores qui, après absorption de photons à une longueur d'onde spécifique, réémettent de la lumière à une longueur d'onde supérieure, un processus caractérisé par le décalage de Stokes.

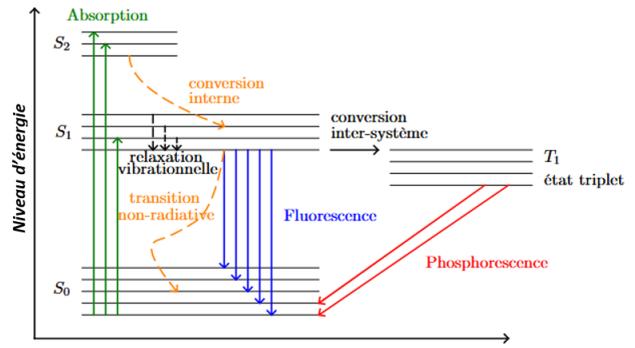


Figure 2 - Diagramme de Perrin Jablonski : les bases de la fluorescence

Dans notre configuration, le film mince, revêtu de rhodamine B, est excité par des LEDs émettant à 535 nm (optimale pour exciter la fluorescence du dépôt), tandis que la lumière émise par fluorescence est captée autour de 600 nm. Ce décalage spectral est essentiel pour isoler le signal de fluorescence de la lumière incidente, grâce à l'utilisation d'un filtre passe-haut sur notre caméra sCMOS. L'intensité de la fluorescence émise est intrinsèquement liée à la température du film mince, laquelle est modifiée par l'exposition aux champs électromagnétiques. Cette relation entre la fluorescence et la température, mise en évidence dans nos visualisations, permet une cartographie précise et non intrusive des champs électromagnétiques. Les variations de fluorescence, en fonction de la température, sont analysées quantitativement pour transposer les changements thermiques du film en mesures d'intensité lumineuse. Cette approche offre ainsi une représentation visuelle détaillée et quantifiable des dynamiques électromagnétiques, comme le démontrent les courbes présentées dans la Figure 3.

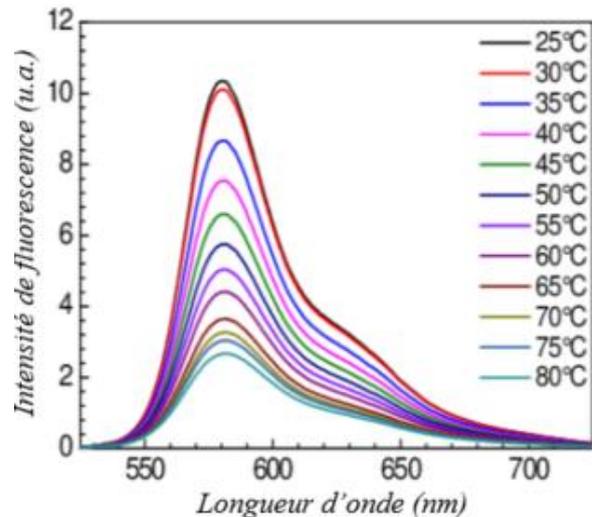


Figure 3 - Variation de la fluorescence avec la longueur d'onde et la température

Cette méthode s'avère cruciale pour la calibration du système et pour garantir une réponse linéaire et précise du signal de fluorescence en fonction des variations de température induites par les champs électromagnétiques.

2.c. Techniques de dépôt du fluorophore

La réalisation de dépôts uniformes et reproductibles de fluorophore sur des films minces est un défi crucial pour optimiser la sensibilité et la précision de notre méthode. La rhodamine B est d'abord mise en solution dans l'éthanol, puis mélangée avec une résine époxy (qui garantit la pérennité du dépôt sur le film). Les techniques initiales d'enduction manuelle à la spatule, bien que simples, se sont révélées insuffisantes en termes de reproductibilité et d'homogénéité de l'épaisseur du dépôt. De même, la sérigraphie, bien qu'une option envisagée et testée, a été écartée en raison de la forte viscosité de la résine époxy qui compromettrait la qualité et l'uniformité des couches de fluorophore. Finalement, c'est l'utilisation d'un applicateur de film Baker (couramment utilisée dans la fabrication de couches minces pour ses résultats uniformes et reproductibles) qui donne les meilleurs résultats.



Figure 4 - Dosage de la Rhodamine B, dilution dans l'éthanol, mélange avec la résine époxy puis dépôt sur le film mince

Cette technique, illustrée par la Figure 4, permet d'obtenir une épaisseur de dépôt constante de 60 μm avec une précision très satisfaisante de $\pm 1 \mu\text{m}$ et un écart-type limité à 0,35 μm , cela sur une surface de plusieurs décimètres carrés. L'utilisation de l'applicateur de film permet ainsi de surmonter les limitations des méthodes précédentes, en assurant une distribution homogène du fluorophore sur toute la surface du film. Cette uniformité est cruciale pour garantir la fidélité des mesures de fluorescence, car toute variation dans l'épaisseur du dépôt pourrait entraîner des incohérences dans l'intensité de fluorescence enregistrée et, par conséquent, dans la cartographie du champ électromagnétique. Cette amélioration significative dans la technique de dépôt renforce la reproductibilité et la fiabilité des mesures obtenues par la méthode de thermographie par fluorescence.

3. Mesure et simulation d'une antenne fractale

L'antenne fractale est une antenne du commerce de type planaire. Il s'agit d'une structure de type dipolaire où le brin métallique est remplacé par une succession de triangles organisés selon un motif fractal (Figure 5), permettant l'émission dans une large bande de fréquences (1 à 10 GHz). La complexité du champ proche de cette antenne permet de mettre en valeur la très grande

résolution spatiale de la mesure, de l'ordre de $\lambda/400$ (caméra 4MP, 3500 pixels/m).

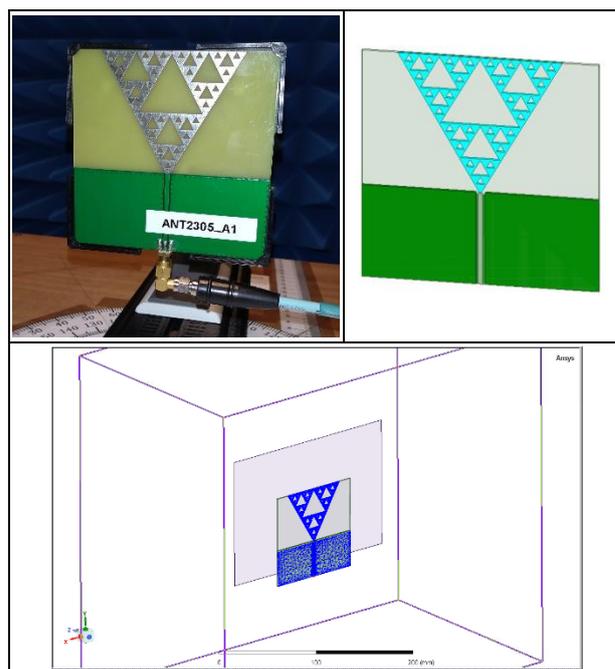


Figure 5. Antenne fractale, et modèle HFSS (antenne + film mince)

La structure est imprimée symétriquement de part et d'autre d'un substrat époxy (matériau FR4, de permittivité relative $\epsilon_r = 4,4$).

Nous avons simulé l'antenne par la méthode des éléments finis (logiciel commercial HFSS). Avant les mesures de thermographie, nous avons vérifié le bon comportement de l'antenne par une mesure de paramètres S avec un analyseur de réseau. La mesure du S11 (Figure 6) corrobore ainsi la simulation, ce qui permet de valider le modèle numérique.

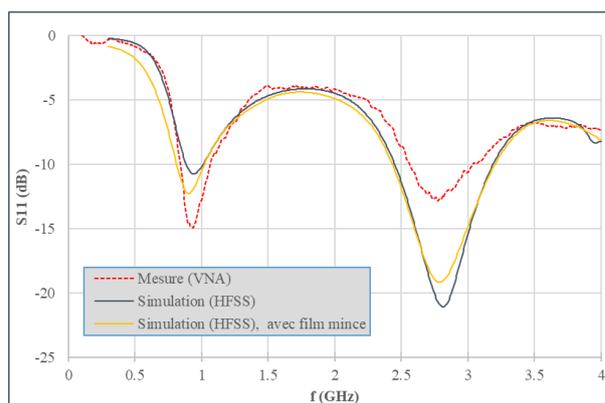


Figure 6 – S11 mesuré et simulé

Notons que la présence du film mince à proximité de l'antenne a peu d'influence. Avec une impédance de surface de plusieurs kOhm, celui-ci est quasi transparent aux microondes. Seule une faible fraction (quelques pourcents) de l'énergie EM est absorbée (et produit l'échauffement et donc la variation de fluorescence permettant la mesure). Cela se vérifie par la simulation :

les S11 avec et sans film modélisé sont très proches (Figure 6), et les cartographies de champ sont indiscernables. Celles que nous proposons ci-après sont obtenues en présence du film (représenté par une impédance de surface de taille limitée correspondant à l'aire du film réel).

Pour la mesure du champ proche, nous nous plaçons à la fréquence du second pic, soit 2680 MHz, et à une distance de 10 mm (Figure 7).

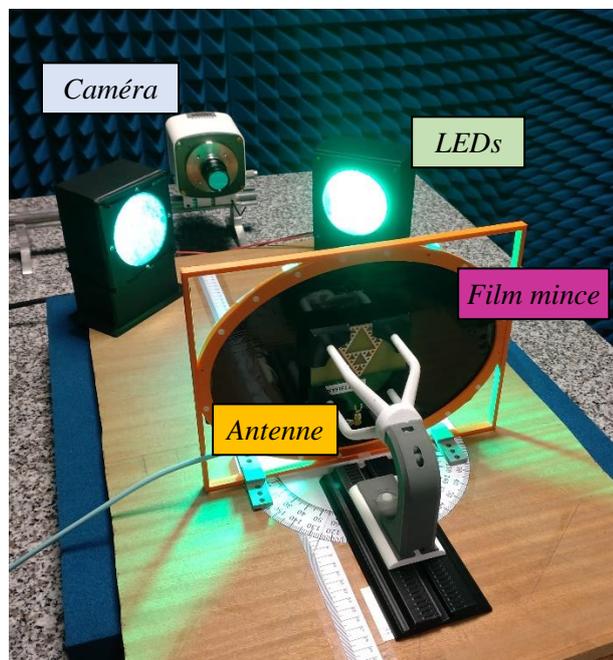


Figure 7 – Banc expérimental pour la mesure en champ proche

La mesure du champ proche, ainsi que la simulation, sont données Figure 8 : nous présentons la cartographie d'amplitude de champ électrique, ainsi que les deux profils correspondant aux axes ($x = 0$) et ($y = 0$).

L'image expérimentale est très légèrement moins contrastée, en raison sans doute d'une certaine diffusion thermique dans l'épaisseur du film. Une piste d'amélioration est donc de limiter cette épaisseur (une trentaine de microns serait préférable aux 60 que nous avons aujourd'hui), ce qui limitera la diffusion latérale.

On retrouve sur les profils, par ailleurs très similaires, le contraste un peu moins marqué sur l'image mesurée, ce qui se traduit par une amplitude légèrement plus faible des pics sur l'axe horizontal (en vert) que donnée par la simulation.

Cette mesure permet donc d'obtenir une cartographie du champ proche d'une grande fidélité, et donc de vérifier le bon fonctionnement de l'antenne ; nous avons ainsi un outil de diagnostic quasi instantané (la cartographie de la Figure 8 est obtenue en 40 secondes) et pour tout type d'antenne (le principe de la mesure étant indépendant de la fréquence du champ incident). Précisons toutefois que cette mesure, basée sur un phénomène thermique, requiert un peu de puissance électromagnétique (un ampli RF de 5 Watts a été utilisé ici).

N.B. Le champ indiqué Figure 8 est normalisé à 1 W, afin de correspondre à la simulation.

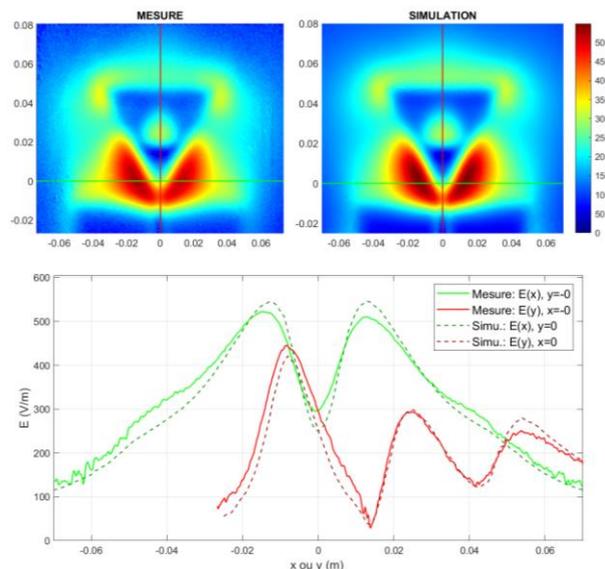


Figure 8 – Amplitude du champ électrique mesuré (G.) et simulé (D.) ; distance = 1 cm, $f = 2680$ MHz

4. Conclusion

La méthode de thermographie de fluorescence permet la visualisation et la mesure des champs électromagnétiques microondes. L'intérêt est particulièrement marqué pour le diagnostic d'antenne en champ proche. En effet, il s'agit d'une méthode optique qui fournit en quelques secondes plusieurs centaines de milliers de points de mesure (chaque pixel de l'image pouvant être assimilé à un point de mesure). A la différence d'un scan long et parfois rendu difficile par les couplages champ / capteur, la méthode EMVI est quasi-instantanée et ne nécessite aucun capteur local.

Références

- [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