



HAL
open science

Plateforme d'exposition aux ondes RF et sa caractérisation en dosimétrie

Maréva Calvet-Chautard, Benjamin Cerdan, Ali Moscatiello, Olivia Peytral-Rieu,
David Dubuc, Katia Grenier

► To cite this version:

Maréva Calvet-Chautard, Benjamin Cerdan, Ali Moscatiello, Olivia Peytral-Rieu, David Dubuc, et al.. Plateforme d'exposition aux ondes RF et sa caractérisation en dosimétrie. 18èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Mar 2025, Saint-Etienne (FR), France. <hal-05396675>

HAL Id: hal-05396675

<https://laas.hal.science/hal-05396675v1>

Submitted on 3 Dec 2025

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.



Copyright - All rights reserved

Plateforme d'exposition aux ondes RF et sa caractérisation en dosimétrie

M.Calvet-Chautard¹, B.Cerdan¹, A.Moscatiello¹, O.Peytral-Rieu¹, D.Dubuc¹ and K.Grenier¹

¹ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UT, Toulouse, France

mcalvetcha@laas.fr, bcerdan@laas.fr, ali.moscatiello@laas.fr, opeytral@laas.fr, dubuc@laas.fr, grenier@laas.fr

Résumé — Avec la multiplication des applications en radiofréquences et l'apparition de nouvelles normes dans les télécommunications, il est essentiel d'évaluer l'impact des ondes électromagnétiques sur les organismes vivants et de déterminer si ces ondes présentent des risques potentiels pour la santé. La réalisation de telles études nécessite des systèmes d'exposition précis, calibrés et garantissant des conditions expérimentales reproductibles avec une forte puissance statistique. Or, la littérature ne présente pas de système d'exposition qui permette une forte redondance des tests réalisés dans des conditions contrôlées. Pour répondre à ce besoin, cet article présente une plateforme d'applicateurs RF conçus pour générer localement un champ électromagnétique en champ proche, spécifiquement adapté à l'utilisation de plaques à puits standards, couramment employées par les biologistes pour réaliser des tests à haut débit et compatibles avec les outils d'analyses biologiques *in vitro* standard de fluorescence qui sont à utiliser après une exposition aux ondes RF. L'article propose une description détaillée de l'un de ces applicateurs ainsi que la méthodologie développée pour réaliser sa caractérisation en dosimétrie à la fréquence de 2.3 GHz.

I. INTRODUCTION

Les ondes électromagnétiques (EM) et leurs effets potentiels sur les organismes vivants suscitent un fort intérêt, notamment en raison du déploiement de la téléphonie mobile 5G, de l'émergence de nouvelles normes de communication et de l'utilisation exponentielle des communications sans fil [1-2]. La question de leur dangerosité demeure encore controversée [3]. En effet, certaines études ne détectent aucun effet nocif, tandis que d'autres signalent des impacts significatifs comme un effet cancérigène [3-4].

Face à ces incertitudes, il est crucial d'évaluer aussi bien *in vivo* et *in vitro* les effets des ondes radiofréquences de manière rigoureuse, précise et reproductible, en s'appuyant sur une dosimétrie contrôlée et calibrée. Les études sur les effets des ondes électromagnétiques sur les organismes vivants se déclinent en plusieurs approches complémentaires, allant des études épidémiologiques [1] à l'échelle humaine aux expérimentations *in vivo* sur des animaux [3] et *in vitro* sur des cellules [4]. Ces études expérimentales nécessitent le développement de systèmes d'exposition RF et une configuration de test adaptés à des post-analyses biologiques réalisées par des biologistes ou des médecins. Pour répondre à ces besoins, il existe de nombreux systèmes d'exposition RF basés sur des approches électromagnétiques différentes (guides d'ondes rectangulaires, champ proche, champ lointain, antennes...[5-8]). Au niveau *in vitro*, les approches traditionnelles sont basées sur l'utilisation de boîtes de Pétri, qui présentent pourtant des limites en termes de compacité, de manipulation et de dosimétrie. Les systèmes associés sont

limités en nombre d'échantillons étudiés et n'intègrent pas systématiquement des contrôles positifs et négatifs biologiques. Ainsi, dans le contexte d'évaluation à l'échelle cellulaire, nous avons développé une plateforme d'applicateurs RF conçue pour être compatible avec des plaques à 96 puits, consommables standard largement utilisés pour des analyses biologiques parallélisées en laboratoire, afin de permettre un grand nombre de tests simultanément et une versatilité de champs électromagnétiques applicables du fait du nombre élevé d'applicateurs RF. Cet article présente donc la plateforme développée ainsi que la méthodologie appliquée pour en faire la dosimétrie. Celle-ci a été réalisée pour l'un des applicateurs par des mesures expérimentales et est présentée dans cet article.

II. PLATEFORME D'EXPOSITION RF

Afin d'être compatible avec une plaque à 96 puits couramment utilisée par les biologistes pour leurs analyses cellulaires à haut débit, nous avons développé une plateforme d'exposition RF dédiée, afin de renforcer la puissance statistique des résultats. Pour permettre une versatilité des expositions, une configuration de plateforme d'applicateurs RF a été définie pour pouvoir illuminer les puits individuellement. Ainsi notre plateforme comporte plusieurs applicateurs RF. Le schéma de principe du système d'exposition RF avec une plaque à puits est indiqué sur la Figure 1, tandis que la Figure 2 présente une photographie du système connecté placé en incubateur.

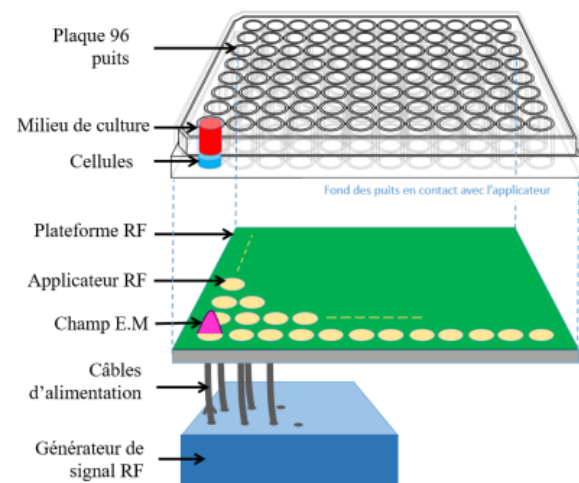


Figure 1: Schéma de principe du système d'exposition RF d'une plaque à puits à l'aide d'une plateforme d'applicateurs RF connectée à une chaîne de génération de signal RF

III. CARACTERISATION EN DOSIMETRIE

A. Choix de la méthodologie de dosimétrie RF

L'applicateur RF est conçu pour étudier la toxicité potentielle des ondes radiofréquences sur des cellules. Il est donc essentiel de procéder à une calibration précise en dosimétrie afin de déterminer avec exactitude la puissance à laquelle nous observons d'éventuels effets biologiques. Pour cela, nous avons établi un protocole de caractérisation en dosimétrie de notre système afin de connaître, en fonction de la puissance incidente appliquée, le niveau de Débit d'Absorption Spécifique (DAS) correspondant, soit la quantité d'énergie électromagnétique absorbée par l'objet biologique lorsqu'il est exposé à des ondes RF. Il peut être obtenu de différentes manières [9], soit par une mesure du champ électrique (1^{ière} partie de l'équation (1)), soit par une variation thermique comme indiqué dans la seconde partie de l'équation (1),

$$DAS = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho} = c \left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} \quad (1)$$

avec σ la conductivité électrique (S/m), ρ la masse volumique (kg/m^3), E le champ électrique (V/m) et C la capacité calorifique ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$).

Certaines méthodes se basent donc sur l'analyse du champ électrique pour déterminer le DAS, comme c'est le cas de l'ANFR (Agence Nationale des Fréquences) pour évaluer, à l'aide d'une sonde EM, la conformité d'équipements radiofréquences mis sur le marché. Cependant, ces sondes en champ électrique, dont les dimensions sont de l'ordre du centimètre, ne peuvent pas être utilisées pour mesurer le DAS à l'intérieur d'un puits d'une plaque à 96 puits de 6,35 mm de diamètre.

En revanche, il existe des sondes thermiques miniatures de quelques dizaines de micromètres. Etant donné le diamètre d'un puits de plaque à 96 puits, notre choix s'est donc porté sur une mesure thermique. Une puissance incidente suffisante pour obtenir un échauffement thermique est utilisée.

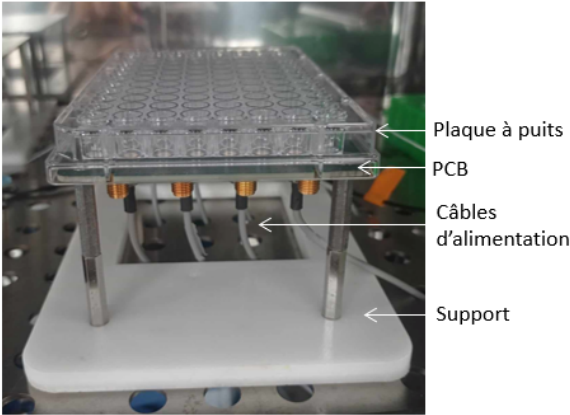


Figure 2: Photographie du dispositif d'exposition RF en incubateur

L'incubateur assure des conditions environnementales nécessaires aux éléments biologiques propices à une prolifération cellulaire normale, soit une température de 37°C, avec une hygrométrie supérieure à 90 % et 5 % de CO₂.

Pour illuminer les puits individuellement, notre plateforme d'exposition RF est composée de plusieurs applicateurs, qui présentent une configuration coplanaire circulaire, spécifiquement dimensionnée pour correspondre à la taille des puits. La partie rayonnante au centre possède un diamètre de 3,8 mm et est séparée de la masse par un gap de 2 mm de large, comme visible sur la Figure 3. Ces dimensions permettent d'irradier de manière homogène le fond d'un puits de 6,35 mm de diamètre [8].

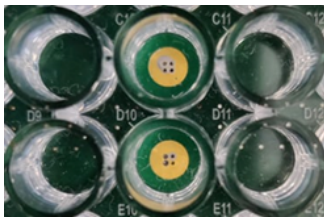


Figure 3: Photographie de deux applicateurs RF sous une plaque à 96 puits

Ces éléments rayonnants sont placés sur la face avant d'un substrat PCB (Printed Circuit Board) et rayonnent en champ proche. Etant donné le besoin de réplification intrinsèque des tests sur cellules et afin de réduire le nombre de câbles RF à l'arrière de la plateforme, deux applicateurs voisins sont connectés à un seul connecteur SMA situé à l'arrière du PCB et forment ainsi un doublet d'applicateurs. Les faces avant et arrière du circuit sont interconnectées grâce à des vias métalliques. La plaque à puits contenant milieu de culture et cellules est alors posée sur le PCB (cf. Figure 1 et Figure 2). Dans cette configuration, il y a un puits sur chaque applicateur RF.

Afin d'en réaliser la dosimétrie, une méthodologie adaptée à cette configuration d'applicateurs a été mise en place et fait l'objet de la section suivante.

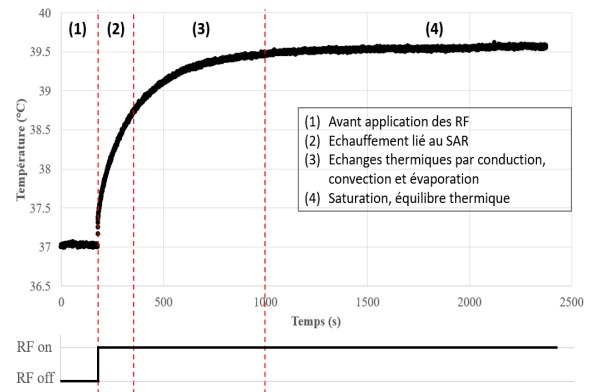


Figure 4 : Courbe représentant l'évolution de la température d'un échantillon liquide soumis aux ondes RF

L'évolution de la température du milieu de culture suit alors le profil type indiqué en Figure 4, qui identifie les différents phénomènes physiques associés à l'application des ondes RF sur le liquide biologique. Avant application du signal RF, la température est stable et correspond à la température imposée par l'incubateur, à savoir 37°C. Une fois le signal RF appliqué, la température augmente dans les premières secondes à minutes et est fonction du DAS appliqué. Des échanges thermiques par conduction, convection ou encore évaporation apparaissent ensuite avec les matériaux environnants pour finir par une stabilisation thermique. Seule l'évolution thermique dès les premières secondes d'application de l'onde RF est à considérer pour extraire le DAS avec le calcul de la pente à l'origine de la zone d'échauffement (zone 2 sur la Figure 4) à l'aide d'une régression exponentielle.

B. Détermination du DAS par caractérisation thermique

Pour mesurer l'évolution de la température dans les puits, nous utilisons une fibre optique terminée par un capteur thermique dont la taille est adaptée à notre étude. Ce capteur/fibre optique OPSSENS OTG-M420 est utilisé avec un module d'acquisition double voies de chez OPSSENS et le logiciel de la même marque.

La sonde thermique est maintenue dans le puits à l'aide d'un bouchon en plastique percé en son centre (Figure 5) réalisé par impression 3D. Ce bouchon a été développé et fabriqué par l'équipe pour assurer le maintien de la fibre optique à la verticale au centre du puits et à la profondeur souhaitée. Dans notre cas, la caractérisation en dosimétrie a été menée en fond de puits pour se rapprocher des conditions de futures expérimentations sur cellules cultivées en monocouche.

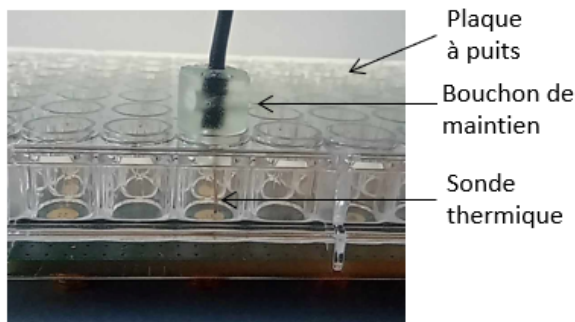


Figure 5: Photographie d'une sonde thermique à l'intérieur d'un puits sur la plateforme RF

La plateforme d'applicateurs RF développée est connectée à une chaîne de génération de signaux RF composée d'un générateur de signal en mode CW, d'un amplificateur RF et d'un isolateur. Tous ces éléments sont schématisés dans la Figure 6. Un bilan de puissance a été réalisé au préalable avec une sonde de puissance USB de la marque Mini-Circuits. Ce bilan permet de connaître la puissance exacte appliquée en fin de chaîne RF, c'est-à-dire en entrée de la plateforme RF.

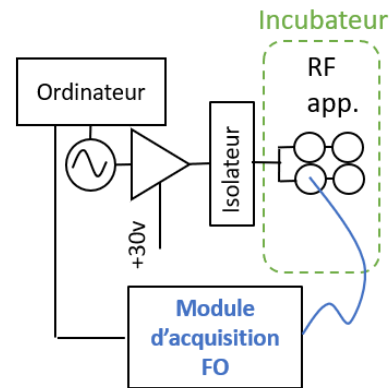


Figure 6 : Synoptique du banc de test en dosimétrie RF par fibre optique

Pour les tests de calibration en dosimétrie, nous avons étudié l'échauffement du DMEM (du Dubbeco's Modified Eagles Medium), un milieu de culture cellulaire couramment utilisé. Une phase de stabilisation de la température est effectuée et mesurée pendant 10 min. Le signal RF est ensuite appliqué. Nous avons étudié l'élévation en température à différentes puissances en fin de chaîne RF. Nous avons sélectionné les puissances de 0,5 W et 1 W, suffisamment élevées pour induire un échauffement du DMEM et permettant d'observer un rapport d'un facteur 2 lors du calcul du DAS. En effet, le DAS varie proportionnellement à la puissance appliquée.

La Figure 7 présente le profil en température obtenu pour des signaux incidents CW de 0,5W et 1 W à la fréquence de 2.3GHz dans 100µL de DMEM durant 1h30. Une élévation de température d'environ 1°C est obtenue pour un signal de 1W de puissance et une élévation de 0,5°C pour une puissance de 0,5W.

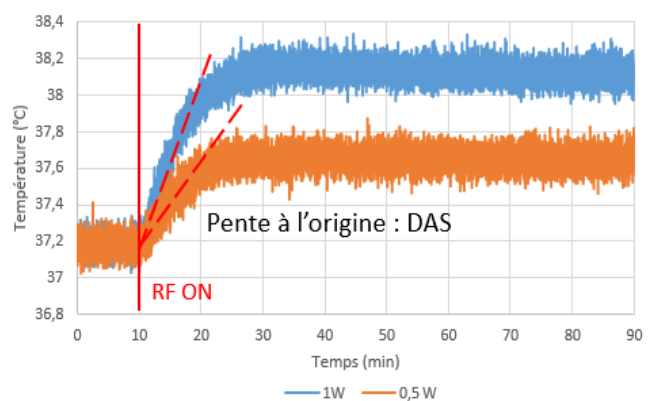


Figure 7 : Profils de température avec 100µL de DMEM pour des signaux RF appliqués en CW à 2.3 GHz à 0,5 W et 1W

Une fois les mesures effectuées, nous utilisons un programme développé en interne par l'équipe avec le logiciel Matlab pour réaliser une régression exponentielle et déterminer la valeur expérimentale du DAS pour chaque puissance appliquée. Dans les conditions de la Figure 7, le DAS mesuré en fond du puits irradié est de 3,8 W/kg pour

une puissance incidente de 0,5 W et de 7,4 W/kg pour 1 W. Un facteur très proche de 2 entre ces deux mesures de DAS est ainsi obtenu.

Ces mesures ont été répétées trois fois à chaque puissance afin de tester la répétabilité de ces résultats. La valeur moyenne du DAS et l'écart-type lié à ces trois mesures sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Valeur moyenne et écart-type du DAS pour 3 mesures à différentes puissances

Puissance (W)	DAS (W/kg)
0.5	4,0 ± 0.2
1	7,9 ± 0.5

Grâce à cette série de 3 mesures pour chaque puissance, nous remarquons que l'écart-type est relativement faible, 0,2 W/kg pour 0,5 W et 0,5 W/kg pour 1 W (moins de 7% de la valeur moyenne du DAS). Nous pouvons conclure que ces tests de calibration en dosimétrie et la mesure du DAS par régression exponentielle sont répétables.

IV. CONCLUSIONS

Une plateforme d'applicateurs RF en champ proche a été développée pour évaluer *in vitro* l'impact d'ondes RF sur cellules cultivées en 2D dans des plaques à 96 puits. Cette plateforme présente l'avantage de comporter de multiples applicateurs RF permettant une forte redondance en exposition RF d'échantillons biologiques. Une méthodologie de caractérisation en dosimétrie adaptée à la taille du contenant biologique a été mise en place afin de calibrer notre système d'exposition. Cette méthode thermique utilise une fibre optique terminée par un capteur thermique, qui est placé en fond de puits, à l'emplacement des cellules dans leur milieu de culture. Une régression exponentielle appliquée sur l'évolution thermique lors de l'application du signal RF permet de définir le DAS. Ainsi un signal incident à 2,3 GHz et une puissance de 1 W pour un volume de 100 µL de milieu de culture aboutit à un DAS de 7,9 W/kg. Une série de trois mesures à deux puissances a permis de montrer la répétabilité d'une telle expérimentation et de valider la mesure du DAS par régression exponentielle. Cette calibration en dosimétrie permet ainsi de définir la puissance d'entrée suivant le DAS que l'on souhaite appliquer sur cellules.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet RAPID d'acronyme CELL FI et le projet financé par le Programme National de Recherche Environnement-Santé-Travail de l'Anses avec le soutien des ministères chargés de l'environnement, de l'agriculture et du travail (ANSES-23-RF-09).

REFERENCES

- [1] Rapport ANSES sur l'exposition aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie "5G", Avril 2021.
- [2] K. Karipidis, R. Mate, D. Urban, R. Tinker, et A. Wood, « 5G mobile networks and health—a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz », *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 31, n° 4, p. 585-605, juill. 2021, doi: 10.1038/s41370-021-00297-6.
- [3] J. C. Lin, « Cancer Occurrences in Laboratory Rats From Exposure to RF and Microwave Radiation », *IEEE J. Electromagn. RF Microw. Med. Biol.*, vol. 1, n° 1, p. 2-13, juin 2017, doi: 10.1109/JERM.2017.2721427.
- [4] H. Al-Serori *et al.*, « Evaluation of the potential of mobile phone specific electromagnetic fields (UMTS) to produce micronuclei in human glioblastoma cell lines », *Toxicol. In Vitro*, vol. 40, p. 264-271, avr. 2017, doi: 10.1016/j.tiv.2017.01.012.
- [5] M. Zhadobov *et al.*, « Exposure System and Dosimetry for In Vitro Studies of Biocompatibility of Pulse-Modulated RF Signals of Ultrahigh Field MRI », *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 60, n° 11, p. 3167-3175, nov. 2013, doi: 10.1109/TBME.2013.2270371.
- [6] M. A. Garcia-Fernandez *et al.*, « Dosimetric Characteristics of an EMF Delivery System Based on a Real-Time Impedance Measurement Device », *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 63, n° 11, p. 2317-2325, nov. 2016, doi: 10.1109/TBME.2016.2527927.
- [7] T. Hagan, I. Chatterjee, D. McPherson, et G. L. Craviso, « A Novel Waveguide-Based Radio Frequency/Microwave Exposure System for Studying Nonthermal Effects on Neurotransmitter Release—Finite-Difference Time-Domain Modeling », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 32, n° 4, p. 1668-1676, août 2004, doi: 10.1109/TPS.2004.832699.
- [8] A. Moscaticello, B. Cerdan, C. Gironde, C. Furger, D. Dubuc, K. Grenier, "Dosimetry performances of a MultiWell-Plate-Based Near-Field RF Applicator for the Investigation of EM Impact on Biological Cells," IEEE International Microwave Symposium Proceedings (IMS 2022), Denver, USA, June 2022.
- [9] T. Wu, T.S. Rappaport, C.M. Collins, "Safe for generations to come," IEEE Microwave Magazine, pp. 65-84, March 2015.