

## MANUFACTURING CONDITIONS OF A MODIFIED TEM CELL FOR REAL-TIME OBSERVATION OF BIOLOGICAL CELLS EXPOSED TO ELECTROMAGNETIC FIELDS

SOUeid MALAK<sup>\*1</sup>, CARR LYNN<sup>1,2</sup>, O'CONNOR RODNEY P.<sup>1,2</sup>,  
LEVEQUE PHILIPPE<sup>1</sup>, ARNAUD-CORMOS DELIA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut de recherche XLIM, UMR CNRS 7252 Université de Limoges, 87060 Limoges, France*

<sup>2</sup> *LABEX "Sigma-LIM", Université de Limoges, 87060 Limoges, France*

**Abstract:** In this paper, we study the influence of the manufacturing conditions of a transverse electromagnetic (TEM) cell for real-time observation of biological cells during their exposure to electromagnetic fields. Microscopic observation is achieved through an aperture in the lower wall of the TEM cell that is sealed with a 700-nm film of the transparent conducting material Indium tin oxide (ITO). The ITO layer is connected to the lower wall with a conductive epoxy adhesive. To ensure a perfect and stable electrical contact, the epoxy must be heated to degas and consolidate. A study on the efficiency of contact provided by the epoxy was carried out according to the heating duration. The results show that a long heating duration more than 12 hours is required to obtain an electrical continuity in the aperture that is insensitive to temperature increase during exposure to electromagnetic fields.

**Keywords:** Transverse electromagnetic (TEM) cell, Indium tin oxide (ITO), optical transparency, electromagnetic field, electrical continuity, real-time.

### 1. INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, l'augmentation rapide de l'utilisation des appareils de communication sans fil (la téléphonie mobiles, Wi-Fi, RADAR...) a été accompagnée par une quantité importante de la recherche les effets possibles des champs électromagnétiques radiofréquences (allant du 30 kHz à 300 GHz) sur la santé [1]. Cependant, les mécanismes intervenant dans l'interaction entre les champs EM et les cellules vivantes, autres que ceux conduisant à des effets thermiques reconnus, sont encore mal connus. Ceci est principalement dû à l'absence des systèmes permettant la visualisation en temps réel des cellules biologiques pendant leur exposition à des champs EM. La visualisation en temps réel des cellules biologiques est importante pour définir et exploiter les mécanismes d'interaction, à la fois les effets thermiques et les effets potentiels non thermiques. Comme illustré dans [2], différents systèmes d'exposition ont été développés pour étudier les effets sanitaires des ondes EM. Pour l'investigation en temps réel, des systèmes d'exposition spécifiques ont également été conçus incorporant un réseau d'électrodes multiples [3] et des guides d'ondes coplanaires [4]. Quelques études permettent la surveillance de l'échantillon en utilisant l'imagerie microscopique. Pour tenir compte de la plaque du microscope pour des applications RF, des systèmes d'exposition existants peuvent être adaptés par l'addition d'une ouverture qui permet l'accès au système par l'intermédiaire d'un objectif de microscope. Pour les études in vitro sur les effets biologiques des RF induits à l'échelle microscopique, la cellule transverse électromagnétique (TEM) est un dispositif d'exposition couramment utilisé [5, 6]. Une cellule TEM ouverte avec

---

\* Corresponding author, [malak.soueid@xlim.fr](mailto:malak.soueid@xlim.fr)

une ouverture dans le centre de la plaque inférieure a été proposée pour l'observation microscopique en temps réel des cellules exposées [7].

Cependant, de telles modifications peuvent perturber de façon significative le champ électrique induit à l'intérieur de l'échantillon et ainsi modifier les performances du système d'exposition. Dans ce papier, nous proposons d'étudier l'influence des conditions de réalisation d'une cellule TEM avec l'ouverture fermée par un matériau conducteur optiquement transparent. Nous avons choisi une couche de 700-nm d'oxyde d'indium-étain (ITO) en tant que matériau conducteur, comme il est l'un des meilleurs candidats parmi les oxydes conducteurs transparents [8].

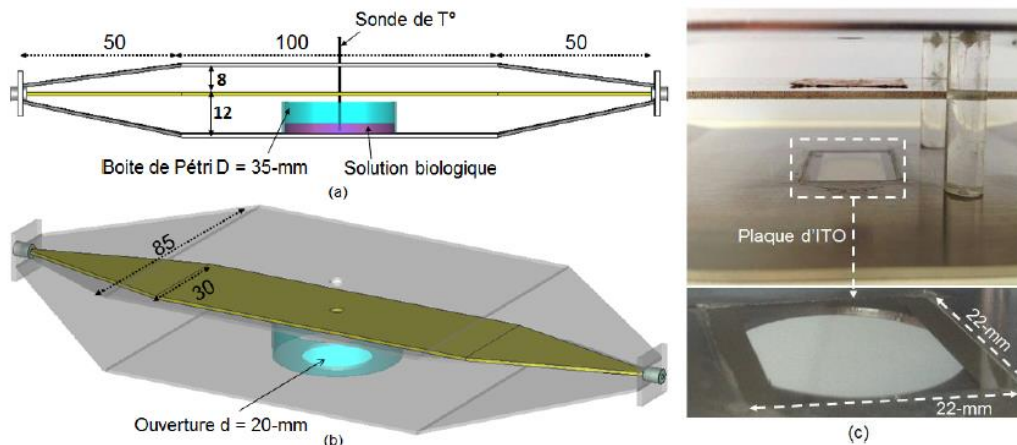


Fig.1. Cellule TEM contenant une boîte de Pétri: (a) vue de côté, (b) vue de dessus, (c) Photos de la couche d'ITO placée dans la plaque inférieure de la cellule TEM. Dimensions en mm.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1. La cellule transverse électromagnétique

Les dimensions de la cellule transverse électromagnétique (TEM) ouverte utilisée dans ce travail comme système d'exposition sont présentées dans la figure 1(a) et 1(b). La structure est de 200 mm de longueur, 85 mm de largeur, 20 mm de hauteur et montée sur la platine d'un microscope. La boîte de Pétri de 35 mm de diamètre est positionnée au centre de la paroi inférieure de la cellule TEM. En raison de la taille de l'objectif du microscope, une ouverture de 20-mm de diamètre est percée dans la paroi inférieure au-dessous de la boîte de Pétri pour visualiser en temps réel l'échantillon exposé et faciliter la compréhension des effets biologiques induits.

### 2.2. Caractéristiques de l'oxyde d'indium-étain

L'ITO est un mélange d'oxyde d'indium(III) ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde d'étain (IV) ( $\text{SnO}_2$ ). La caractéristique principale de ce composé est sa combinaison de conductivité électrique et de transparence optique. La plaque d'ITO utilisée pour fermer l'ouverture de 20-mm de diamètre et éviter les considérables perturbations du champ électrique induites dans l'échantillon biologique est présentée dans la figure 1(c). Elle consiste en une lame de verre carrée de largeur 22-mm et d'épaisseur 170- $\mu\text{m}$ , sur laquelle est déposée la couche de 700-nm d'ITO [7]. Avec cette épaisseur de la couche d'ITO, un bon comportement conducteur et une transparence optique de 85% sont atteints.

La couche d'ITO est caractérisée en terme de résistance carrée  $R_{\square}$ , exprimée en ohms par carré ( $\Omega/\square$ ). La résistance carrée de cette couche d'ITO est de 8-12  $\Omega/\square$ . Deux barres en argent sont imprimées aux deux bords opposés de la lame de verre, du côté de la couche d'ITO, pour assurer un bon contact électrique dans des applications où l'ITO doit être connecté électriquement à un dispositif donné comme dans notre cas. Chaque barre en argent a une épaisseur et une largeur de 3- $\mu\text{m}$  avec une résistance carrée inférieure à 0.2  $\Omega/\square$  et par suite une meilleure conductivité électrique que l'ITO.

### 2.3. Condition de de fermeture de l'ouverture avec la couche d'ITO

Différentes étapes ont été faites pour coller la plaque d'ITO à la cellule TEM et étudier la stabilité de son comportement électrique suite à l'élévation de la température lors de l'exposition RF du milieu biologique. Un carré de 22-mm<sup>2</sup> de surface et 170-μm de hauteur a été gravé au centre de la plaque inférieure de la cellule TEM au-dessus de l'ouverture. La plaque d'ITO est déposée dans le carré et fixée par de l'époxy électriquement conductrice pour garantir l'absence de l'air au niveau du contact avec la plaque inférieure et assurer ainsi une bonne continuité électrique entre les barres en argent et la cellule TEM. La cellule TEM est ensuite placée dans un four pour cuire l'époxy. La cuisson de l'époxy est une condition nécessaire pour la durcir ce qui la rend plus résistante aux changements thermiques lors des expositions RF. En plus l'époxy est préparé en mélangeant manuellement deux composants. Cette opération de mélange conduit à l'emprisonnement de bulles d'air dans l'époxy. L'apport de chaleur à l'époxy par cuisson permet de la dégazer et d'extraire les bulles d'air. Cela est indispensable pour optimiser les performances de conductivité de la colle époxy et améliorer l'homogénéité du joint de colle.

Pour tester l'influence de la durée de cuisson sur la stabilité de la continuité électrique assurée par la couche d'ITO, la cellule TEM avec la plaque d'ITO a été cuite à 120°C pour deux durées différentes de 1 heure et 12 heures. Après chaque cuisson, la cellule TEM a été utilisée pour faire des séries d'exposition de 3-ml de la solution biologique contenu dans la boîte de Pétri à un champ électromagnétique continu de fréquence 1,8 GHz et de puissance incidente égale à 25 W. Durant l'exposition, l'élévation de la température dans la solution a été mesurée a été effectuée à l'aide d'une sonde fluoroptique non perturbante transparente au niveau de l'environnement électromagnétique, accompagnée d'un boîtier de mesure (Luxtron One, Lumasense Technologies, CA, USA).

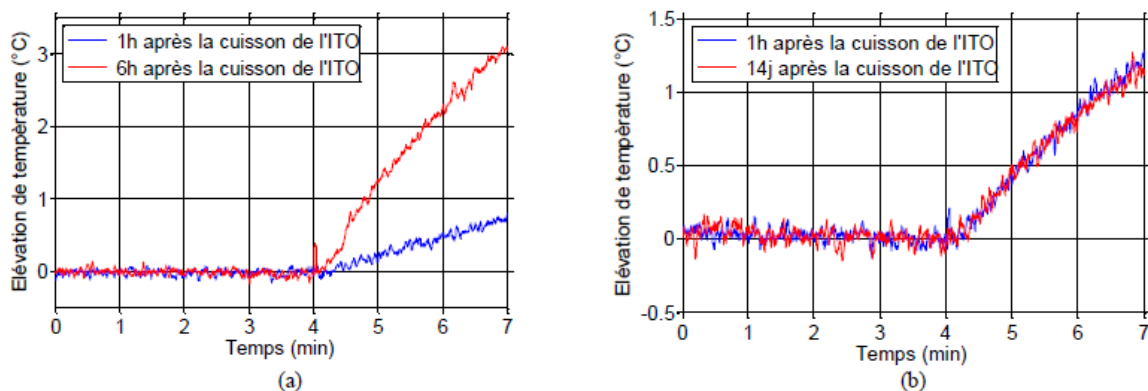


Fig.2. Les résultats de mesures de température pour l'exposition de 3-ml de la solution saline à une fréquence de 1.8 GHz et une puissance incidente  $P_{inc} = 25$  W dans la cellule TEM avec l'ouverture de diamètre 20-mm fermée par la plaque d'ITO cuite dans le four à 120°C pour une durée de : (a) 1 heure, (b) 12 heures.

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Après la cuisson de la cellule TEM à 120°C pendant une heure, deux séries de mesure d'élévation de température ont été faites à deux temps différents pour étudier la stabilité de la continuité électrique dans l'ouverture assurée par l'ITO au cours du temps. La figure 2(a) montre les résultats d'élévation de température obtenus. La première série de mesures a été faite une heure après la cuisson de la cellule TEM. La deuxième série de mesure a été faite six heures après la cuisson de la cellule TEM avec les mêmes conditions d'exposition. Nous ne présentons qu'une seule mesure de chaque série puisque nous avons obtenu une reproductibilité du résultat dans les différentes mesures d'une même série.

La comparaison des résultats de mesure des deux séries, présentés dans la figure 2(a), montre deux élévations de températures différentes. Pour une exposition de 3-min, une élévation de température de 0.7°C est obtenue dans la première mesure effectuée une heure après la cuisson tandis qu'une élévation de température de 3,1°C est obtenue six heures après la cuisson. Cela indique que la plaque d'ITO n'est pas vue de la même manière dans les deux cas. Son comportement électrique est instable au cours du temps. L'élévation de la température dans la solution en fonction du temps est beaucoup plus élevée après six heures qu'une heure après la cuisson. Une

discontinuité électrique et un fort couplage électrique a une lieu dans la solution grâce à l'ouverture même en présence de l'ITO. La cellule TEM avec la couche d'ITO ne se comporte plus comme une cellule TEM sans ouverture dans la plaque inferieure.

La même cellule TEM avec la même plaque d'ITO fixée avec l'époxy conductrice a été recuite dans le four à 120°C pour une durée plus longue, de 12 heures. Des mesures d'élévation de température avec les mêmes conditions d'exposition ( $f = 1.8$  GHz,  $P_{inc} = 25$  W) ont été réalisées sur une durée de deux semaines après la cuisson.

La figure 2(b) montre les résultats d'élévation de température dans la solution après une heure et 14 jours de la cuisson de la cellule TEM. Comme nous observons, les deux courbes de température sont confondues. La même élévation de température de 1.1°C est obtenue dans la solution saline pour une exposition de 3-min une heure et 14 jours après la cuisson. Cela indique que le comportement de la cellule TEM avec l'ouverture fermée par la couche d'ITO reste stable au cours du temps ce qui est indispensable pour la reproductibilité des résultats. La continuité du champ électrique dans l'ouverture est assurée par la présence de l'ITO. La cuisson de l'époxy pendant une heure était alors insuffisante pour la dégazer et la durcir totalement et assurer un contact parfait de l'ITO avec la plaque inferieure de la cellule TEM insensible aux changements thermiques durant les exposition RF.

#### 4. CONCLUSIONS

Dans ce papier, nous avons étudié l'influence des conditions de réalisation d'une cellule TEM modifiée par une ouverture dans sa plaque inferieure couverte par un métal transparent (l'oxyde d'indium-étain) pour permettre l'observation en temps réel des cellules biologiques durant leur exposition aux champs électromagnétiques. En particulier, nous avons démontré le temps minimale de cuisson de la colle époxy conductrice utilisée nécessaire pour assurer un contact électrique parfait et stable au cours du temps entre la couche d'ITO et la plaque de la cellule TEM. Une cuisson de longue, de 12 heures, a été suffisante pour durcir l'époxy et rendre le contact entre l'ITO et la plaque de la cellule TEM stable au cours du temps et insensible aux changements thermiques durant les expositions RF.

#### RÉFÉRENCES

- [1] P. A. Valberg, T. E. van Deventer, and M. H. Repacholi, "Workgroup report: Base stations and wireless networks-radiofrequency (RF) exposures and health consequences," *Environmental Health Perspectives*, vol. 115, pp. 416-424, Mar 2007.
- [2] A. Paffi, C. Merla, R. Pinto, G. A. Lovisolo, M. Liberti, C. Marino, et al., "Microwave Exposure Systems for In Vivo Biological Experiments: A Systematic Review," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 1980-1993, 2013.
- [3] D. Moretti, A. Garenne, E. Haro, F. Poullietier de Gannes, I. Lagroye, P. Leveque, et al., "In-vitro exposure of neuronal networks to the GSM-1800 signal," *Bioelectromagnetics*, vol. 34, pp. 571-578, Dec. 2013.
- [4] A. Paffi, M. Pellegrino, R. Beccherelli, F. Apollonio, M. Liberti, D. Platano, et al., "A Real-Time Exposure System for Electrophysiological Recording in Brain Slices," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 2463-2471, 2007.
- [5] R. P. O'Connor, S. D. Madison, P. Leveque, H. L. Roderick, and M. D. Bootman, "Exposure to GSM RF Fields Does Not Affect Calcium Homeostasis in Human Endothelial Cells, Rat Pheocromocytoma Cells or Rat Hippocampal Neurons," *Plos One*, vol. 5, p. 16, Jul 2010.
- [6] J. X. Zhao, H. M. Lu, and J. Deng, "DOSIMETRY AND TEMPERATURE EVALUATIONS OF A 1800 MHz TEM CELL FOR IN VITRO EXPOSURE WITH STANDING WAVES," *Progress in Electromagnetics Research-Pier*, vol. 124, pp. 487-510, 2012.
- [7] M. Soueid, S. Kohler, L. Carr, S. M. Bardet, R. P. O'Connor, P. Leveque, and D. Arnaud-Cormos, "Electromagnetic Analysis of an Aperture Modified TEM Cell Including an ITO Layer for Real-Time Observation of Biological Cells Exposed to Microwaves". *Progress In Electromagnetics Research*, 149, 193-204, 2014.
- [8] T. Yasin, R. Baktur, and C. Furse, "A comparative study on two types of transparent patch antennas," in *General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI, 2011*, pp. 1-4.