



CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DE LA DOSIMÉTRIE À LA SANTÉ HUMAINE

État de l'art en matière de dosimétrie expérimentale (RF et pulses)

RF and pulses experimental dosimetry

Philippe Leveque*, Delia Arnaud-Cormos**.

*XLIM, Université de Limoges – CNRS, philippe.leveque@unilim.fr

**XLIM, Université de Limoges – CNRS, delia.arnaud-cormos@ensil.unilim.fr

Mots-clefs : bioélectromagnétisme, dosimétrie, système d'exposition
bioelectromagnetism, dosimetry, exposure device

Résumé

La dosimétrie expérimentale est un point clef dans les études des interactions des champs électromagnétiques avec le vivant. En effet, la connaissance du champ électromagnétique dans les milieux ou tissus biologique est un paramètre déterminant pour l'analyse et la reproductibilité des résultats. L'objet de cette présentation est d'une part de mettre en évidence l'intérêt de la dosimétrie et d'autre part de décrire les outils nécessaires pour mener à bien cette dernière. Le domaine d'investigation s'appuiera plus particulièrement sur les systèmes d'exposition, en considérant deux types de signaux spécifiques : ceux utilisés dans le cadre des télécommunications sans fil et les impulsions de champs électriques de durée ultra-courtes et de très forte intensité.

Introduction

L'utilisation des ondes électromagnétiques est aujourd'hui de plus en plus répandue que ce soit pour des applications de télécommunications sans fil ou des applications industrielles, médicales ou scientifiques. Pour répondre le plus précisément possible aux éventuels effets des ondes électromagnétiques sur le vivant, il est nécessaire d'effectuer des expérimentations en laboratoire dans des conditions parfaitement maîtrisées et caractérisées. La connaissance des niveaux d'exposition dans les milieux biologiques exposés aux ondes électromagnétiques est un élément indispensable à l'interprétation des résultats biologiques, biophysiques ou encore biochimiques. Les applications des radiofréquences couvrent un vaste domaine. Pour illustrer la problématique de la dosimétrie expérimentale, deux types de signaux seront envisagés correspondant d'une part aux domaines de fréquences des signaux de télécommunications sans fil, et d'autre part aux champs électromagnétiques pulsés de très courte durée et très forte amplitude.

De nombreuses études ont été effectuées depuis l'avènement de la téléphonie mobile sur les signaux GSM-900 [1-5] et GSM-1800 [6-8], et plus récemment sur les signaux EDGE, UMTS, Wifi [9-11], pour citer les principaux. Les dispositifs expérimentaux développés pour effectuer des études en laboratoire ont porté aussi bien sur les études *in vivo* et *in vitro*. Deux exemples seront présentés permettant de mettre en évidence la pertinence et l'importance de la dosimétrie.

Pour ce qui concerne les applications biomédicales des champs électromagnétiques, il existe un nouveau champ d'investigation autour des champs électriques pulsés de très courte durée, typiquement de quelques nanosecondes, et de très forte amplitude. Ces travaux sont effectués dans la continuité d'une application bioélectrique, qui est aujourd'hui pratiquée en clinique, qui est l'électrochimiothérapie [12-15]. Il est recherché aujourd'hui avec des impulsions plus courtes de nouveaux effets et de nouvelles cibles à l'intérieur même de la cellule biologique. [16-18]

1. Système d'exposition et dosimétrie pour les signaux RF

Afin d'illustrer l'importance de la dosimétrie, deux exemples vont être considérés. On s'appuiera sur la dosimétrie numérique pour montrer à quel point le couplage entre une onde électromagnétique et un milieu diélectrique est dans la plupart des cas difficilement prévisibles. Les grandeurs admises pour caractériser l'exposition sont généralement le débit d'absorption spécifique (DAS, ou SAR en anglais pour Specific Absorption Rate) qui s'exprime en W/kg ou encore l'absorption spécifique (AS) qui s'exprime en J/kg. Le DAS peut être obtenu soit à partir de la connaissance du

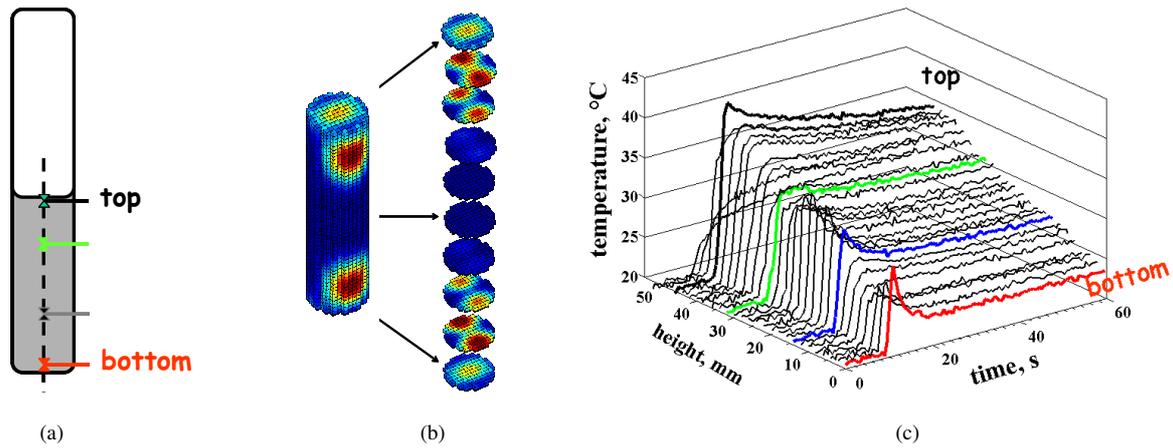


Fig. 2. Exposition in vitro - Dosimétrie numérique et expérimentale : (a) 5 ml de solution dans le tube à essai, ce dernier étant placé dans une cavité cylindrique ; (b) Distribution spatiale du DAS à 2.45 GHz obtenue par simulation numérique (fdtd) ; (c) Distribution spatio-temporelle de la température obtenue expérimentalement

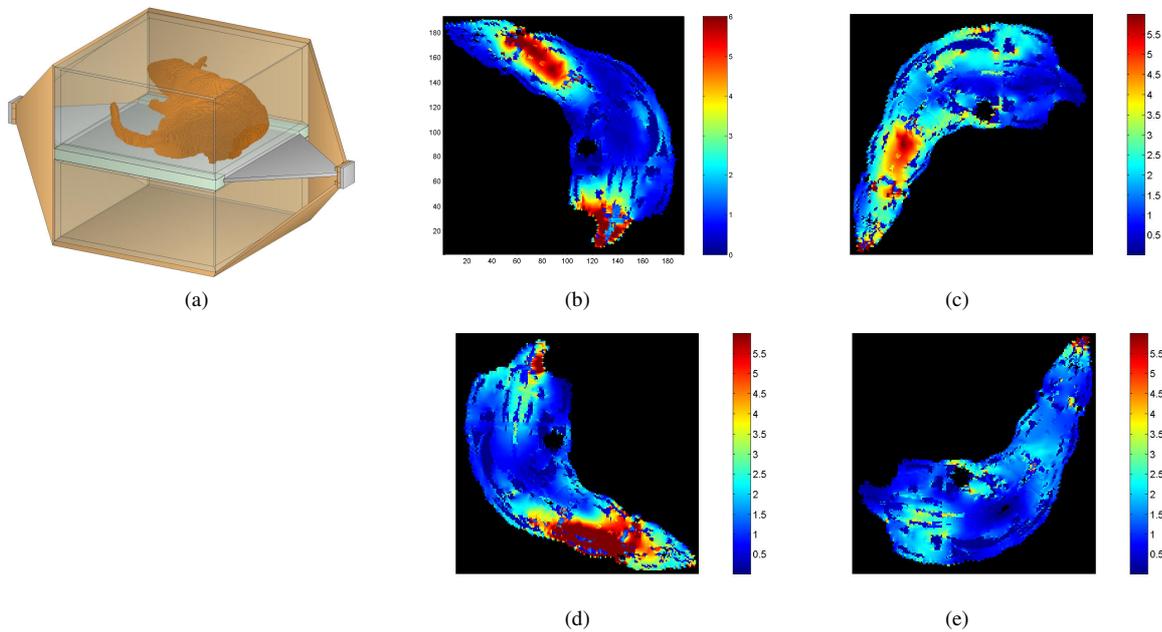


Fig. 1. Exposition in vivo – Dosimétrie numérique : (a) vue 3D du modèle de rat placé dans une cellule TEM ; (b), (c), (d), (e) Distribution spatiale de DAS dans un plan de coupe du modèle en fonction de la position de l'animal, à la fréquence de 900 MHz.

champ électrique, soit à partir de la connaissance de la variation de température dans le milieu exposé. Les milieux biologiques peuvent généralement être considérés comme des milieux diélectriques à pertes et peuvent présenter une très forte inhomogénéité.

1.1. Exposition in vitro

Un dispositif basé sur une cavité cylindrique est utilisé pour exposer un tube à essai rempli de 5 ml de solution. Une description détaillée peut être trouvée dans la référence [19]. Le système est dimensionné pour exposer la solution à une onde électromagnétique à la fréquence de 2.45 GHz. En l'absence de l'échantillon dans la cavité, le champ électrique est maximal au centre de la cavité, à l'endroit où est placée la solution. La présence de l'échantillon va perturber de façon significative la distribution de champ faisant apparaître deux zones où les niveaux de DAS sont élevés, comme illustré sur la Fig. 1. Pour compléter ces résultats de dosimétrie numérique, des mesures de températures ont été effectuées pour une puissance incidente entraînant un échauffement significatif. Une distribution spatio-temporelle de la température est illustrée sur la Fig. 1. On observe dans les tous premiers instants une montée rapide de la température en haut et en bas du tube, puis le phénomène de convection lié aux différences de densité, induit un gradient de température significatif. Cet exemple illustre clairement les besoins de quantifier les distributions de DAS et de température dans les échantillons exposés.

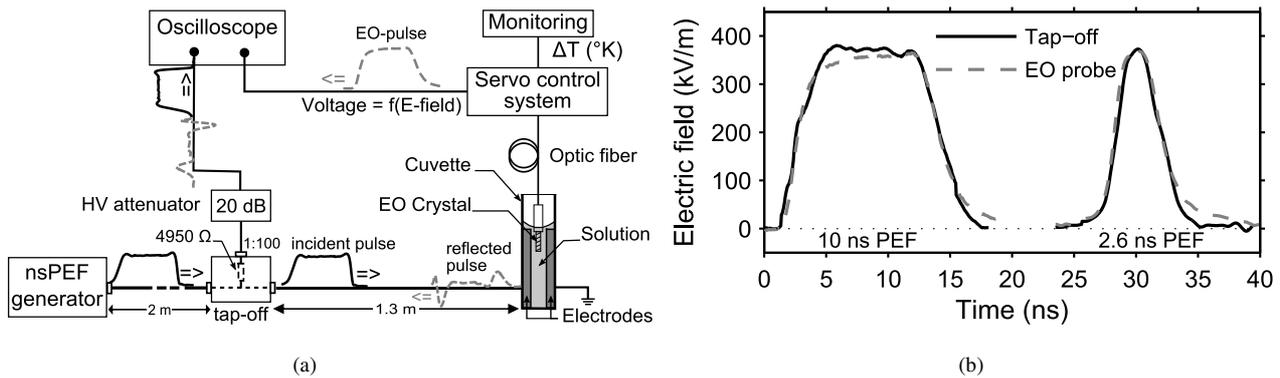


Fig. 3. Système d'exposition et dosimétrie expérimentale pour une exposition aux impulsions nanosecondes : (a) Schéma du dispositif ; (b) mesure du champ électrique déduite de la mesure de l'onde de tension incidente et réfléchie et obtenue avec la sonde électro-optique.

1.2. Exposition in vivo

L'exposition des animaux requière une attention particulière. Différents systèmes ont été développés et caractérisés. On peut citer l'antenne boucle qui permet une exposition locale de l'animal, ce dernier étant placé dans une fusée de contention [3]. Pour permettre des mouvements libres des animaux, un dispositif basé sur une chambre réverbérante à brassage de mode a été mis en place pour une exposition corps entier à des signaux Wifi [11, 20]. Par le passé, une exposition a été effectuée en plaçant un animal dans une cellule TEM. L'animal avait la possibilité de bouger à l'intérieur de la structure. La dosimétrie numérique effectuée a montré des variations significatives des niveaux de DAS suivant la position de l'animal (Fig. 2). Un facteur 10 a été observé sur la valeur moyenne du DAS évaluée dans le cerveau de l'animal. Il apparaît alors extrêmement délicat d'interpréter les résultats biologiques observés avec la présence d'une telle variation.

1.3. Sondes de mesure de DAS et de température

Il existe aujourd'hui plusieurs types de sonde de DAS. Certaines sont plus spécifiquement destinées à l'évaluation des niveaux d'exposition des téléphones portables par exemple, d'autres sont plus destinées à la dosimétrie des systèmes d'exposition [21]. Elles sont basées soit sur la mesure de température, soit sur la mesure du champ électrique. Elles doivent dans les deux cas présenter une forte immunité aux champs électromagnétiques pour ne pas perturber la distribution de DAS dans l'échantillon. Elles doivent également présenter un encombrement réduit pour obtenir une résolution spatiale la plus fine possible.

2. Système d'exposition et dosimétrie pour les signaux pulsés

L'utilisation de champ électromagnétique pulsé de très forte amplitude demande comme pour les signaux de télécommunications sans fil une parfaite maîtrise des conditions d'expositions. Suivant la durée des impulsions, deux types de dispositif peuvent être utilisés. Pour les impulsions les plus longues, typiquement supérieures à quelques nanosecondes, la solution ou les tissus exposés sont en contact directe avec les électrodes [22, 23]. Il y a alors passage d'un courant de conduction. Pour les impulsions les plus courtes, généralement subnanosecondes, il n'est plus nécessaires d'avoir un contact directe entre le milieu exposé et les électrodes et c'est un courant de déplacement qui est présent [24].

La durée très courte des impulsions permet de réduire fortement les élévations de températures et autorise des expositions avec des niveaux de champs électromagnétiques très élevés. Il est alors ainsi possible d'appliquer des impulsions de tension supérieure à quelques kV sur es électrodes distantes de quelques centaines de μm [25].

2.1. Exposition in vitro

Un système d'exposition aux impulsions nanosecondes est présenté sur la Fig. 3. Il est généralement constitué d'un générateur et d'un système qui permet de délivrer les impulsions à l'échantillon exposé. Une chaîne d'acquisition permet de prélever une faible partie du signal pour connaître les signaux incidents et réfléchis et connaître ainsi les impulsions réellement appliqués. Il est aussi, dans la mesure du possible, nécessaire d'effectuer une mesure dans l'échantillon, comme décrit sur la Fig. 3.

2.2. Sondes de mesure de DAS et de température

La dosimétrie expérimentale requière dans ces conditions de champ de très forte intensité un type de sonde différent de celles utilisées pour les signaux RF (bas niveau). Des travaux récents ont permis le développement et la caractérisation d'une telle sonde [26-28]. Il s'agit d'une sonde électro-optique qui présente l'avantage de mesurer à la fois une composante de champ électrique en transitoire (sans redressement) et la température [29, 30]. Les caractéristiques plus précises de cette sonde font l'objet d'une présentation au cours des JS12.

Références bibliographiques

- [1] M. G. Moisesescu, P. Leveque, M.-A. Verjus, E. Kovacs, and L. M. Mir, "900 MHz Modulated Electromagnetic Fields Accelerate the Clathrin-Mediated Endocytosis Pathway," *Bioelectromagnetics*, vol. 30, pp. 222-230, Apr 2009.
- [2] V. Joubert, P. Leveque, A. Rametti, A. Collin, S. Bourthoumieu, and C. Yardin, "Microwave exposure of neuronal cells in vitro: Study of apoptosis," *International Journal of Radiation Biology*, vol. 82, pp. 267-275, Apr 2006.
- [3] P. Leveque, C. Dale, B. Veyret, and J. Wiart, "Dosimetric analysis of a 900-MHz rat head exposure system," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 52, pp. 2076-2083, Aug 2004.
- [4] W. Stankiewicz, R. Zdanowski, E. Skopinska-Roewska, D. Ujazdowska, J. Kieliszeki, P. Skopinski, P. Boder, and E. Sommer, "The effect of 900 MHz microwave GSM signal on the proliferation of endothelial cells in vitro," *Central European Journal of Immunology*, vol. 36, pp. 215-219, 2011.
- [5] A. Sannino, G. Di Costanzo, F. Brescia, M. Sarti, O. Zeni, J. Juutilainen, and M. R. Scarfi, "Human Fibroblasts and 900 MHz Radiofrequency Radiation: Evaluation of DNA Damage after Exposure and Co-exposure to 3-Chloro-4-(dichloromethyl)-5-Hydroxy-2(5h)-furanone (MX)," *Radiation Research*, vol. 171, pp. 743-751, Jun 2009.
- [6] A. Watilliaux, J.-M. Edeline, P. Lévêque, T. Jay, and M. Mallat, "Effect of Exposure to 1,800 MHz Electromagnetic Fields on Heat Shock Proteins and Glial Cells in the Brain of Developing Rats," *Neurotoxicity Research*, vol. 20, pp. 109-119, Aug 2011.
- [7] H. Masuda, S. Sanchez, P. E. Dulou, E. Haro, R. Anane, B. Billaudel, P. Leveque, and B. Veyret, "Effect of GSM-900 and -1800 signals on the skin of hairless rats. I: 2-hour acute exposures," *International Journal of Radiation Biology*, vol. 82, pp. 669-674, Sep 2006.
- [8] S. Sanchez, H. Masuda, B. Billaudel, E. Haro, R. Anane, P. Leveque, G. Ruffie, I. Lagroye, and B. Veyret, "Effect of GSM-900 and -1800 signals on the skin of hairless rats. II: 12-week chronic exposures," *International Journal of Radiation Biology*, vol. 82, pp. 675-680, Sep 2006.
- [9] F. P. de Gannes, E. Haro, A. Hurtier, M. Taxile, G. Ruffie, B. Billaudel, B. Veyret, and I. Lagroye, "Effect of Exposure to the Edge Signal on Oxidative Stress in Brain Cell Models," *Radiation Research*, vol. 175, pp. 225-230, Feb 2011.
- [10] K.-Y. Lee, B. C. Kim, N.-K. Han, Y.-S. Lee, T. Kim, J.-H. Yun, N. Kim, J.-K. Pack, and J.-S. Lee, "Effects of combined radiofrequency radiation exposure on the cell cycle and its regulatory proteins," *Bioelectromagnetics*, vol. 32, pp. 169-178, 2011.
- [11] S. Ait-Aissa, B. Billaudel, F. P. De Gannes, A. Hurtier, E. Haro, M. Taxile, G. Ruffie, A. Athane, B. Veyret, and I. Lagroye, "In situ detection of gliosis and apoptosis in the brains of young rats exposed in utero to a Wi-Fi signal," *Comptes Rendus Physique*, vol. 11, pp. 592-601, Nov-Dec 2010.
- [12] L. M. Mir, M. F. Bureau, J. Gehl, R. Rangara, D. Rouy, J. M. Caillaud, P. Delaere, D. Branellec, B. Schwartz, and D. Scherman, "High-efficiency gene transfer into skeletal muscle mediated by electric pulses," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 96, pp. 4262-4267, Apr 1999.
- [13] J. Gehl, T. H. Sorensen, K. Nielsen, P. Raskmark, S. L. Nielsen, T. Skovsgaard, and L. M. Mir, "In vivo electroporation of skeletal muscle: threshold, efficacy and relation to electric field distribution," *Biochimica Et Biophysica Acta-General Subjects*, vol. 1428, pp. 233-240, Aug 1999.
- [14] D. Miklavcic, K. Beravs, D. Semrov, M. Cemazar, F. Demsar, and G. Sersa, "The importance of electric field distribution for effective in vivo electroporation of tissues," *Biophysical Journal*, vol. 74, pp. 2152-2158, May 1998.
- [15] L. M. Mir, S. Orłowski, J. Belehradek, J. Teissie, M. P. Rols, G. Sersa, D. Miklavcic, R. Gilbert, and R. Heller, "Biomedical applications of electric pulses with special emphasis on antitumor electrochemotherapy," *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, vol. 38, pp. 203-207, Aug 1995.
- [16] P. T. Vernier and M. J. Ziegler, "Nanosecond field alignment of head group and water dipoles in electroporating phospholipid bilayers," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 111, pp. 12993-12996, Nov 2007.
- [17] R. Nuccitelli, U. Pliquett, X. Chen, W. Ford, R. James Swanson, S. J. Beebe, J. F. Kolb, and K. H. Schoenbach, "Nanosecond pulsed electric fields cause melanomas to self-destruct," *Biochemical and Biophysical Research Communications*, vol. 343, pp. 351-360, 2006.
- [18] K. H. Schoenbach, R. P. Joshi, J. F. Kolb, C. Nianyong, M. Stacey, P. F. Blackmore, E. S. Buescher, and S. J. Beebe, "Ultrashort electrical pulses open a new gateway into biological cells," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, pp. 1122-1137, 2004.
- [19] M. Cueille, A. Collin, C. Pivain, and P. Leveque, "Development of a numerical model connecting electromagnetism, thermal and hydrodynamics to analyse in vitro exposure system," *Annales Des Telecommunications-Annals of Telecommunications*, vol. 63, pp. 17-28, Feb 2008.
- [20] T. N. Wu, A. Hadjem, M. F. Wong, A. Gati, O. Picon, and J. Wiart, "Whole-body new-born and young rats' exposure assessment in a reverberating chamber operating at 2.4 GHz," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 55, pp. 1619-1630, Mar 2010.
- [21] J. Schuderer, T. Schmid, G. Urban, T. Samaras, and N. Kuster, "Novel high-resolution temperature probe for radiofrequency dosimetry," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 49, pp. N83-N92, Mar 2004.
- [22] D. Arnaud-Cormos, P. Leveque, Y.-H. Wu, J. M. Sanders, M. A. Gundersen, and T. P. Vernier, "Microchamber Setup Characterization for Nanosecond Pulsed Electric Field Exposure," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 1656-1662, June 2011.

- [23] M. Kenaan, S. El Amari, A. Silve, C. Merla, L. M. Mir, V. Couderc, D. Arnaud-Cormos, and P. Leveque, "Characterization of a 50- Ω Exposure Setup for High-Voltage Nanosecond Pulsed Electric Field Bioexperiments," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 207-214, Jan 2011.
- [24] X. Shu, S. Altunc, P. Kumar, C. E. Baum, and K. H. Schoenbach, "A Reflector Antenna for Focusing Subnanosecond Pulses in the Near Field," *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 9, pp. 12-15, 2010.
- [25] C. Dalmay, J. Villemejeane, V. Joubert, O. Francais, L. M. Mir, and B. Le Pioufle, "Design and realization of a microfluidic device devoted to the application of ultra-short pulses of electrical field to living cells," *Sensors and Actuators B-Chemical*, vol. 160, pp. 1573-1580, Dec 15 2011.
- [26] M. Bernier, G. Gaborit, L. Duvillaret, A. Paupert, and J. L. Lasserre, "Electric field and temperature measurement using ultra wide bandwidth pigtailed electro-optic probes," *Applied Optics*, vol. 47, pp. 2470-2476, May 2008.
- [27] P. Jarrige, N. Ticaud, S. Kohler, R. P. O'Connor, L. Duvillaret, G. Gaborit, D. Arnaud-Cormos, and P. Leveque, "Electro-Optic Probe adapted for Bioelectromagnetic Experimental Investigations," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. to be published.
- [28] M. Bernier, L. Duvillaret, G. Gaborit, A. Paupert, and J. L. Lasserre, "Temperature-dependent-free pigtailed electro-optic sensors for vectorial measurement of microwave signals," in *Sensors, 2007 IEEE*, 2007, pp. 573-576.
- [29] S. Kohler, P. Jarrige, N. Ticaud, R. P. O'Connor, L. Duvillaret, G. Gaborit, D. Arnaud-Cormos, and P. Leveque, "Simultaneous High Intensity Ultrashort Pulsed Electric Field and Temperature Measurements Using a Unique Electro-Optic Probe," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 22, pp. 153-155, 2012.
- [30] P. Jarrige, N. Ticaud, S. Kohler, R. P. O'Connor, L. Duvillaret, G. Gaborit, D. Arnaud-Cormos, and P. Leveque, "Electro-Optic Probe adapted for Bioelectromagnetic Experimental Investigations," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 2012.