

ELF - COMMENT CALCULER LE CHAMP ELECTRIQUE INDUIT DANS LE CORPS HUMAIN ET AVEC QUELLE INCERTITUDE ?

Noël BURAI, Riccardo SCORRETTI

Laboratoire Ampère - UMR CNRS 5005 – Université Claude Bernard Lyon 1
bat. Oméga - 43 bd du 11 novembre 1918 - 69622 Villeurbanne
noel.burais@univ-lyon1.fr riccardo.scorretti@univ-lyon1.fr

L'arrivée de la nouvelle directive européenne 2013/35/UE est une étape importante dans le long processus de réglementation débuté en 1999 avec les recommandations ICNIRP pour l'évaluation de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques. Cette réglementation s'appuie sur la notion d'effets à court terme sur lesquels il existe un certain consensus scientifique. Elle concerne des valeurs limites notamment en basses fréquences (BF) : grandeurs mesurables ou Valeurs Déclenchant l'Action (VDA ou VA, appelés niveaux de référence par ICNIRP), les champs d'exposition électrique E et magnétique H, et une grandeur non mesurable ou Valeur limite d'exposition (VLE, appelée restriction de base par ICNIRP), le champ électrique E_i interne induit dans le corps humain. Par rapport à la précédente directive 2004/40/CE, cette dernière notion remplace celle de la densité de courant induit, mais cela ne constitue pas en soi un changement vis-à-vis de la problématique de calcul.

Lors de l'évaluation de l'exposition, dans le cas où les VDA mesurées à l'emplacement du corps humain sont dépassées, la mesure directe d'un phénomène induit localement dans le corps est impossible en BF. La dosimétrie numérique est alors le seul moyen pour accéder avec précision à la VLE (ou champ électrique induit E_i). Cette situation concerne a priori les cas de fortes valeurs de courant ou de tension dans le dispositif rayonnant, et/ou de faible distance entre le dispositif et le corps.

La dosimétrie numérique ou modélisation 3D des phénomènes électromagnétiques a atteint une certaine maturité malgré la complexité des interactions électromagnétiques entre le dispositif et le corps humain. Ses divers organes présentent en effet à l'échelle macroscopique des propriétés électromagnétiques très spécifiques (conductivité $\sigma < 1$ S/m, permittivité diélectrique $\epsilon_r > 10^6$ en BF). Par ailleurs, la structure géométrique du corps reste très complexe avec des dimensions très diverses des constituants (tissus, organes..).

Dans cette présentation, les auteurs font le point sur les modèles, une méthode numérique utilisée (les Eléments Finis 3D), les démarches spécifiques associées en termes de précision de calcul du champ induit E_i en BF. La précision est liée en effet à divers paramètres, en particulier, le modèle géométrique du corps, les propriétés (σ, ϵ_r) des tissus, la formulation mathématique utilisée en fonction des caractéristiques de l'exposition, la qualité du maillage par Eléments Finis, ..etc.

Initialement, les simulations étaient réalisées à partir d'un nombre très limité de modèles géométriques du corps humain (principalement Zubal, UVic, NorMan et le « Visible Human Project »). Dans les dernières années, le nombre de modèles du corps humain disponibles ne cesse d'augmenter : ces nouveaux modèles sont beaucoup précis (plus haute résolution) et détaillés (nombre d'organes représentés) que les précédents, et permettent de simuler différentes postures et morphologies.

Par contre, les propriétés macroscopiques (σ, ϵ_r) des divers organes s'appuient toujours presque uniquement sur les diverses études, synthèses et donc chiffres de C. Gabriel [1]. Ces valeurs in vitro présentent a priori une incertitude importante, mais constituent **la** seule

référence actuelle pour des calculs normatifs. Il est toutefois possible de déterminer l'impact sur le champ induit de l'incertitude mais sur les paramètres d'un nombre limité d'organes seulement, car l'utilisation d'une méthode dite stochastique impacte de manière exponentielle les coûts de calcul [5]. Une autre voie [3], la mesure de ces propriétés à l'échelle cellulaire et la détermination des propriétés macroscopiques par changement d'échelle, relève pour le moment de la recherche pure à long terme.

En fonction de l'exposition (champ électrique E ou magnétique H, seuls ou prédominants, ou exposition simultanée E/H), différentes formulations mathématiques sont disponibles (ϕ -A, T-B, A-V, T- Ω) dans les logiciels. Elles permettent de réduire la complexité imposée par les fameuses équations de Maxwell. Elles s'appuient, soit sur une détermination directe simultanée des phénomènes électromagnétiques sur l'ensemble dispositif rayonnant/corps humain, soit sur une détermination en deux étapes (par exemple, calcul du champ H rayonné par le dispositif en l'absence du corps, puis calcul des phénomènes induits dans le corps humain seul). Le choix de l'une ou l'autre démarche et d'une formulation (voire d'une combinaison entre 2 formulations) relève d'un compromis précision/coût de calcul [2,4].

Les calculs HF sont généralement basés sur la méthode numérique FDTD associée à un maillage grille 3D homogène directement compatible avec des modèles « voxélisés ». En BF, la méthode des Eléments Finis (EF) est de plus en plus utilisée, surtout grâce aux récents développements dans les modèles du corps humain, car elle est a priori plus adaptée pour représenter des formes complexes et obtenir un maillage 3D non conforme, dont la finesse est adaptée à la taille des organes et tissus. Les logiciels EF disposent de meilleurs automatismes dont le résultat et donc la précision du calcul, dépendent de la géométrie et des critères de raffinement locaux [6] que doit imposer l'utilisateur sur la base de la connaissance intuitive des phénomènes, par exemple, à une interface entre 2 organes de paramètres (σ, ϵ_r) très différents. Cependant, le maillage du corps humain, malgré les récents progrès, reste une étape complexe qui doit être exécutée par un spécialiste.

Quelle que soit la méthode performante de résolution numérique utilisée, elle reste une méthode approchée, contrairement à une solution analytique qui donne un résultat exact, mais uniquement pour des problèmes canoniques. La comparaison entre champs induits obtenus avec diverses formulations, d'une part, et le développement d'estimateurs résiduels d'erreurs [7], d'autre part, sont les seuls moyens disponibles actuellement pour estimer l'erreur commise dans la résolution numérique, la mesure directe de champs induits étant pour le moins problématique – voire impossible – à l'intérieur du corps.

1. C.Gabriel et al., "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz", *Phys. Med. Biol.* 41 2251-2269, 1996.
2. R. Scorretti, R. Perrussel, D. Voyer, N. Burais, L. Nicolas, "Domain decomposition for computing extremely low frequency induced current in the human body", *IEEE Trans. on Magnetics*, Volume: 47 , Issue: 5, Page(s): 886 – 889, 2011.
3. F. Buret, N. Haddour, J. Laforet-Ast, L. Nicolas, R. Perrussel, D. Voyer, N. Burais, M. Frénéa-Robin, R. Scorretti, N. Siauve, "Electromagnetic characterization of biological cells", *Engenharia Biomedica, Brazilian Journal of Biomedical engineering*, Volume 27, Suplemento 1, p. 61-68, 2011
4. R. Scorretti , R.V. Sabariego , L. Morel , C. Geuzaine , N. Burais, L. Nicolas, "Computation of Induced Fields Into the Human Body by Dual Finite Element Formulations", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 48, N. 2, p. 783 – 786, 2012.
5. M.A. Drissaoui, S. Lanteri, P. Leveque, F. Musy, L. Nicolas, R. Perrussel, D. Voyer, « A stochastic collocation method combined with a reduced basis method to compute uncertainties in numerical dosimetry », *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 48, N. 2, p. 563-566, 2012.
6. T. Lelong, P. Thomas, R Scorretti, F. Piriou, N. Burais, I. Magne, "Improving the mesh quality of computational phantoms", 9th International Symposium on Electric and Magnetic Fields (EMF 2013) April 23-25.
7. T. Lelong et all, "Error estimation in the Computation of Induced Current of Human Body in the Case of Low frequency Magnetic Field Excitation", *Compumag 2013*, Budapest, 30 juin-4 juillet 2013.