



LIEN ENTRE LE COURANT INDUIT ET LE DEBIT D'ABSORPTION SPECIFIQUE DE 1 A 30 MHZ

Jeanne Frère, Maxim Zhadobov, Ronan Sauleau, Christophe Lemoine, Alain
Alcaras, Gwenaël Le Cadre

► To cite this version:

Jeanne Frère, Maxim Zhadobov, Ronan Sauleau, Christophe Lemoine, Alain Alcaras, et al.. LIEN ENTRE LE COURANT INDUIT ET LE DEBIT D'ABSORPTION SPECIFIQUE DE 1 A 30 MHZ. 18ème colloque international et exposition sur la compatibilité électromagnétique, Jul 2016, Rennes, France. hal-01346447

HAL Id: hal-01346447

<https://hal.science/hal-01346447>

Submitted on 19 Jul 2016

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.

LIEN ENTRE LE COURANT INDUIT ET LE DEBIT D'ABSORPTION SPECIFIQUE DE 1 A 30 MHZ

J. Frère^{1,2}, M. Zhadobov¹, R. Sauleau¹, C. Lemoine¹, A. Alcaras², G. Le Cadre²

¹Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (IETR), UMR CNRS 6164, Université Rennes 1, 263 avenue du Général Leclerc, 35042 Rennes

²Thales Communications & Sécurité, 110 avenue du Maréchal Leclerc, BP 70945, 49309 Cholet Cedex
jeanne.frere@univ-rennes1.fr

Résumé. Des normes internationales définissent des limites en champ électrique, magnétique, courant induit, densité de courant (J) et débit d'absorption spécifique (DAS) afin de garantir la sécurité des personnes en cas de surexposition électromagnétique. Nous proposons dans cet article une formule établissant un lien entre les courants induits le long du corps et les J/DAS dans le corps pour un fantôme homogène de l'humain. Les courants induits permettant de calculer les J et DAS sont issus de résultats de simulations pour un fantôme homogène. Nos résultats montrent que les DAS calculés par notre formule via les courants induits donnent de très bonnes estimations des DAS calculés en simulation pour trois types d'illumination du fantôme. Les écarts sont notamment inférieurs à 1,5 dB pour les DAS corps entier (DAS_{CE}) et de ± 3 dB pour les DAS 10g max membres et tête & tronc. Cela permet d'envisager un moyen non invasif de mesure des DAS grâce aux courants induits le long du corps.

I. INTRODUCTION

Le nombre croissant de systèmes radioélectriques chez les particuliers et industriels a entraîné la publication de normes internationales par l'ICNIRP et l'IEEE afin de limiter le risque de surexposition électromagnétique des personnes [1] [2]. Pour des fréquences HF (3 à 30 MHz), des niveaux de référence en champs électrique et magnétique et en courant induit ainsi que des restrictions de base sur les densités de courant J et DAS sont donc définis.

Plusieurs articles montrent l'intérêt de vérifier les valeurs de courant induit même si les limites en champs sont respectées [3] [4]. De plus, ces courants induits peuvent alors être supérieurs aux niveaux de référence et il est donc nécessaire d'évaluer les J et DAS. Cependant il n'existe actuellement pas de moyens standards de mesure de DAS ou de J pour des fréquences HF.

Gandhi et Aslan ont pourtant développé une antenne équivalente à l'être humain permettant de mesurer les courants induits dans le corps lors d'une exposition en radiofréquence [5] et un récent article de Kibret *et al* a établi une formule reliant le DAS corps entier et le courant induit axial dans une antenne cylindrique monopôle équivalente à l'être humain [6].

Nous proposons donc dans cet article d'étudier le lien existant entre les valeurs de courant induit et les valeurs de DAS local et corps entier (DAS_{CE}), dans le but de simplifier la validation de systèmes radio. Grâce au lien ainsi établi, nous calculerons les DAS_{CE} et DAS 10g maximaux dans un fantôme homogène à partir des courants induits calculés le long du même fantôme en simulation numérique. Ces DAS seront ensuite comparés aux DAS calculés en simulation pour ce même fantôme. Nous appliquerons cela pour une exposition en onde plane, en champ haute impédance et en champ basse impédance.

II. MATERIELS ET METHODES DE CALCULS

II.1. Fantôme utilisé

Le fantôme utilisé pour l'étude est Duke (1,74 m ; 70 kg), issu de la Virtual Family [7]. Nous avons choisi d'utiliser une résolution de 5 mm. Le fantôme sera homogénéisé par un même tissu dont les propriétés diélectriques sont données en Figure 1. Ce tissu a une masse volumique de 1090 kg/m³. Ses propriétés diélectriques ont été calculées à partir de la moyenne pondérée des propriétés des neuf tissus les plus présents dans le fantôme Hugo issu du Visible Human Project [8].

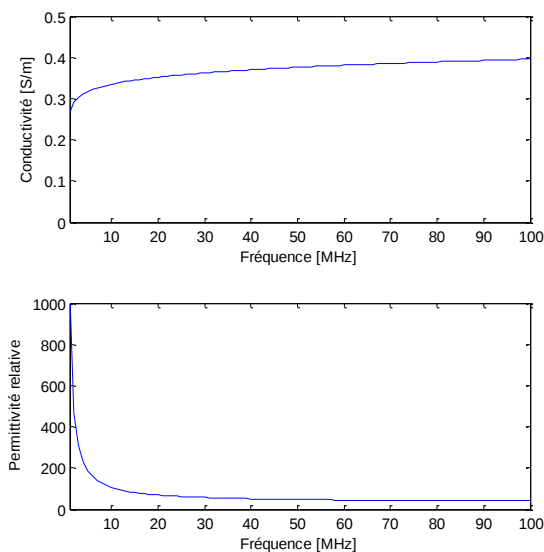


Figure 1 : Propriétés diélectriques entre 1 et 100 MHz du tissu équivalent

II.2. Scénarios d'exposition étudiés

Le fantôme est exposé à trois types d'illumination. La première est une exposition de face en espace libre à une onde plane polarisée verticalement à 61 V/m. La seconde est une exposition à un champ haute impédance ($E/H \gg 377 \Omega$). Ce champ haute impédance est modélisé par deux plaques conductrices parallèles de type condensateur électrique alimentées par une source de tension (Figure 2). L'impédance d'onde est supérieure à 3000Ω à 1 MHz et nous avons vérifié que la présence du fantôme ne perturbe pas l'impédance générée par les plaques. A 1 MHz, le champ électrique est de 5,3 V/m et le champ magnétique de 1,4 mA/m.



Figure 2 : Exposition champ haute impédance

La troisième exposition est une illumination à un champ basse impédance ($E/H \ll 377 \Omega$). Ce champ basse impédance est modélisé par des plaques conductrices formant une boucle de courant alimentée par une source de tension (Figure 3). Cette structure est similaire à une large spire magnétique ou inductance. L'impédance d'onde est de 20Ω à 1 MHz et comme en haute impédance, nous avons vérifié que la présence du fantôme ne perturbe pas l'impédance de la boucle. A 1 MHz, le champ électrique est de 0,8 V/m et le champ magnétique de 0,04 mA/m.

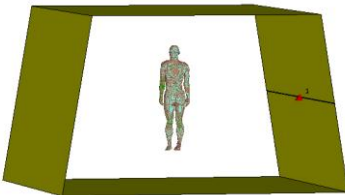


Figure 3 : Exposition champ basse impédance

II.3. Lien entre le courant et le DAS en HF

Dans cette section, nous établissons un lien entre les valeurs de courant induit et les valeurs de DAS corps entier (DAS_{CE}) et de DAS 10g dans les zones membres et tête & tronc. Nous développons des formules analytiques reliant le DAS et les courants induits pour des fréquences comprises entre 1 et 30 MHz, voire 1 à 100 MHz selon le type d'exposition du fantôme.

Les courants induits sont calculés en simulation par le logiciel CST Microwave (méthode numérique Finite Integration Technique FIT).

La validation de ces formules analytiques se fait par la comparaison des DAS locaux et corps entier obtenus en simulation et par nos formules.

Pour la suite de l'article, σ [S/m] représente la conductivité du tissu équivalent et ϵ sa permittivité, $f = \omega/2\pi$ [Hz] la fréquence de l'onde, J [A/m²] la densité de courant, E [V/m] le champ électrique, B [T] l'induction magnétique, D [C/m²] le déplacement électrique et H [A/m] le champ magnétique.

Nous simplifions la morphologie du fantôme en le décomposant en cinq cylindres de hauteur et rayon différents correspondant aux chevilles, aux jambes, au tronc, au cou et à la tête (Figure 4).

De plus la source est considérée uniforme selon l'angle d'incidence, ce qui permet d'avoir une densité de courant invariante selon θ en se plaçant en coordonnées cylindriques (r, θ, z).

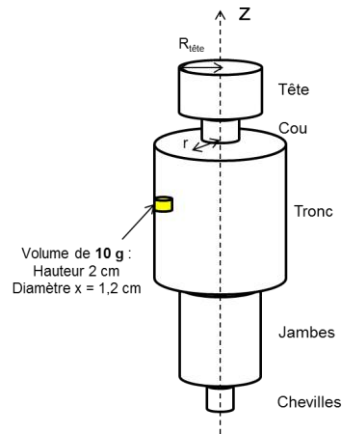


Figure 4 : Schéma de modélisation du fantôme pour l'établissement de formules analytiques liant les courants induits et les DAS

Nous considérons que la densité de charge électrique dans le fantôme est nulle, ce qui permet d'écrire les équations de Maxwell suivantes :

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\vec{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (3)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (4)$$

En appliquant le rotationnel à l'équation (2), nous pouvons exprimer la densité de courant dans le fantôme par l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$\vec{\Delta} \vec{J} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{J}}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

Nous supposons que la dérivée de J par rapport à z sur une portion de cylindre de hauteur 1 cm est négligeable par rapport aux autres dérivées. Cela permet d'écrire que la densité de courant axiale J_r à une hauteur z s'exprime selon l'équation (6) où $\tau = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \omega^2 - j\omega\sigma\mu_0}$;

$J_0(\tau r)$ est la fonction de Bessel de 1^{ère} espèce et d'ordre 0 et J_{ctez} est une constante dépendant de la hauteur z directement liée au courant induit sur une section du fantôme.

$$J_z(r) = J_{ctez} J_0(\tau r) \quad (6)$$

L'expression du courant induit, connu sur une section z , permet de calculer la constante grâce à l'intégrale de la densité de courant sur une surface.

$$I_z = 2\pi J_{ctez} \frac{R}{\tau} J_1(\tau R) \quad (7)$$

La densité de courant axiale à une hauteur z s'écrit alors :

$$J_z(r) = \frac{I_z \tau}{2\pi R} \frac{J_0(\tau r)}{J_1(\tau R)} \quad (8)$$

où R représente le rayon total de la section du corps à la hauteur z , r représente le point de la section auquel J_z est calculé et J_0 , J_1 les fonctions de Bessel de 1^{ère} espèce d'ordre 0 et 1 respectivement.

Nous exprimons ensuite les puissances absorbées sur le corps entier et sur des volumes de 10g afin de calculer les DAS.

Le DAS_{CE} est donné par l'équation (9) où M est la masse du fantôme, H sa hauteur. La somme sur la hauteur H du fantôme s'effectue avec un pas de 1 cm.

$$DAS_{CE} = \frac{1}{M} \sum_{z=0}^H \left(\frac{\pi}{\sigma} 0.01 |J_{ctez}|^2 \int_{r=0}^R |J_0(\tau r)|^2 r dr \right) \quad (9)$$

Comme nous ne souhaitons calculer que les DAS 10g maximaux dans les zones membres et tête & tronc, le DAS 10g n'est calculé qu'à la surface du fantôme où l'on trouve les DAS 10g les plus élevés. Il s'exprime donc par l'équation (10) où $x = 1,2$ cm et $\delta z = 2$ cm. Le volume de 10g n'est pas un cube mais un petit cylindre de hauteur δz et de rayon x (Figure 4).

$$DAS_{10g} = \frac{x\pi}{4(R-x)\sigma 0.01} \int_{z=z_1}^{z_1+\delta z} |J_{ctez}|^2 dz \int_{r=R-2x}^R |J_0(\tau r)|^2 r dr \quad (10)$$

Nous avons implémenté ces relations sous Matlab en fournissant en entrée les courants induits le long du fantôme calculés tous les 1 cm en simulation.

III. RESULTATS

Nous calculons les valeurs maximales de DAS local dans les zones membres et tête & tronc ainsi que les DAS_{CE} pour trois expositions différentes : onde plane, champ haute impédance et champ basse impédance. La validation de nos formules se fait par la comparaison des DAS calculés par les équations (9) et (10) et des DAS calculés par simulation.

En simulation nous utilisons un fantôme homogène de morphologie équivalente à l'être humain et pour nos formules, le corps humain est assimilé à un objet cylindrique homogène présenté en Figure 4.

III.1. Onde plane ($E/H = 377 \Omega$)

Le fantôme est exposé de face à une onde plane polarisée verticalement à 61 V/m (10 W/m²) en espace libre entre 1 et 90 MHz. Cela correspond à la limite en champ

électrique pour les travailleurs entre 10 et 400 MHz donnée par l'ICNIRP.

Dans les deux pieds les courants induits sont supérieurs aux limites, car leur maximum s'élève à 225 mA alors que la limite pour les travailleurs est de 200 mA. Les courants induits dans les chevilles sont même supérieurs à 300 mA autour de 60 MHz (Figure 5).

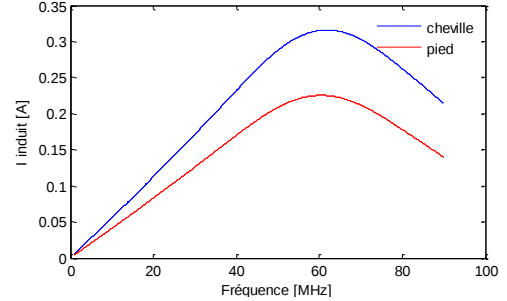


Figure 5 : Courant induit dans les pieds et les chevilles calculés en simulation dans Duke homogène - Onde plane à 61 V/m

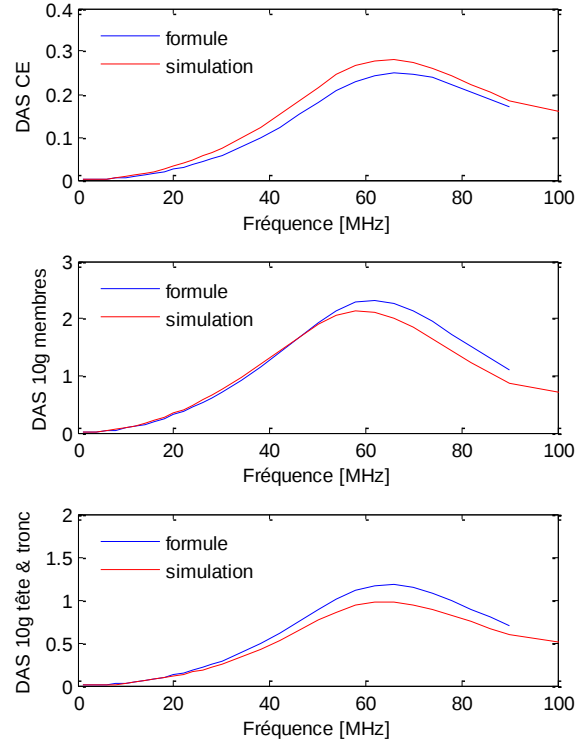


Figure 6 : DAS_{CE} et DAS 10g max dans les membres et tête & tronc de Duke homogène - Comparaison entre la simulation et nos formules (9) et (10) – Onde plane à 61 V/m

Nous constatons que les valeurs de DAS_{CE} sont inférieures à la limite de 0,4 W/kg, de même que les valeurs de DAS 10g sont inférieures à 10 W/kg pour la zone tête & tronc et 20 W/kg pour les membres (Figure 6). Cela confirme le fait que les DAS et les champs électriques peuvent être conformes aux normes sans que les courants induits le soient.

Nous obtenons des écarts de 0,2 à 1,2 dB entre les DAS_{CE} calculés en simulation et ceux calculés par nos formules.

Les écarts pour le DAS 10g membres varient de -1 à 1,5 dB selon la fréquence et pour le DAS 10g tête & tronc, ils sont compris entre -1,5 et -0,8 dB.

La résonance du corps à 60-65 MHz pour le fantôme Duke est bien prise en compte par nos formules et les écarts sur les grandeurs sont acceptables puisqu'ils restent inférieurs en valeur absolue à 3 dB (Figure 6). L'utilisation de ces formules pour calculer les DAS dans un fantôme hétérogène est tout à fait envisageable, puisque les écarts de DAS_{CE} entre un fantôme hétérogène et un fantôme homogène (compris entre -1 et 2,5 dB [9]). Pour les DAS locaux, comme nous ne calculons que les valeurs maximales, il est également envisageable de modifier les valeurs de conductivité du tissu homogène par celle de la graisse ou de la peau (tissus présents en surface du fantôme Duke).

Ces résultats montrent qu'en onde plane nos hypothèses physiques (uniformité de la source sur le fantôme selon θ et dépendance en z sur 1 cm négligeable) permettent d'établir des formules approchées des DAS corps entier et locaux fiables pour un fantôme homogène. Nos formules sont donc très utiles pour prédire les DAS et densités de courant induits dans un fantôme à partir des courants induits sur une section du fantôme. Cela ouvre la possibilité de valider indirectement les restrictions en DAS par les courants induits.

Nous étudions dans la suite la validité de nos formules pour des cas d'exposition en impédance d'onde quelconque.

III.2. Champ haute impédance ($E/H \gg 377 \Omega$)

Pour l'exposition en champ haute impédance, nous imposons un courant induit de 200 mA dans les pieds du fantôme Duke et constatons que les valeurs de DAS 10g dans les membres sont inférieures à 12 W/kg pour des fréquences HF. En revanche, si nous imposons un DAS maximal de 20 W/kg dans les membres, les courants induits dans les pieds sont compris entre 200 et 500 mA. Comme en onde plane, nous constatons que les valeurs de courant induit peuvent donc être supérieures à la norme même si les DAS sont conformes.

De plus, nous obtenons des écarts de 0,2 à 2 dB sur le DAS_{CE} entre nos formules et la simulation. Ils sont compris entre -0,6 à 1,7 dB pour le DAS 10g membres et entre -1,1 à 2,7 dB pour le DAS 10g tête & tronc (Figure 7).

Pour cette exposition en champ électromagnétique haute impédance en HF, nous constatons que nos formules de DAS_{CE} et de DAS 10g max (équations (9) et (10)) donnent des résultats proches du comportement simulé.

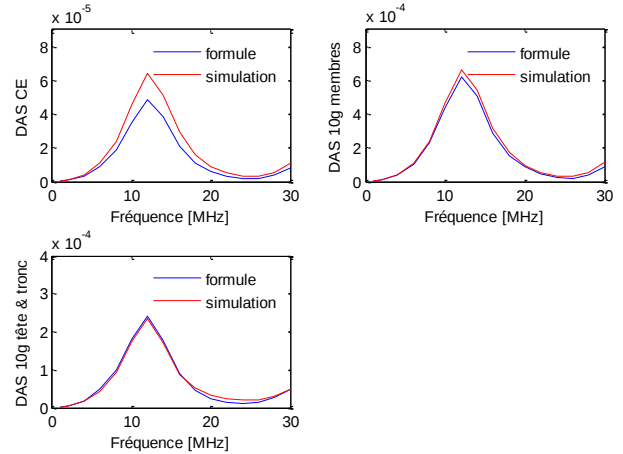


Figure 7 : DAS_{CE} et DAS 10g max dans les membres et tête & tronc – Comparaison entre la simulation et nos formules (9) et (10) – Champ électromagnétique haute impédance

III.3. Champ basse impédance ($E/H \ll 377 \Omega$)

Pour l'exposition en champ basse impédance, nous imposons un courant induit de 200 mA dans les pieds du fantôme Duke. Nous constatons que les valeurs de DAS 10g dans les membres sont inférieures à 19 W/kg pour des fréquences HF. Imposer un DAS maximal de 20 W/kg dans les membres, entraîne des courants induits dans les pieds sont compris entre 200 et 400 mA.

Comme dans les expositions précédentes, nous constatons que les valeurs de courant induit peuvent donc être supérieures à la norme bien que les DAS soient conformes.

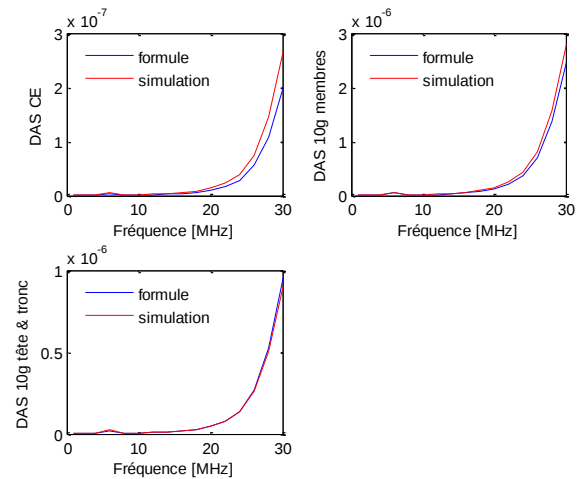


Figure 8 : DAS_{CE} et DAS 10g max dans les membres et tête & tronc – Comparaison entre la simulation et nos formules (9) et (10) – Champ électromagnétique basse impédance

De plus, nous obtenons des écarts de 1,2 à 3 dB sur le DAS_{CE} entre le script et la simulation. Ils sont compris entre 0,5 à 1,5 dB pour le DAS 10g membres et entre -0,2 à 4 dB pour le DAS 10g tête & tronc (Figure 8). Dans cette structure, nous remarquons une faible résonance

vers 5 MHz qui est bien prise en compte par nos formules.

Dans ce dernier cas d'exposition, nous obtenons des résultats satisfaisants entre nos formules et la simulation.

Nous avons appliqué les mêmes formules (équations (9) et (10)) pour une exposition plus réaliste : le fantôme Duke homogène, placé à côté d'un véhicule, est exposé au champ créé par une antenne fouet HF placée sur le toit du véhicule. Dans ce cas, les écarts entre nos formules et la simulation sont compris entre 0 et 1,5 dB pour les DAS_{CE} et locaux.

Quelle que soit l'exposition nous avons constaté que la conformité en DAS est toujours respectée bien que celle en courant induit ne le soit pas.

Par ailleurs nous avons constaté des écarts moyens entre ± 3 dB entre la simulation et nos formules sur les valeurs de DAS_{CE} et de DAS 10g max.

IV. CONCLUSION

Nous avons établi des formules permettant de calculer les DAS corps entier et DAS 10g max à partir des courants induits calculés le long du corps pour un fantôme homogène. Ces formules ont été validées pour une exposition en onde plane entre 1 et 100 MHz et pour des expositions basse et haute impédance entre 1 et 30 MHz. Par ailleurs nous avons constaté que la conformité en DAS pour ces trois expositions était toujours respectée quand celle en courant induit l'était. Bien qu'un lien entre courant induit et DAS corps entier ait déjà été établi, c'est la première fois que des formules permettent de calculer les DAS locaux maximaux via les courants induits.

L'adaptation de nos formules à un fantôme hétérogène et/ou la validation d'un fantôme homogène représentatif de l'hétérogénéité des tissus en HF feront l'objet de futurs travaux.

REFERENCES

- [1] ICNIRP 1998, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", Health Phys., Vol. 74, 1998, pp. 494-522
- [2] IEEE, "IEEE Standard for Safety levels with respect to human exposure to Radio Frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz", IEEE Std C95.1, 2005
- [3] O.P. Gandhi, J.Y. Chen et A. Riazi, "Currents induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers", IEEE Transactions on biomedical engineering, Vol. 33, n° 18, 1995, pp. 757-767
- [4] S. Tofani, G. d'Amore, G. Fiandino, A. Benedetto, O.P. Gandhi et J.Y. Chen, "Induced foot-currents in humans exposed to VHF Radio-Frequency EM

fields", IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 37, n° 18, 1995, pp. 96-99

- [5] O.P. Gandhi et E.E. Aslan, "Human Equivalent Antenna for Electromagnetic Fields", Brevet américain n° 5394164, 28 fév. 1995
- [6] B. Kibret, A.K. Teshome et D.T.H. Lai, "Cylindrical Antenna Theory for the Analysis of Whole-Body Averaged Specific Absorption Rate", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 63, n° 11, 2015, pp. 5224-5229
- [7] A. Christ, W. Kainz, E. Hahn, K. Honegger, M. Zefferer, E. Neufeld, W. Rascher, R. Janka, W. Bautz, J. Chen, B. Kiefer, P. Schmitt, H. Hollenbach, J. Shen, M. Oberle, D. Szczerba, A. Kam, J. Guag et N. Kuster, "The Virtual Family – Development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations", Phys. Med. Bio., Vol. 55, 2010, pp. 23-38
- [8] "The Visible Human Project", disponible en ligne <http://www.nlm.nih.gov/research/visible/>
- [9] J. Frere, M. Zhadobov, R. Sauleau, C. Lemoine, A. Alcaras et G. Le Cadre, « Etude comparative de différents fantômes de l'humain en bandes HF et VHF », 19^{èmes} Journées Nationales Microondes, JNM 2015, juin 2015