



**HAL**  
open science

# INFLUENCE DE L'IMPEDANCE D'ONDE SUR LES VALEURS DE DEBIT D'ABSORPTION SPECIFIQUE POUR UN FANTOME DE L'HUMAIN EN BANDE HF

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

## ► To cite this version:

Jeanne Frère, Alain Alcaras, Christophe Lemoine, Gwenaël Le Cadre, Maxim Zhadobov, et al..  
INFLUENCE DE L'IMPEDANCE D'ONDE SUR LES VALEURS DE DEBIT D'ABSORPTION  
SPECIFIQUE POUR UN FANTOME DE L'HUMAIN EN BANDE HF. 18ème colloque interna-  
tional et exposition sur la compatibilité électromagnétique (CEM2016), Jul 2016, Rennes, France.  
hal-01345489

**HAL Id: hal-01345489**

**<https://hal.science/hal-01345489v1>**

Submitted on 13 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.

# INFLUENCE DE L'IMPEDANCE D'ONDE SUR LES VALEURS DE DEBIT D'ABSORPTION SPECIFIQUE POUR UN FANTOME DE L'HUMAIN EN BANDE HF

J. Frère<sup>1,2</sup>, M. Zhadobov<sup>1</sup>, R. Sauleau<sup>1</sup>, C. Lemoine<sup>1</sup>, A. Alcaras<sup>2</sup>, G. Le Cadre<sup>2</sup>

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

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

**Résumé.** Afin de garantir la sécurité des personnes et de limiter le risque de surexposition électromagnétique, des normes internationales définissent des limites en champ électrique, en champ magnétique, en courant induit et en débit d'absorption spécifique (DAS). Nous étudions dans cet article l'influence de l'impédance d'onde d'un champ électromagnétique sur les valeurs de courant induit et de DAS corps entier dans un fantôme de l'humain hétérogène. Nous calculons les courants induits dans un fantôme isolé et dans un fantôme formant une boucle en simulation et par des formules approchées utilisant des circuits d'impédance équivalente à l'être humain pour deux expositions. Avec nos résultats, nous montrons que les courants induits et le DAS corps entier dépendent soit de la partie électrique soit de la partie magnétique du champ appliqué selon la posture du fantôme (isolé ou en boucle). Cela permet d'envisager une meilleure prédiction des restrictions de base par des mesures de champs.

## I. INTRODUCTION

Avec la multiplication des fonctions radioélectriques, les risques de surexposition des personnes augmentent. C'est pourquoi des normes internationales publiées par l'ICNIRP ou l'IEEE définissent des limites en champs ou en débit d'absorption spécifique (DAS) [1][2].

Lors de mesures de champs et de calculs de DAS, nous avons constaté qu'en HF (3 à 30 MHz), avec une antenne demi-boucle, les valeurs de champ magnétique H pouvaient dépasser les limites de 4 dB tout en ayant des valeurs de DAS faibles (16 dB en-dessous de la limite). Avec une antenne fouet, les valeurs de champ électrique dépassaient la limite de seulement 1,5 dB alors que les valeurs de DAS correspondantes étaient 14 dB en-dessous de la limite. Donc les DAS étaient plus forts avec l'antenne fouet qu'avec l'antenne demi-boucle, bien que les niveaux de référence soient plus forts avec l'antenne demi-boucle. A notre connaissance, aucune étude n'explique ce phénomène.

L'objectif de cet article est donc de comprendre comment sont corrélées les limites en champs E et H et les limites en DAS pour des fréquences HF, notamment entre 1 et 10

MHz. Pour cela, nous étudions les courants induits et les DAS corps entier (DAS<sub>CE</sub>) dans un fantôme hétérogène exposé à un champ haute impédance, à un champ basse impédance et à un champ créé par des antennes placées sur un véhicule. Le fantôme est soit isolé dans le champ soit en boucle (pied et main en contact avec des surfaces conductrices en cuivre, le tout formant une boucle). Nous calculons également les courants induits dans le fantôme grâce à des circuits d'impédance équivalente à l'être humain afin de montrer que le courant induit est directement lié à la partie électrique du champ appliqué pour un fantôme isolé ou à la partie magnétique du champ appliqué pour un fantôme en boucle.

## II. MATERIELS ET METHODES DE CALCULS

### II.1. Fantôme utilisé

Le fantôme utilisé pour l'étude est Duke (1,74 m ; 70 kg ; jusqu'à 84 tissus) ; il est issu de la Virtual Family [3]. Nous avons choisi d'utiliser une résolution de 5 mm. Les propriétés diélectriques des tissus sont celles proposées par Gabriel [4].

### II.2. Scénarios d'exposition étudiés

Le fantôme est exposé à trois types d'illumination. La première 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 1). L'impédance d'onde est supérieure à  $4000 \Omega$  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 5,5 V/m et le champ magnétique de 1,2 mA/m.

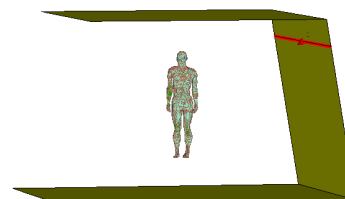


Figure 1 : Exposition champ haute impédance

La deuxième 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 2). Cette structure est similaire à une large spire magnétique ou inductance. L'impédance d'onde est de  $27 \Omega$  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 1,24 V/m et le champ magnétique de 46 mA/m.

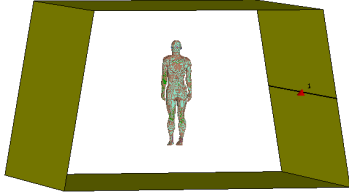


Figure 2 : Exposition champ basse impédance

Dans ces deux environnements, le fantôme est soit isolé soit en contact avec des plaques conductrices en cuivre au niveau des pieds et des mains de façon à former une boucle de courant.

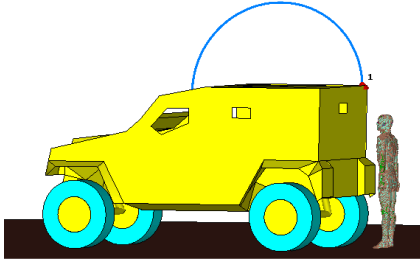


Figure 3 : Illustration d'un cas à proximité d'une antenne demi-boucle sur véhicule

La troisième exposition est plus réaliste, car le fantôme est placé à proximité d'un véhicule muni d'une antenne. Cette antenne sera dans un premier temps une antenne électrique et dans un second temps une antenne magnétique afin de créer soit un environnement plutôt électrique soit un environnement plutôt magnétique (Figure 3). La puissance fournie aux deux antennes est de 0,5 W. Les champs induits par l'antenne électrique sont de 630 V/m et de 0,054 A/m à 1MHz. Pour l'antenne magnétique, ils sont de 47 V/m et de 1,33 A/m à 1 MHz.

Les valeurs de champs, de DAS corps entier ( $DAS_{CE}$ ) et de courant induit à mi-hauteur dans le fantôme sont calculées à l'aide du logiciel CST Microwave (méthode numérique : Finite Integration Technique FIT). Les courants induits dans le fantôme exposé à un champ haute et basse impédance sont également calculés grâce à des formules développées dans la section III.

### III. THEORIE

Dans cette section, nous développons des formules analytiques de courant induit dans le fantôme isolé et dans le fantôme en boucle. Ces formules permettent de montrer de façon analytique que le courant induit dans le fantôme isolé dépend du champ électrique et que le

courant induit dans le fantôme en boucle dépend du champ magnétique. Comme nous avons montré dans une autre étude [5] que le débit d'absorption spécifique (DAS) est lié aux courants induits dans le fantôme, nos résultats montreront que le DAS dans un fantôme isolé dépend de la partie électrique du champ appliqué alors que le DAS dans un fantôme en boucle dépend de la partie magnétique du champ appliqué.

#### III.1. Fantôme équivalent à une antenne électrique

Entre 1 et 10 MHz,  $\sigma \sim \omega\epsilon$  où  $\sigma$  est la conductivité moyenne des tissus et  $\epsilon$  la permittivité moyenne des tissus composant le fantôme ; cela nous permet de supposer que le fantôme isolé est suffisamment conducteur pour le considérer équivalent à une antenne dipôle de hauteur  $h$  et de rayon  $r$ . Cela nous permet d'exprimer le courant au milieu du fantôme par le courant de court-circuit de l'antenne dipôle.

En basse fréquence, l'antenne électrique équivaut à une capacité, dont l'expression [6] est donnée dans l'équation (1).

$$C_{BF} = \frac{h}{120 \ln\left(\frac{h}{r}\right)c} = 17,6 \text{ pF} \quad (1)$$

La tension de l'antenne est liée au champ électrique externe ainsi qu'à la hauteur effective du dipôle. Pour des fréquences inférieures à la fréquence de résonance du dipôle (ici  $\sim 60$  MHz), la hauteur effective est la hauteur du dipôle divisée par deux. La tension s'exprime donc par l'équation (2).

$$V_{CO} = \frac{h}{2} E \quad (2)$$

Grâce à la tension et à l'impédance de l'antenne, nous pouvons exprimer le courant de court-circuit de l'antenne qui sera le courant maximal dans le fantôme et le courant induit à mi-hauteur du fantôme. L'expression du courant est donnée en équation (3) et il dépend du champ électrique.

$$I_{cc} = \frac{V_{CO}}{Z_{corps}} = hE\pi f \frac{h}{120 \ln\left(\frac{h}{r}\right)c} \quad (3)$$

#### III.2. Fantôme équivalent à une antenne magnétique

Nous supposons que le fantôme en boucle est équivalent à une boucle quasi-ouverte, car la conductivité du fantôme est très faible par rapport à la conductivité des plaques  $\sigma_{\text{fantôme}} \ll \sigma_{\text{cuivre}}$ . Sa tension peut donc être calculée par la loi de Lenz. Comme le fantôme est en contact avec des surfaces conductrices au niveau des mains et des pieds (pour former la boucle), nous utilisons un circuit d'impédance équivalente à celle de l'être humain servant à l'évaluation des courants de contact pour calculer l'impédance du fantôme en boucle. Dans un premier temps, le circuit d'impédance équivalente au corps donné par la norme EN 50475 [7] est utilisé. Dans

un second temps le circuit d'impédance équivalente au corps proposé par De Santis *et al* en 2011 [8] est utilisé, car nous avons constaté que l'impédance de notre fantôme en boucle calculée en simulation est plus proche de celle du circuit de De Santis *et al* que de celui de la norme EN 50475.

La loi de Lenz appliquée au fantôme boucle permet de calculer la tension de la boucle :

$$V_{CO} = \int_s \frac{d\Phi}{dt} dS = \omega \int_s B \cdot dS = \mu_0 H 2\pi fhl \quad (5)$$

où  $h$  est la hauteur du fantôme boucle et  $l$  la longueur.

Les circuits d'impédance équivalente à l'être humain sont présentés en Figure 4 pour le circuit de De Santis *et al* et en Figure 5 pour le circuit utilisé dans la norme EN 50475.

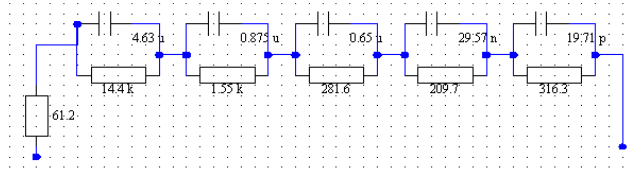


Figure 4 : Schéma du circuit proposé par De Santis *et al* [8] d'impédance équivalente à l'impédance du corps humain entre 100 Hz et 100 MHz

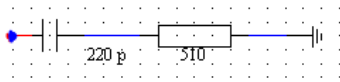


Figure 5 : Schéma du circuit utilisé dans la norme EN 50475 [7] d'impédance équivalente à l'impédance du corps humain en HF (3 à 30 MHz)

Les impédances des circuits présentés ci-dessus ne sont pas détaillées dans l'article et seront notées  $Z_{corps}$  dans la formule de calcul du courant induit dans le fantôme en boucle. Le courant induit est donné par l'équation (6) et dépend du champ magnétique.

$$I_{cc} = \frac{V_{CO}}{Z_{corps}} = \frac{\mu_0 H 2\pi fhl}{Z_{corps}} \quad (6)$$

Les courants induits dans le fantôme isolé et en boucle calculés par les équations (3) et (6) sont comparés aux courants induits calculés en simulation pour les mêmes fantômes en exposition champ haute et basse impédance.

## IV. RESULTATS

Nous calculons les valeurs de courant induit au milieu d'un fantôme hétérogène ainsi que les DAS corps entier ( $DAS_{CE}$ ) pour trois expositions : champ haute impédance, champ basse impédance et champ créé par une antenne sur le toit d'un véhicule. Pour les expositions en champ haute et basse impédance, nous comparons les courants induits au milieu du fantôme calculés en simulation aux courants induits calculés par les équations (3) et (6).

### IV.1. Champ haute impédance

Le fantôme est placé dans un champ haute impédance entre 1 et 10 MHz. Ce champ a une impédance supérieure à  $4000 \Omega$  à 1 MHz, donc il est principalement électrique.

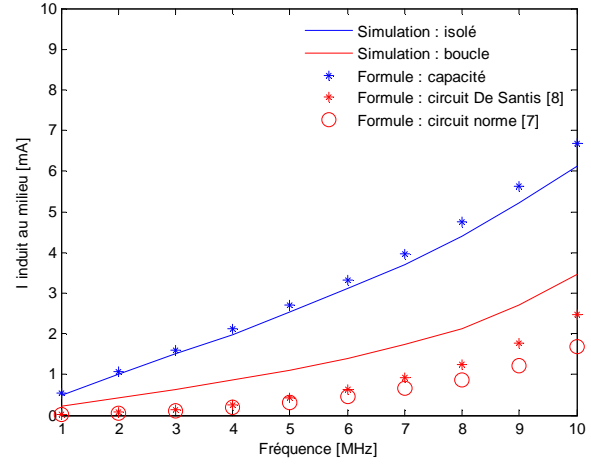


Figure 6 : Comparaison des courants induits au milieu du fantôme isolé et en boucle entre la simulation et les formules d'antenne pour un champ haute impédance

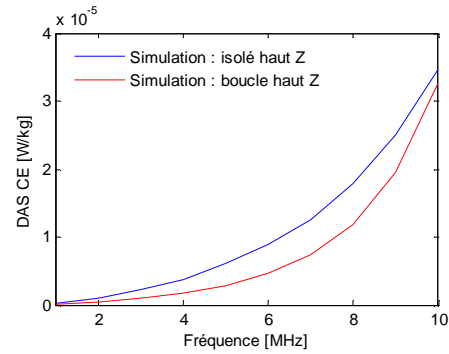


Figure 7 :  $DAS_{CE}$  dans un fantôme isolé et en boucle pour l'exposition champ haute impédance

Nous constatons que les valeurs de courant induit calculées en simulation et par les équations (3) et (6) sont plus élevées dans le fantôme isolé que dans le fantôme en boucle (Figure 6). De plus les courants induits calculés par l'équation (3) sont légèrement supérieurs aux courants induits calculés en simulation pour le fantôme isolé, alors que les courants induits calculés par l'équation (6) sont inférieurs à ceux calculés en simulation. Cependant nos formules proposées (équations (3) et (6)) donnent de bonnes estimations des courants induits calculés en simulation car les écarts sont acceptables et les variations en fonction de la fréquence sont les mêmes entre la simulation et nos formules. Nous constatons que le circuit proposé par De Santis *et al* nous permet d'obtenir des courants induits plus proches de la simulation que les courants induits calculés par le circuit de la norme EN 50475.

Comme les formules développées dans les équations (3) et (6) donnent de bonnes estimations des valeurs et des variations des courants induits dans les deux fantômes, nos résultats montrent bien que les courants induits dans

un fantôme isolé dépend bien des valeurs de champs électriques et que les courants induits dans un fantôme en boucle dépendent bien des valeurs de champs magnétiques. De plus, les valeurs de  $DAS_{CE}$  sont plus élevées pour le fantôme isolé que pour le fantôme en boucle dans un champ haute impédance (Figure 7).

#### IV.2. Champ basse impédance

Le fantôme est placé dans un champ basse impédance entre 1 et 10 MHz. Ce champ a une impédance inférieure à  $27 \Omega$  à 1 MHz, il est donc principalement magnétique. Nous avons calculé les courants induits dans le fantôme isolé par l'équation (3) et dans le fantôme en boucle par l'équation (6) et les comparons aux courants induits calculés en simulation pour les mêmes fantômes (Figure 8).

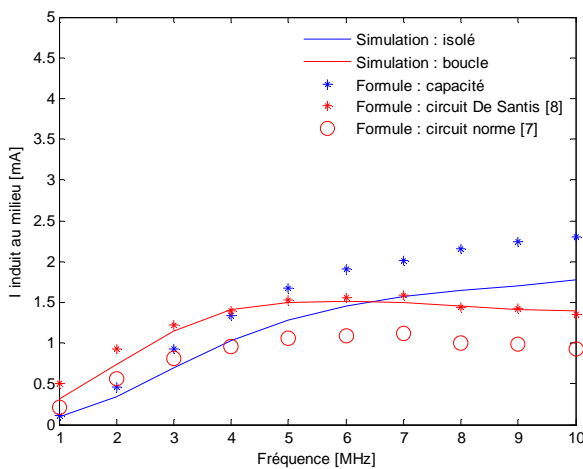


Figure 8 : Comparaison des courants induits au milieu du fantôme isolé et en boucle entre la simulation et les formules d'antenne pour un champ basse impédance

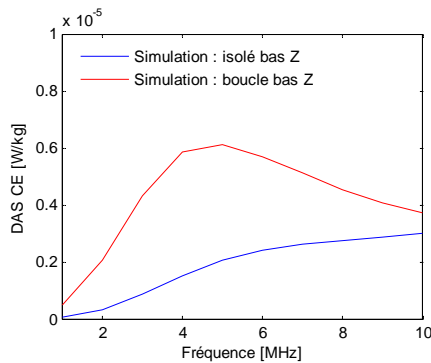


Figure 9 :  $DAS_{CE}$  dans un fantôme isolé et en boucle pour l'exposition champ basse impédance

Nous constatons que pour des fréquences inférieures à 6 MHz, c'est le fantôme en boucle qui a les valeurs de courant les plus élevées en simulation (Figure 8). Avec les formules (3) et (6), les courants du fantôme boucle sont supérieurs à ceux du fantôme isolé que jusqu'à 5 MHz, en comparant les courants induits calculés par l'impédance d'une capacité et les courants induits calculés par le circuit de De Santis *et al.*

Les courants induits calculés dans une capacité par l'équation (3) sont proches des courants induits calculés en simulation dans le fantôme isolé et suivent les mêmes variations. Les courants induits calculés par l'équation (6) par le circuit équivalent proposé par la norme EN 50475 donnent des valeurs proches des courants induits calculés en simulation dans un fantôme boucle. Mais les courants induits calculés par l'équation (6) avec l'impédance du circuit proposé par De Santis *et al* se superposent aux courants induits calculés en simulation dans le fantôme en boucle.

Comme dans l'exposition en champ haute impédance, les courants induits calculés par les équations (3) et (6) donnent des valeurs et des variations de courants induits très proches de ceux calculés en simulation. Nos résultats montrent que les courants induits dans un fantôme isolé dépendent bien de la partie électrique du champ appliqué et que les courants induits dans un fantôme en boucle dépendent de la partie magnétique du champ appliqué au fantôme. Nous constatons également que les valeurs de  $DAS_{CE}$  sont plus élevées dans le fantôme en boucle que dans le fantôme isolé dans un champ basse impédance (Figure 9).

#### IV.3. Antenne sur véhicule

Le fantôme est isolé et placé à côté d'un véhicule (Figure 3). Il est d'abord exposé aux champs créés par une antenne électrique (antenne fouet) puis aux champs créés par une antenne magnétique (antenne demi-boucle). Les deux antennes sont placées sur le toit du véhicule. La puissance délivrée aux deux antennes est de 0,5 W. entre 1 et 10 MHz, l'antenne fouet produit majoritairement du champ électrique et l'antenne demi-boucle majoritairement du champ magnétique.

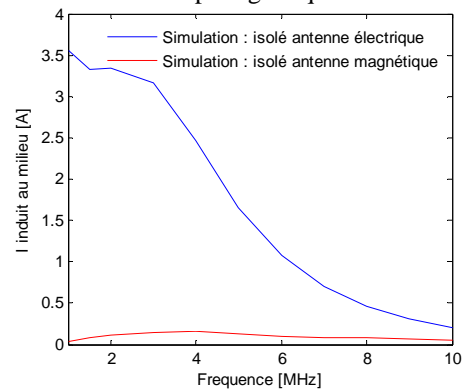


Figure 10 : Courants induits à mi-hauteur dans un fantôme isolé à proximité d'une antenne électrique ou magnétique placée sur un véhicule

Nous constatons que pour le fantôme isolé, les valeurs de courants induits à mi-hauteur du fantôme sont plus élevées en présence de l'antenne électrique (Figure 10), cela est en accord avec notre hypothèse. En effet le fantôme isolé est supposé sensible au champ électrique et c'est bien en présence de l'antenne électrique que le fantôme isolé présente les valeurs de courant induit les plus élevées.

De plus, les valeurs de  $DAS_{CE}$  dans un fantôme isolé sont les plus élevées en présence de l'antenne fouet (Figure 11). Comme dans les expositions précédentes, nous constatons qu'en présence d'un champ majoritairement électrique, c'est le fantôme isolé qui présente les valeurs de courant induit les plus fortes.

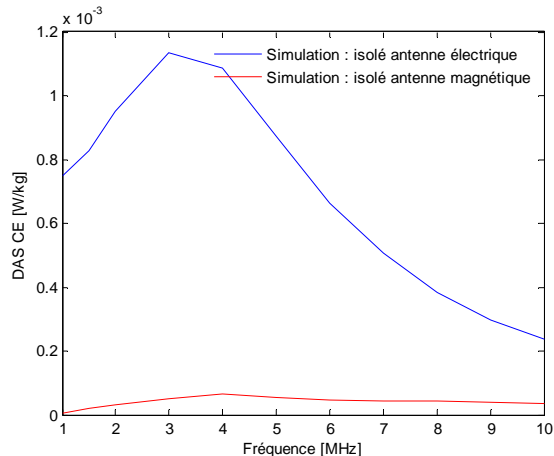


Figure 11 :  $DAS_{CE}$  dans un fantôme isolé à proximité d'une antenne électrique ou magnétique placée sur un véhicule

Nos résultats montrent que les courants induits dans une personne isolée dépendent principalement de la partie électrique du champ auquel elle est exposée. De même que les courants induits dans une personne formant une boucle (pied et main en contact avec des matériaux métalliques) dépendent principalement de la partie magnétique du champ auquel elle est exposée. De plus, en utilisant le lien établi dans un précédent article [5], nous montrons que le DAS corps entier dépend de la partie électrique du champ appliqué pour un fantôme isolé ou de la partie magnétique du champ appliqué pour un fantôme en boucle.

Dans les recommandations en champs électrique et magnétique de l'IEEE [2], le rapport des limites E/H est de  $113 \Omega$  (différent de  $377 \Omega$ , l'impédance de l'onde plane) pour des fréquences entre 1 et 30 MHz. Pour des fréquences en-dessous de 1 MHz, ce rapport est inférieur à  $113 \Omega$  alors que pour des fréquences supérieures à 30 MHz, le rapport E/H des limites se rapproche de l'impédance de l'onde plane ( $377 \Omega$ ).

Pour des fréquences inférieures à 30 MHz, l'évaluation du DAS nécessite a priori de pouvoir modéliser des ondes d'impédance quelconque. Cependant la majorité des logiciels de calculs électromagnétiques ne permet pas de modéliser simplement des champs appliqués d'impédance quelconque. Les résultats présentés ci-dessus montrent que dans le cas d'un fantôme isolé, les courants induits et le DAS corps entier dépendent principalement de la partie électrique du champ ; nous proposons donc de modéliser le champ complexe appliqué à un fantôme isolé par une onde plane polarisée selon le champ électrique dont la valeur est celle de la partie électrique du champ appliqué.

De même pour un fantôme en boucle, nous proposons de modéliser le champ électromagnétique complexe par une onde plane polarisée selon le champ magnétique dont la valeur est celle de la partie magnétique du champ appliqué.

## V. CONCLUSION

Nous avons montré que les courants induits et le DAS corps entier dans un fantôme isolé dépendent de la partie électrique du champ appliqué alors que pour un fantôme formant une boucle, ils dépendent de la partie magnétique du champ appliqué.

De plus, nous proposons une nouvelle méthode de modélisation des champs électromagnétiques pour l'évaluation de grandeurs dosimétriques dans un fantôme. Cette méthode permet de réduire les temps de simulation et de modéliser des champs d'impédance quelconque par une onde plane.

## 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] 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
- [4] C. Gabriel, "Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies", Final Tech. Rep. Occupational and Environmental Health Directorat, 1996
- [5] J. Frere, M. Zhadobov, R. Sauleau, C. Lemoine, A. Alcaras et G. Le Cadre, "Lien entre le courant induit et le débit d'absorption spécifique de 1 à 10 MHz", 18<sup>ème</sup> colloque international et exposition sur la compatibilité électromagnétique, CEM 2016 Rennes
- [6] C.R. Paul, "Analysis of Multiconductor Transmission Lines", Wiley-Interscience, 1<sup>ère</sup> édition 1994
- [7] EN 50475, "Norme de base pour le calcul et la mesure de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques des émetteurs de service de radiodiffusion dans les bandes HF (3 MHz à 30 MHz)", NF EN 50475, août 2008

- [8] V. De Santis, P.A. Beeckman, D.A. Lampasi et M. Feliziani, “*Assessment of Human Body Impedance for Safety requirements against Contact Currents for Frequencies up to 110 MHz*”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 58, n° 2, 2011, pp. 390-396