



HAL
open science

Etude comparative de différents fantômes de l'humain en bandes HF et VHF

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.. Etude comparative de différents fantômes de l'humain en bandes HF et VHF. Journées Nationales Microondes JNM 2015, Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01256745

HAL Id: hal-01256745

<https://hal.science/hal-01256745v1>

Submitted on 15 Jan 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.

Etude comparative de différents fantômes de l'humain en bandes HF et VHF

Jeanne Frère^{1,2}, Maxim Zhadobov¹, Ronan Sauleau¹, Christophe Lemoine¹, Alain Alcaras², Gwenaël Le Cadre²,

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

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

Résumé

Cet article présente une étude comparative de plusieurs fantômes de l'humain exposés en onde plane et champ proche entre 2 MHz et 90 MHz. Nous analysons et comparons les niveaux d'exposition induits dans le corps humain selon la morphologie des fantômes et le type d'exposition.

1. Introduction

De plus en plus de systèmes radioélectriques apparaissent dans les domaines privés, industriels ou militaires. Les applications militaires les utilisent particulièrement dans les bandes de fréquence HF (3 MHz à 30 MHz), VHF (30 MHz à 300 MHz) et UHF (300 MHz à 3000 MHz) pour différentes fonctions : communication, brouillage, radar, etc.

Avec la multiplication de ces fonctions, le risque de surexposition électromagnétique des opérateurs augmente. Des normes et recommandations internationales ont donc été publiées afin de garantir la sécurité des personnes (exemple : ICNIRP de 1998 [1]).

Pour pallier le manque de moyens de mesure notamment en HF et VHF et garantir l'évaluation de la conformité des systèmes radio militaires, des simulations numériques sont nécessaires pour calculer le débit d'absorption spécifique (DAS) ou la densité de courant (J) induits dans le corps. Le calcul de ces grandeurs dosimétriques est effectué en modélisant des fantômes de morphologie équivalente à l'être humain. Cependant ces fantômes ont à l'origine été développés pour des applications biomédicales (notamment en IRM à 64 MHz pour un champ magnétique de 1,5 T). Pour les bandes HF, VHF et UHF, quelques études entre 20 MHz et 2,4 GHz [2] ont été menées avec ces fantômes sans toutefois être associées à des systèmes de radio-télécommunications mobiles et portables.

Les normes et recommandations donnant les limites en onde plane, l'objectif de ce travail sera d'étudier d'abord le comportement en onde plane de plusieurs fantômes, puis le comportement de ces mêmes fantômes en exposition champ proche plus réaliste. L'analyse des résultats permettra d'évaluer les comportements de différents fantômes selon le type d'exposition.

2. Matériels et méthodes

2.a. Fantômes utilisés

Plusieurs fantômes ont été comparés pour une même exposition. Des fantômes voxels de résolution proche ont été utilisés : Ella (1,6 m ; 58 kg ; jusqu'à 84 tissus) et Duke (1,74 m ; 70 kg ; jusqu'à 84 tissus) issus de la Virtual Family [3] avec une résolution de 5 mm et Hugo (1,87 m ; 113 kg pour 32 tissus) issu du Visible Human Project [4] avec une résolution de 4 mm. Ces fantômes hétérogènes seront également homogénéisés par un même tissu désigné liquide homogène.

2.b. Liquide homogène

Neuf tissus représentent 92% du volume du fantôme Hugo de résolution 1 mm. Ces tissus sont les suivants (du plus au moins présents en termes de voxels) : les muscles, la graisse, la peau, les poumons, la moelle, les ligaments, l'os cortical, le foie et l'os spongieux. Les propriétés diélectriques du liquide homogène sont la moyenne pondérée (selon le nombre de voxels d'Hugo en 1 mm) des propriétés diélectriques de ces 9 tissus. Elles sont données en Figure 1 entre 2 et 100 MHz.

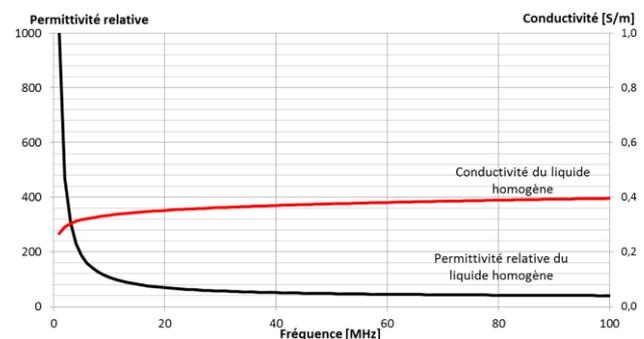


Figure 1 : Propriétés diélectriques du liquide homogène entre 2 MHz et 100 MHz

2.c. Configuration de l'étude

Dans un premier temps, les fantômes en espace libre sont exposés de face en onde plane avec une densité de puissance de 1 W/m². Dans un second temps, ils sont exposés à un champ proche grâce à un portatif placé à

côté de la tête (à 10 cm de l'oreille des fantômes) avec une puissance rayonnée par l'antenne de 1 W. Concernant le champ proche, l'antenne est un monopôle et mesure 1 m en HF et 50 cm en VHF.

Les valeurs de DAS corps entier (DAS_{CE}) et de DAS 10g max sont calculées pour les fantômes hétérogènes et homogènes avec une résolution de 4 (Hugo) ou 5 mm (Duke et Ella). Toutes les simulations numériques sont effectuées à l'aide de CST Microwave (méthode numérique FIT : Finite Integration Technique).

3. Résultats

3.a. Exposition en onde plane

La Figure 2 présente les différentes zones à fort DAS 10g de ces fantômes à 78 MHz (fréquence choisie arbitrairement). On constate que c'est au niveau des chevilles, des genoux et du cou que le DAS est le plus élevé. D'une manière générale en HF et VHF, nous avons observé que ces 3 zones présentent systématiquement des DAS plus élevés.

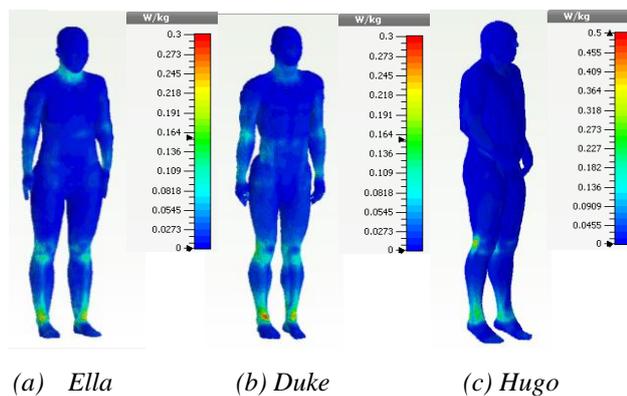


Figure 2 : Localisation des zones à fort DAS à 78 MHz pour les 3 fantômes hétérogènes

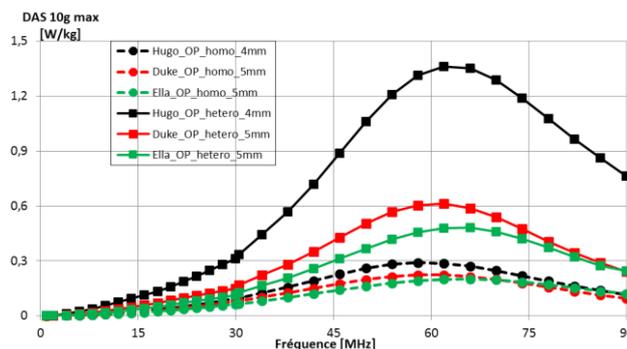


Figure 3 : DAS 10g max pour différents fantômes entre 2 MHz et 90 MHz – Onde Plane

Les valeurs de DAS 10g maximum obtenues en HF et VHF sont présentées en Figure 3 pour ces 6 fantômes (3 fantômes hétérogènes et 3 homogènes) exposés à une onde plane. Les valeurs de DAS 10g pour les trois fantômes homogènes sont très proches (écart ≤ 2 dB). Entre les fantômes hétérogènes Duke et Ella les résultats sont similaires (écart $\leq 1,3$ dB) alors que le fantôme

Hugo présente des valeurs de DAS 10g de 1,5 à 3,5 fois supérieures à celles de Duke/Ella. Par ailleurs les valeurs de DAS 10g pour un fantôme hétérogène sont toujours supérieures aux valeurs de DAS 10g pour un même fantôme homogénéisé. L'écart est d'environ 4 dB sauf pour Hugo dont les écarts varient entre 6 et 8 dB. Un comportement similaire (écarts entre fantômes et écarts d'homogénéisation) a été observé lorsque l'angle d'incidence et/ou la polarisation varient.

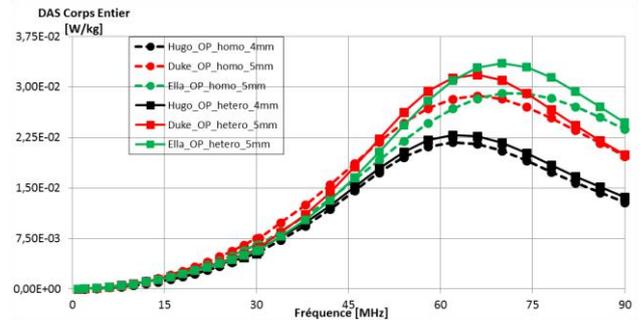


Figure 4 : DAS_{CE} pour différents fantômes entre 2 MHz et 90 MHz - Onde Plane

La Figure 4 présente les valeurs de DAS_{CE} pour les 6 fantômes exposés en onde plane. Les écarts dus à l'homogénéisation sont beaucoup plus faibles que pour le DAS local, car ils sont compris entre ± 1 dB.

Les valeurs maximales de DAS_{CE} et de DAS 10g sont relevées autour de la fréquence de résonance du corps (~ 62 MHz pour Hugo, ~ 66 MHz pour Duke et ~ 70 MHz pour Ella).

3.b. Influence des tissus à la surface des fantômes

Suite à ces résultats, nous avons remarqué que le fantôme Hugo en résolution 4 mm ne présentait quasiment pas de peau. En effet sa 1^{ère} couche de tissus n'est composée que de graisse tandis que pour les fantômes Duke/Ella, la 1^{ère} couche de tissus est composée à la fois de peau et de graisse. Or des études ont montré l'influence de certains tissus sur les valeurs de DAS local, notamment entre des tissus à forte teneur en eau (comme la peau ou les muscles) et des tissus à faible teneur en eau (comme la graisse) [5]. Il faut également noter que les tissus à forte teneur en eau ont une conductivité plus forte que les tissus pauvres en eau ($\sigma_{graisse} \sim 0,03$ S/m et $\sigma_{peau} \sim 0,4$ S/m en HF/VHF).

Suite à cela nous avons modifié les tissus de la 1^{ère} couche chez deux fantômes (Duke et Hugo) : elle a été remplacée soit par de la graisse, soit par de la peau soit par un mélange peau/graisse. Nous avons choisi de comparer les deux fantômes masculins et de mettre de côté Ella car elle présente les mêmes caractéristiques que Duke pour sa 1^{ère} couche de tissus.

La Figure 5 présente les valeurs de DAS 10g max en VHF obtenues pour Hugo et Duke. Seuls les résultats en VHF sont présentés, mais le même phénomène a été observé en HF. Le remplacement de la graisse par de la peau pour Hugo a pour effet de « repositionner » son DAS 10g max dans l'ordre de grandeur de Duke non modifié. Les écarts entre un fantôme Hugo n'ayant que de la peau à la surface et Duke non modifié sont

inférieurs à 1,4 dB contre 4 dB précédemment. Cela nous indique que les écarts de DAS entre Hugo et Duke non-modifiés sont dus à la surface entièrement grasseuse d'Hugo. De plus les écarts sur les DAS 10g dus à l'homogénéisation sont maintenant inférieurs à 2 dB pour le fantôme Hugo modifié.

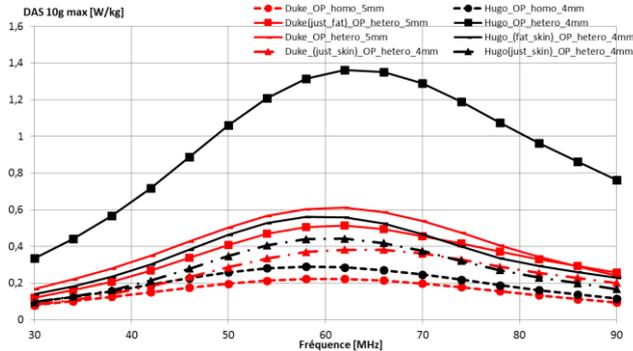
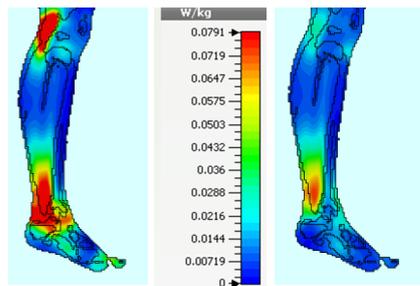


Figure 5 : Influence de la 1ère couche de tissus chez Hugo et Duke en VHF sur le DAS 10g max - Onde Plane

La Figure 6 présente la répartition en DAS 10g au niveau de la cheville à 28 MHz (fréquence choisie arbitrairement) pour Hugo non modifié (Figure 9a) et pour Hugo modifié avec de la peau à la place de la graisse (Figure 9b). Nous pouvons observer que l'absorption est plus profonde avec de la graisse en surface, la peau atténuant plus fortement le champ pénétrant dans les tissus. Cela s'explique par la valeur de conductivité de la peau plus forte que celle de la graisse conduisant à une épaisseur de peau plus faible pour la peau que pour la graisse ($\sigma_{\text{graisse}} = 0,03 \text{ S/m}$, $\delta_{\text{graisse}} = 0,6 \text{ m}$; $\sigma_{\text{peau}} = 0,4 \text{ S/m}$, $\delta_{\text{peau}} = 0,2 \text{ m}$ à 28 MHz).



(a) Hugo non modifié (b) Hugo avec que de la peau en surface

Figure 6 : Distribution surfacique du DAS 10g chez Hugo à 28 MHz

Nous pouvons en conclure que la présence de graisse en surface tend bien à augmenter les valeurs locales de DAS mais qu'il est difficile de quantifier cette augmentation puisque les écarts sont variables entre Hugo et Duke.

En prenant comme référence le cas d'une 1ère couche composée de peau et de graisse, car avec une résolution de 4/5 mm ce sont les cas les plus réels (Duke non-modifié et Hugo dont la 1ère couche possède les propriétés diélectriques égales à la moyenne de celles de

la graisse et de la peau), nous constatons en Onde Plane que :

- Duke avec uniquement de la graisse en surface engendre une légère diminution de DAS 10g (< 1,5 dB). Hugo non-modifié (que de la graisse en surface) engendre une augmentation importante de DAS 10g (4 dB à 5 dB) → Ceci montre qu'une 1ère couche de graisse ($\sigma_{\text{graisse}} < \sigma_{\text{mélange peau/graisse}}$) peut engendrer une forte augmentation en DAS 10g.
- Duke avec que de la peau en surface engendre une diminution de DAS 10g (1 à 3 dB). Hugo avec que de la peau engendre une faible diminution de DAS 10g (1 à 1,5 dB) → Ceci montre qu'une 1ère couche de peau ($\sigma_{\text{peau}} > \sigma_{\text{mélange peau/graisse}}$) engendre une diminution en DAS 10g.
- Duke homogène engendre une diminution de DAS 10g d'environ 4 dB et Hugo homogène de 1,5 à 3 dB. Vis-à-vis des fantômes utilisés, ceci montre que le liquide homogène utilisé engendre une diminution du DAS 10g de moins de 5 dB.

3.c. Exposition en champ proche

Les valeurs de DAS 10g max obtenues en HF et VHF sont présentées en Figure 7 pour les 6 fantômes exposés à un champ proche.

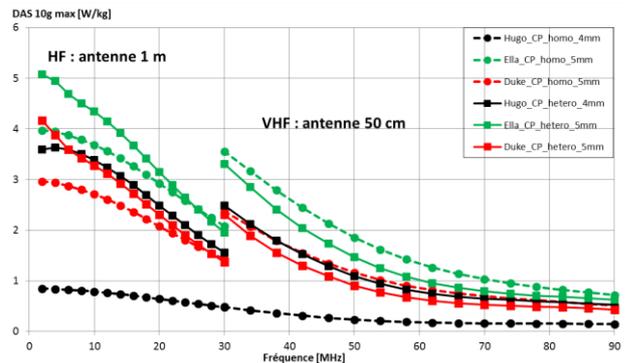


Figure 7 : DAS 10g max normalisé pour différents fantômes entre 2 et 90 MHz - Champ Proche

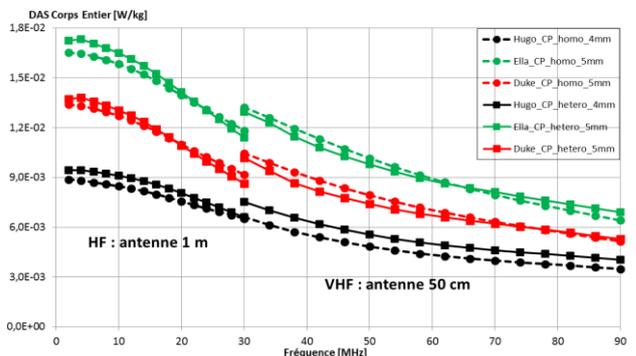


Figure 8 : DAS_{CE} normalisé pour différents fantômes entre 2 et 90 MHz - Champ Proche

Les résultats en DAS 10g max n'ont pas la même tendance que dans le cas onde plane, car ce sont les fantômes Ella hétérogène (en HF) puis Ella homogénéisé (en VHF) qui présentent les valeurs maximales tandis que c'est Hugo homogénéisé qui a les valeurs les plus

faibles. Cependant les écarts entre les fantômes hétérogènes sont faibles : écart $\leq 1,5$ dB entre Ella et Hugo hétérogènes et $\leq 2,1$ dB entre Ella et Duke hétérogènes pour le DAS 10g max. Les écarts sur le DAS 10g max dus à l'homogénéisation sont $\leq 1,5$ dB pour Ella et Duke alors que pour Hugo ils sont d'environ 6 dB ; pour le DAS_{CE} (Figure 8) ils sont de $\pm 0,3$ dB pour Duke et Ella et 0,6 dB pour Hugo. Nous remarquons qu'en champ proche la résonance du corps n'apparaît pas sur les valeurs de DAS puisque c'est essentiellement la tête qui est exposée et non le corps entier contrairement à l'exposition Onde Plane.

Le fantôme Hugo est encore singulier puisque les écarts d'homogénéisation sont plus importants que chez Duke et Ella : en champ proche homogénéisé, valeurs faibles de DAS 10g ; en onde plane hétérogène, valeurs élevées de DAS 10g.

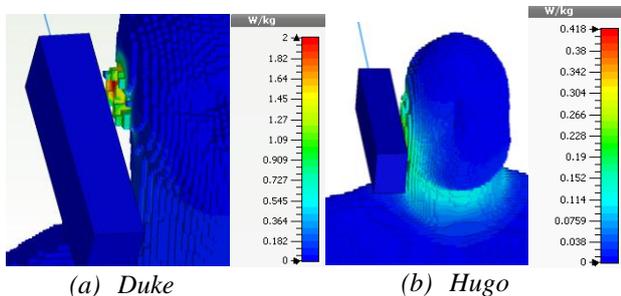


Figure 9 : Distribution surfacique du DAS 10g à 34 MHz des fantômes homogénéisés

La Figure 9 présente les DAS 10g de Duke et Hugo homogénéisés à 34 MHz (fréquence choisie arbitrairement), Ella ayant la même répartition en DAS local que Duke. Nous constatons que le DAS est localisé sur l'oreille pour Duke alors que pour Hugo, cela s'étend jusqu'au cou en homogène (jusqu'au milieu de la joue en hétérogène). Cela est a priori dû à la morphologie du modèle d'Hugo, car contrairement à Duke/Ella, son oreille se confond avec sa tête.

Malgré cette morphologie particulière (qui tendrait à diminuer le DAS local en champ proche), Hugo hétérogène présente des valeurs de DAS 10g max équivalentes à celles de Duke/Ella. En effet comme la 1^{ère} couche de tissus d'Hugo (de résolution 4 mm) n'est composée que de graisse alors que chez Duke/Ella (de résolution 5 mm), elle est composée de peau et de cartilage au niveau de l'oreille, il se pourrait que ce soit cette 1^{ère} couche de tissus qui explique les différences en DAS 10g entre Hugo et Duke/Ella, comme nous avons pu le voir précédemment en onde plane.

Donc malgré la morphologie d'Hugo, la présence de graisse à sa surface pourrait faire augmenter les DAS locaux, et donc expliquerait que l'on obtienne des valeurs de DAS 10g équivalentes à celles de Duke/Ella pour Hugo hétérogène.

4. Conclusion

Les résultats de cette étude ont montré qu'en exposition de type onde plane, les fantômes Ella, Duke et

Hugo hétérogènes et homogénéisés présentent un comportement similaire du point de vue répartition en DAS 10g avec des valeurs plus élevées chez les fantômes hétérogènes, notamment chez Hugo.

Nous avons constaté que les fantômes Hugo et Duke n'étaient pas équivalents au niveau des tissus de surface (résolution de 4 ou 5 mm), cette différence pouvant expliquer les valeurs élevées de DAS 10g relevées chez Hugo par rapport à Duke.

En effet l'absorption en champ se produit dans les 1^{ères} couches de tissus des fantômes, or les propriétés diélectriques de la peau et de la graisse sont assez éloignées. On constate ainsi que la présence de graisse à la surface d'un fantôme peut faire augmenter les valeurs locales en champ donc en DAS 10g par rapport à une surface de fantôme ne contenant que de la peau. Le comportement particulier d'Hugo s'explique donc par ses tissus présents en surface différents de ceux d'Ella et Duke.

L'exposition en champ proche nous a permis de pointer une autre particularité du fantôme Hugo. En effet son oreille et sa tête se confondent alors que chez Ella et Duke, elles sont bien distinctes donc pour une exposition en champ proche près de l'oreille, le champ sera absorbé très localement pour Duke et Ella (sur les oreilles) alors que pour Hugo, il sera absorbé sur une plus grande surface (sur l'oreille et la tête).

5. Remerciements

Cette étude est financée par Thales, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et a bénéficié du soutien de l'Université de Rennes 1 et du CNRS.

6. Bibliographie

- [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] E. Conil, A. Hadjem, F. Lacroux, M.F. Wong et J. Wiart, « *Variability analysis of SAR from 20 MHz to 2,4 GHz for different adult and child models using FDTD* », Phys. Med. Bio., Vol. 53, 2008, pp. 1511-1525)
- [3] A. Christ, W. Kainz, E. Hahn, K. Honegger, M. Zefferefer, 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] « *The Visible Human Project* », disponible en ligne : <http://www.nlm.nih.gov/research/visible/>
- [5] A. Christ, T. Samaras, A. Klingeböck, N. Kuster, « *Characterization of the electromagnetic near-field absorption in layered tissue in the frequency range from 30 MHz to 6000 MHz* », Phys. Med. Bio., Vol. 51, 2006, pp. 4951-4965