



CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DE LA DOSIMÉTRIE À LA SANTÉ HUMAINE

Utilisation de la DG-FDTD pour un calcul de dosimétrie dans un problème fortement multiéchelle : détermination du DAS oeil pour une personne située à proximité d'une source HF/VHF embarquée sur un véhicule

On the use of the DG-FDTD for dosimetric analysis in a highly multiscale problem: computation of the SAR in the eye of a person located near a HF / VHF source onboard a vehicle

Guelilia Zakaria, Loison Renaud, Gillard Raphael et Laisné Alexandre

IETR - INSA Rennes, Guelilia Zakaria, zakaria.guelilia@insa-rennes.fr

IETR - INSA Rennes, Loison Renaud, renaud.loison@insa-rennes.fr

IETR - INSA Rennes, Gillard Raphael, raphael.gillard@insa-rennes.fr

DGA Technique aéronautique, Laisné Alexandre, alexandre.laisne@dga.defense.gouv.fr

Mots-clefs :

Dosimétrie numérique – FDTD – Exposition aux champs EM – Estimation du DAS – analyse multigrilles

Dosimetry – FDTD – EM exposer – SAR estimation – Multigrid analysis

Résumé

La dosimétrie numérique consiste en l'évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements électromagnétiques. Au vu de la complexité et l'hétérogénéité du corps humain, la méthode la plus appropriée pour effectuer des simulations électromagnétiques est la méthode des différences finies dans le domaine temporel. Néanmoins, la FDTD pose certains problèmes dus notamment à un schéma de maillage uniforme qui peut rendre les simulations coûteuses en ressources informatiques.

Cette communication expose l'avancé de nos recherches sur la méthode intitulée DG-FDTD basée sur la division du problème global en sous-volumes FDTD. Cette technique a pour but de caractériser chaque élément de l'environnement de simulation à l'aide d'un maillage approprié. L'exécution de la simulation est effectuée de manière séquentielle grâce à un transfert de l'information électromagnétique entre les différents volumes.

Dans un premier temps, cette étude s'amorce sur la validation de la méthode DG-FDTD dans un problème simple. Dans un second temps, un scénario plus complexe est traité en utilisant cette méthode. Les résultats de cette simulation permettent de montrer l'efficacité de la DG-FDTD pour traiter des problèmes de dosimétrie fortement multiéchelles.

Introduction

Avec le développement et la présence au quotidien des objets de communication, connaître la dose d'exposition aux rayonnements émissant est devenu une nécessité. Des organismes tels que l'ICNIRP[1] proposent de nombreuses recommandations afin de définir les limites acceptables en terme d'exposition. Désormais pour qu'une technologie soit conforme, elle doit satisfaire à la loi européenne et au décret français qui proposent de respecter un niveau précis d'exposition.

La dosimétrie numérique est une approche essentielle pour l'évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements électromagnétiques. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude. La méthode généralement préconisée pour cette évaluation est la FDTD (Finite Difference Time Domain). Objet d'étude et de recherche de ces dernières années, elle a prouvé son efficacité pour la simulation d'objets tridimensionnels et hétérogènes tels que le corps humain. Néanmoins, cette méthode pose de sérieuses difficultés principalement liées à la taille du scénario traité. Du fait de son maillage uniforme, des problèmes de sur-échantillonnage apparaissent lorsque le but est de calculer le DAS (Débit d'Absorption Spécifique) dans une zone très localisée telle que l'oeil. En effet, une description précise de cet organe est nécessaire et

entraîne un sur-échantillonnage spatial de l'ensemble du volume de calcul, même dans les zones où la description pourrait être très relâchée. Ainsi, une augmentation de la taille de la simulation entraîne irréversiblement une hausse de la consommation en ressources informatiques et en temps de traitement. Pour résoudre ces problèmes, des approches de sous-maillage ont été développées. Bien qu'elles proposent un gain en termes de temps et en ressources informatiques, elles présentent des inconvénients tels que les instabilités [2] ou les réflexions parasites aux interfaces entre les grilles. C'est ainsi qu'une approche alternative permettant de contourner ces inconvénients a été proposée [3,4]. La méthode nommée DG-FDTD (Dual Grid FDTD) permet de décomposer un scénario en plusieurs simulations FDTD exécutées séquentiellement et possédant chacune une résolution adaptée aux éléments qu'elle décrit.

Le sujet de notre étude est le calcul du DAS dans un oeil d'un corps humain entier situé à proximité d'une source HF/VHF embarquée sur un véhicule. Pour ces longueurs d'onde, le véhicule et le personnel se trouvent dans la zone de champ proche de l'aérien, et sont illuminés de façon globale, ce qui nécessite un maillage de l'ensemble des éléments dans un même volume de calcul. La méthode DG-FDTD est utilisée pour affronter le caractère multiéchelle qu'impose ce scénario. En effet, l'oeil présente des dimensions très petites comparées au reste du corps et surtout comparées à l'environnement complet (notamment le véhicule). Le plan de cette communication est le suivant. Dans un premier temps, la validité de la DG-FDTD pour traiter les scénarios visés est étudiée. Dans un second temps, un problème de grande taille mettant en scène une personne au voisinage d'un véhicule surmonté d'une antenne est analysé à l'aide de la DG-FDTD. Cette étude a pour but de montrer que la méthode est parfaitement adaptée à des problèmes fortement multiéchelles.

1. Calcul du DAS oeil dans le modèle de corps éclairé par une onde plane

Cette première partie a pour but de valider l'utilisation de la DG-FDTD pour le calcul du DAS oeil gauche dans un modèle de corps humain.

1.1. Modèle de corps utilisé et scénario de simulation

Le modèle de corps humain correspond à un modèle nommé « visible human » ou Hugo [5]. Le modèle utilisé possède une structure homogène à l'exception des yeux caractérisés par leur propre permittivité et conductivité. Le protocole expérimental de ce premier test est le suivant: Hugo se situe en espace libre et est illuminé par une onde plane l'éclairant de face avec un champ polarisé verticalement dans une bande de fréquence allant de 1 à 100 MHz. L'amplitude du champ électrique incident est de 1V/m.

1.2. Calcul du DAS dans l'oeil gauche

Dans cette section, nous validons l'utilisation de la DG-FDTD pour calculer le DAS oeil dans le scénario d'exposition de type onde plane. Pour cela trois simulations sont mises en oeuvre:

- FDTD intégralement maillée en 8 mm (FDTD-8),
- FDTD intégralement maillée en 4 mm (FDTD-4),
- DG-FDTD décrivant le corps complet en 8 mm puis zoomant sur l'oeil décrit en 4 mm (DG FDTD-8-4).

La FDTD-8 correspond à la simulation modélisant Hugo maillé en 8 mm (figure 1) tandis que la FDTD-4 représente Hugo maillé en 4 mm. Ces simulations sont définies par les paramètres présentés dans le tableau 1.

	FDTD-8	FDTD-4
Pas spatiaux dx=dy=dz	8 mm	4 mm
Pas temporel dt	15,3960 ps	7,6980 ps
Temps d'observation Tobs	60 ns	60 ns
Bande d'étude	1-100 MHz	1-100 MHz
Nombre de cellules du volume FDTD Nx, Ny, Nz	150, 150, 300	300, 300, 600

Tableau 1 : Paramétrage FDTD-8 et FDTD-4

La méthode DG-FDTD consiste à décomposer un calcul FDTD en plusieurs étapes simulées séquentiellement. Chaque étape met en jeu un volume FDTD avec un maillage qui lui est propre. Pour la validation de cette approche, notre simulation se décompose en deux étapes. La première, dite simulation grossière, correspond au modèle de Hugo 8 mm simulé lors de la FDTD-8. Une surface de prélèvement de champ est définie autour de l'oeil comme le montre la figure 1.

La deuxième étape réutilise le champ prélevé dans l'étape 1 et interpolé pour exciter un volume FDTD plus petit mais maillé plus finement. L'excitation est effectuée à l'aide d'une surface d'injection de champs de type « inside ». Le but de cette étape vise à décrire finement l'oeil (4 mm). A cet effet, un volume limité à l'oeil et aux tissus proches est excité par le champ prélevé dans l'étape 1 comme le montre la figure 2. Les paramètres des simulations mises en œuvre dans le DG-FDTD-8-4 sont précisés dans le tableau 2.

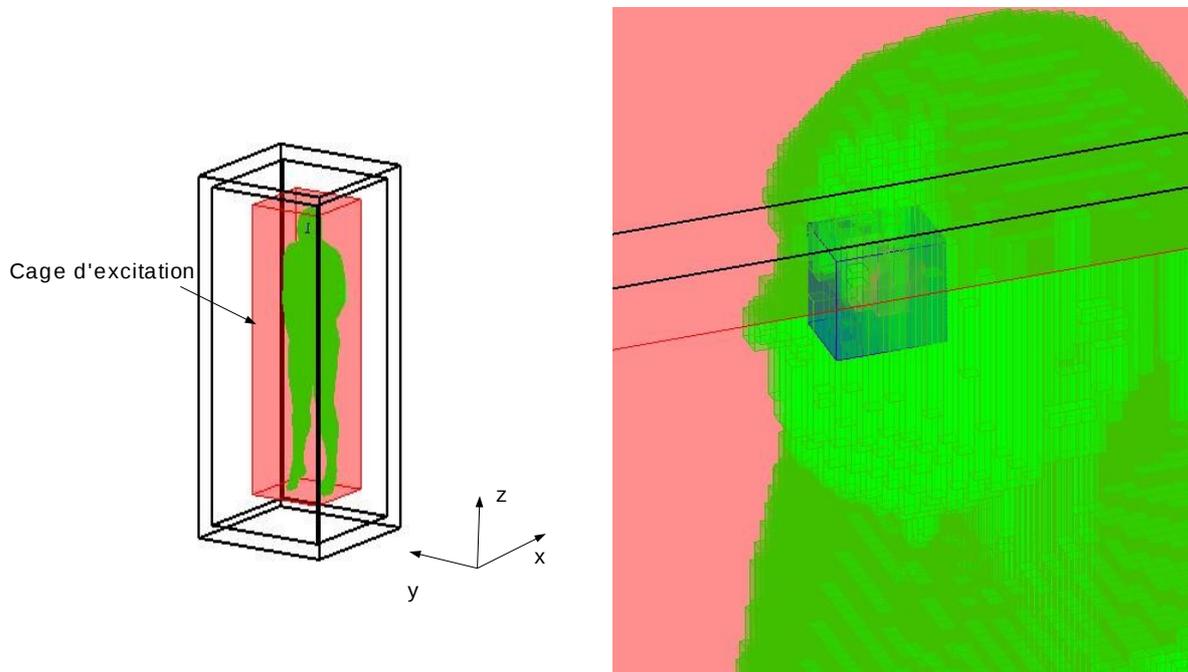


Figure 1 : FDTD-8 & DG-FDTD-8-4 1ere étape

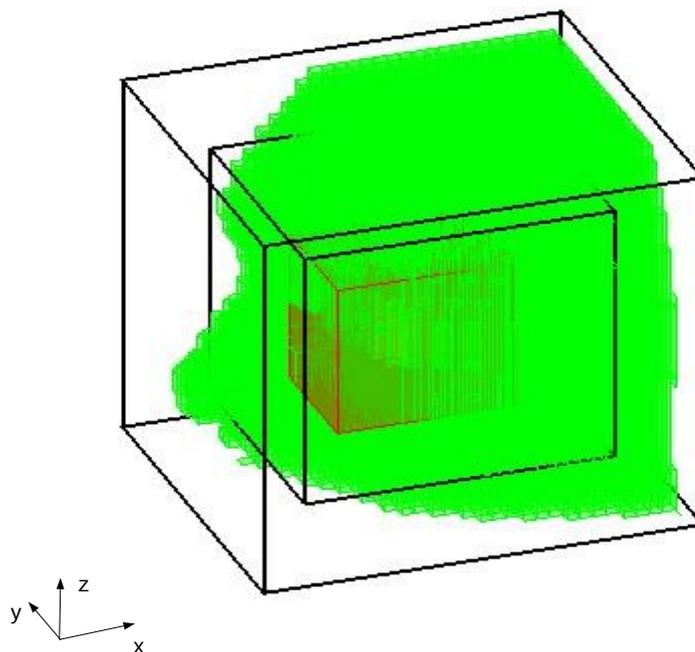


Figure 2 : DG-FDTD 8-4 2ème étape

DG-FDTD-8-4	1ère étape	2ème étape
Pas spatiaux $dx=dy=dz$	8 mm	4 mm
Pas temporel dt	15,3960 ps	7,6980 ps
Temps d'observation T_{obs}	60 ns	60 ns

Bande d'étude	1-100 MHz	1-100 MHz
Nombre de cellules du volume FDTD Nx, Ny, Nz	150, 150, 300	34,30,34

Tableau 2 : Paramétrage DG-FDTD-8-4

La figure 3 présente les résultats obtenus avec les 3 approches. Ces résultats amènent plusieurs commentaires :

- Une différence atteignant 20% est observée entre les résultats obtenus avec les modèles 8 et 4 mm (cf. en complément la courbe d'erreur figure 4). Cela montre que le maillage 8 mm est trop lâche pour estimer précisément le DAS œil et qu'une résolution 4 mm améliore l'estimation.
- La DG-FDTD-8-4 donne des résultats très proches de ceux obtenus avec la FDTD-4. La courbe de la figure 4 montre que l'erreur reste inférieure à 10% sur toute la bande d'analyse. Ce résultat montre que la DG-FDTD offre une estimation correcte du DAS œil en décrivant le corps à 8 mm et en raffinant la tête à 4 mm. Il n'est donc pas nécessaire de décrire finement l'intégralité du corps. Un zoom autour de la zone de calcul du DAS est suffisant.
- Du point de vue de temps de simulation (tableau 3), la DG-FDTD permet clairement de réduire le temps de calcul tout en approchant la précision du calcul FDTD fin. On peut aisément deviner de l'intérêt de cette méthode dans un modèle électromagnétique, cette fois ci plus complexe et possédant un environnement de grande taille.

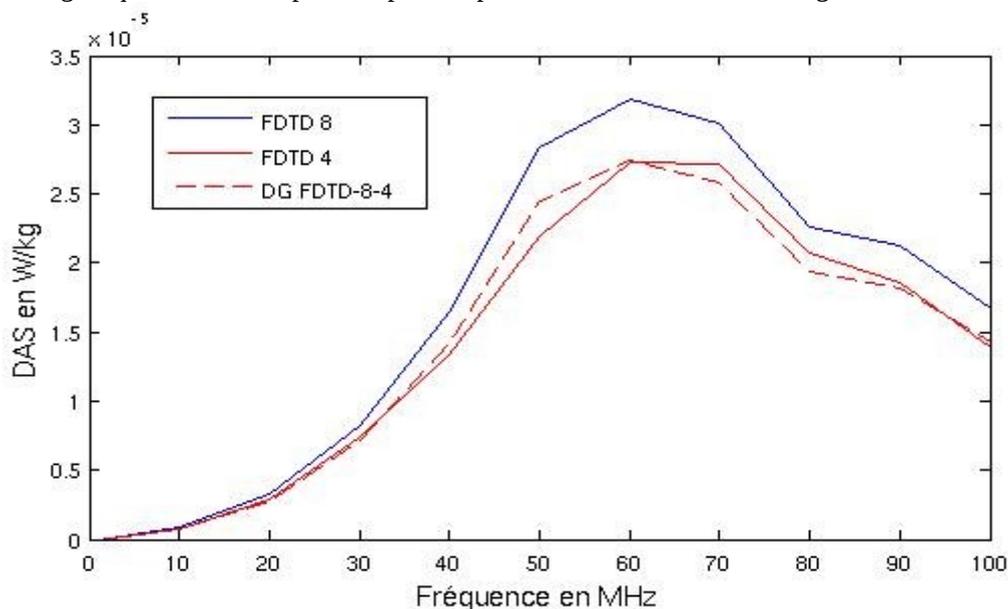


Figure 3 : DAS œil gauche en fonction de la fréquence

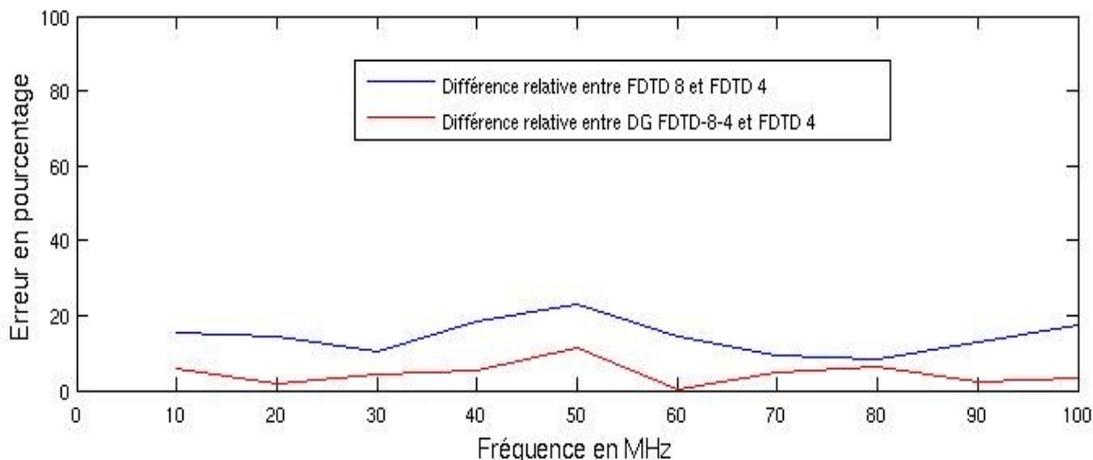


Figure 4 : Différence relative

Simulation	FDTD 8	FDTD 4	DG FDTD-8-4
Temps de simulation	46 minutes	7 heures 55 minutes	1 heure 17 minutes

Tableau 3 : Temps de simulation

2. Simulation d'un cas complexe: Hugo exposé au champ rayonné par un monopôle localisé sur une voiture

L'objectif de cette partie est la mise en application de la DG FDTD dans un cas de grande taille et présentant des fortes variations des niveaux de résolution. Cette section vise à montrer que cette méthode est parfaitement adaptée à ce type de scénario.

2.1. Présentation de l'environnement

Le scénario sélectionné est un environnement composé d'une voiture surmonté d'une antenne monopôle rayonnant dans les bandes HF/VHF (1 à 100 MHz) avec une amplitude de générateur de tension de 1 V. Le modèle de corps humain est placé près du véhicule. La décomposition de la simulation DG FDTD se fait de manière analogue à la simulation précédente. Une première simulation très grossière avec un maillage de (160*160*160) mm³ représente l'intégralité de la scène avec le véhicule, l'émetteur et un modèle de corps humain homogène simplifié comme le montre la figure 5. Une surface de prélèvement est définie autour du modèle du corps humain. La seconde étape simule un volume FDTD maillé beaucoup plus finement (8*8*8) mm³ et excité par le champ prélevé dans l'étape 1 (volume de calcul identique à celui de la figure 1 à la différence que le corps touche le sol représenté par un plan de masse). Une dernière surface de prélèvement définie tout autour de l'oeil permet de simuler une troisième étape. Cette dernière vise à décrire finement l'oeil (maillage 4 mm) afin de calculer précisément le DAS oeil comme nous le montre la figure 2. Le tableau 4 résume les paramètres de cette DG-FDTD-160-8-4.

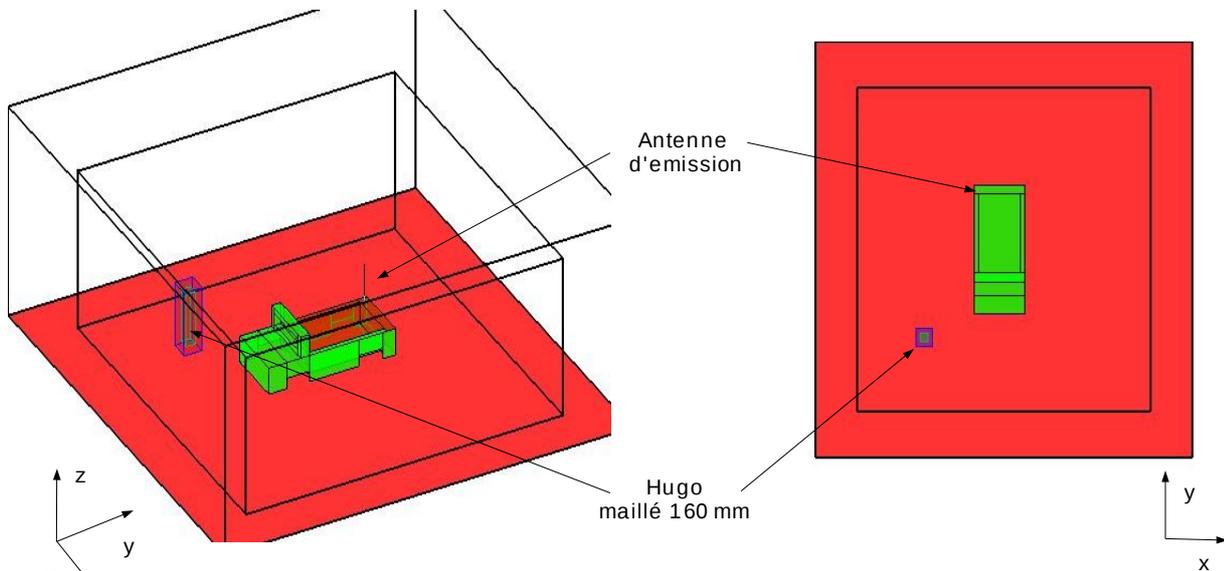


Figure 5 : FDTD-160 1er étape : environnement: véhicule, antenne et modèle de corps humain

DG-FTDT-160-8-4	1ère étape	2ème étape	3ème étape
Pas spatiaux dx=dy=dz	160 mm	8 mm	4 mm
Pas temporel dt	307,92 ps	15,3960 ps	7,6980 ps
Temps d'observation Tobs	200 ns	200 ns	200 ns
Bande d'étude	1-100 MHz	1-100 MHz	1-100 MHz
Nombre de cellules du volume FDTD Nx, Ny, Nz	90,90,40	150, 150, 300	54,50,54

Tableau 4: Paramétrage DG-FDTD-160-8-4

2.2. Résultats

Afin de pouvoir apprécier la manière dont rayonne l'antenne sur le véhicule, la cartographie de la figure 6 montre la valeur du module du champ électrique à 60 MHz, normalisé par rapport au maximum de champ et en dB.

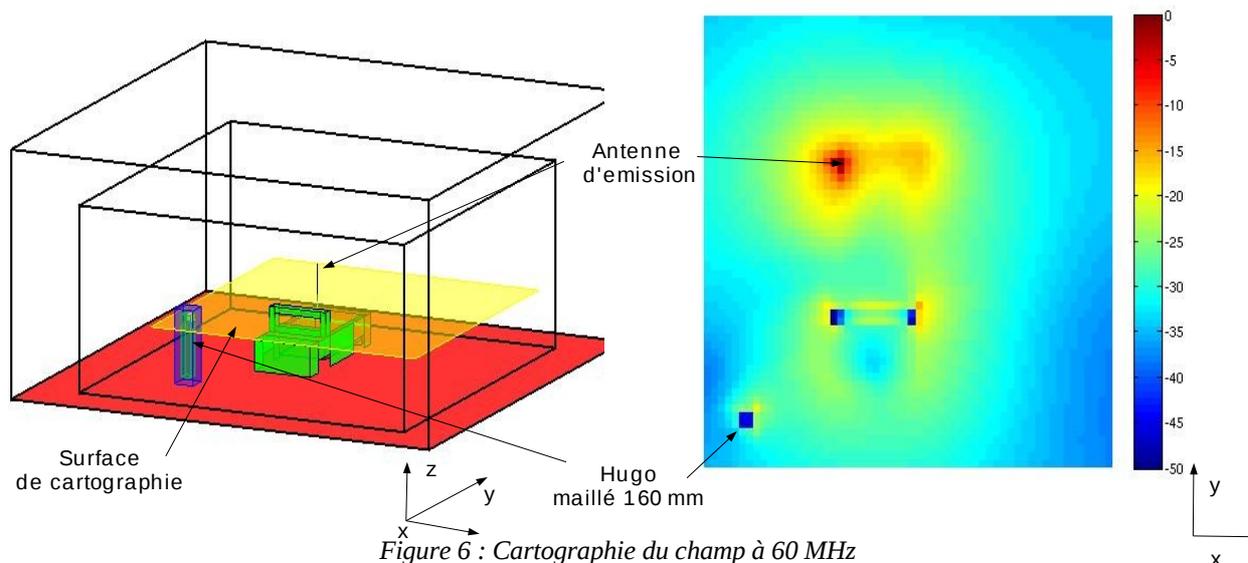


Figure 6 : Cartographie du champ à 60 MHz

Simulation DG FDTD-160-8-4	FDTD 160 : 1ere étape	Interpolation du champ prélevé 160 mm vers 8 mm	DG FDTD-160-8-4 : 2ème étape	Interpolation du champ prélevé 8 mm vers 4 mm	DG FDTD-160-8-4 : 3ème étape	DG FDTD-160-8-4 complète
Temps de simulation	27 secondes	9 minutes	3 heures 43 minutes	5 min 40 secondes	9 minutes	4 heures et 6 minutes

Tableau 4 : Temps de simulation pour chacune des étapes

A titre d'information, le DAS œil calculé à 60 MHz pour la position du corps décrite plus haut et pour une puissance d'émission de 1 W est donné par une valeur de $6,5275 \cdot 10^{-6}$ W/kg.

Cette analyse montre les potentialités offertes par la DG-FDTD. Elle permet de traiter de manière efficace et rapide des problèmes de dosimétrie fortement multiéchelles.

3. Conclusion et Perspectives

Cette communication a présenté l'utilisation de la méthode DG-FDTD pour le calcul du DAS local dans des situations fortement multiéchelles. Après avoir validé son utilisation dans un scénario test, elle a été appliquée dans un environnement grand format, complexe et multiéchelle (rapport de maillage de 40). La DG-FDTD donne des résultats rapides et précis tout en minimisant l'utilisation des ressources informatiques.

En perspective de cette étude, il est nécessaire de pouvoir varier la position du modèle de corps par rapport au véhicule et d'étudier la variation du DAS œil. A plus long terme, nous voudrions proposer une méthode permettant de donner rapidement le DAS œil en fonction de la position spatiale du corps. Une étude de variabilité est en cours de réalisation.

Références bibliographiques

- [1]- Site internet de l'ICNIRP : <http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf> .
- [2]- R. A. Chilton and R. Lee, « Explicit 3D FDTD subgridding with provable stability and conservative properties », IEEE AP-S International Antennas and Propagation Symposium, Honolulu, HI, June 2007, pp. 3069–3072.
- [3]- R. Pascaud, R. Gillard, R. Loison, J. Wiart et M. F. Wong, « Dual-grid finite difference time-domain scheme for the fast simulation of surrounded antennas », IET Microwave Antennas and Propagation, vol. 1, no 3, pages 700–706, Juin 2007.
- [4]- C. Miry, R. Loison and R. Gillard, « An Efficient Bilateral Dual-Grid-FDTD Approach Applied to On-Body Transmission Analysis and Specific Absorption Rate Computation », IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 58, No. 9, 2010, pp. 2375-2382.
- [5]- M.J.Ackerman, « Accessing the visible human project D-Lib. Mag. [Online] », http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html, Oct.1995.