

MÉTHODE HYBRIDE COUPLÉE À UNE ÉQUATION DE RÉSEAU POUR LE CALCUL DES PERTURBATIONS INDUITES SUR LE CÂBLAGE D'UNE VOITURE

X. Ferrières*, J.P. Parmantier, S. Bertuol

ONERA, Département DEMR, unité CDE

2 avenue Edouard Belin, 31055 TOULOUSE - BP 4025

** tel. : 05.62.25.26.79 – fax. : 05.62.25.25.77 - E-mail : Xavier.Ferrieres@onera.fr*

Résumé : Nous présentons une méthode hybride différences finies/volumes finis couplée à une équation de réseau pour le calcul de courants et de tensions sur le câblage d'une voiture. Des comparaisons entre simulations et mesures sont effectuées et permettent de valider cette approche sur un cas quasi industriel.

1. INTRODUCTION

Cet article porte sur l'application d'une méthode hybride différences finies/volumes finis sur un exemple quasi industriel lié au problème automobile. Il s'agit d'évaluer à l'intérieur d'un châssis automobile des niveaux de champs électromagnétiques et de tension sur un câblage résultant d'une agression externe sur une large bande de fréquences. L'article est découpé en plusieurs parties : tout d'abord, on décrit le problème. On présente ensuite la méthode hybride utilisée pour les simulations. Enfin, on donne un ensemble de comparaisons entre les mesures et les calculs obtenus.

2. PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Cet article présente la simulation numérique d'une expérience effectuée par la MIRA. Ces travaux sont menés dans le cadre du projet européen du 5^{ème} PCRD, GEMCAR, dont l'objectif est de réaliser un guide de modélisation CEM à l'intention des constructeurs automobiles. Dans ce contexte, plusieurs outils numériques sont utilisés et confrontés à des mesures effectuées entre différents laboratoires. Les partenaires du projet sont la MIRA, FORD et QINETIQ (UK), l'ONERA, EADS/CCR et le CETIM (France), l'EPFL (Suisse), HEVROX (Belgique) et VOLVO (Suède). L'expérience de la MIRA consiste à mesurer dans un châssis de voiture un ensemble de points de champs et à relever aux extrémités des câbles circulant dans ce châssis des valeurs de paramètres S . La voiture utilisée est une VOLVO S80 mise à disposition par VOLVO CAR. Celle-ci est irradiée par une antenne bi-conilog sur une plage de fréquences allant de 30 MHz à 1 GHz. La distance de cette antenne par rapport à la voiture ne permet pas de travailler, du moins aux basses fréquences, en champs lointains au niveau de la voiture. En d'autres termes, on ne peut pas considérer que le champ rayonné par l'antenne soit une onde plane au niveau de la voiture. Il faut donc dans les simulations modéliser cette antenne. Dans l'expérimentation, les paramètres S_{21} sont mesurés entre les extrémités des câbles et le port de l'antenne chargés chacun par 50 Ω . La totalité du dispositif est placé dans une chambre semi-anéchoïque sur un plan de sol métallique. Le câblage étudié est constitué d'un ensemble de lignes monofilaires circulant le long des parois métalliques de la voiture à une distance environ égale à 2 cm. La figure 1 montre le dispositif expérimental mis en place.

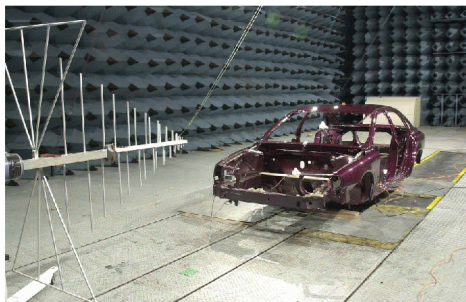


Figure 1 - Dispositif expérimental (Photo MIRA)

La première difficulté dans les simulations est la modélisation de l'antenne bi-conilog. Une première phase de calibration du modèle de l'antenne a donc été nécessaire. Dans cette phase, des valeurs de champs en différents points, dont un de référence, ont été relevées dans la chambre en présence uniquement de l'antenne d'émission. Une campagne de comparaisons mesures/calculs a été alors effectuée en considérant comme donnée le module du rapport des champs pris aux différents points sur le champ pris au point de référence [1].

On a pu alors définir un modèle d'antenne de type différences finies où les barreaux les plus petits (hautes fréquences) sont éliminés et les autres sont modélisés par des fils minces. Le bi-cône est quant à lui considéré comme une plaque de métal mince (Figure 2).

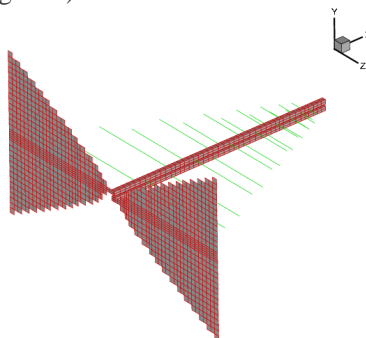


Figure 2 - modèle différences finies de l'antenne biconilog.

Pour modéliser cette antenne, la question du choix entre une méthode différences finies ou bien une méthode volumes finis permettant un maillage plus conforme mais non structuré de l'antenne s'est posé. Le choix s'est porté sur la méthode différences finies en raison de la géométrie assez « cartésienne » de l'antenne (hormis le bi-cône) et du fait que le nombre de mailles non structurées nécessaires en volumes finis était trop prohibitif pour la totalité du problème final incluant la voiture. La figure 3 montre une comparaison mesure/calcul pour différents points de calibration de l'antenne. On remarque sur ces courbes que le modèle choisi pour l'antenne est tout à fait correct.

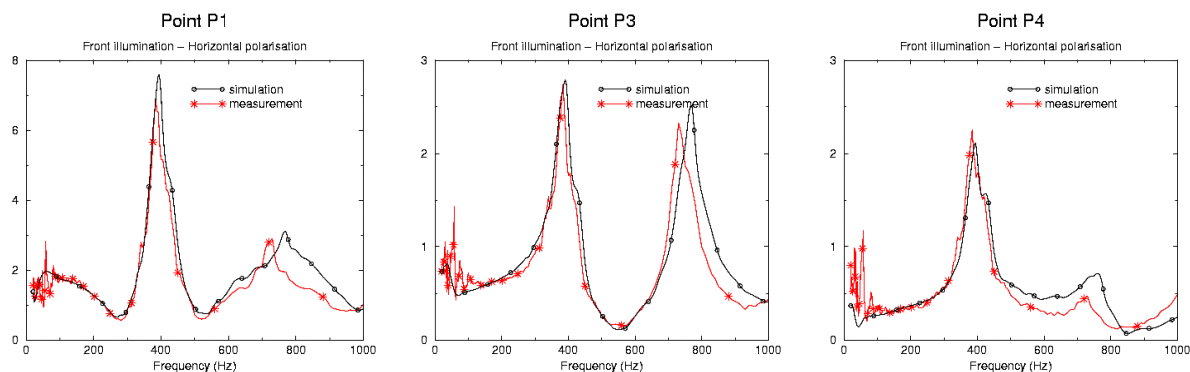


Figure 3 - comparaison mesures/calculs en différents points de calibration.

La deuxième difficulté, au niveau des simulations, consiste à être capable de positionner correctement le câblage à 2 cm le long des parois métalliques de la voiture sans pour autant utiliser un maillage sur-dimensionné en nombre de mailles qui entraînerait un coup de calcul trop important. Pour lever cette difficulté, on choisit d'utiliser autour de la voiture un maillage conforme qui évite, même avec une taille de cellule importante, la possibilité de contact entre la position du câblage avec les cellules de maillage en marches d'escalier que l'on rencontre dans le cas d'une approche différences finies. Pour modéliser cette partie du domaine de calcul, notre choix s'est donc porté sur une approche volumes finis. La figure 4 montre le problème du maillage en marches d'escalier et l'avantage du maillage conforme dans cette zone du domaine de calcul.

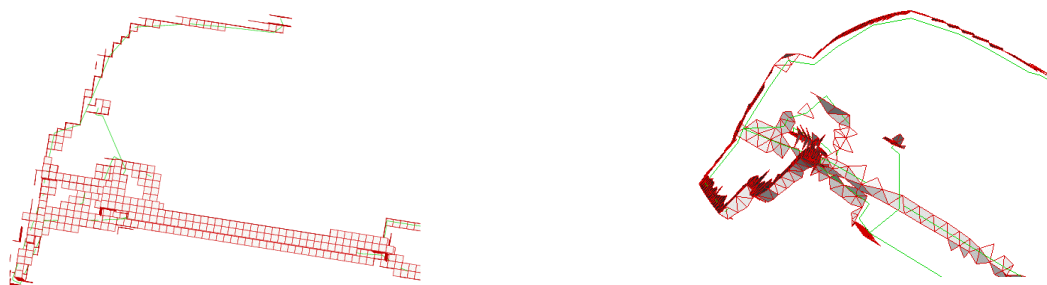


Figure 4 - maillages autour des câbles pour les schémas différences finies et volumes finis.

3. MÉTHODE DE SIMULATION PROPOSÉE

Comme cela a déjà été fait par divers auteurs ([2],[3]) et du fait que plusieurs types de câbles seront à évaluer, la stratégie utilisée pour résoudre notre problème consiste à relever les champs électriques tangentiels le long du parcours des câbles dans un calcul 3D en l'absence de ceux-ci (modèle d'Agrawal [4]). Puis, à l'aide de ces champs pris comme sources de tension distribuées dans une équation de résolution de lignes de transmissions ne faisant intervenir que le câblage, on calcule les courants et tensions aux terminaisons des câbles pour pouvoir ensuite déterminer les paramètres S_{12} . Dans cette stratégie, un code 3D habituellement utilisé lorsqu'on travaille sur une grande plage de fréquences est la méthode différences finies utilisant le schéma de Yee [5]. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, cette méthode n'est pas envisageable pour notre problème à cause de la position du câblage dans la voiture. C'est pourquoi, nous avons opté pour une méthode hybride qui permet de calculer les champs partout dans le domaine de calcul par un schéma de Yee sauf dans une zone proche des parois de la voiture où ceux-ci sont calculés par un schéma volume finis. Dans cette méthode, le maillage du domaine de calcul est défini par une grille cartésienne possédant des trous dans lesquels des maillages non structurés constitués de tétraèdres sont greffés. Dans cet assemblage de maillages, on exige la coïncidence nodale et pour cela, des éléments de type hexaédriques ayant des faces constituées de 2 triangles assureront la liaison entre le maillage structuré cartésien et les maillages non structurés.

Pour comprendre le mécanisme de l'hybridation des deux schémas, on rappelle brièvement les méthodes FDTD et FVTD utilisées en précisant la position des inconnues dans les maillages.

Pour la méthode FDTD, l'espace est maillé sous forme de cellules hexaédriques où les inconnues E et H sont positionnées comme indiqué sur la figure 5. La résolution dans le domaine temporel s'effectue suivant un schéma de type leap-frog où E est calculé aux temps $ndt, (n+1)dt, (n+2)dt, \dots$ et H aux temps $(n-1/2)dt, (n+1/2)dt, (n+3/2)dt, \dots$, avec dt le pas de temps.

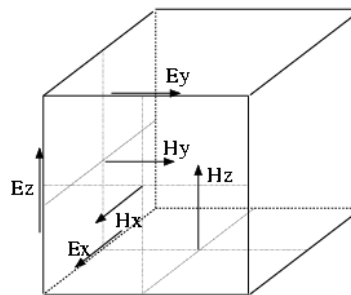


Figure 5 - position des inconnues dans la cellule pour le schéma de Yee.

Pour la méthode FVTD, on écrit les équations de Maxwell sous forme conservative et les champs positionnés aux centres des cellules de discrétisation sont évalués à l'aide des flux $(nx E^*)/\mu$ et $-(nx H^*)/\epsilon$ pris au niveau des surfaces qui entourent les cellules considérées [6]. Dans la méthode, la forme des cellules peut être quelconque. Pour la discrétisation en temps, on utilise une méthode prédicteur-correcteur dans laquelle les champs E et H sont évalués aux mêmes temps c'est-à-dire $ndt, (n+1)dt, (n+2)dt, \dots$

Les deux schémas précédents sont des schémas locaux, c'est-à-dire que les inconnues d'une cellule ne dépendent que des inconnues des cellules voisines. Pour hybrider les deux schémas, on va donc ne le faire qu'à la frontière des zones de calcul évaluées avec des méthodes différentes. Pour cela, considérons la figure 6 représentant la frontière entre la zone de maillage structurée et une zone de maillage non structurée.

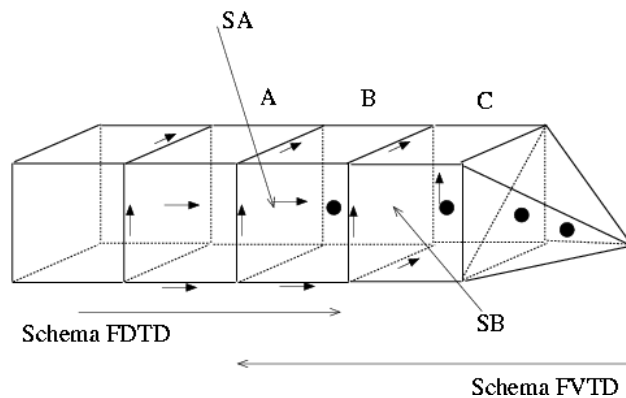


Figure 6 - hybridation des schémas FDTD et FVTD.

Sur la figure 6, les champs calculés par les différences finies sont représentés sous forme de flèches et ceux calculés par les volumes finis sous forme de points. On note une zone de recouvrement d'au moins une cellule, dans la méthode d'hybridation où les champs sont à la fois calculés par les deux schémas numériques. Les champs calculés par volumes finis au niveau de la cellule B vont nécessiter de connaître le flux au travers de la surface SA ou bien les champs au centre de la cellule A. Pour cela on interpolera les champs calculés en différences finies sur la cellule A au centre de celle-ci. De la même manière, pour calculer les champs en différences finies sur la cellule B, il suffira de connaître les champs E sur la surface SB. Ceci s'effectuera en interpolant les champs volumes finis pris aux centres des cellules entourant chaque arête de la surface SB. A cause de ces interpolations, il est nécessaire d'avoir une zone de recouvrement des schémas qui permette d'interpoler les valeurs frontières de chaque schéma à partir des valeurs calculées par l'autre schéma. La figure 7 représente le maillage hybride d'une configuration de la voiture étudiée. On voit autour de la voiture la zone d'échange des schémas.

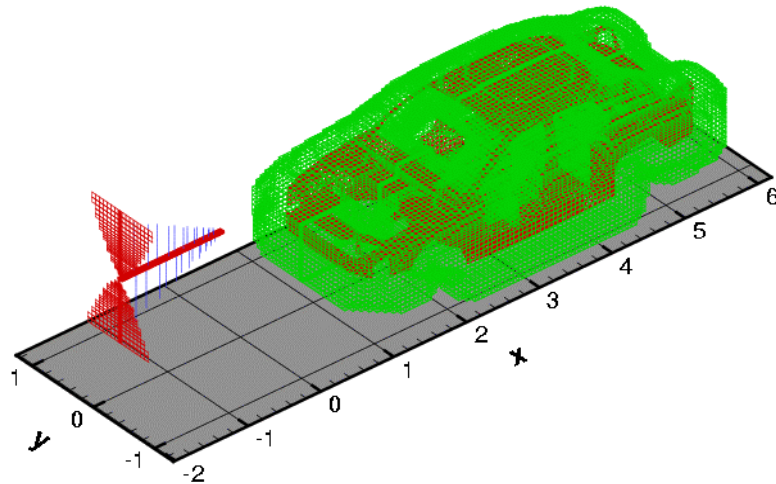


Figure 7 - maillage hybride de la Volvo S80.

La dernière étape de l'hybridation des schémas consiste à utiliser pour chaque schéma un pas dt différent. En effet, le critère de stabilité pour le schéma volumes finis est généralement plus contraignant que celui du schéma différences finies. On utilise alors un pas de temps local pour le schéma volume finis afin de ne pas trop alourdir les calculs en temps d'exécution de la méthode hybride.

Dans cette méthode, le routage du câblage est discrétisé sous forme d'un ensemble de points où les champs électriques tangents sont obtenus par interpolation. Ces points de champs calculés par transformée de Fourier discrète sont ensuite entrés dans le code de résolution de lignes de transmission pour calculer les tensions et courants sur le câblage.

4. RÉSULTATS, COMPARAISONS MESURES/CALCUL

Les résultats présentés dans ce paragraphe concernent une configuration dans laquelle l'antenne agresse le véhicule par le côté et se trouve positionnée en polarisation verticale (Figure 8). Les valeurs de champs mesurés à l'intérieur de la voiture sont situés approximativement au niveau du moteur (P1), au niveau du plancher intérieur au centre de la voiture (P4), au centre du compartiment passager de la voiture (P6) et au niveau de la lunette arrière (P5).

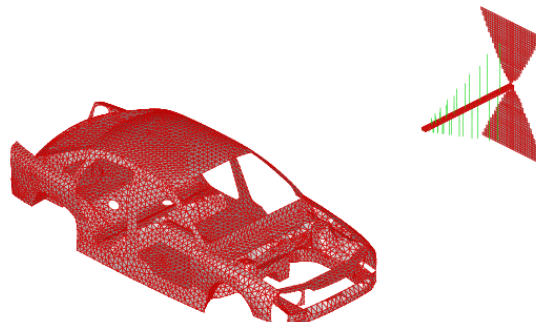


Figure 8 - configuration étudiée.

La figure 9 montre des comparaisons de mesures avec des simulations effectuées avec la méthode hybride et un solveur FDTD seul. On remarque sur ces comparaisons que les solutions FDTD et hybrides donnent des résultats proches des mesures. Sur ces courbes, il est cependant difficile de dire laquelle des deux solutions simulée est meilleure que l'autre car la concordance dépend du point mesuré. On peut seulement noter que la méthode hybride donne des résultats corrects. Par contre, contrairement à la méthode FDTD, elle procure l'avantage supplémentaire de permettre de prendre en compte nos câblages sans précautions particulières.

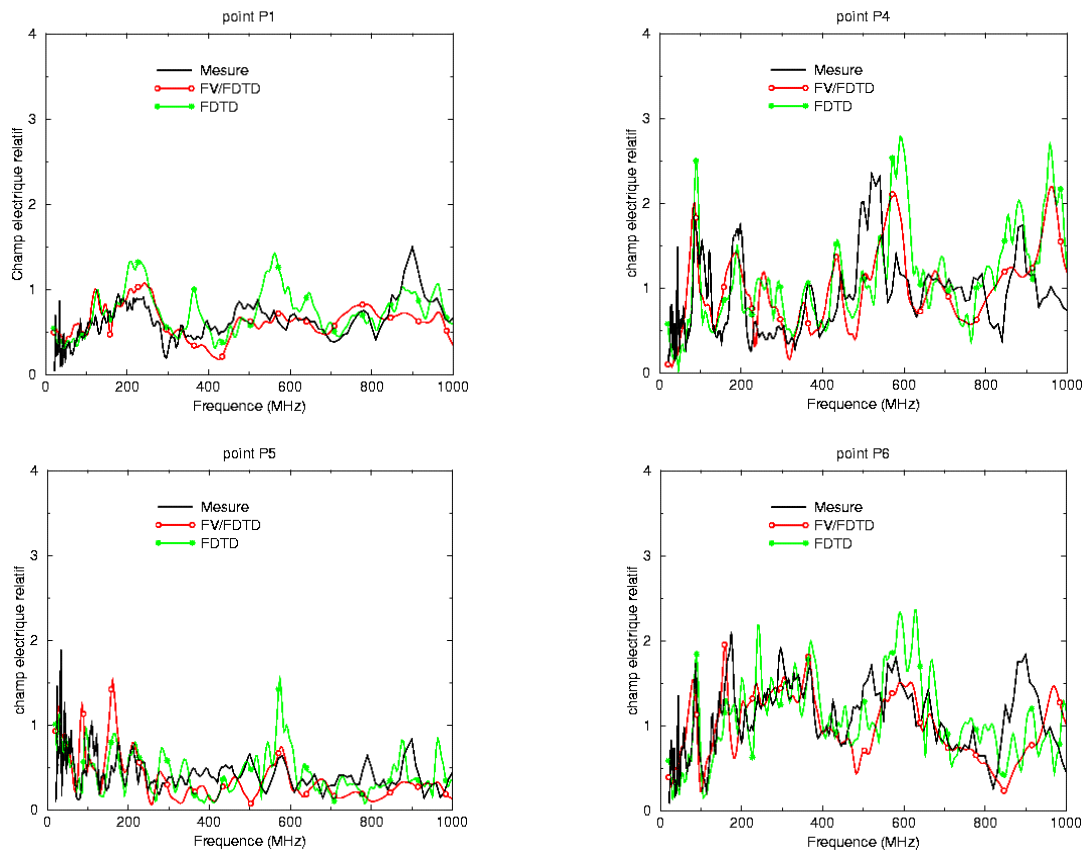


Figure 9 - points de champs à différentes positions dans la voiture.

Le câblage prototype utilisé dans l'expérience est représenté sur la figure 10. Les différents ports de mesures sont notés sur la figure 10.



Figure 10 - câblage prototype à l'intérieur de la voiture.

La figure 11 montre une comparaison des paramètres S_{21} mesurés et des paramètres S_{21} calculés à l'aide de la méthode hybride couplé à un code de résolution de transmission de lignes. On remarque sur ces courbes que la simulation décrit bien le comportement des mesures sur la plage de fréquences étudiée.

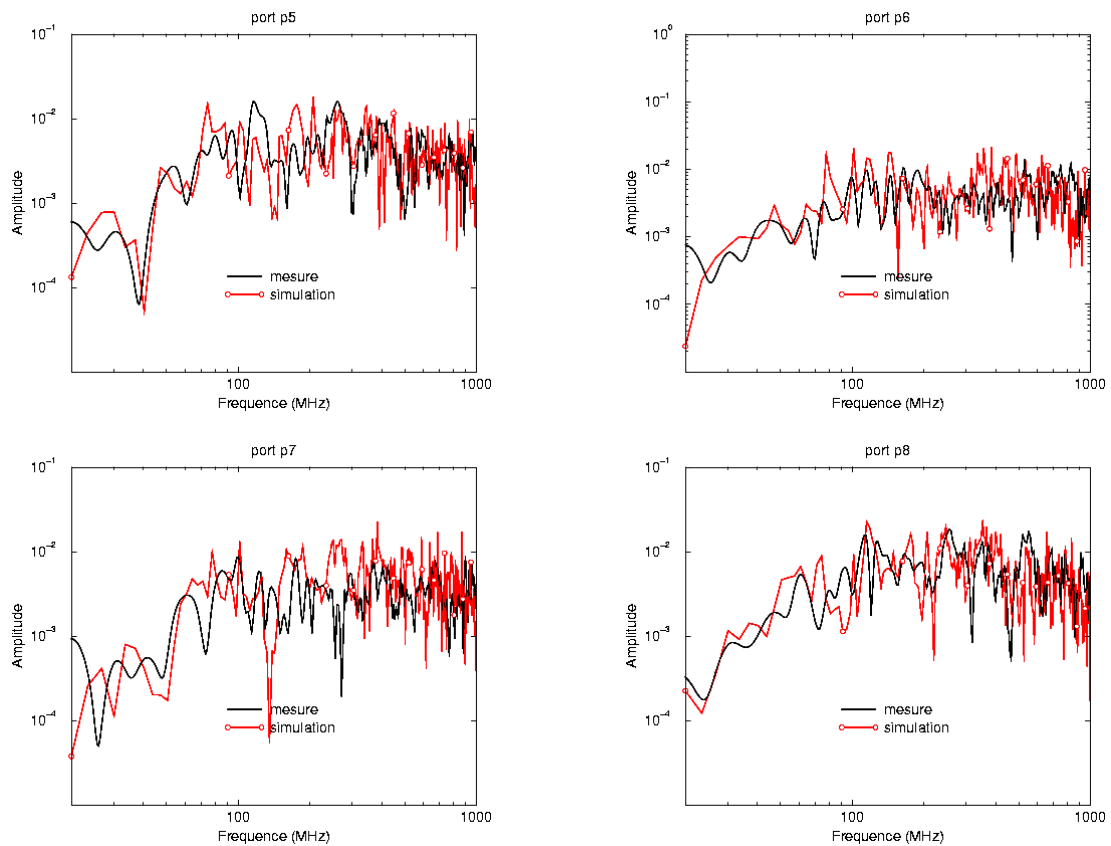


Figure 11 - comparaisons mesures/calculs sur des paramètres S_{21} au niveau de différents ports.

5. CONCLUSION

Dans cet article, on a décrit une méthode hybride temporelle basée sur les schémas différences finies et volumes finis que l'on a ensuite appliquée à la détermination des champs à l'intérieur d'un véhicule. Cette méthode comparée aux mesures et aux résultats FDTD donne satisfaction si ce n'est son coût plus important (environ 4 fois sur un maillage de taille de maille comparable), dans l'état actuel par rapport à la méthode FDTD seule. Cependant, l'avantage de la méthode hybride réside dans le fait de pouvoir mailler les formes courbes de manière conforme et dans le cas où on est intéressé par des champs proches des parois, d'éviter ainsi le surmaillage nécessaire dans la méthode différences finies. On obtient alors dans ce cas des coûts calculs analogues voire plus importants en FDTD que pour la méthode hybride. Enfin, un couplage de cette méthode avec un code de résolution de réseaux de lignes de transmission a permis de valider et d'utiliser cette méthode sur un cas complexe et quasi industriel. Dans le futur, un point important sera d'optimiser la partie liée au calcul volumes finis dans le solveur afin d'avoir vraiment une méthode efficace en coût temps calcul.

6. RÉFÉRENCES

- [1] J.A. Flint, A.R. Ruddle, 'The GEMCAR project – generic guidelines for the modelling of automotive EMC', ARMMS RF and Microwave conference, Loughborough, UK, 30 avril, May 2001.
- [2] L. Paletta, 'Démarche topologique pour l'étude des couplages électromagnétiques sur des systèmes de câblages industriels de grande dimension', Thèse de doctorat de l'université Paris XI – Orsay, 1998.
- [3] F. Issac, S. Bertuol, F. Boulay, J.P. Parmantier, 'Etude approfondie du couplage d'une ESD sur un câblage à partir d'une méthode numérique de couplage champ-câble', Actes du 10^{ème} colloque CEM de Clermont Ferrand, 14-16 Mars 2000, pp 124-129.
- [4] F.M. Tesche, M.V. Ianoz, T. Karlson, 'EMC Analysis Methods and Computational Models', John Wiley & Sons, 1997.
- [5] K.S. Yee, 'Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media', IEEE Trans. Antennas Propag., vol AP-14, 302-307, May 1966.
- [6] P. Bonnet, X. Ferrieres, F. Issac, F. Paladian, J. Grando, J.C. Alliot, J. Fontaine, 'Numerical Modeling of scattering problem using a time domain finite volume method.', JEW, vol.11, 1165-1184, 1997.

Remerciements : Nous tenons à adresser nos remerciements à la MIRA pour les mesures effectuées, à EADS CCR et VOLVO pour le maillage surfacique de la voiture et à l'ensemble du consortium pour nous avoir autorisé à publier ces résultats.