N° d'ordre : 3948

THESE

présentée à

L'Université des Sciences et Technologies de Lille

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR

*Spécialité : **MICROONDES ET MICROTECHNOLOGIES***

Par
Guillaume ANDRIEU

Elaboration et Application d'une Méthode de Faisceau Equivalent pour l'Etude des Couplages Electromagnétiques sur Réseaux de Câblages Automobiles

Soutenue le 20 décembre 2006 devant la commission d'examen :

Président :	M. Michel Cauterman	Professeur à l'ENIB
Rapporteurs :	M. Marc Hélier	Professeur de l'université Pierre et Marie Curie
	M Alain Reineix	Directeur de recherche CNRS
Directeur de thèse :	M. Bernard Démoulin	Professeur à l'université de Lille 1
Examinateurs :	M. Frédéric Bocquet	Ingénieur de Recherche RENAULT
	M. Jean-Philippe Parmantier	Ingénieur – DEMR ONERA
	M. Olivier Maurice	Ingénieur – CCR EADS

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

Remerciements

Cette thèse a été effectuée dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) qui a réuni la société Renault et le groupe TELICE (Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique) du laboratoire IEMN (Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie) de l'université de Lille1. Ce travail a également fait l'objet d'une collaboration avec l'équipe DEMR (Diffraction Electromagnétique et Radar) de l'ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales).

Je tiens à commencer ces remerciements en exprimant toute ma reconnaissance et ma gratitude à mon directeur de thèse, M. Bernard Démoulin, professeur et responsable de l'équipe CEM du groupe Telice. Je le remercie profondément pour m'avoir toujours accordé le temps nécessaire à l'avancée de mes travaux en me donnant de précieux conseils. Il a ainsi contribué à mon épanouissement scientifique en me donnant le goût du travail de recherche. Recevez donc l'expression de ma plus profonde gratitude.

L'encadrement de ce travail au sein de la société Renault a été réalisé par Frédéric Bocquet, ingénieur de recherche, que je remercie fortement pour avoir marqué un intérêt constant pour mon travail et m'avoir également aidé sur de nombreux aspects administratifs. Je lui suis reconnaissant également pour son soutien, sa confiance et l'autonomie qu'il m'a toujours accordé.

Cette thèse présente de nombreuses mesures expérimentales qui n'auraient pu être effectuées sans l'aide précieuse de Lamine Koné, ingénieur de recherche au Telice. Néanmoins, il serait injuste de ne pointer que les aspects expérimentaux dans l'aide que m'a apportée Lamine. Merci donc pour tout.

Je remercie également très chaleureusement Jean-Philippe Parmantier de l'Onera qui a toujours montré un grand enthousiasme par rapport à l'avancée de mes travaux. Merci beaucoup Jean-Philippe pour tes nombreuses idées, ta rigueur scientifique, ta gentillesse … et tes corrections pour les articles en anglais !

Je tiens ensuite à exprimer ma grande reconnaissance à M. Michel Cauterman, professeur à l'école nationale d'ingénieurs de Brest (ENIB), pour avoir accepté d'assurer la présidence du jury.

Je remercie également M. Marc Hélier, professeur de l'université Pierre et Marie Curie, pour m'avoir fait l'honneur de juger mon travail en qualité de rapporteur.

M. Alain Reineix, directeur de recherche CNRS au laboratoire Xlim de Limoges, a également accepté d'effectuer le travail de rapporteur, je l'en remercie chaleureusement. Je n'oublie pas que c'est M. Reineix qui m'a conseillé de postuler pour ce sujet de thèse à l'été 2003 puis qui, trois ans plus tard, m'a également proposé de continuer dans le domaine de la CEM au sein du laboratoire Xlim.

Mes remerciements vont également à M. Olivier Maurice, ingénieur au CCR d'EADS à Suresnes, qui a accepté d'évaluer cette thèse en qualité d'examinateur. Je le remercie de l'intérêt qu'il a porté à mon travail et de la qualité scientifique des commentaires et des remarques qu'il a fait.

Ce travail de recherche s'est déroulé en majeure partie au sein de l'équipe CEM-RF du Technocentre Renault de Guyancourt. Je tiens donc ici à remercier chaleureusement Anselmo Soria, pour m'avoir accueilli au sein de cette équipe et d'avoir mis tous les moyens nécessaires à ma disposition pour la bonne avancée de mes travaux. Je

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

remercie également Péniamin Matossian, responsable de l'équipe CEM ainsi que tous les membres de l'équipe CEM-RF qui ont tous contribué, qu'ils soient ingénieurs, techniciens, stagiaires à créer une ambiance de travail agréable chez Renault. Par peur d'en oublier certains, je préfère ne pas citer tout le monde. Néanmoins, et au nom de la solidarité entre thésards, il me semble important de remercier tout particulièrement les différents doctorants que j'ai côtoyés au sein de l'équipe.

Je commence donc par Xavier Bunlon qui a, tout au long de mon travail, montré un intérêt constant pour mes travaux. Ses remarques et ses conseils m'ont toujours été d'un précieux secours. J'adresse ici, à ce grand œnologue, tous mes remerciements et également tous mes encouragements pour réussir, avec l'aide de l'Onera, l'application industrielle de ce travail.

Je remercie ensuite chaleureusement Madjid Mahmoudi, pour ses encouragements constants tout au long de mon travail et sa bonne humeur communicatrice. Malheureusement, malgré ses efforts, il n'a en revanche pas réussi à me convertir en danseur de salsa! Mais ceci eut été un miracle…

En plus des remerciements qu'ils méritent pour leurs qualités humaines et leurs encouragements à mon égard au cours de ma dernière année de travail, j'adresse mes plus vifs encouragements aux thésards qui n'en ont pas encore terminé : Martine et Loïs. Qu'ils sachent que je suis convaincu que les résultats de leurs travaux seront brillants.

Il me paraît également important de remercier les secrétaires C. Alberola, C. Saenger et la responsable des thèses Cifre M. Godefroid pour leur grand professionnalisme.

Ce travail fut également réalisé au sein du groupe Telice de l'IEMN : j'en remercie donc son directeur, le professeur Pierre Degauque. Je remercie ensuite tous les permanents de l'équipe qui ont su m'accueillir chaleureusement : Sylvie Baranowski, Marine Démoulin, Martine Liénard, Virginie Dégardin, Pierre Laly, Daniel Dégardin, Philippe Mariage, Christian Semet et Jacques Baudet. J'adresse également une mention spéciale à notre bédéphile, Emmanuelle Gillmann pour sa gentillesse.

Je remercie également les différents thésards de l'équipe qui ont tous permis de créer une ambiance de travail sympathique et motivante : Sébastien Bazzoli, Marc Olivas-Carrion, Youssef Bouri, Stéphane Egot, Andrea Cozza, Tarik Hammi, Samuel Leman et Abdou Nasr. Je n'oublie bien sûr pas Nedim Ben Slimen sans qui la vie au labo n'aurait pas été tout à fait la même !

Je remercie également les mécaniciens Jean-Claude et Christophe ainsi que Jocelyne qui a assuré la reprographie de cette thèse.

Ce travail a également été réalisé grâce à l'aide de l'équipe DEMR de l'ONERA. Je remercie ainsi tout particulièrement Solange Bertuol, spécialiste ès Cripte et Nutla pour sa grande disponibilité et sa rapidité pour répondre à mes nombreux mails. Je fus également touché par sa convivialité et son professionnalisme lors de mes deux visites à Toulouse. Qu'elle sache que notre « bœuf » à la guitare tient toujours, peut-être lors d'un prochain congrès CEM, si je progresse bien sûr !

Merci également à Isabelle Junqua, spécialiste ès RandomOP, qui n'a pas hésité à décortiquer mes simulations pour trouver les éventuels problèmes permettant de réduire l'écart entre mesure et simulation.

Je souhaite également remercier Johan Panh, mon responsable de stage de DESS du CNES qui a su, au cours de l'été 2003, me donner goût à la CEM et détecter chez

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

moi la fibre du « chercheur ». Je garde un excellent souvenir de ce stage qui a fortement contribué à mon envie de faire une thèse en CEM.

En dehors du monde professionnel, de nombreuses personnes ont contribué à la réussite de ce travail en me permettant notamment de surmonter les moments difficiles et en m'encourageant dans la dernière ligne droite. Je commencerai donc tout d'abord par mes parents qui m'ont toujours soutenu pendant mes longues années d'étude. Je remercie également les autres membres de ma famille : ma grand-mère, mes deux soeurs Laurence et Raphaëlle, mon beau-frère Loïc, mes neveux Yann et Lucas et ma petite nièce Anaëlle.

Mes remerciements suivants vont aux courageux (voire aux inconscients) qui n'ont pas hésité à accomplir l'aller-retour Limoges – Lille en deux jours pour assister à ma soutenance : Sabrina, Aurélien et Sébastien. Mes autres amis ont également contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail : Laurent, Angélique, Rub's, Laëtitia, Mickaël, Léo, Alexandra et bien sûr … le petit Rocky ! Merci donc à vous tous pour votre soutien et pour m'avoir permis de me changer les idées pendant ces trois années.

Je termine mes remerciements envers celle qui a su accompagner les hauts et les bas d'un thésard acariâtre tout au long de ces trois années grâce à sa gentillesse, sa patience et sa générosité. Merci Céline.

"La science est une chose merveilleuse … tant qu'il ne faut pas en vivre !"

Albert Einstein

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... - 9 -

1 PRÉSENTATION DU CONTEXTE ET DES OUTILS DE SIMULATION ..... - 13 -

1.1 PRÉSENTATION DE LA CEM AUTOMOBILE ..... - 13 -

1.1.1 Présentation du contexte automobile ..... - 13 -

1.1.2 La directive européenne 2004/104 ..... - 14 -

1.1.3 Le cahier des charges CEM Renault ..... - 17 -

1.1.4 Simulation numérique de tests d'immunité rayonnée ..... - 18 -

1.2 OUTILS POUR LA SIMULATION ..... - 19 -

1.2.1 Equations de Maxwell ..... - 19 -

1.2.2 Résolution numérique des équations de Maxwell ..... - 21 -

1.2.3 Présentation de la Topologie de câblages ..... - 30 -

1.2.4 Présentation des logiciels utilisés ..... - 46 -

1.3 CONCLUSION DU CHAPITRE 1 ..... - 50 -

2 PROBLÉMATIQUE DE LA MODÉLISATION DES COUPLAGES ÉLECTROMAGNÉTIQUES HAUTES FRÉQUENCES SUR UN FAISCEAU DE CÂBLES MULTICONDUCTEUR ..... - 51 -

2.1 ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES PARTICULIÈRES ..... - 51 -

2.2 LIMITES FRÉQUENTIELLES DE L'APPROCHE COUPLÉE CODE 3D / LIGNES DE TRANSMISSION ..... - 52 -

2.2.1 Limites HF de la théorie des lignes de transmission ..... - 52 -

2.2.2 Limites d'application des modèles de couplage champ-câble ..... - 54 -

2.2.3 Pertes par rayonnement électromagnétique en HF ..... - 57 -

2.3 INFLUENCE DES IMPÉDANCES TERMINALES ..... - 59 -

2.4 MODÉLISATION DE FAISCEAUX MULTICONDUCTEUR EN MOM ..... - 62 -

2.4.1 Justification du choix de la MoM ..... - 62 -

2.4.2 Discrétisation des éléments filaires et surfaciques en MoM ..... - 62 -

2.4.3 Etude des performances de la MoM pour la modélisation de faisceaux de câbles multiconducteur ..... - 62 -

2.5 QUANTIFICATION DES PERTES DIÉLECTRIQUES ENGENDRÉES PAR LES GAINES ISOLANTES ..... - 65 -

2.6 CONCLUSION DU CHAPITRE 2 ..... - 72 -

3 EDIFICATION DE LA MÉTHODE DU FAISCEAU ÉQUIVALENT ..... - 73 -

3.1 PRINCIPE ET OBJECTIFS DE LA MÉTHODE ..... - 73 -

3.2 RAPPELS SUR LA THÉORIE MODALE ..... - 74 -

3.3 CONSTITUTION DE GROUPES DE CONDUCTEURS ..... - 75 -

3.3.1 Critère retenu pour la constitution des groupes ..... - 75 -

3.3.2 Détermination de la variable Z_{mc} ..... - 76 -

3.4 DÉTERMINATION DES MATRICES LINÉIQUES DU FAISCEAU RÉDUIT ..... - 78 -

3.4.1 Hypothèses simplificatrices ..... - 78 -

3.4.2 Conventions adoptées pour les démonstrations ..... - 78 -

3.4.3 Détermination de la matrice inductance du faisceau réduit ..... - 79 -

3.4.4 Détermination de la matrice capacité du faisceau réduit ..... - 83 -

3.5 CONSTRUCTION DE LA GÉOMÉTRIE DE SECTION DROITE DU FAISCEAU RÉDUIT ..... - 85 -

3.6 CHARGES TERMINALES DU FAISCEAU RÉDUIT ..... - 87 -

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

3.6.1 Charges reliées à la référence de masse ..... *- 87 -*
3.6.2 Charges différentielles ..... *- 88 -*
3.7 CONCLUSION DU CHAPITRE 3 ..... - 91 -

4 VALIDATIONS NUMÉRIQUES ET EXPÉRIMENTALES DE LA MÉTHODE DU FAISCEAU ÉQUIVALENT ..... - 93 -
4.1 PRÉCISIONS UTILES AUX PROTOCOLES DE VALIDATION ..... - 93 -
4.2 VALIDATIONS NUMÉRIQUES ..... - 94 -
4.2.1 Description du faisceau de référence ..... *- 94 -*
4.2.2 Faible contraste de la valeur des charges terminales du faisceau de référence ..... *- 95 -*
4.2.3 Fort contraste de la valeur des charges terminales du faisceau de référence ..... *- 98 -*
4.2.4 Impact de la méthode sur les temps de calculs ..... *- 107 -*
4.2.5 Etude de l'influence de la non uniformité des faisceaux de câblages ..... *- 108 -*
4.3 VALIDATION EXPÉRIMENTALE EN CHAMBRE ANÉCHOÏQUE ..... - 111 -
4.3.1 Description du dispositif expérimental ..... *- 111 -*
4.3.2 Modélisation du dispositif expérimental en MoM ..... *- 113 -*
4.3.3 Validation de la confrontation sur un faisceau multiconducteur ..... *- 118 -*
4.4 VALIDATION EXPÉRIMENTALE EN CHAMBRE RÉVERBÉRANTE À BRASSAGE DE MODES ..... - 125 -
4.5 CONCLUSION DU CHAPITRE 4 ..... - 128 -

5 EXTENSION DE LA MÉTHODE DU FAISCEAU ÉQUIVALENT AU CAS DE RÉSEAUX ARBORESCENTS ..... - 129 -
5.1 PROCÉDÉ D'EXTENSION AU CAS DE RÉSEAU ARBORESCENT ..... - 129 -
5.2 VALIDATION NUMÉRIQUE ..... - 131 -
5.2.1 Présentation du cas test ..... *- 131 -*
5.2.2 Comparaisons des courants induits aux extrémités des deux réseaux ..... *- 132 -*
5.2.3 Bilan des ressources informatiques nécessaires ..... *- 133 -*
5.3 MODÉLISATION D'UN RÉSEAU DE CÂBLES SIMPLIFIÉ INSTALLÉ SUR UNE MAQUETTE DE VÉHICULE - 134 -
5.3.1 Description du contexte topologique ..... *- 134 -*
5.3.2 Modélisation de la structure en MoM ..... *- 137 -*
5.3.3 Validation en chambre anéchoïque ..... *- 138 -*
5.3.4 Analyses complémentaires sur le couplage Onde / Véhicule ..... *- 150 -*
5.3.5 Validation en CRBM ..... *- 154 -*
5.4 CONCLUSION DU CHAPITRE 5 ..... - 155 -

CONCLUSION GÉNÉRALE ..... - 157 -
ANNEXE A ..... - 161 -
ANNEXE B ..... - 163 -
ANNEXE C ..... - 165 -
ANNEXE D ..... - 169 -
BIBLIOGRAPHIE ..... - 173 -
PUBLICATIONS DE L'AUTEUR ..... - 179 -

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

Introduction générale

Apparue dans les années 1980 sur quelques équipements sécuritaires (ABS, Airbag,…), l'électronique occupe de nos jours une place en constante augmentation dans le monde de l'automobile. Les équipements électroniques actuels concernent désormais également l'amélioration du confort de conduite (aide au parking,…), la préservation de l'environnement (calculateurs d'injection,…) ou l'augmentation du confort de vie à bord du véhicule à travers les équipements multimédias (GPS,…). Tous ces nouveaux équipements ont pour but de répondre aux attentes de la clientèle dans un marché automobile de plus en plus concurrentiel et compétitif.

En parallèle au développement de l'électronique dans le domaine automobile, ces dernières années ont également vu fortement augmenter le nombre de liaisons radioélectriques présentes dans l'environnement du véhicule. Celles-ci proviennent des applications contenues dans le véhicule mais aussi des appareils apportés par les passagers (téléphone portable,…) ou présentes dans l'environnement pour d'autres applications (radar,…). La figure 1 présente un panorama non exhaustif des applications susceptibles de se trouver actuellement et dans un futur proche à bord des véhicules RENAULT :

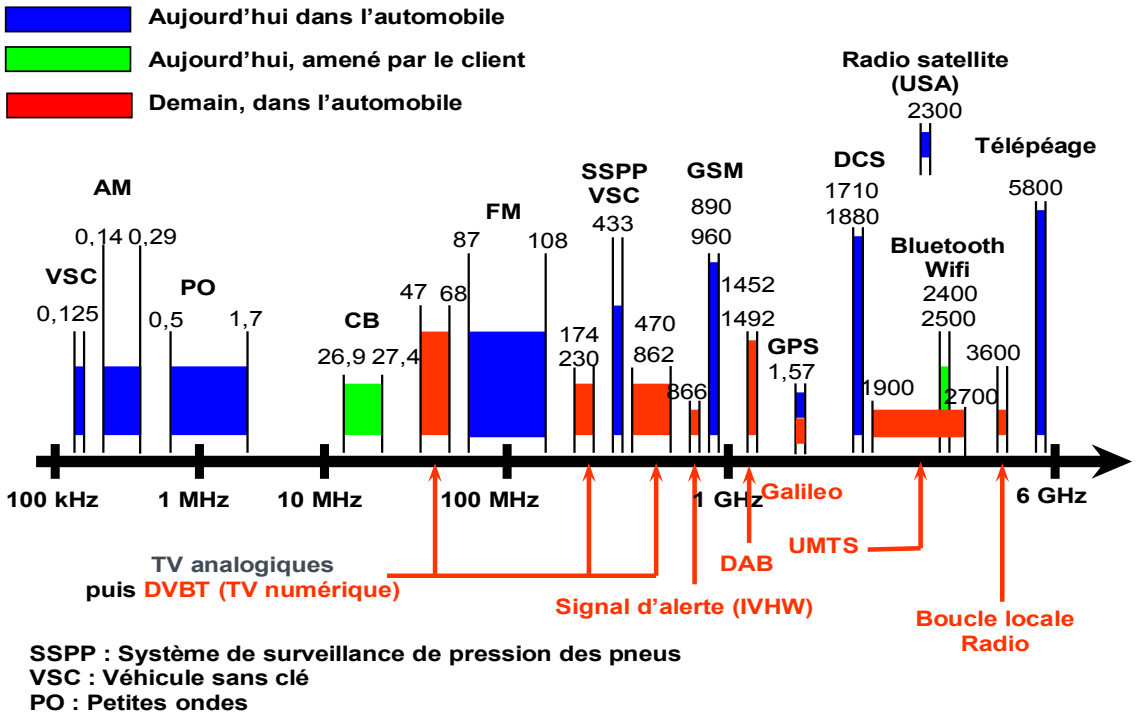

Figure 1 : Panorama non exhaustif des liaisons radioélectriques susceptibles de se trouver dans un véhicule RENAULT actuellement ou dans le futur

Malheureusement, cette augmentation du nombre de liaisons radioélectriques dans l'environnement d'un véhicule automobile se traduit également par une augmentation des risques liés à la Compatibilité Electromagnétique (CEM). En effet, chaque liaison radioélectrique peut également être considérée en CEM comme une source potentielle de perturbation capable de provoquer, par couplage électromagnétique sur le réseau de câblages d'un véhicule, le dysfonctionnement d'un équipement électronique du véhicule.

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

En effet, le réseau de câblages joue un rôle tout à fait particulier en CEM du fait qu'il connecte tous les équipements électroniques du véhicule entre eux. Il peut ainsi, par analogie, être assimilé à une antenne réceptrice ou émettrice des perturbations électromagnétiques ainsi que le vecteur de propagation de ces perturbations. Les incidents de type CEM pouvant être préjudiciables aux constructeurs automobiles en terme de coût et d'image, une nouvelle problématique est donc apparue depuis quelques années pour l'industrie automobile et plus généralement pour tous les secteurs du monde du transport.

Cette problématique intervient dans un contexte où les constructeurs automobiles sont soumis à des contraintes de plus en plus fortes afin de répondre au mieux aux besoins des consommateurs. Ainsi, alors que la complexité du réseau de câblages des nouveaux modèles de véhicules ne cesse d'augmenter, les constructeurs s'imposent des délais de conception de plus en plus courts. De plus, dans le cadre d'une politique de réduction des coûts, les constructeurs entendent également réduire le nombre de phases très coûteuses utilisant des véhicules prototypes. Ces raisons ont naturellement amené la modélisation numérique dans le domaine de la CEM au centre des préoccupations de l'industrie automobile. Celle-ci a donc emboîté le pas des industries militaire et aéronautique, pionnières dans ce domaine pour l'étude notamment de la protection contre l'IEMN (Impulsion ElectroMagnétique Nucléaire), la foudre ou les champs forts (HIRF – High Intensity Radiated Fields) ([1], [2], [3]).

Les premiers travaux réalisés par Renault dans le domaine de la simulation numérique en CEM ont notamment permis de valider une approche couplée permettant de calculer les niveaux de perturbations conduites ou rayonnées en entrée des équipements électroniques sur le véhicule complet ([4], [5]). Cette approche utilise un code de calcul tridimensionnel résolvant les équations de Maxwell dans l'espace et le formalisme de la Topologie Electromagnétique développée au début des années 80 sous l'instigation de C.E. Baum ([6], [7], [8]), chercheur à l'Air Force Research Laboratory. La Topologie Electromagnétique repose sur la décomposition d'un problème complexe en plusieurs sous-problèmes élémentaires résolus séparément, le problème global étant alors résolu à l'aide d'un formalisme de réseau. Dans le cas de réseaux de câblages multiconducteur, la Topologie de câblages, dérivée de la Topologie Electromagnétique, permet, à l'aide de la théorie des lignes de transmission (MTLN – Multiconductor Transmission Line Network), de prendre en compte les phénomènes de propagation et de couplages sur et entre tous les fils conducteurs du réseau. Aujourd'hui, la modélisation numérique de l'agression électromagnétique d'un véhicule entièrement câblé dans la bande de fréquence allant de 20 à 300MHz est rentrée dans un processus industriel applicable au cours du développement des futurs modèles de la gamme ([9]). L'objectif principal de ces modélisations numériques est de diminuer le nombre d'essais à effectuer lors des phases d'homologation vis-à-vis des exigences réglementaires (directive européenne, cahier des charges CEM RENAULT,…) en préconisant les configurations « pire cas » à effectuer en priorité. La mesure reste donc toujours indispensable afin de s'assurer de l'absence de dysfonctionnement des équipements électroniques en présence d'une agression électromagnétique.

Ces dernières années, l'augmentation de la fréquence des perturbations électromagnétiques pouvant potentiellement agresser le réseau de câblages encourage désormais Renault à étendre les simulations numériques d'immunité vers les « hautes fréquences » (HF). Cette volonté se heurte malheureusement à la limitation en fréquence de la MTLN. En effet, ce formalisme, basé sur l'hypothèse de la propagation des modes de type transverse électromagnétique (TEM) au sein des faisceaux de câblages, ne convient plus lorsque la hauteur des conducteurs par rapport à la référence de masse devient proche du cinquième de la longueur d'onde. La MTLN ne permet donc pas d'intégrer les modes de propagation d'ordre supérieur ([10]) faisant leur apparition

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

avec l'augmentation de la fréquence ainsi que les pertes par rayonnement électromagnétique très importantes en hautes fréquences.

A ces fréquences, l'utilisation de codes de calculs tridimensionnels résolvant les équations de Maxwell dans l'espace se révèle alors obligatoire. Malheureusement, ceux-ci sont peu adaptés pour traiter le cas de faisceaux de câblages multiconducteur. En effet, ils requièrent une discrétisation fine de chaque conducteur du faisceau en segments dont la longueur est usuellement égale au dixième de la longueur d'onde. Les temps de calculs deviennent alors prohibitifs dès que le nombre de conducteurs du faisceau est important.

Les travaux de cette thèse sont donc axés sur la mise en œuvre de techniques de simulation simplifiées permettant d'étudier les couplages électromagnétiques sur des faisceaux de câblages multiconducteur à l'aide de codes de calculs tridimensionnels. Il faut donc trouver des hypothèses simplificatrices permettant de diminuer la complexité des faisceaux de câblages sans toutefois diminuer la précision des calculs. L'objectif final est de prouver la faisabilité d'une telle approche sur un véhicule complet en vue d'une application industrielle en HF.

Concrètement, Renault souhaite, comme en « basse fréquence », pouvoir effectuer une comparaison entre différentes configurations d'illuminations sur le niveau de perturbations induites en entrée des équipements électroniques. Il ne s'agit donc en aucun cas de pouvoir prédire, en fonction du niveau de perturbation calculé en entrée d'équipement, un éventuel dysfonctionnement des calculateurs électroniques. Ce serait, à l'heure actuelle, trop ambitieux alors que beaucoup de paramètres ne sont pas encore suffisamment maîtrisés sur les équipements eux-mêmes. Cependant, depuis quelques années, de nombreux travaux sont réalisés pour la compréhension des phénomènes provoquant le dysfonctionnement d'équipements électroniques placés en extrémité de câblages ([11], [12], [13]).

Cette thèse, réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE entre l'entreprise RENAULT et le laboratoire TELICE de l'université des sciences et techniques de Lille et également avec l'ONERA dans le cadre d'un partenariat, comporte deux phases distinctes. Dans un premier temps, notre travail concerne le développement d'une méthode simplifiée permettant de modéliser un faisceau de câblages multiconducteur, définis comme une liaison de câbles point à point, en HF à l'aide de ressources informatiques raisonnables. Dans un second temps, notre attention se portera sur l'extension de cette méthode au cas de réseaux de câblages arborescents.

Pour la réussite de ce travail, il nous est apparu indispensable de réaliser des mesures. Celles-ci doivent tout d'abord permettre de mettre en évidence et de comprendre les phénomènes physiques importants se produisant sur les faisceaux de câblages multiconducteur en HF puis de valider les méthodes de simulation mises en œuvre.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous rappelons tout d'abord le contexte industriel de ce travail. Pour cela, nous présentons les différents types de tests d'immunité rayonnée réalisés sur véhicule complet ou sur équipements isolés pour l'homologation et la validation des nouveaux modèles de véhicules. Ensuite, nous présentons les simulations numériques d'immunité rayonnée effectuées par Renault à l'heure actuelle sur la bande de fréquence 20 – 300 MHz. Enfin, nous procédons à une description théorique des différentes méthodes de calculs tridimensionnelles ainsi que de la Topologie Electromagnétique et de sa dérivée, la Topologie de câblages. Le chapitre se termine par une présentation succincte des différents logiciels de calcul utilisés au cours de ce travail.

Dans le second chapitre, nous mettons en évidence les limitations fréquentielles de la méthodologie de couplage champ-câble utilisée en basse fréquence. Il s'agit ainsi de

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

montrer en particulier la limitation de la MTLN lorsque la fréquence augmente. Ensuite, nous montrons l'importance des pertes diélectriques ou des pertes par rayonnement électromagnétique des faisceaux de câblages en hautes fréquences. Enfin, le chapitre se termine par une mise en évidence de la difficulté de prise en compte des faisceaux de câblages comprenant un grand nombre de conducteurs à l'aide de la méthode des moments (MoM – Method of Moments).

Le troisième chapitre de ce manuscrit présente les fondements théoriques d'une méthode que nous appelons « méthode du faisceau équivalent » développée au cours de la thèse. Cette méthode permet de définir un faisceau équivalent contenant un nombre réduit de « conducteurs équivalents » à partir d'un faisceau initial contenant un grand nombre de conducteurs. Les quatre étapes nécessaires à la définition des caractéristiques électriques et géométriques du faisceau équivalent sont présentées de façon détaillée.

Dans le quatrième chapitre, nous procédons aux validations numériques puis expérimentales de la méthode. Les validations numériques ont pour but de montrer l'identité d'un faisceau initial et du faisceau correspondant appelé « faisceau réduit ». La validation expérimentale permet ensuite de comparer, lors de tests d'immunité réalisés sur une large bande de fréquence, le courant de mode commun mesuré aux extrémités d'un faisceau multiconducteur au courant calculé par une méthode des moments aux extrémités du faisceau réduit correspondant. Ces validations expérimentales sont effectuées à l'intérieur de deux moyens d'essais : une chambre anéchoïque et une chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM).

Le cinquième et dernier chapitre présente tout d'abord les aménagements à apporter à la méthode du faisceau équivalent pour l'étendre au cas de réseaux de câblages arborescents de type automobile. A ce titre, une validation numérique est effectuée sur un réseau de câblages arborescent placé sur un plan de masse infini. Ensuite, nous présentons les résultats obtenus lors d'une campagne expérimentale réalisée sur une maquette simplifiée de véhicule à l'échelle ½ et nous les comparons aux résultats numériques obtenus par l'application de la méthode sur le réseau de câblages placé à l'intérieur de la maquette.

Dans la conclusion de cette thèse, les principaux résultats obtenus sont rappelés de façon synthétique ainsi que les perspectives scientifiques et industrielles soulevées par ces travaux.

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

Conclusion générale

Ce travail de recherche, réalisé dans le domaine de la Compatibilité Electromagnétique (CEM), consistait à élaborer des méthodes numériques permettant de modéliser l'induction d'une perturbation électromagnétique sur un réseau de câblages de type industriel en « hautes fréquences » (HF). L'utilisation de la modélisation numérique s'inscrit dans un cadre de diminution des coûts et des délais de développement qui se traduit, au niveau CEM, par l'optimisation et la diminution du nombre d'essais nécessaires à l'homologation d'un nouveau modèle de véhicule ainsi que d'une suppression progressive des phases utilisant des véhicules prototypes. Nous résumons ci-dessous les principaux apports scientifiques de cette thèse ainsi que les perspectives soulevées dans le domaine de la modélisation numérique de réseaux de câblages multiconducteur.

La modélisation de faisceaux de câblages multiconducteur en HF est une voie assez peu explorée jusqu'à présent. En effet, l'utilisation d'une approche couplée utilisant un code 3D et un modèle de lignes de transmission, généralement utilisée en basses fréquences, est limitée aux fréquences supérieures par l'utilisation du modèle de lignes. La modélisation complète du faisceau par un code 3D se révèle également impossible lorsque le nombre de conducteurs du faisceau augmente et que le temps de calcul requis devient prohibitif (cf chapitre 2). Pour pallier ces problèmes et accéder aux fréquences supérieures, la « méthode du faisceau équivalent » (cf chapitre 3) s'avère une solution efficace et prometteuse. La diminution des temps de calculs due à la réduction de la complexité des faisceaux rend envisageable la réalisation de calcul 3D à des fréquences jusqu'alors inexplorées. La robustesse et la précision de cette méthode approchée ont pu être validées au cours de validations numériques et expérimentales effectuées sur quelques exemples canoniques (cf chapitre 4).

Les perspectives futures de la méthode concernent principalement sa validation sur des faisceaux de type industriels. Par exemple, les faisceaux testés pourraient contenir plusieurs centaines de conducteurs ou être connectés à des réseaux d'impédances terminales composés d'éléments dépendants de la fréquence. Dans ce cas, la présence d'éléments inductifs et capacitifs permettrait d'imaginer une composition des groupes de conducteurs dépendante de la fréquence.

La suite de ce travail de recherche a consisté à démontrer la possibilité d'étendre la méthode au cas de réseaux arborescents afin de répondre à la problématique automobile. La procédure mise au point, validée numériquement sur un réseau arborescent complexe (cf chapitre 5), permet ainsi d'envisager la modélisation d'un réseau de câblages complexe en « hautes fréquences » à l'aide d'un code 3D. Néanmoins, la mise en œuvre de cette méthode sur un réseau de câblages de type industriel nécessite l'amélioration du processus de création du réseau réduit afin de respecter au mieux la complexité du réseau au niveau des bifurcations notamment. Il paraît également indispensable de mettre au point un algorithme permettant d'automatiser la procédure de construction de la géométrie de section droite de chaque branche du réseau réduit à partir de la connaissance de ses matrices de paramètres linéiques.

Développée initialement pour des applications HF, la méthode semble également prometteuse sur les bandes de fréquences inférieures. En effet, la réduction de la

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

complexité du réseau de câblages permet logiquement d'alléger les temps de calculs indépendamment du traitement numérique utilisé. Ainsi, le réseau réduit défini par la méthode pourrait être modélisé à la place du réseau initial lors des calculs d'immunité effectués par Renault en BF et ainsi réduire les temps de calculs nécessaires à l'application du modèle de lignes de façon considérable. Précisons qu'à l'heure actuelle, la modélisation du réseau de câblages complet d'un véhicule dure près de 48h sur un ordinateur pourtant performant.

A notre connaissance, la modélisation d'un réseau de câblages complexe placé au sein d'une structure métallique de dimensions conséquentes n'avait pratiquement pas été réalisée à des fréquences dépassant quelques centaines de MHz. Les données recueillies lors de la campagne expérimentale menée sur une maquette de véhicule jusqu'à la fréquence de 2 GHz (cf chapitre 5) ont révélé les comportements inhérents aux structures surdimensionnées par rapport à la longueur d'onde. Par exemple, des phénomènes d'interférences constructives sur la structure diffractante, prévus par la théorie, auraient tendance à être lissés lors des mesures à cause des inévitables défauts présentés par la structure réelle.

Sur ce type de structures, un simple examen visuel des résultats semble insuffisant pour analyser la précision et la qualité des résultats numériques obtenus. Pour affiner ce jugement, le développement ou l'utilisation d'outils statistiques permettrait certainement de faciliter et de rationaliser l'analyse, voire le cas échéant le recours à des techniques de traitement du signal.

A la suite de ce travail, la modélisation d'un véhicule réel entièrement câblé apparaît désormais possible aux fréquences élevées. Néanmoins, la fréquence maximale de la simulation reste toujours prioritairement dépendante de la puissance de calcul de l'ordinateur utilisé à cause du critère de maillage en $\lambda/10$ de la structure. Cependant, les progrès rapides effectués par les méthodes numériques existantes et les performances des moyens de calcul permettent d'envisager de traiter ce type de problèmes sur des bandes de fréquences inexplorées il y a encore quelques années. Lors de ce travail, un calcul à une seule fréquence sur une structure comprenant 60 000 inconnues a pu être réalisé sur un ordinateur performant en moins de vingt minutes.

La méthode développée durant ce travail permet de consolider cet optimisme. En effet, et contrairement aux basses fréquences, la réalisation d'un test d'immunité sur le réseau de câblages d'un véhicule complet ne nécessite qu'un seul calcul 3D. Cette unique étape de calcul permet de compenser en partie les temps de calculs supérieurs engendrés par l'utilisation du code 3D pour la modélisation du réseau.

La décroissance fréquentielle de l'effet de la structure diffractante sur les couplages électromagnétiques exercés sur le câblage ouvre des perspectives intéressantes dans le domaine des « hautes fréquences ». Ainsi, la nécessité de modéliser l'intégralité d'un véhicule réel pour connaître le niveau de perturbation induit à l'entrée d'un équipement situé dans une zone particulière (habitacle, compartiment moteur, coffre,…) peut être remise en question. Un découpage de la structure complexe en zones topologiques modélisées séparément semble, à nos yeux, constituer une alternative sérieuse. Cette approche simplifiée nous apparaît parfaitement adaptée aux objectifs et aux contraintes de la simulation numérique pratiquée dans un cadre industriel dont l'objectif consiste bien souvent à déterminer les ordres de grandeur des niveaux de couplage et leurs évolutions en fonction de la fréquence.

La réalisation de calculs d'immunité sur véhicule en HF au niveau industriel nécessite tout de même quelques étapes supplémentaires. Ainsi, une campagne

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

expérimentale réalisée sur une carcasse métallique de véhicule réel (caisse en blanc) permettrait de se rapprocher progressivement d'un cas industriel réaliste. Cette campagne faciliterait de plus l'étude de divers paramètres aux effets mal connus dans le domaine des fréquences élevées. Citons par exemple les phénomènes de diffraction électromagnétique engendrés par la présence de fentes entre la carrosserie et les ouvrants de la caisse ou la complexification de la géométrie de la structure provenant du design esthétique du véhicule. Sa taille supérieure devrait également apporter des éclaircissements sur les phénomènes que nous pensons corrélés au surdimensionnement par rapport à la longueur d'onde.

Une attention toute particulière doit également être apportée à la modélisation des équipements électroniques placés aux extrémités des réseaux de câblages. A moyen terme, les objectifs principaux devraient par exemple se concentrer sur la modélisation des réseaux d'impédances (charges inductives, capacitives, non-linéaires,…) présentés par les calculateurs de bord ou à l'étude attentive des mécanismes de conversion modale du mode commun vers le mode différentiel provoqués par la dissymétrie de leurs impédances d'entrée. Ces extensions devraient singulièrement améliorer la portée des simulations théoriques afin de les transformer en outils d'observations des seuils de dysfonctionnements d'équipements.

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

Bibliographie

[1] J.P. Parmantier, V. Gobin, F. Issac, I. Junqua, Y. Daudy, J.M. Lagarde
An Application of the Electromagnetic Topology Theory on the Test-Bed Aircraft, EMPTAC
Interaction Notes, Note 506, Novembre 1993

[2] J.P. Parmantier, P. Degauque
Topology Based Modeling of Very Large Systems
Modern Radio Science 1996, Ed. J. Hamelin, Oxford University Press, pp 151-177

[3] J.P. Parmantier, V. Gobin, F. Issac, L. Paletta, I. Junqua, Y. Daudy, J.M. Lagarde
An Application of Electromagnetic Topology on the Test-Bed Aircraft, EMPTAC – ETE III
Interaction Notes, Note 527, Septembre 1997

[4] L. Paletta
Démarche Topologique pour l'Etude des Couplages Electromagnétiques sur des Systèmes de Câblages Industriels de Grande Dimension
Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay, 28 septembre 1998

[5] L. Paletta, J. P. Parmantier, F. Issac, P. Dumas, J.C. Alliot
Susceptibility Analysis of Wiring in a Complex System Combining a 3-D Solver and a Transmission-Line Network Simulation
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 44, n°2, May 2002, pp 309-317

[6] C.E. Baum
A Formal Approach to the Analysis and Design of Complex Electronic Systems
Intercation Notes, Note 400, Septembre 1980

[7] C.E. Baum
The Theory of Electromagnetic Interference Control
Interaction Notes, Note 478, Décembre 1989
ou dans :
Modern Radio Science 1990, Oxford University Press, pp 87-101

[8] C.E. Baum
On the Analysis of General Multiconductor Transmission Line Networks
Interaction Notes, Note 350, Janvier 1988

[9] F. Bocquet, J.C. Kedzia
Key Features for the Successful Industrial Deployment of Numerical EMC in Automotive
Actes du colloque CEM2004, mars 2004, Toulouse, pp 110-113

[10] S. Marteau
Etude du Couplage d'une Onde Electromagnétique avec un Guide d'Onde Ouvert au Moyen d'une Représentation Modale des Champs
Thèse de doctorat, Université Paris VI, 24 Novembre 1995

[11] J.M. Poinsignon
Méthode de Caractérisation CEM des Equipements Automobiles en Mode Conduit
Thèse de doctorat, Université de Rouen, 4 décembre 2003

[12] S. Egot, M. Klingler, L. Koné, S. Baranowski, F. Lafon, C. Marot
Modeling Automotive Electronic Equipment in a Realistic Sub-System
Proceedings of EMC EUROPE 06, September 2006, Barcelona, pp 1041-1045

© 2007 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

[13] S. Bazzoli
Caractérisation et Simulation de la Susceptibilité des Circuits Intégrés face aux Risques d'Induction Engendrées par des Micro-ondes de Forte Puissance
Thèse de doctorat, Université de Lille, 27 octobre 2005

[14] F.M. Tesche, M.V. Ianoz, T. Karlsson
EMC Analysis Methods and Computational Methods
John Wiley & Sons, 1997

[15] A.K. Agrawal, H.J. Price, S.H. Gurbaxani
Transient Reponse of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 22, n°2, May 1980, pp 119-129

[16] J. Jing
The Finite Element Method in Electromagnetic
ED Wiley, 1993

[17] D. A. Mac Namara
Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction
Ed. Artech House, 1990

[18] R. B. Kouyoumjian, P. H. Pathak
A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly conducting Surface
Proceedings of the IEEE, vol 62, n°11, November 1974

[19] R. G. Rojas, T. H. Lee
High-Frequency Techniques
Handbook of Antennas in Wireless Communications, 2002 CRC Press, ed by Lal Chand Godara

[20] P. H. Pathak
High-Frequency Techniques for Antenna Analysis
Proceedings of the IEEE, vol 80, n°1, p 44-65, January 1992

[21] R. G. Kouyoumjian
Asymptotic High-Frequency Methods
Proceedings of the IEEE, vol 53, p 864-876, August 1965

[22] F. Molinet, D. Bouche
Méthodes Asymptotiques en Electromagnétisme
Ed. Springer-Verlag, 1994

[23] V. Gobin, X. Ferrières, J. Grando, B. Michielsen, J.P. Parmantier, J.C. Alliot
Analyse critique des outils numériques pour la CEM
Actes du colloque CEM1996, Septembre 1996, Clermont, p 212-217

[24] H.C. Pocklington
Electrical Oscillations on Wire
Cambridge Philos. Soc. Proc., vol 9, pp 324-332, 1897

[25] C.A. Balanis
Advanced Engineering Electromagnetics
John Wiley & Sons, New York, 1989

[26] V. Gobin
Diffraction par des Ouvertures et par des Objets Tridimensionnels. Application à la Mesure des Impédances de Surface des Matériaux Bons Conducteurs
Thèse de doctorat, Université de Lille Flandres Artois, 3 juillet 1989

[27] R. F Harrington
Field Computation by Moment Methods
Macmillan, New York, 1968

© 2007 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

[28] J.J.H. Wang
Generalized Moment Methods in Electromagnetics
John Wiley & Sons, New York, 1991

[29] T. P .Sarkar, A. R. Djordjevic, B. M. Kolundzija
Method of Moments Applied to Antennas
Handbook of Antennas in Wireless Communications, 2002, CRC Press, ed by Lal Chand Godara

[30] N. Engheta, W. D. Murphy, V. Rohklin, M. S. Vassiliou
The Fast Multipole Method (FMM) for Electromagnetic Scattering Problems
IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 40, n°6, june 1992

[31] R. Coifman, V. Rohklin, S. Wandzura
The Fast Multipole Method for the Wave Equation : A Pedestrian Prescription
IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol 35, n°3, june 1993

[32] J. Song, C. C. Lu, W. C. Chew
Multilevel Fast Multipole Algorithm for Electromagnetic Scattering by Large Complex Objects
IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 45, n°10, October 1997

[33] K. S. Yee
Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media
IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 14, p 302, may 1966

[34] J. B. Bérenger
A perfectly Matched Layer for Free-Space Simulation in Finite-Difference Computer Codes
Annales des Télécommunications, vol 51, n°1-2, 1996

[35] J. B. Bérenger
Improved PML for the FDTD Solution of Wave-Structure Interaction Problems
IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 45, n°3, march 1997

[36] C.E. Baum, T.K. Liu, F.M. Tesche
On the Analysis of General Multiconductor Transmission Line Networks
Interaction Notes, Note 350, Janvier 1988

[37] C.D. Taylor, R.S. Satterwhite, C.W. Harrison
The Response of a Terminated Two-Wire Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field
IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 13, n°6, November 1968, pp 987-989

[38] F. Rachidi
Formulation of the Field-to-Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 35, n°3, August 1993, pp 404-407

[39] L. Paletta, P. Dumas, J.P. Parmantier
Utilisation du Champ Electrique Tangentiel comme Terme Source dans les Problèmes de Topologie Electromagnétique
Actes du colloque CEM1996, Lille, Septembre 1996, pp 241-248

[40] J.P. Parmantier
Approche Topologique pour l'Etude des Couplages Electromagnétiques
Thèse de doctorat, Université de Lille, 20 décembre 1991

[41] J.P. Parmantier
Topologie Electromagnétique : Etude des Couplages Electromagnétiques sur le Câblage d'une Voilure d'Avion Mirage III
Rapport Final ONERA, n°9/6727 PY, Juin 1994

© 2007 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

[42] C.E. Baum, J. Nitsch, R.J. Sturm
Analytical Solution for Uniform and Nonuniform Multiconductor Transmission Lines with Sources
Review of Radio Science 1993-1996, Ed. W. Ross Stone, Oxford University Press, pp 433-464

[43] J. Nitsch, C.E. Baum, R.J. Sturm
Analytical Treatment of Circulant Nonuniform Multiconductor Transmission Lines
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 34, n°1, February 1992, pp 28-38

[44] P. Besnier
Etude des Couplages Electromagnétiques sur des Réseaux de Lignes de Transmission Non Uniformes à l'aide d'une Approche Topologique
Thèse de doctorat, Université de Lille, 26 janvier 1993

[45] C. Castanié
Modèles de Lignes de Transmission Non Uniformes pour l'Etude des Couplages Electromagnétiques sur des Réseaux de Câbles
Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, 3 octobre 2002

[46] D.A. Hill
Plane Wave Integral Representation for Fields in Reverberation Chambers
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility., Vol 40, pp. 209-217, August 1998

[47] D.A. Hill
Electromagnetic Theory of Reverberation Chambers
National Institue of Standards and Technology, Boulder, CO, NIST Tech, Note 1506, 1998

[48] C. Fiachetti, B. Michielsen, F. Issac. A. Reineix
Etude d'un Modele de Champ Aléatoire pour la Modélisation du Couplage sur un Equipement Electronique dans une Chambre Réverbérante à Brassage de Modes
Actes du colloque CEM2000, Clermont Ferrand, Mars 2000

[49] C. Fiachetti
Modèles du Champ Electromagnétique Aléatoire pour le Calcul du Couplagesur un Equipement Electronique en CRBM et Validation Expérimentale
Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2002

[50] P. Degauque, A. Zeddam
Remarks on the Transmission-Line Approach to Determining the Current Induced on Above-Ground Cables
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 30, n°1, February 1988, pp 77-80

[51] B. D. Popovic, A. Nesic
Generalisation of the Concept of Equivalent Radius of Thin Cylindrical Antennas
IEE Proceedings, vol 131, n°3, June 1994

[52] B. D. Popovic
CAD of Wire Antennas and Related Radiating Structures
Research Studies Press, John Wiley and Sons, New York, 1991

[53] U. Jakobus
Comparison of Different Techniques for the Treatment of Lossy Dielectric/Magnetic Bodies within the Methods of Moments Formulation
AEÛ International Journal of Electronics and Communications, vol 54, n°3, 2000, pp 263-273

[54] D.O. Wendt, J.L. Ter Haseborg
Radiation Losses Representation in the Tranmission Line Theory (TLT)
EMC'94 ROMA, September 1994, Roma, pp 713-718

[55] C. Girard, B. Thomas, A. Reineix, B. Jecko
Modélisation des Pertes par Rayonnement dans un Formalisme de Théorie des Lignes en Transitoire
Actes du colloque CEM1996, Septembre 1996, Lille, pp 297-292

© 2007 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

[56] A. Cozza, F. Canavero, B. Démoulin
High-Frequency Extension of the Transmission Line Theory for an Open Line
Actes du colloque CEM2004, Avril 2004, Toulouse, pp 165-170

[57] J.B. Nitsch, S.V. Tkachenko
Complex-Valued Transmission-Line Parameters and their Relation to the Radiation Resistance
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 46, n°3, August 2004, pp 477-487

[58] C. Poudroux
Etude de l'Incidence des Paramètres Primaires des Lignes Couplées sur la Précision de Prédiction de l'Amplitude des Parasites Induits sur des Torons Multifilaires
Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 30 septembre 1992

[59] M. Vautier
Etude des Phénomènes de Couplage Electromagnétique dans les Faisceaux de Câbles Multifilaires de Télécommunications
Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand, 19 mai 1993

[60] M. Rifi
Etude Théorique de la Propagation des Ondes Electromagnétiques sur les Lignes de Transport d'Energie Aériennes pour une Application à un Système de Transmission de Données
Thèse de doctorat, Université de Lille Flandres Artois, 21 mai 1987

[61] C. Poudroux, M. Rifi, B. Démoulin
A Simplified Approach to Determine the Amplitude of the Transient Voltage Induced on a Cable Bundle
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 37, n°4, November 1995, pp 497-504

[62] C. Castanié, D. Lazaro, I. Chênerie
Modélisation de Faisceaux de Câbles par Générations Aléatoires Corrélées
Actes du colloque CEM2002, Mars 2002, Grenoble, pp 205-210

[63] R.C. Johnson
Antenna Engineering Handbook, 3rd Edition
Ed MacGrawHill, 1993

[64] Drabowitch, Ancona
Antennes, Tome 2
Ed Masson, 1986

[65] P.O. Iversen, P. Garreau, D. Burrell
Real-Time Spherical Near-Field Handset Antenna Measurements
IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 43, Issue 3, , June 2001, pp 90 -94

[66] J.E. Hansen
Spherical Near-Field Antenna Measurements
IEEE electromagnetic waves series 26, London : Peter Peregrinus Ltd, 1988

[67] C. Bruns, P. Leuchtmann, R. Valhdieck
Analysis and Simulation of a 1-18 GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol 45, n°1, February 2003, pp 55-60

[68] P. Corona, G. Latmiral, E. Paolini, L. Piccioli
Use of a Reverberating Enclosure for Measurements of Radiated Power in the Microwave Range
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 18, May 1976, pp 54-59

[69] L. Musso
Assessment of Reverberation Chamber Testing for Automotive Applications
Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 21 février 2003

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

Publications de l'auteur

[1] G. Andrieu, L. Koné, F. Bocquet, B. Démoulin, JP Parmantier
Intégration des réseaux de câbles dans la simulation CEM automobile d'immunité en hautes fréquences
Actes du colloque CEM06, St-Malo, Avril 2006, pp 278-280

[2] G. Andrieu, L. Koné, F. Bocquet, B. Démoulin, JP Parmantier
Method for the evaluation of high frequency coupling on cable harnesses
Proceedings EMC Europe 2006, Barcelona, September 2006, pp 1052-1057

[3] G. Andrieu, L. Koné, F. Bocquet, B. Démoulin, JP Parmantier
Méthode d'évaluation des perturbations induites sur un faisceau de câbles automobile en hautes fréquences
Actes du colloque Numélec 2006, Lille, Novembre 2006, pp 143-144

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

Elaboration et Application d'une Méthode de Faisceau Equivalent pour l'Etude des Couplages Electromagnétiques sur Réseaux de Câblages Automobiles

Résumé :

Dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) automobile, des outils numériques autorisent actuellement la simulation de tests d'immunité sur le réseau de câblages d'un véhicule complet. Ainsi, les niveaux de perturbation induits sur le réseau par une onde électromagnétique perturbatrice peuvent être calculés numériquement à l'aide d'une approche couplée utilisant un code 3D et un modèle de ligne de transmission. L'utilisation du modèle de ligne limite toutefois le champ d'application de cette approche aux "basses fréquences" (BF).

Pour accéder aux fréquences supérieures, nous avons développé une méthode dite du "faisceau équivalent". Celle-ci consiste à réduire un faisceau de câblages multiconducteur, défini comme une liaison de câbles point à point, en un faisceau composé d'un nombre limité de "conducteurs équivalents" représentant chacun le comportement d'un groupe de conducteurs du faisceau initial. La méthode a ensuite été étendue au cas de réseaux arborescents afin de répondre à la problématique automobile.

Les validations numériques et expérimentales effectuées sur des faisceaux de câblages ont tout d'abord permis d'illustrer la robustesse et la précision de la méthode. Ensuite, les résultats obtenus lors d'une campagne expérimentale réalisée sur une maquette de véhicule à l'échelle ½ valide la pertinence de la méthode proposée en vue d'une application industrielle sur véhicules réels. De plus, un seul calcul 3D est nécessaire pour prendre en compte le réseau de câblages simplifié et la structure diffractante du véhicule (carrosserie métallique) en "hautes fréquences" (HF). Développée initialement pour des applications HF, la méthode du faisceau équivalent paraît également prometteuse en BF afin de réduire la complexité de réseaux de câblages installés sur des systèmes de grande dimension.

Mots-clés : Compatibilité Electromagnétique, Faisceau de Câblages Multiconducteur, Méthode des Moments, Réseaux de Lignes de Transmission Multiconducteur, Topologie Electromagnétique

Development and Implementation of Equivalent Cable Harness Method for the Study of Electromagnetic Coupling on Automotive Cable Networks

Abstract :

In nowadays automotive Electromagnetic Compatibility (EMC), some available numerical tools offer the possibility to perform the simulation of immunity tests on the cable network of an entire car. Indeed, EM induced perturbation levels on the network can be computed with a coupled approach between a 3D code and a multiconductor transmission line network (MTLN) code. However, the MTLN use limits this approach at "low frequencies" (LF).

In order to perform numerical computations on cable harnesses at "high frequencies" (HF), we developed a method called "Equivalent Cable Harness Method". It consists in modelling a multiconductor cable harness, defined as a set of point-to-point cable links, in a simplified cable harness composed of a reduced number of "Equivalent Conductors", each one representing the behaviour of one group of conductors of the initial cable harness. Then, the method has been extended to tree-like network cases representative of the automotive problem.

First, numerical and experimental validations on numerous multiconductor cable harness configurations illustrate the robustness and the precision of the method. Second, its pertinence in a future industrial application on a complete vehicle is validated by the comparison with results obtained on a reference experiment carried out on a simplified car structure. Indeed, only one 3D code computation is required at HF to take into account the simplified cable network of the whole metallic structure. Initially developed for HF problems, the "Equivalent Cable Harness Method" seems promising at LF to reduce the complexity of tree-like cable networks installed on large dimension systems.

Keywords : Electromagnetic compatibility, Multiconductor cable harnesses, Method of moments, Multiconductor Transmission Line Networks, Electromagnetic Topology

© 2007 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl