

ETUDE PROBABILISTE DE L'ENVIRONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE GENERE DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE

Fatou DIOUF * - Sébastien LALLECHERE* - Françoise PALADIAN * - Marco KLINGLER*- Michel FOGLI ****

(*) LASMEA, Université Blaise Pascal, 24 Avenue des Landais, 63177 Aubière France
fatou.diouf@lasmea.univ-bpclermont.fr

(**) LAMI, Université Blaise Pascal, 24 Avenue des Landais, 63177 Aubière France
michel.fogli@polytech.univ-bpclermont.fr

(***) PSA Peugeot Citroën, Vélizy-Villacoublay, France
marco.klingler@mpsa.com

Résumé. Cet article concerne, dans un premier temps, la comparaison des paramètres probabilistes de l'environnement électromagnétique d'un véhicule automobile soumis à une perturbation externe, et des caractéristiques du champ électromagnétique généré en Chambre Réverbérante à Brassage de Modes (CRBM). En effet, les normes actuelles proposent la CRBM comme moyen d'essai en immunité rayonnée pour les équipements confinés dans des enceintes métalliques fermées ou semi-fermées. Il importe alors d'appréhender en quel sens l'environnement en CRBM peut être « comparé » à celui généré à l'intérieur de ces systèmes soumis à un champ électromagnétique perturbateur. Des prémices de réponses à cette question peuvent être obtenues par la comparaison des paramètres statistiques du champ électromagnétique caractérisant ces deux types d'environnements. Nous proposons également l'utilisation d'estimateurs statistiques performants pour la détermination des paramètres du second ordre du champ électromagnétique interne à un véhicule automobile, soumis à une source de caractéristiques aléatoires.

I. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les équipements électroniques devant assurer des fonctions dans les véhicules automobiles rendent incontournables l'évaluation des risques CEM. Les essais automobiles sont habituellement réalisés en Chambre Anéchoïque (CA). Or, on constate un intérêt naissant et croissant du domaine industriel automobile pour les CRBM. Le processus étant complexe, il est impératif de rendre fiable chaque étape et de corrélérer les résultats entre les phases successives afin d'optimiser le processus global, en l'occurrence pour les essais d'immunité rayonnée des équipements sur table et sur véhicule. La transposition des tests sur véhicule vers des essais sur table demeure toujours un point difficile à traiter [1].

Lors des tests sur table en CA, l'équipement est exposé à une illumination par une onde plane : se pose alors la question de la représentativité du test vis-à-vis de l'environnement réel. En effet, lorsque l'équipement est embarqué, l'interaction avec les parties métalliques du véhicule provoque de multiples réflexions. Les caractéristiques des deux types d'environnement des équipements automobiles sont ils alors comparables ? Néanmoins, la structure assez complexe du véhicule soulève beaucoup de questions concernant les caractéristiques du champ dans cet environnement [2] comparé à un environnement réverbérant. En effet, environ 1/3 des bords extérieurs entourant le compartiment interne est constitué de vitres alors que le reste est métallique.

Dans notre approche, la comparaison proposée porte sur les densités de probabilité du champ électromagnétique en CRBM et dans le véhicule automobile. La comparaison se fera entre les estimées de la densité de probabilité issues des données expérimentales pour la CRBM, et de résultats de simulation numérique dans la zone habitacle pour une onde provenant d'une antenne située sur le toit du véhicule.

Dans une seconde partie, des paramètres statistiques (moyenne, densité spectrale de puissance, fonction de covariance) du champ électromagnétique induit à l'intérieur d'un véhicule automobile soumis à un environnement électromagnétique aléatoire, seront évalués à partir d'estimateurs statistiques performants. Il en sera ainsi déduit les estimées du coefficient de corrélation des parties réelles et imaginaires des composantes du champ électrique, d'où la possibilité de conclure ou non à la corrélation spatiale de ces variables. Cette étude représente la première étape à la mise en œuvre du processus d'identification de champ aléatoire.

II. COMPARAISON DES LOIS DE PROBABILITE DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE GENERE DANS LE VEHICULE ET EN CRBM

La première partie de cette étude consiste à comparer les paramètres statistiques du champ électrique induit dans l'habitacle d'un véhicule automobile par une source électromagnétique externe, et généré en CRBM.

II.1 Champ électromagnétique généré en CRBM

D'après Hill [3], les parties réelles et imaginaires des composantes du champ électromagnétique issu d'une CRBM idéale sont des variables aléatoires indépendantes gaussiennes, centrées et de même écart-type en tout point du volume utile du moyen d'essai. Par conséquent, les modules des composantes du champ suivent une loi de Rayleigh d'ordre 2 à facteur d'échelle s tandis que le module du champ total $|E_{tot}|$ suit une loi de Rayleigh d'ordre 6 à facteur d'échelle s . Les densité de probabilité, valeur moyenne et écart-type de $|E_{tot}|$ sont alors donnés par :

$$P_{|E_{tot}|}(x) = \frac{x^5 e^{-\frac{x^2}{2s^2}}}{8s^6} \mathbf{1}_{x>0} \quad (1)$$

$$\langle |E_{tot}| \rangle = \frac{15\sqrt{2\pi}}{16} s \quad (2)$$

$$\sigma_{|E_{tot}|} = \sqrt{6 - \frac{225\pi}{128}} s \quad (3)$$

Ce résultat a été, dans un premier temps, confirmé à partir de données expérimentales obtenues au LASMEA, notamment avec l'objectif de déterminer la valeur de la fréquence à partir de laquelle cette hypothèse est légitime. Le module du champ électrique a été mesuré en 80 points du volume utile de la CRBM, et pour 51 positions de brasseur dans la gamme de fréquences [250 MHz - 1 GHz]. La figure 1 présente les résultats du test d'homogénéité du χ^2 appliqué, à chaque fréquence, à chaque couple de point référencé au point central du volume d'essai.

A partir de 340MHz, pour la CRBM du LASMEA de dimensions 8,40m x 6,70m x 3,50m, 20% des couples de points considérés (sur un total de 79) sont inférieurs au seuil critique (non-respect de la distance du χ^2), pour une erreur de 1^{ère} espèce de 5%. Il est à noter que cette valeur de fréquence correspond aux résultats des tests d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov et du χ^2 de Pearson, pour la comparaison des lois de distribution théorique et expérimentale de la puissance reçue dans le volume utile de la CRBM [4]. Conformément aux travaux de Hill, l'hypothèse d'homogénéité et d'ergodicité du champ électromagnétique peut être par conséquent admise à partir de cette fréquence limite.

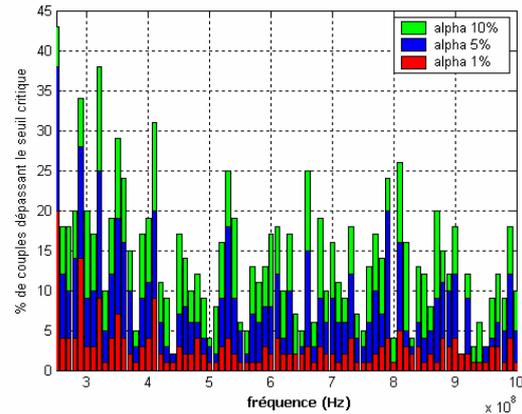


Fig.1 - Résultats du test d'homogénéité χ^2 appliqué à 79 points du volume utile de la CRBM, et référencé au point central du volume utile de la CRBM du LASMEA.

Nous pouvons donc admettre que nous disposons, pour le module de chaque composante cartésienne du champ électromagnétique, de 51 x 80 réalisations des observations de ces modules, qui seront utilisées dans la section suivante pour l'estimation de la densité de probabilité du module du champ électrique en CRBM.

II.2 Champ électromagnétique induit dans un véhicule automobile par une source externe

L'objectif est maintenant d'estimer la densité de probabilité du module du champ induit dans l'habitacle par une antenne située sur le toit du véhicule. Il s'agit ici de déterminer les caractéristiques de l'environnement électromagnétique au centre de l'habitacle du véhicule d'une part, et au voisinage des équipements électroniques, d'autre part.

Les données de simulation numérique du champ électromagnétique généré dans un véhicule automobile ont été obtenues aux fréquences suivantes : 27 MHz, 85 MHz, 146 MHz, 172 MHz, 390 MHz, 433 MHz et 900 MHz.

a) Champ électromagnétique dans la partie centrale de l'habitacle

La première étude concerne une comparaison statistique du champ électrique dans l'habitacle véhicule et dans le volume utile de la CRBM. Après estimation de la densité de probabilité des modules du champ électrique aux différentes fréquences pour lesquelles on dispose de données numériques, la concordance, entre les estimées expérimentales et les lois théoriques en CRBM, s'est avérée satisfaisante à partir de 390MHz. A titre d'illustration, la figure 2 représente une estimée de la densité de probabilité du module du champ électrique normalisé à sa valeur moyenne, à la fréquence de 900MHz, pour les deux types d'environnement.

En revanche, les fonctions de répartition théoriques caractérisant l'environnement CRBM ne sont plus en

adéquation avec les valeurs estimées à partir des résultats de simulation numérique du véhicule en dessous de 390MHz. La figure 3 illustre cette conclusion à la fréquence de 146MHz.

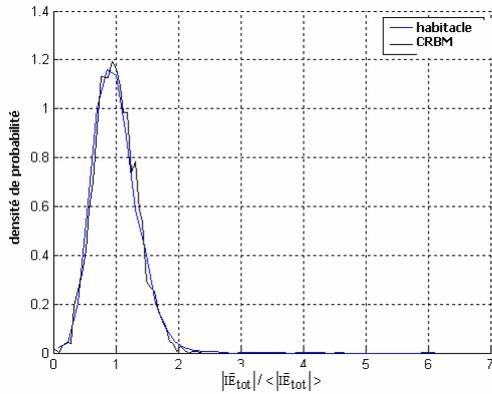


Fig.2 - Comparaison des densités de probabilité estimée à partir de 4080 échantillons (habitacle véhicule) et théorique (CRBM) du module du champ total en CRBM à 900 MHz

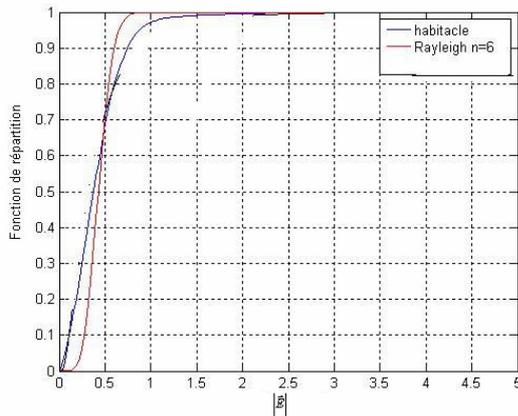


Fig.3 - Comparaison des densités de probabilité estimée à partir de 4080 échantillons (habitacle véhicule) et théorique (CRBM) à 146MHz

L'environnement électromagnétique au centre du véhicule est donc comparable à celui d'une CRBM à partir d'une valeur de fréquence dépendant des dimensions du véhicule. Cette étude n'ayant été réalisée qu'à partir de quelques valeurs de fréquences, elle ne peut conduire à une détermination précise de cette limite, d'où l'intérêt de disposer de données sur une large gamme de fréquences. Or, l'évaluation de tels résultats par un code fréquentiel (tel que celui utilisé pour le calcul des données de notre étude) conduit à des temps de calculs prohibitifs. C'est pourquoi, nous proposons, dans la section II de compléter cette analyse par le traitement de résultats issus d'un code temporel.

Ces premiers résultats sont importants vis-à-vis des protocoles de mesures en immunité des dispositifs situés dans l'habitacle du véhicule (équipements, stimulateurs de passagers,...), ainsi que pour la

détermination des paramètres d'exposition pour l'évaluation des risques sanitaires (mesures du DAS).

b) Champ électromagnétique à l'emplacement des faisceaux électriques

Par ailleurs, les équipements électroniques, et plus particulièrement les faisceaux électriques ne sont pas localisés dans le volume central de l'habitacle véhicule, mais le long de la caisse du véhicule. Nous avons donc été amenés à analyser les paramètres de l'environnement électromagnétique à l'emplacement des faisceaux électriques. Au niveau de ces équipements, les estimées des densités de probabilité sont obtenues à partir de 3072 points de calcul dont la répartition est illustrée figure 4.

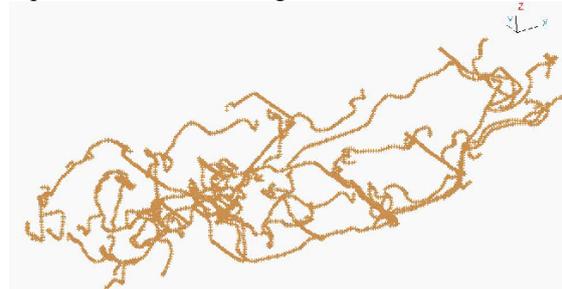


Fig.4 - Position des 3072 points de calculs à l'emplacement des faisceaux électriques

Pour les différentes valeurs de fréquences étudiées, les parties réelles et imaginaires des composantes du champ électrique ne suivent pas une loi gaussienne. Par conséquent, les modules des composantes du champ électrique ne suivent pas une loi de Rayleigh d'ordre 2, et la fonction de répartition du module du champ électrique induit à l'emplacement des faisceaux est différente de celle estimée dans le volume central de l'habitacle du véhicule (Fig.6).

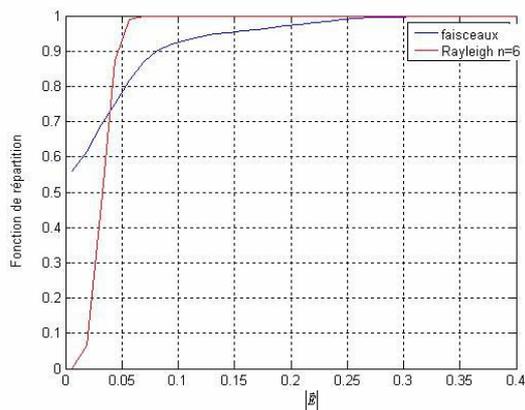


Fig.6 - Comparaison à 900 MHz entre la fonction de répartition du module du champ électrique près de la caisse du véhicule et celle de la loi de Rayleigh d'ordre 6

Par conséquent, l'environnement électromagnétique des équipements électroniques situés à proximité de la caisse du véhicule, est statistiquement différent de l'environnement CRBM. En outre, ces résultats

mettent en évidence la nécessité de préciser l'utilisation d'un plan de masse dans le protocole de mesure de l'immunité des équipements en CRBM. Il serait également intéressant de réaliser une comparaison des paramètres statistiques de l'environnement interne au véhicule, à l'emplacement des faisceaux électriques, et de l'environnement CRBM, à proximité des parois de la structure [5].

Considérons maintenant le champ électrique tangentiel aux faisceaux, représentant le terme source des équations de couplage décrivant le comportement des câblages, dans le formalisme d'Agrawal. La figure 7 montre, toujours à la fréquence de 900 MHz, que le module de cette grandeur ne suit pas la loi de probabilité théorique du module du champ électrique en environnement CRBM.

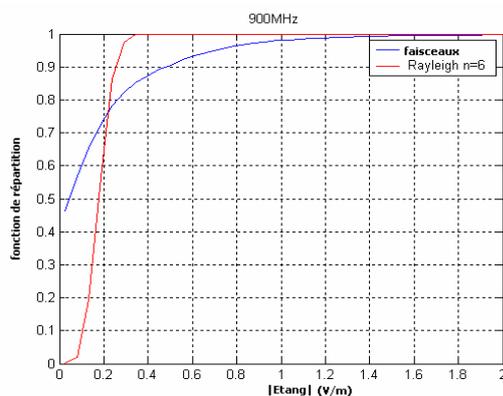


Fig.7 - Comparaison à 900 MHz entre la fonction de répartition du module du champ tangentiel aux faisceaux et celle de la loi de Rayleigh d'ordre 6

Afin d'éviter de recourir à la modélisation de l'ensemble du véhicule automobile pour l'analyse électromagnétique des faisceaux électriques, il serait opportun de déterminer les paramètres statistiques de la composante du champ électrique suivant l'axe des faisceaux électriques. Pour cela, il peut être envisagé d'utiliser des techniques d'estimation de champ aléatoire présentées section suivante.

II. ESTIMATION STATISTIQUE DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE ALEATOIRE GENERE DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE

Nous avons vu dans la section précédente, pour certains points du véhicule, ou pour certaines fréquences, que la loi de probabilité suivie par le module du champ électrique reste à déterminer. Nous proposons, dans le but de réaliser une estimation statistique de l'environnement interne au véhicule, de mettre en œuvre des outils développés pour des besoins en mécanique. Les données ont été obtenues à partir d'un code FDTD mis au point au LASMEA [6]. La configuration étudiée correspond à un véhicule automobile de dimensions maximales (4,5m x 1,7m x 1,3m) soumis, successivement, à 60 ondes planes de polarisation et d'incidence différentes, et de même

amplitude. Les directions de propagation de ces ondes planes, réparties de manière uniforme, sont déterminées à partir d'une sphère illustrée figure 8.

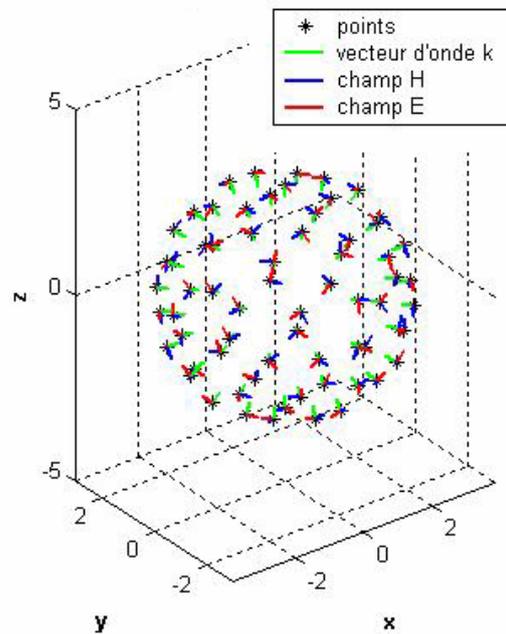


Fig.8 – Directions de propagation des 60 ondes planes injectées au niveau de la surface de Huygens

La fréquence maximale des excitations est de 1,2GHz. Les données en 1024 points de l'habitacle sont obtenues après transformée de Fourier. Il est à noter que le système étudié, dont les parois sont considérées comme étant parfaitement conductrices, reste éloigné d'une configuration réelle : l'objectif est ici de tester la mise en oeuvre de techniques d'estimation de champs aléatoires.

II.1 Hypothèses sur le champ électromagnétique interne au véhicule

Pour l'ensemble des 60 ondes planes excitant le véhicule, le champ électromagnétique peut être considéré comme une variable aléatoire. Il est nécessaire, dans un premier temps de vérifier les hypothèses de gaussianité des parties réelles et imaginaires du champ électrique, ou encore l'adéquation de la loi de distribution du module du champ électrique avec une loi de Rayleigh d'ordre six pour le module du champ électrique $|\vec{E}|$. La figure 9

présente les résultats du test du KS appliqué à $|\vec{E}|$: la distance du KS est inférieure au seuil relatif à une erreur de 1^{ère} espèce de 10% à partir de 510MHz.

Par suite, nous admettrons qu'à partir de cette valeur de fréquence, les hypothèses requises pour l'application des techniques d'estimation de champ aléatoire proposées deviennent légitimes.

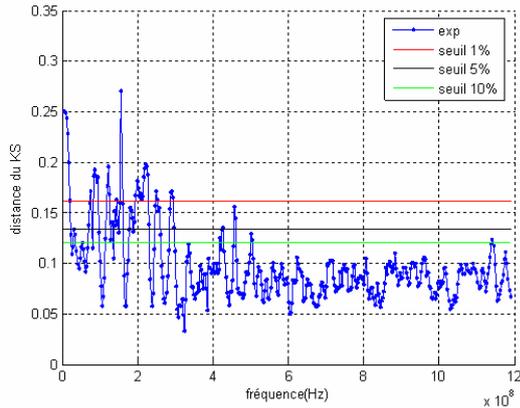


Fig.9 – Résultats du test du KS appliqué au module du champ électrique interne au véhicule normalisé à sa valeur moyenne.

II.2 Estimation des paramètres statistiques du champ aléatoire

L'estimation de la moyenne, de la Densité Spectrale de Puissance (DSP) et de la fonction de covariance des grandeurs électromagnétiques induites dans l'habitacle soumis à une source externe de caractéristiques aléatoires vont nous permettre de préciser l'environnement interne du véhicule. L'efficacité de l'estimation de ces différentes grandeurs requiert l'utilisation d'estimateurs statistiques performants. Les outils qui ont été appliqués dans le cadre de cette étude sont détaillés dans [7]. L'estimation de la fonction de covariance est une étape importante car celle-ci nous renseigne sur la dépendance entre parties réelle et imaginaire des composantes du champ électrique dans le domaine d'étude inclus dans l'habitacle du véhicule. A titre d'exemple, la figure 10 présente le terme diagonal de la fonction de covariance $C_{E_{zz}^I, E_{zz}^I}$ (E_{zz}^I correspondant à la partie imaginaire de la composante E_z) à la fréquence de 1,1GHz, en un point situé au centre de l'habitacle.

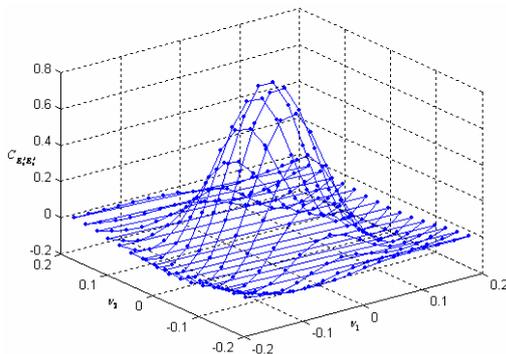


Fig.10 - Terme diagonal de la fonction de covariance $C_{E_{zz}^I, E_{zz}^I}$ à la fréquence de 1,1GHz, au centre de l'habitacle.

La valeur maximale de ce terme correspond à la variance qui est ici égale à 0,5. L'estimateur de la fonction de covariance est ici basé sur la connaissance préalable de l'estimateur de la DSP, celui fondé sur

l'emploi direct des trajectoires du champ aléatoire étant jugé moins performant. L'estimée du coefficient de corrélation entre parties réelles ou imaginaires de l'une des composantes du champ électrique en deux points distants de ν dans l'habitacle est alors obtenue par :

$$\rho_{pq}(\nu) = \frac{C_{pq}(\nu)}{\sqrt{C_{pp}(0)}\sqrt{C_{qq}(0)}} \quad (4)$$

où p et q représentent partie réelle ou partie imaginaire de l'une des composantes cartésiennes du champ électrique.

A titre d'exemple, les figures 11 et 12 présentent les valeurs des coefficients de corrélation entre partie imaginaires des composantes E_x et E_z suivant une direction proche de la caisse, et située au centre de l'habitacle, respectivement, pour différentes valeurs de la fréquence.

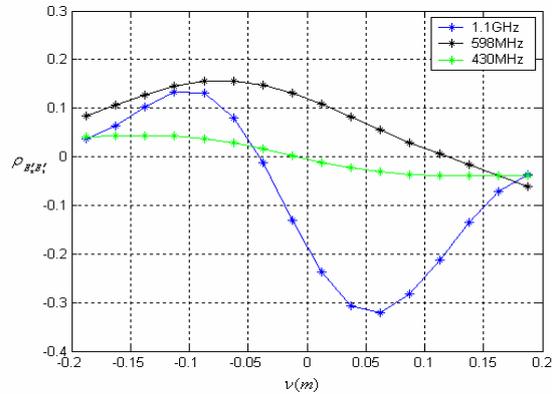


Fig.11 - Coefficient de corrélation entre les parties imaginaires des composantes E_x et E_z , situées près de la caisse du véhicule

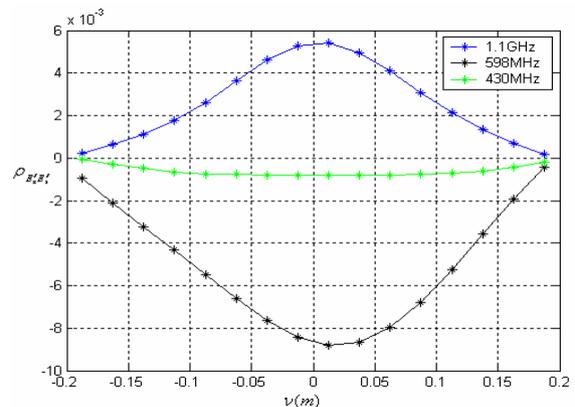


Fig.12 - Coefficient de corrélation entre les parties imaginaires des composantes E_x et E_z , situées au centre de l'habitacle

Ces valeurs du coefficient de corrélation représentent un estimateur de la valeur « vraie » de ce paramètre, auquel est appliqué un test de comparaison du coefficient de corrélation « vrai » à la valeur nulle [9]. Par exemple, pour un degré de liberté ddl=60 (soit 60 couples de données), la valeur absolue du coefficient de corrélation estimé doit être supérieure ou égale à $s=0.3248$ pour conclure à la corrélation spatiale des

variables, pour un risque de 1^{ère} espèce α de 0,01, ce qui est le cas à proximité de la caisse du véhicule. En revanche, dans l'habitacle, les valeurs estimées du coefficient de corrélation sont inférieures à α , ce qui permet de conclure, à des valeurs non corrélées des parties réelles ou imaginaires des composantes de champ électrique.

L'estimation des paramètres du champ électrique nous renseigne donc sur les dépendances et interdépendances du champ aléatoire. Nous devons souligner ici que cette étude ne représente qu'une étape dans le processus menant vers l'identification et la modélisation probabiliste du champ électrique. L'hypothèse de base est que les parties réelles et imaginaires des composantes du champ électrique suivent une loi normale. Si le champ à estimer n'est pas gaussien, la première étape, avant l'utilisation des algorithmes, consistera à faire une normalisation gaussienne du champ aléatoire, i.e. déterminer une relation entre la matrice de covariance de ce champ et celle de la loi gaussienne. Avec un nombre suffisant d'échantillons, ces méthodes seraient applicables à l'étude de l'environnement électromagnétique en CRBM afin de vérifier, notamment, la validité du modèle théorique de Hill, à savoir l'importance du degré de corrélation entre les parties réelles et imaginaires du champ électromagnétique au sein du volume utile de la CRBM.

III. CONCLUSION

Nous avons montré, à partir de résultats de simulation d'un véhicule automobile, l'adéquation des lois de probabilité du champ électrique dans l'habitacle et dans le volume utile d'une CRBM, et ceci à partir d'une fréquence limite. En revanche, le long de la caisse du véhicule, soit au niveau des équipements électroniques, les caractéristiques de l'environnement électromagnétique, pour les fréquences étudiées, se sont avérées différentes de celles d'une CRBM. Ces résultats représentent des indicateurs pour la mise en œuvre, dans cette structure, des tests d'immunité d'équipements automobiles.

L'utilisation d'estimateurs statistiques performants nous a, dans un second temps, permis de déterminer les estimées des paramètres du second ordre du champ aléatoire. Les données utilisées pour cette étude sont issues de simulations numériques d'un véhicule automobile soumis à 60 ondes planes de polarisation aléatoire. Nous avons pu vérifier, à partir de l'estimée de leur coefficient de corrélation, que parties

réelles/imaginaires des composantes du champ électrique dans l'habitacle sont indépendantes. Appliquées au champ électromagnétique en CRBM, ces techniques d'estimation pourraient par ailleurs permettre une vérification des expressions analytiques du coefficient de corrélation spatiale [8].

REFERENCES

- [1] L. Musso, .Assessment of Reverberation chamber testing for automotive applications., PhD thesis, February 2003
- [2] H.Weng, D.G.Beetner, T.H.Hubing, X.Dong, R.Wiese, J.McCallum, "Investigation of Cavity resonances in an automobile", 2004 IEEE Symposium on EMC, Santa Clara, August 2004
- [3] D. A. Hill, "Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers", IEEE Trans. on Electromag. Compat. Vol. 40, pp. 209-217, august, 1998.
- [4] F.Diouf, F.Paladian, M.Klingler, M.Fogli, S.Girard, "Probabilistic study of the electromagnetic environment generated inside a vehicle", IEEE Workshop on EMC, CDRom, Paris, Juin 2007
- [5] D. A. Hill, "Boundary fields in Reverberation Chambers", IEEE Trans. on Electromag. Compat. Vol. 47, n°2, pp.281-290, May 2005
- [6] S.Lalléchère, "Modélisations numériques temporelles de Chambres Réverbérantes à Brassage de Modes en Compatibilité Electromagnétique. Contribution aux schémas Volumes Finis », thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Décembre 2006
- [7] F.Diouf, « Application de méthodes probabilistes à l'analyse des couplages en Compatibilité Electromagnétique et contribution à la sûreté de fonctionnement de systèmes électroniques », thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Mai 2008
- [8] D.A.Hill, "Spatial Correlation Function for Fields in a Reverberation Chamber", IEEE Trans. On Electromag. Compat., Vol. 37, N°1 , p.138 , February 1995
- [9] J.L.Golmard, A.Mallet, V.Morice, "Biostatistique", Faculté de Médecine Pierre et Marie Curie, Octobre 2007, <http://www.chups.jussieu.fr/polys/biostats/poly/>