Conception et caractérisation dune chambre réverbérante à brassage de modes en ondes millimétriques.

Abdou Khadir Fall, Philippe Besnier, Christophe Lemoine, Maxim Zhadobov, Ronan Sauleau

▶ **To cite this version:**

Abdou Khadir Fall, Philippe Besnier, Christophe Lemoine, Maxim Zhadobov, Ronan Sauleau. Conception et caractérisation dune chambre réverbérante à brassage de modes en ondes millimétriques.. Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM2014), Jul 2014, Clermont-Ferrand, France. hal-01080718

HAL Id: hal-01080718
https://hal.science/hal-01080718

Submitted on 6 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONCEPTION ET CARACTERISATION D'UNE CHAMBRE REVERBERANTE A BRASSAGE DE MODES EN ONDES MILLIMETRIQUES

A.K. Fall[1], P. Besnier[1], C. Lemoine[1], M. Zhadobov[2], R. Sauleau[2]

(1) : IETR, UMR CNRS 6164 - INSA de Rennes, Département Antennes et Dispositifs Hyperfréquences
20 av. des Buttes de Coësmes, 35708 Rennes, France (e-mail : abdou.fall@insa-rennes.fr).
(2) : IETR, UMR CNRS 6164 - Université de Rennes 1, Département Antennes et Dispositifs Hyperfréquences
263 av. du Général Leclerc, 35042 Rennes, France.

Résumé. Cette communication porte sur la conception, la réalisation et la caractérisation d'une chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM) en ondes millimétriques. A partir d'une étude initiale du comportement statistique du champ électrique en très hautes fréquences basée sur l'utilisation d'un modèle de simulation par la théorie des images, nous avons élaboré un prototype d'une cage d'expérimentation compacte de dimensions internes 423 mm × 412 mm × 383 mm. Cette cage offre une possibilité d'exploitation en bande Ka (26.5-40 GHz), en bande U (40-60 GHz), et en bande V (50-75 GHz). La mesure de l'efficacité de blindage à 40 GHz, la caractérisation statistique de la cage dans la bande 1-20 GHz ainsi que dans la bande millimétrique 58.5-61.5 GHz sont présentées dans ce papier.

I. Introduction

Les études sur les chambres réverbérantes ne cessent de croitre du fait des enjeux qu'elles portent. De nos jours, les chambres réverbérantes sont utilisées pour des applications très diverses: essais d'immunité, essais de rayonnement, mesures d'efficacité de blindage, mesures de gain d'antennes, etc.

Cependant, le nombre d'études de la CRBM dans le domaine millimétrique est très limité [1], [2], [3] et quasiment inexistant autour de 60 GHz alors que de nouveaux systèmes exploitant cette gamme de fréquences vont bientôt apparaître massivement. On peut citer par exemple l'émergence des réseaux de communication corporels (BAN) et personnels sans fil à très haut débit (WPAN) dans la bande 57-64 GHz.

Notre objectif est de mettre au point une CRBM en tenant compte des contraintes spécifiques imposées par sa mise en œuvre en ondes millimétriques (pertes, blindage, sources...).

II. ANALYSE DE PRE-DIMENSIONNEMENT DE LA CRBM

II.1. Estimation du coefficient de qualité

La connaissance du coefficient de qualité est essentielle pour la compréhension du comportement du champ électrique dans la CRBM. Toutefois une connaissance précise de sa valeur n'est pas nécessaire pour étudier le comportement statistique du champ ou de la puissance. Le facteur de qualité associé à un mode de cavité parallélépipédique est connu de manière rigoureuse [4]. Cependant ces expressions ne sont pas tout à fait adéquates pour une chambre réverbérante réelle. Nous nous limiterons au coefficient de qualité moyen associé aux pertes dans les parois de la chambre uniquement [4] :

$$Q_w = \frac{V}{S\mu_r\delta}\frac{3}{2}\frac{1}{1+\frac{3\pi}{8k_0}(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}+\frac{1}{d})} \qquad (1)$$

où V est le volume de la cavité, de surface S, de dimensions a, b et d ; k_0 correspond au nombre d'onde, μ_r à la perméabilité magnétique relative et δ à l'épaisseur de peau du matériau des parois.

La présence des objets sous test et les antennes peuvent modifier le facteur de qualité. Cependant, l'influence du facteur de qualité des antennes peut être négligée en hautes fréquences puisqu'il croît avec la fréquence au cube.

$$Q_{ant} = \frac{16\pi^2 V}{m\lambda^3} \qquad (2)$$

L'expression (1) du facteur de qualité théorique est une surestimation du facteur de qualité empirique de la CRBM. C'est pour cette raison que nous introduisons un facteur correctif de 1/10 dans l'expression du facteur de qualité théorique afin de prendre en considération toutes les sources de pertes non maîtrisées [4].

II.2. Etude de la statistique du champ électrique simulé

Les échantillons du champ électrique sont générés par un modèle numérique basé sur la théorie des images [5]. Les paramètres d'entrée du modèle de simulation sont : les dimensions géométriques de la cavité (a = 423 mm, b = 412 mm et d = 383 mm), la position et l'orientation de l'émetteur, les positions du récepteur (N = 64) ainsi qu'un facteur R qui modélise les pertes globales. Ce dernier paramètre est relié au coefficient de qualité global par l'expression (3) où f correspond à la fréquence et L à la

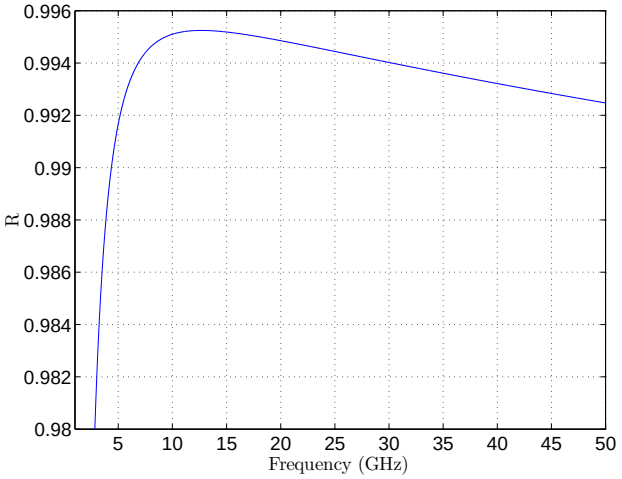

Fig. 1. Estimation du facteur R à partir de l'estimation du facteur de qualité de la cage (dimensions de la cage : a = 423 mm, b = 412 mm, d = 383 mm; conductivité électrique : $\sigma = 1.8 \times 10^6$ S/m).

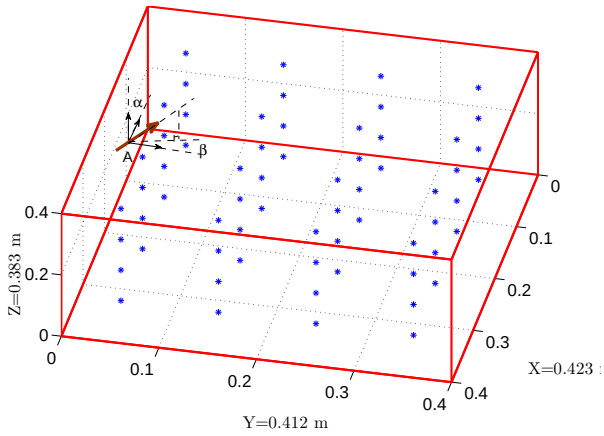

Fig. 2. Configuration des 64 positions du récepteur en simulation.

distance moyenne entre deux réflexions sur les parois.

$$R \approx 1 - \frac{10 \times \pi f L}{c Q_w} \tag{3}$$

Le résultat de l'estimation du facteur *R* dans la bande de fréquence de 1 GHz à 50 GHz est présenté en Fig. 1. Entre 1 et 10 GHz, l'évolution de *R* est très rapide. Cependant, *R* décroit ensuite très lentement entre 10 et 50 GHz, sa variation en fonction de la fréquence étant de 0.3% de son excursion maximale. Dans les simulations, la valeur de *R* est prise constante et égale à 0.993 dans toute la bande de fréquence à étudier. Cette considération reste acceptable étant donné que la variation de *R* est très faible au-delà de 10 GHz et que nous nous intéressons au domaine millimétrique.

Par ailleurs, il est admis que dans une chambre réverbérante idéale, le module de chaque composante cartésienne complexe du champ électrique suit une distribution

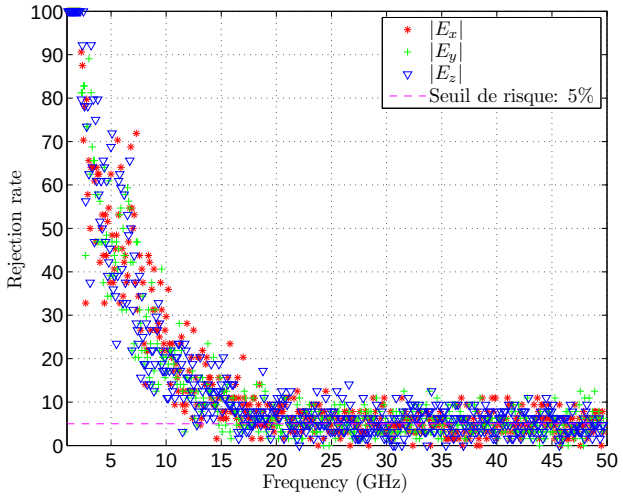

Fig. 3. Test d'ajustement statistique de AD (simulation numérique pour R=0.993).

de Rayleigh [6]. Le test de Anderson Darling (AD) sur les échantillons du champ électrique ou sur la puissance est souvent utilisé en chambre réverbérante [7], et c'est celui que nous avons appliqué pour vérifier l'ajustement de la loi de Rayleigh à la distribution obtenue par simulation. Le taux de rejet du test est déterminé à partir de 64 tests correspondant aux 64 positions du récepteur dans la cage (voir Fig. 2.). Un test est évalué sur un échantillon de taille *N* = 31 valeurs de champ électrique obtenues par un brassage en fréquence dans une sous-bande de largeur égale à 1% de la fréquence centrale. Sur la figure 3, nous observons que le taux de rejet du test d'ajustement statistique de AD à une loi de Rayleigh pour les trois composantes cartésiennes du champ électrique simulé ($|E_x|$, $|E_y|$ et $|E_z|$) est très faible au-delà de 10 à 15 GHz et converge vers le seuil de risque considéré pour le test (5%). Une étude préalable de corrélation a été effectuée afin de s'assurer de l'indépendance des valeurs au sein d'un échantillon.

III. CHOIX TECHNIQUES DE CONCEPTION

La mise en place d'une chambre millimétrique sollicite plus de contraintes mécaniques, électromagnétiques et métrologiques par rapport à une CRBM standard. Le choix des dimensions de la cage est fixé par la fréquence minimale de fonctionnement (LUF <26,5 GHz) ainsi que le volume de la cage. La cavité doit être surdimensionnée par rapport à la longueur d'onde et son volume suffisamment grand pour contenir des objets de quelques centimètres.

L'AG3 (ALMg3,5) est utilisé comme matériau de fabrication. Il offre une bonne conductivité électrique ($\sigma = 1.8 \times 10^7 S/m$) et présente une bonne aptitude à la transformation à chaud ou à froid, une bonne soudabilité et un bon état de surface.

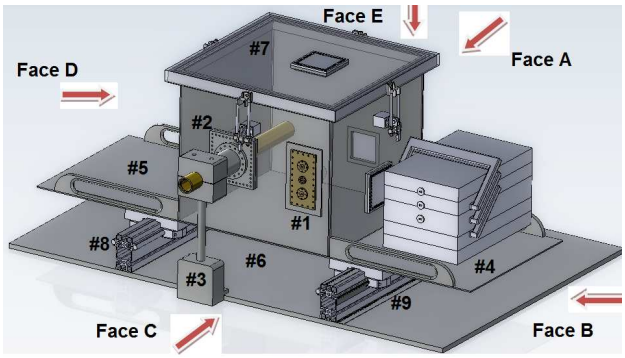

Fig. 4. Vue 3D de la CRBM millimétrique.

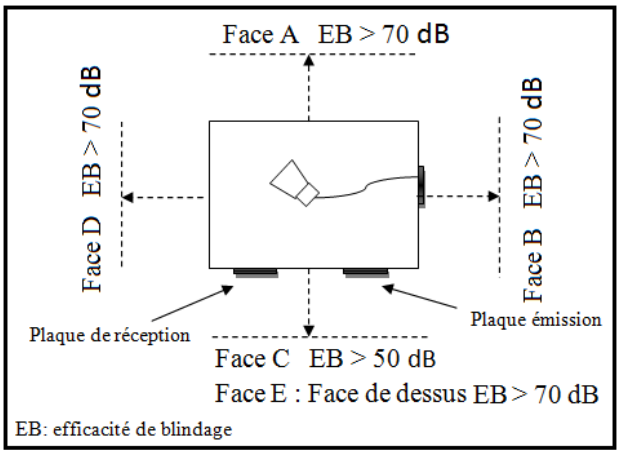

Fig. 5. Vue 3D de la CRBM millimétrique.

La cage dispose de deux panneaux techniques pour la transmission et la mesure du signal millimétrique (Fig. 4.). Trois traversées de guides (bande Ka, U, et V) ont été prévues sur la plaque d'émission (#1). La plaque de réception (#2) est traversée par un tube circulaire coulissant à l'intérieur duquel est soudé un guide d'onde. Les deux plaques métalliques (#4, #5) servent de support pour le générateur millimétrique et son alimentation. L'ensemble est posé sur deux rails (#8, #9). Le tube circulaire est solidaire à la plaque (#6) sur laquelle sont fixés les rails par l'intermédiaire d'un support vertical (#3). La mesure en différentes positions du récepteur est possible à l'aide du guide d'onde coulissant. Des panneaux techniques ont été aussi conçus sur chaque face de la cage en cas d'un besoin ultérieur. Des guides d'ondes sont utilisés sur toute la chaîne de mesure afin de minimiser les pertes en hautes fréquences.

Le brassage électronique a été préféré au brassage mécanique. Cependant, à terme, le contrôle du niveau de champ sera effectué au moyen de l'antenne d'émission ou de réception en position fixe. Le blindage du couvercle est assuré par un système de joint métallique.

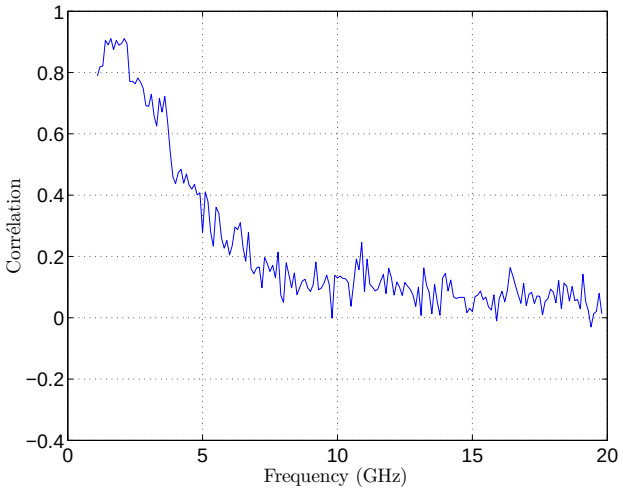

Fig. 6. Calcul de la fonction d'autocorrélation à l'ordre 1 (mesures).

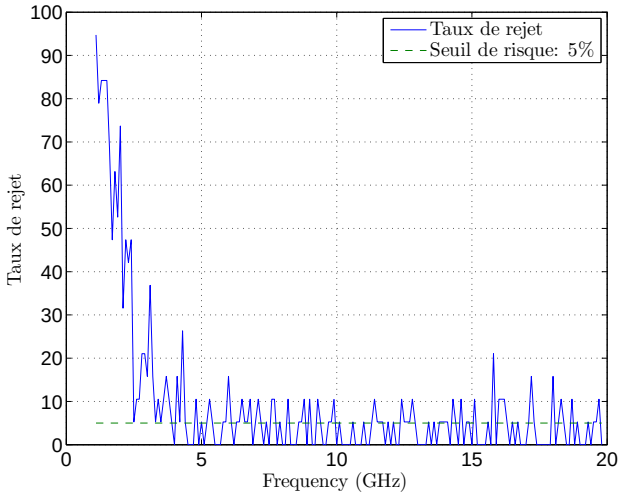

Fig. 7. Test d'ajustement statistique de AD (mesures).

IV. CARACTERISATION DE LA CRBM

IV.1. Mesure de l'efficacité de blindage à 40 GHz

L'efficacité de blindage à 40 GHz a été évaluée chez la société SIEPEL (La Trinité-sur-Mer, 56). Elle est d'au moins 70 dB sur les 4 faces A, B, D et E et d'au moins 50 dB sur la face C où se trouvent les interfaces d'émission et de réception. Les résultats sont synthétisés en Fig. 5 .

IV.2. Etude de la statistique du module de S21 entre 1 et 20 GHz

A l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel, nous mesurons les paramètres S entre deux antennes cornets larges bandes placées dans la cage. L'antenne d'émission (IMC-2018) est fixe et l'antenne de réception (H-1498 Series) est placée en 20 positions distinctes dans la cage à l'aide du guide coulissant.

La corrélation est d'abord étudiée à l'aide de la fonction d'autocorrélation (ACF) à l'ordre 1:

$$C = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X)}\sqrt{var(Y)}} \quad (4)$$

où Y est la même série de mesures que X sélectionnées dans une sous-bande de brassage Δ_f mais décalée d'un rang. Les valeurs de corrélation obtenues (voir Fig. 6) sont inférieures à 0,15 au-delà des fréquences de 7 à 8 GHz. Pour un échantillon comprenant 620 (31×20) mesures, nous pouvons considérer qu'une estimation du coefficient de corrélation inférieur ou égal 0,15 est un bon indicateur de non corrélation des éléments de l'échantillon [8].

Nous effectuons un test d'ajustement statistique de AD à une loi de Rayleigh sur les échantillons de mesures de $|S_{21}|$. Chaque test est réalisé dans une sous-bande de fréquence constituée d'échantillons de taille N = 31 mesures de $|S_{21}|$ obtenues par un brassage en fréquence. La largeur de la sous-bande étudiée est égale à 1% de la fréquence centrale de la bande. Nous retenons ensuite le taux de rejet à partir de 20 tests (en 20 positions dans la cage).

En figure 7, nous observons que le taux de rejet du test est très faible dès 5 GHz. Les performances sont donc conformes (voire meilleures) en ce qui concerne la LUF, ce qui peut être lié à la forme non parallélépipédique (répartition des modes) notamment du fait de la présence du guide d'onde, de l'antenne d'émission et à l'incertitude sur l'évaluation du facteur de qualité (facteur 10 de sécurité considéré en phase de conception).

IV.3. Caractérisation de la cage dans la bande 58,5-61,5 GHz

a - Description du banc de test

En figure 8, nous montrons une photo de la chaîne d'instrumentation des mesures de puissance. Le signal est généré par un oscillateur contrôlé en tension avec une diode Gunn. Au moyen d'une source de tension continue externe variable de 0 à 20 V, nous contrôlons la fréquence du signal millimétrique dans la plage de 58,5 à 61,5 GHz. La puissance maximale délivrée par le générateur est de l'ordre 36 dBm, elle varie légèrement avec la fréquence. Cependant, nous pouvons faire varier l'amplitude du signal par l'intermédiaire d'un potentiomètre et d'une source de tension externe variable de 0 à 10 V, les valeurs minimales obtenues sont comprises entre 10 et 14 dBm en fonction de la fréquence. Puisque l'analyseur de spectre est limité à 40 GHz, la puissance reçue par l'antenne de réception est transposée à une fréquence comprise entre 5 et 10 GHz par l'intermédiaire d'un mélangeur (M15HWD-OML) pour acquérir des signaux dont la fréquence est comprise entre 58,5 à 61,5 GHz.

La variation de la fréquence du générateur et la lecture de la puissance mesurée avec l'analyseur de spectre ont été automatisés via un PC. Deux guides d'ondes ouverts servent d'antenne émettrice et de réception.

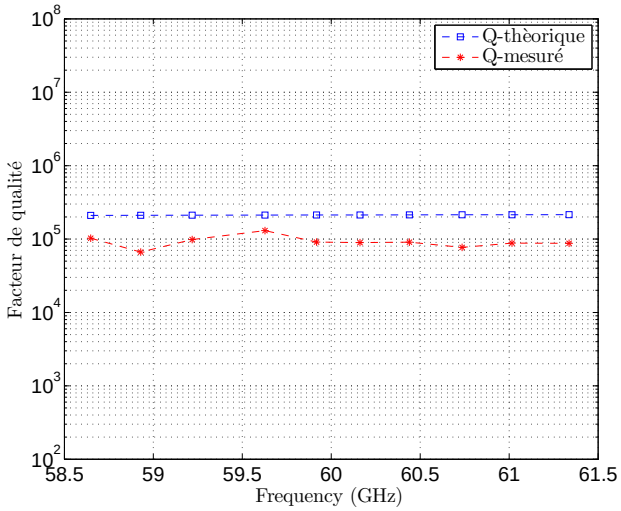

Fig. 9. Comparaison entre $Q_{exprimental}$ et $Q_{thorique}$.

Nous collectons des séries de mesures de la puissance dans la bande 58,5-61,5 en 31 positions de l'antenne de réception dans la cage. La distance entre les positions du récepteur est de 5 mm ($\approx \lambda$) de manière à les décolérer spatialement [9].

b - Evaluation du facteur de qualité

Le facteur de qualité expérimental est déterminé à l'aide de la formule suivante [10] :

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3}\frac{\langle P_r \rangle_N}{P_t}. \quad (5)$$

Le terme P_r correspond à la puissance reçue par l'antenne de réception, P_t, à la puissance transmise à la cage, V, au volume de la cavité et λ, à la longueur d'onde. Chaque valeur de Q expérimental (en Fig. 9.) est estimée à partir de 31 (nombre de positions du récepteur) échantillons de taille N = 30 mesures de puissance obtenues par un brassage en fréquence dans une sous-bande Δ_f de 300 MHz. Le ratio facteur de qualité théorique sur le facteur de qualité expérimental est compris entre 1 et 3 dans toute la bande de fréquence. Ce résultat est conforme à celui d'une CRBM standard. Nous aurions pu s'attendre à un facteur de qualité expérimental plus faible dans l'hypothèse notamment de fuites électromagnétiques dues aux imperfections de blindage dont l'existence aurait pu être révélée en régime de fréquence millimétrique. Les valeurs du coefficient de qualité composite expérimental sont suffisamment élevées par rapport au seuil minimal de Q, noté Q_{thrp} [11] :

$$Q_{thrp} = \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{2/3}\frac{3V^{1/3}}{2\lambda} \approx 300. \quad (6)$$

Q_{thrp} correspond au facteur de qualité en dessous duquel les performances de la chambre se dégradent significativement.

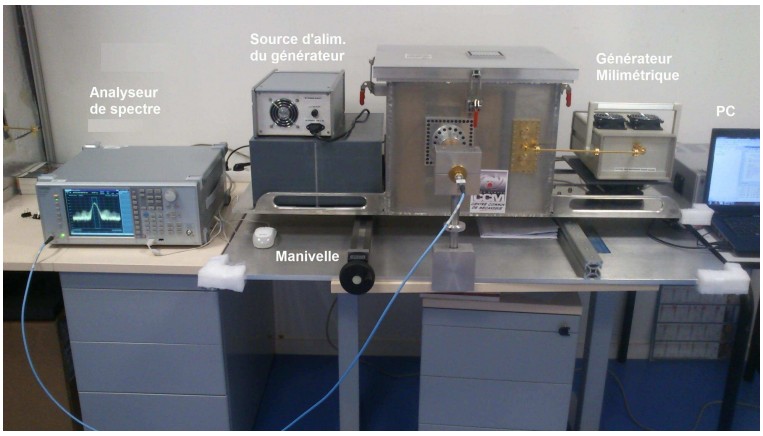

Fig. 8. Chaine d'instrumentation pour la mesure de la puissance dans la CRBM millimétrique.

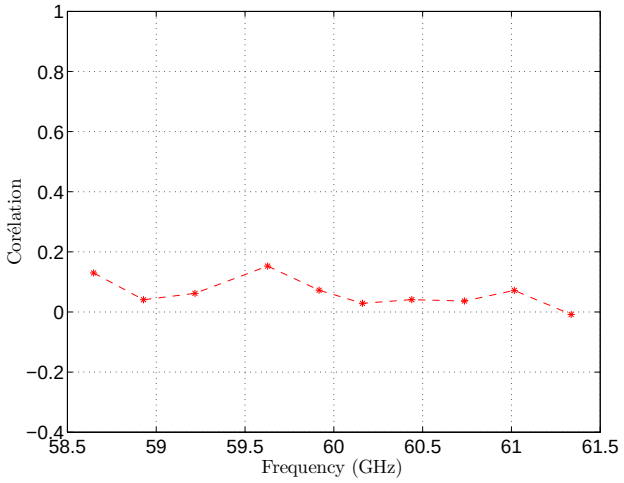

Fig. 10. Fonction d'autocorrélation à l'ordre 1 calculée à partir des échantillons expérimentaux de puissance normalisée.

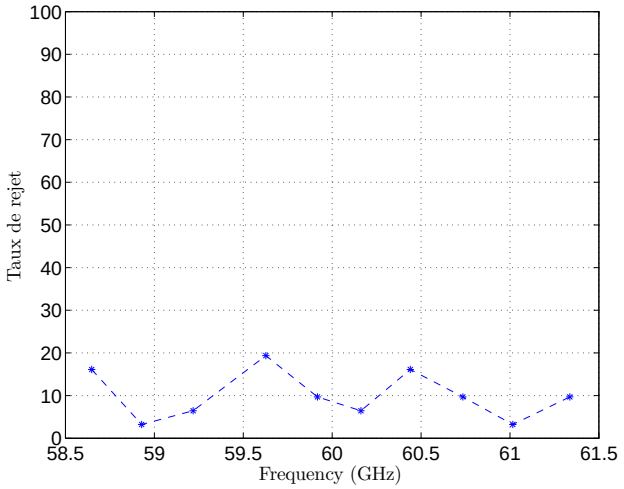

Fig. 11. Test d'ajustement de AD à la loi exponentielle appliqué à la distribution expérimentale de la puissance normalisée.

c - Test d'ajustement statistique de Anderson Darling

Etant donné que la puissance suit une loi exponentielle dans une chambre réverbérante idéale [6]-[7], nous avons procédé à un test d'ajustement statistique de AD à une loi exponentielle sur les échantillons de mesures de puissance.

Le taux de rejet du test est déterminé à partir de 31 tests correspondant aux 31 positions du récepteur dans la cage. Un test est évalué sur un échantillon de taille N = 30 mesures de puissance obtenues par brassage en fréquence dans une sous-bande de largeur Δ_f = 300 MHz. La puissance mesurée avec l'analyseur de spectre est normalisée à la puissance émise par le générateur afin de décorréler la réponse du générateur et celle du mélangeur qui n'ont pas une réponse tout à fait plate. Notons que la distribution des mesures de puissance normalisée reste identique à celle des mesures de puissance non normalisée [12]. Une étude de corrélation (Fig. 10.) a été menée avant de procéder au test dont les résultats sont présentés en Fig. 11.

Le taux de rejet du test d'ajustement statistique de AD à une loi exponentielle sur les mesures de puissance normalisée est faible. Dans ce cas l'hypothèse H_0 du test, *i.e.* les échantillons de mesures de puissance normalisée ne suivent pas une loi exponentielle, est rejetée.

Une étude complémentaire est également faite sur l'estimation du rapport de l'écart-type à la moyenne des échantillons de mesures puissance. Rappelons que si une variable aléatoire P suit une distribution exponentielle de paramètre θ>0, d'écart-type σ_P et de moyenne μ_P alors:

$$\sigma_P = \frac{1}{\theta} \quad et \quad \mu_P = \frac{1}{\theta} \quad donc \quad \frac{\sigma_P}{\mu_P} = 1. \qquad (7)$$

L'estimation du rapport de l' écart-type à la moyenne des échantillons de puissance normalisée est présentée en Fig. 12. D'après ces résultats, nous pouvons conclure que la cage se comporte très bien dans cette bande fréquence d'étude en termes de distribution statistique de la puis-

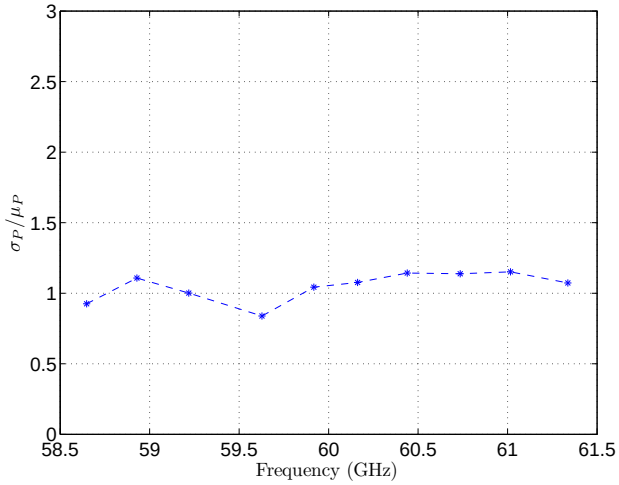

Fig. 12. Estimation du ratio écart-type / moyenne sur les échantillons des mesures de puissance normalisée.

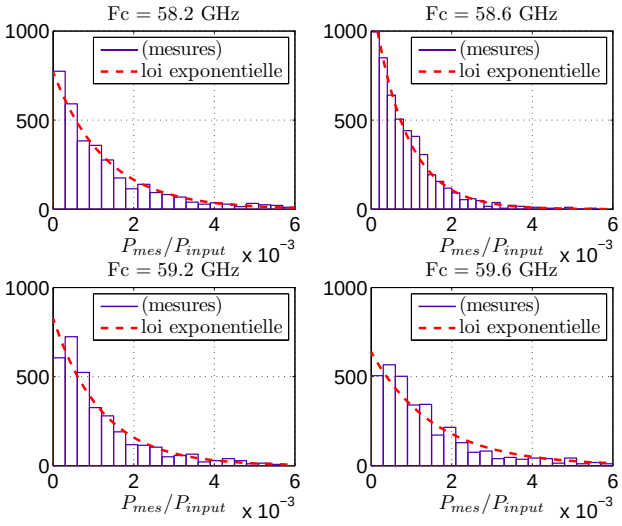

Fig. 13. Histogrammes de distribution des meures de puissance normalisée.

sance reçue au sein du volume de test. En complément, nous avons tracé l'histogramme de la distribution des mesures de la puissance normalisée dans la CRBM qui est en adéquation avec la densité de probabilité d'une loi exponentielle (Fig. 13.). Chaque histogramme est construit à partir de 930 données de puissance normalisée issues de la mesure en 31 positions du récepteur et à 30 fréquences prélevées dans une bande de largeur 300 MHz.

V. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté la conception et la caractérisation d'une CRBM en ondes millimétriques dans la bande 58,5-61,5 GHz. L'estimation du facteur de qualité expérimental donne des résultats qui sont conformes à ceux d'une chambre réverbérante classique. Ensuite, nous avons montré que les échantillons constitués de la puissance reçue par une antenne placée dans la cage suivent une distribution exponentielle. D'après ces analyses, nous pouvons conclure que la cage dispose bien aux fréquences millimétriques, des propriétés requises à son utilisation pour la CEM.

VI. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés par la Région Bretagne, l'Agence Nationale de la Recherche (ANR Bio-CEM, ANR-09-RPDOC-003-01) ainsi que le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).
Nous remercions Patrick Weber, le chef d'atelier du Centre Commun de Mécanique (CCM) de l'INSA de Rennes ainsi que toute son équipe pour la réalisation de la cage. Nous souhaitons également remercier Jean-François Rosnarho, directeur technique de la société SIEPEL, qui nous a offert la possibilité d'évaluer l'efficacité de blindage de la cage en ses locaux ainsi que Jérôme Sol pour l'assistance aux mesures.

REFERENCES

[1] P. Hallbjorner, U. Carlberg, K. Madsen and J. Andersson, "*Extracting electrical material parameters of electrically large dielectric objects from reverberation chamber measurements of absorption cross section,*" IEEE Trans. Electromagn, Compat., vol. 47, no. 2, pp. 291-303, May 2005.

[2] Z. Xiaoxia, L. Jing, F. Hongmei, A. Bhobe, P. Sochoux and Y. Jinghan, ''*High-frequency EMC design verification through full-wave simulations and measurements in reverberation chamber,*" Electromagnetic Compatibility (EMC), IEEE International Symposium on., pp. 299-305, 5-9 Aug. 2013.

[3] A. Jun, H. Jiro, N. Hiroshi, H. Yasutake, I. Hiroshi, I. Atsushi and A. Makoto, "*Manufacture and performance of a 60 GHz-band high-efficiency antenna with a thick resin layer and the feed through a hole in a silicon ship,*" IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 12, pp. 3108-3115, Dec. 2013.

[4] B. Démoulin et P. Bersnier, *"Les chambres réverbérantes en électromagnétisme"*. Hermes Science Publications, Télécom, Octobre 2010.

[5] E. Amador, C. Lemoine, P. Besnier, A. Laisne?, *"Reverberation chamber modeling based on image theory: investigation in the pulse regime,"* IEEE Trans. Electromagn. Comp., vol. 52, no. 4, pp. 778-789, Nov. 2010.

[6] D. A. Hill, *"Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers,"* IEEE Trans. Electromagn, Compat., vol. 40, no. 3, pp. 209-217, Mar. 1998.

[7] C. Lemoine, P. Besnier, and M. Drissi, *"Investigation of reverberation chamber measurements through high power goodness-of-fit test,"* IEEE Trans. Electromagn, Compat., vol. 49, pp.745-755, Nov. 2007.

[8] O. Lunden and M. Backstrom, *"Stirrer efficiency in FOA reverberation chambers. Evaluation of correlation coefficients and chi-squared tests,"* Electromagnetic Compatibility, 2000. IEEE International Symposium on, vol. 1, no., pp. 11-16 vol.1, Aug. 2000.

[9] D. A. Hill, *"Spatial correlation function for fields in a reverberation chamber,"* IEEE Trans. Electromagn. Comp., vol. 37, no. 1, pp. 138, Feb. 1995.

[10] Test and measurement techniques-reverberation chamber test methods, Electromagnetic Compatibility Part 4-21.

[11] C. L. Holloway, D. A. Hill, J. M. Ladbury and. Koepke, *"Requirements for an effective reverberation chamber: unloaded or loaded"* IEEE Trans. Electromagn. Comp., vol. 48, no. 1, pp. 187-194, Feb. 2006.

[12] C. Lemoine *Contribution à l'analyse statistique des mesures en chambre réverbérante à brassage de modes*. Thèse doctorat, INSA Rennes, Rennes, Jull. 2008.