



HAL
open science

Contribution au développement d'un moyen d'essais CEM utilisant une Chambre Réverbérante à Brassage de Modes. Conception et Intégration d'une Enceinte Thermo-régulée pour Essais Multiphysiques.

Habib Boulzazen

► **To cite this version:**

Habib Boulzazen. Contribution au développement d'un moyen d'essais CEM utilisant une Chambre Réverbérante à Brassage de Modes. Conception et Intégration d'une Enceinte Thermo-régulée pour Essais Multiphysiques.. Matière Condensée [cond-mat]. Université de Rouen, 2011. Français. NNT : . tel-00632372

HAL Id: tel-00632372

<https://theses.hal.science/tel-00632372>

Submitted on 14 Oct 2011

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.

N° d'ordre :

THÈSE

présentée à
L'UNIVERSITE DE ROUEN

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR
de l'Université de Rouen
Mention : Electronique

et soutenue publiquement par

HABIB BOULZAZEN

École Doctorale SPMII
Sciences Physiques, Mathématiques et de l'Information pour l'Ingénieur
Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués IRSEEM

Titre de la thèse :

**CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT D'UN MOYEN D'ESSAIS
CEM UTILISANT UNE CHAMBRE RÉVERBÉRANTE À
BRASSAGE DE MODES**

Conception et Intégration d'une Enceinte Thermo-régulée pour Essais Multiphysiques

Soutenue à l'ESIGELEC le 01 Juin 2011, devant le jury :

| | | |
|----------------------|------------------------|--|
| Rapporteurs : | Bernard DEMOULIN | Professeur, IEMN, Université de Lille 1 |
| | Philippe BESNIER | Chargé de Recherche CNRS, HDR, IETR RENNES |
| Directeur de thèse : | Alain REINEIX | Professeur, XLIM, Université de Limoges |
| Encadrant : | François FOUQUET | Enseignant Chercheur, ESIGELEC ROUEN |
| Examineurs : | Paolo CORONA | Professeur, Université de Parthenope, ITALIE |
| | Richard GRISEL | Professeur, GPM, Université de Rouen |
| Membre invité : | Jean-François ROSNARHO | Directeur Recherche et Développement, SIEPEL |

À mes parents

À ma femme

À mes frères et sœurs

NOM : Boulzazen

PRÉNOM : Habib

Titre de la thèse :

Contribution au développement d'un moyen d'essais CEM utilisant une Chambre Réverbérante à Brassage de Modes. Conception et Intégration d'une Enceinte Thermo-régulée pour Essais Multiphysiques.

Résumé :

Dans cette thèse nous proposons l'analyse par l'expérimentation de l'effet de la charge sur les propriétés statistiques du champ électromagnétique mesuré dans le volume utile de la chambre réverbérante à brassage de modes (*CRBM*) ; mais aussi, le développement d'une nouvelle application de la *CRBM* permettant de réaliser des tests d'immunité rayonnée en conjuguant le stress thermique à l'agression électromagnétique. Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'évaluation des principaux paramètres de calibrage dans le cas d'une chambre vide ou en présence d'un ou de plusieurs objets dissipatifs. Une attention particulière a été réservée au nombre de positions d'antenne choisi pour le relevé des mesures. En effet, les normes en vigueur traitant des mesures en chambre réverbérante apportent très peu d'explications quant au nombre de positions d'antenne requis, et un minimum d'informations sur l'influence de la charge sur le comportement électromagnétique de la chambre. Les lois de distribution des mesures de champ et de puissance, relevées au sein du volume de travail, sont évaluées à l'aide de tests statistiques d'ajustement (goodness-of-fit tests). Nous mettons en évidence de manière expérimentale la dégradation de l'indépendance des échantillons relevés sur un tour de brasseur après introduction d'objets dissipatifs faisant paraître un meilleur ajustement des distributions statistiques aux lois de distributions idéales. Cette confusion est la source d'interprétations erronées quant à l'amélioration des propriétés statistiques du champ en *CRBM* en dessous de sa fréquence minimale d'utilisation. Nous apportons également un éclaircissement sur le nombre minimal de positions d'antenne à respecter pour les mesures en *CRBM*.

Dans un second temps, nous mettons en œuvre un protocole expérimental permettant une meilleure compréhension de la variation de la charge en fonction des paramètres physiques ou position spatiale des objets introduits dans la *CRBM*. Cette investigation apporte des réponses sur la façon dont un équipement sous test charge la chambre, et met en évidence la relation entre la charge et la section efficace d'absorption de l'objet au lieu de son volume. Les études scientifiques récentes, préconisant de ne pas dépasser le ratio de 8% du volume total de la chambre pour l'équipement sous test, s'avèrent incomplètes. En effet, le paramètre du volume uniquement est insuffisant pour déterminer la quantité de charge.

Dans un troisième temps, nous présentons une application des mesures en *CRBM* dans un contexte *CEM* (compatibilité électromagnétique) et mesures multiphysiques. Le développement d'un banc de test intégrable à la *CRBM* sans modifier notablement les propriétés statistiques du champ électromagnétique généré, en se basant en partie sur les résultats issus de cette thèse, permet notamment d'adapter celle-ci aux essais multiphysiques répondant aux exigences de qualification d'équipements mécatroniques intégrés dans les véhicules. Nous montrons les résultats de mesures d'immunité rayonnée d'un équipement automobile soumis au stress thermique et l'investigation de l'influence de la température sur l'immunité rayonnée de cet équipement.

Mots-clés :

CEM, chambre réverbérante, charge, lois de distribution, mesures d'immunité rayonnée avec stress thermique.

NAME: Boulzazen

FIRSTNAME: Habib

Thesis title:

Contribution to the development of an EMC test facility using a Mode-Stirred Reverberation Chamber. Design and Integration of a Temperature-controlled Enclosure for Multiphysics Testing.

Abstract:

This thesis deals with the analysis by experimentation of the effect of the load on the statistical properties of the electromagnetic field measured inside the working volume of the Mode-Stirred Reverberation Chamber (*MSRC*), also the development of a new application of the *MSRC* to perform radiated immunity testing in combination of the heat stress and the electromagnetic aggression. At first, we focus on assessing the key calibration parameters in the case of an empty chamber or in the presence of one or more *RF* absorbing objects. Particular attention was reserved to the number of antenna positions chosen for the data measurements. Indeed, the current standards dealing with reverberation chamber measurements provide very little explanation as to the number of required antenna positions, and a minimum of information on the influence of the load on the electromagnetic behavior of the chamber. The statistical distribution functions of field and power measurements inside the working volume are evaluated using statistical goodness-of-fit tests. We show empirically that the independence of samples taken over a stirrer revolution will deteriorates if one or more *RF* absorbing objects are introduced inside the chamber, it could result in an illusory better fitting between the experimental data distributions and the theoretical distributions. This confusion is the source of misinterpretation in the improvement of the statistical properties of the *MSRC* field below its lowest usable frequency (*LUF*). We also provide clarifications on the minimum number of antenna positions to perform measurements in a *MSRC*.

In a second time, we implement an experimental protocol allowing a better understanding of the load level variation based on physical parameters and spatial position of absorbing objects introduced inside a *MSRC*. This investigation provides answers on how equipment under test loads a chamber, and highlights the relationship between the load level and the absorption cross section of the object instead of its volume. In fact, recent scientific studies having recommended not exceeding the ratio of 8% of the total volume of the chamber for the equipment under test seem to be incomplete. Indeed, the only parameter of the volume is insufficient to determine the level of load.

Finally, we present an application of *EMC* measurements using the *MSRC* in an *EMC* context and multiphysical measurements. The development of an *EMC-Thermal stress* test bench to be integrated to the *MSRC* without changing its electromagnetic behavior, based in part on the results of this thesis, allows adapting it to meet the testing requirements of multiphysical characterization of automotive mechatronic equipments. We show the measurements results of radiated immunity of automotive equipment subject to heat stress and investigating the influence of temperature on the radiated immunity of such equipment.

Keywords:

EMC, reverberation chamber, chamber load, statistical distribution, radiated immunity measurements and heat stress.

Remerciements

Les années de thèse que j'ai passées à l'IRSEEM m'ont permis de faire la connaissance et de côtoyer de nombreuses personnes que je tiens à remercier. Tout d'abord, merci à M. Belahcène Mazari, ex-directeur de l'IRSEEM, et M. Eric Durieux nouveau Directeur de l'ESIGELEC et de l'IRSEEM pour leurs accueils au laboratoire, et la confiance qu'ils m'ont accordée dans la réalisation de cette thèse. Je remercie également Mme. Anne Louis Responsable du pôle Electronique et Systèmes et de la formation doctorale pour son accueil et son accompagnement tout au long de cette thèse. Je tiens également à les remercier de poursuivre encore aujourd'hui cette marque de confiance en m'intégrant en qualité d'Ingénieur de Recherche au sein de l'ESIGELEC-IRSEEM.

Ensuite, je remercie M. Alain Reineix, Professeur à l'université de Limoges, de m'avoir accompagné pendant ses trois années en tant que Directeur de thèse, et d'avoir mis à disposition son savoir et sa longue expérience durant toutes les étapes de la thèse malgré l'éloignement géographique. Je lui témoigne ici ma gratitude.

Mes profonds remerciement vont évidemment à M. François Fouquet de m'avoir confié ce projet de thèse, pour sa grande disponibilité tout au long de ce travail, pour ses qualités scientifiques, humaines et surtout sa qualité d'encadrement, tout cela a fait de cette aventure un vrai plaisir. Je qualifie cette expérience à côté de François comme excellente, il m'a permis d'exprimer mes propres capacités et en toute autonomie dans la réalisation de ce travail de longue haleine, tout en m'assurant un suivi régulier et riche en discussions qui ont énormément fait progresser ce projet.

Je tiens également à remercier celles et ceux, enseignants, chercheurs, personnels, doctorants, stagiaires de l'IRSEEM et de l'ESIGELEC, dont je ne pourrai citer tous les noms au risque d'en oublier, qui participent à l'ambiance conviviale qui règne au laboratoire. Par ailleurs, je tiens à remercier spécialement les techniciens de l'IRSEEM M. Christophe Fauconnier, M. Didier Prieur et M. Patrick Aubry pour leur disponibilité et l'aide précieuse qu'ils m'ont fourni pour la réalisation du banc de test ou des mesures en *CRBM*.

Les discussions passionnantes et fructueuses auxquelles j'ai assisté lors des réunions du groupe de travail PICAROS, réunissant les experts académiques et industriels autour de la thématique *CRBM*, ont été un véritable levier pour l'avancement de mes travaux. Aussi, je tiens à remercier tous les membres de ce groupe, et plus particulièrement M. Christophe Lemoine de l'IETR de Rennes pour les multiples échanges que nous avons eus sur les aspects statistiques et pour son aide dans cette partie de la thèse. Mes remerciements vont également à M. Frank Leferink de l'université de Twente (Pays-Bas) pour les discussions passionnantes que nous avons eues lorsque j'ai assisté à ses cours d'excellence sur la *CRBM* à l'Université Polytechnique de Turin en 2008, merci également à M. Flavio Canavero de nous avoir permis d'assister à ces cours.

Mes chaleureux remerciements vont à chaque membre de mon jury, qui a accepté d'examiner mon travail et a fait le déplacement pour assister à ma soutenance de thèse.

Pour terminer, j'adresse mes profondes pensées d'abord à mes parents source de mes réussites grâce à leur soutien indéfectible et leur affection, à mes frères et sœurs pour leurs encouragements continuels, et à mon épouse qui m'a tout partagé dans cette aventure et qui a su radoucir les moments difficiles. Pour eux tous j'exprime ma gratitude.

« De toutes les activités manuelles, l'écriture est sans conteste celle qui apporte le plus d'avantages, dans la mesure où elle met en jeu à la fois la connaissance et le discernement, dans la mesure aussi où elle exige de l'esprit qu'il s'élève depuis les lettres, tracées séparément, jusqu'à la forme des mots que la langue prononce, et de la forme des mots jusqu'à la signification qui leur est propre. L'esprit se transporte ainsi d'un indice à l'autre, et cela d'une façon qui devient bientôt habituelle. C'est de ce trajet perpétuel du signifié au signifiant que l'écriture tire sa puissance, trajet où l'esprit de discernement trouve son véritable accomplissement, source pour l'homme à la fois d'un surcroît d'intelligence et d'un supplément de perplexité »

L'Emir Abd El-Kader

Liste des acronymes

| | |
|------|---|
| ACF | Antenna Calibration Factor (Facteur de calibrage d'antenne) |
| ACS | Absorption Cross Section (Section efficace d'absorption) |
| CA | Chambre Anéchoïque |
| CCF | Chamber Calibration Factor (Facteur de calibrage de la chambre) |
| CEM | Compatibilité Électromagnétique |
| CLF | Chamber Loading Factor (Facteur de charge de la chambre) |
| CRBM | Chambre Réverbérante à Brassage de Modes |
| EM | Électromagnétique |
| EST | Équipement Sous Test |
| IEM | Interférences Electromagnétiques |
| IL | Insertion Loss (Perte d'insertion) |
| LUF | Lowest Usable Frequency (fréquence minimale d'utilisation) |
| Q | Facteur de qualité |
| SR | Stirring Ratio (Efficacité de brassage) |

Table des matières

| | |
|---|-------------|
| Remerciements | v |
| Liste des acronymes | vii |
| Table des matières..... | viii |
| | |
| Première partie..... | 1 |
| INTRODUCTION, ÉTAT DE L'ART ET GÉNÉRALITÉS SUR LA CRBM | |
| Chapitre 1 | 3 |
| Introduction générale | |
| 1.1 <i>La compatibilité électromagnétique.....</i> | 3 |
| 1.2 <i>Enjeux et ascension de la mécatronique</i> | 5 |
| 1.3 <i>Objectifs et plan de la thèse</i> | 7 |
| Chapitre 2 | 11 |
| Etat de l'art..... | 11 |
| 2.1 <i>Historique de la CRBM du four à microondes au moyen d'essais CEM</i> | 11 |
| 2.2 <i>Utilisation des statistiques dans l'évaluation du comportement électromagnétique de la CRBM.....</i> | 15 |
| 2.3 <i>Applications de la CRBM.....</i> | 19 |
| 2.4 <i>Sur la CEM et les contraintes thermiques.....</i> | 21 |
| Chapitre 3 | 23 |
| La chambre réverbérante | |
| <i>De l'anéchoïque à la réverbération.....</i> | 23 |
| 3.1 <i>Théorie de la CRBM.....</i> | 26 |
| 3.1.1 <i>Approche déterministe (modale)</i> | 26 |
| 3.1.1.1 <i>Modes dans une cavité idéale</i> | 26 |
| 3.1.1.2 <i>Cas d'une cavité à pertes</i> | 29 |
| 3.1.2 <i>Approche statistique (théorie de Hill).....</i> | 30 |
| 3.2 <i>Fréquence minimale d'utilisation (LUF)</i> | 33 |
| 3.3 <i>Nombre de modes de cavité.....</i> | 33 |
| 3.4 <i>Facteur de qualité</i> | 34 |
| 3.5 <i>Efficacité de brassage</i> | 36 |

| | |
|----------------------|----|
| Deuxième partie..... | 37 |
|----------------------|----|

CONTRIBUTION À UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT DE LA CRBM EN PRÉSENCE D'UNE CHARGE PAR L'ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS STATISTIQUES EMPIRIQUES ET DES MESURES NORMATIVES

| | |
|------------------|----|
| Chapitre 4 | 39 |
|------------------|----|

Étude expérimentale du fonctionnement de la CRBM en présence d'une charge

| | |
|---|-----|
| <i>Introduction</i> | 39 |
| 4.1 <i>Rappel des modèles de la distribution statistique du champ EM pour une CRBM idéale</i> | 40 |
| 4.1.1 Statistiques du champ EM et fonction de densité de probabilité | 40 |
| 4.1.2 Statistiques de l'amplitude d'une composante rectangulaire et du champ total..... | 41 |
| 4.1.3 Statistiques de la puissance reçue | 43 |
| 4.1.4 Modèle statistique idéal versus données empiriques | 43 |
| 4.1.5 Tests d'ajustement aux lois de distribution statistiques | 44 |
| 4.1.5.1 Hypothèses, erreurs et puissance d'un test | 44 |
| 4.1.5.2 Le test de Kolmogorov-Smirnov (<i>KS</i>)..... | 45 |
| 4.1.5.3 Le test de Anderson-Darling (<i>AD</i>) | 45 |
| 4.1.6 Estimateur et valeurs critiques adaptées pour les lois exponentielle et de Rayleigh..... | 46 |
| 4.1.6.1 Estimateur de la <i>loi exponentielle</i> | 46 |
| 4.1.6.2 Estimateur de la <i>loi de Rayleigh</i> | 46 |
| 4.1.6.3 Valeurs critiques adaptées aux lois théoriques régissant la CRBM..... | 47 |
| 4.1.7 Conclusion | 47 |
| 4.2 <i>Application à l'étude de l'effet de la charge sur le comportement EM de la CRBM</i> | 48 |
| 4.2.1 Protocole expérimental | 50 |
| 4.2.2 Influence de la charge et du nombre de positions d'antenne sur les paramètres de calibrage | 55 |
| 4.2.2.1 Evaluation de la puissance reçue | 55 |
| 4.2.2.2 Evaluation du facteur d'étalonnage d'antenne <i>ACF</i> et des pertes d'insertion <i>IL</i> | 57 |
| 4.2.2.3 Evaluation de la charge due aux absorbants | 58 |
| 4.2.2.4 Evaluation du facteur de charge de la chambre <i>CLF</i> | 59 |
| 4.2.2.5 Estimation de la puissance nécessaire pour générer <i>100V/m</i> à partir du <i>CLF</i> | 63 |
| 4.2.2.6 Evaluation du facteur de qualité de la chambre et notion de section efficace d'absorption | 64 |
| 4.2.3 Effet de la charge sur la statistique des mesures en <i>CRBM</i> | 70 |
| 4.2.3.1 Effet sur l'indépendance des échantillons | 70 |
| 4.2.3.2 Evaluation de l'uniformité statistique du champ <i>E</i> par la méthode normative | 79 |
| 4.2.3.3 Evaluation des distributions statistiques du champ <i>E</i> et de la puissance par les tests d'ajustement statistiques..... | 81 |
| 4.2.4 Effet de l'orientation et de la distribution de la charge..... | 86 |
| 4.2.4.1 Chambre chargée avec deux absorbants selon la configuration n°2..... | 87 |
| 4.2.4.2 Chambre chargée avec deux absorbants selon la configuration n° 3..... | 89 |
| 4.2.4.3 Comparaison des résultats des différentes configurations d'absorbants..... | 92 |
| 4.2.5 Discussion des résultats | 99 |
| 4.2.6 Conclusion | 100 |
| 4.3 <i>Conclusion et perspectives</i> | 102 |

| | |
|--|------------|
| Troisième partie | 103 |
| APPLICATION À LA MÉCATRONIQUE : | |
| ÉTUDE DE L'EFFET DU STRESS THERMIQUE SUR L'IMMUNITÉ RAYONNÉE D'ÉQUIPEMENTS AUTOMOBILES DANS UN ENVIRONNEMENT RÉVERBÉRANT | |
| Chapitre 5 | 105 |
| Elaboration et intégration d'une enceinte thermo-régulée dans une CRBM pour des tests d'immunité rayonnée sous contrainte de la température d'équipements automobile. | |
| <i>Introduction</i> | <i>105</i> |
| <i>5.1 Design et validation de l'enceinte thermo-régulée.....</i> | <i>106</i> |
| 5.1.1 Choix des matériaux pour la constitution de l'enceinte thermo-régulée..... | 107 |
| 5.1.1.1 Le Téflon..... | 107 |
| 5.1.1.2 La Laine de Roche..... | 107 |
| 5.1.1.3 Laine de Fibres de Silice | 107 |
| 5.1.1.4 Le polystyrène extrudé..... | 108 |
| 5.1.1.5 Evaluation de la constante diélectrique des matériaux | 108 |
| 5.1.2 Réalisation de l'enceinte thermo-régulée..... | 116 |
| 5.1.3 Mesures pour la validation de l'enceinte thermo-régulée | 119 |
| 5.1.3.1 Uniformité du champ selon le critère normatif | 119 |
| 5.1.3.2 Niveaux de champ électrique dans l'enceinte thermo-régulée | 121 |
| 5.1.4 Effet de l'insertion de l'enceinte thermo-régulée dans la CRBM..... | 129 |
| 5.1.4.1 Exploitation de l'étude sur l'effet de la charge pour la validation du banc de test..... | 130 |
| 5.1.5 Conclusion..... | 134 |
| <i>5.2 Mesure de l'immunité rayonnée d'un équipement automobile sous stress thermique dans une CRBM</i> | <i>135</i> |
| 5.2.1 Caractéristiques de l'équipement sous test | 135 |
| 5.2.2 Protocole expérimental | 136 |
| 5.2.3 Résultats expérimentaux des tests d'immunité rayonnée avec stress thermique | 138 |
| 5.2.3.1 Comparaison entre brassage continu et brassage pas à pas | 140 |
| 5.2.4 Discussion des résultats | 141 |
| 5.2.5 Comparaison aux tests en Chambre Semi-Anéchoïque | 141 |
| 5.2.6 Conclusion et perspectives | 143 |
| <i>5.3 Conclusion</i> | <i>144</i> |
| Conclusion générale | 145 |
| <i>Conclusion et perspectives.....</i> | <i>145</i> |
| <i>Liste des publications de l'auteur.....</i> | <i>148</i> |
| Annexe A..... | 150 |
| Calcul de la section efficace d'absorption moyenne à l'aide des gains en puissance..... | 150 |
| Bibliographie | 154 |
| Liste des figures..... | 166 |
| Liste des tableaux..... | 169 |

Première partie

INTRODUCTION, ÉTAT DE L'ART ET GÉNÉRALITÉS SUR LA CRBM

Chapitre 1

Introduction générale

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 La compatibilité électromagnétique

Nous assistons actuellement à une ère du tout électronique, des communications (téléphones portables, appareils Wifi et Bluetooth...etc.), aux moyens de transport (voitures, trains et avions de plus en plus autonomes et communiquant), aux appareils domestiques (PC, TV, appareils photos, réfrigérateur, four microondes et lave linge gérés par des fonctions électroniques de plus en plus complexes), jusqu'aux greffes du corps humain (cœur artificiel- FIG.1.1, pacemaker...etc.) inventées très récemment. Les circuits électroniques qui gèrent les différents appareils ou équipements énumérés subissent depuis trois décennies une miniaturisation croissante, par souci d'intégration, accompagnée d'une complexification exponentielle de leurs architectures selon les fonctions à générer. Ainsi, ils sont devenus plus rapides avec la montée en fréquence, et consomment moins d'énergie grâce aux faibles tensions de fonctionnement. Dans le domaine de l'automobile, par exemple, la diversité des fonctions électroniques embarquées dans un même véhicule (éclairage, navigation, sécurité, communication, aide à la conduite, confort...etc.) fait que ces équipements électroniques cohabitent dans un même espace confiné qui est l'habitacle ou le compartiment moteur où règnent des contraintes de natures multiphysiques (électromagnétiques (*EM*), thermiques ou mécaniques), nous pouvons dire la même chose pour le cockpit d'un avion avec un degré de complexité supérieur. La montée en fréquence (jusqu'à une centaine de GHz) rend le moindre petit circuit rayonnant ou récepteur un peu comme une antenne. Dans ce cas chaque circuit électronique devient une source de perturbation *EM* pour les équipements voisins, et lui-même une victime des rayonnements *EM* de ces derniers ou de sources de perturbations externes (Radars, foudres...). Les perturbations sont susceptibles de se propager également par conduction à travers les interconnexions et les câbles reliant les équipements entre eux ou à l'alimentation. C'est dans ce contexte qu'est née une discipline nommée Compatibilité Electromagnétique (*CEM*) dont l'objectif est d'étudier et de remédier aux phénomènes provoqués par les perturbations *EM* rayonnées ou conduites allant du simple grésillement d'un récepteur radio au dysfonctionnement, ayant parfois de graves conséquences, d'équipements électroniques se chargeant de fonctions de sécurité.

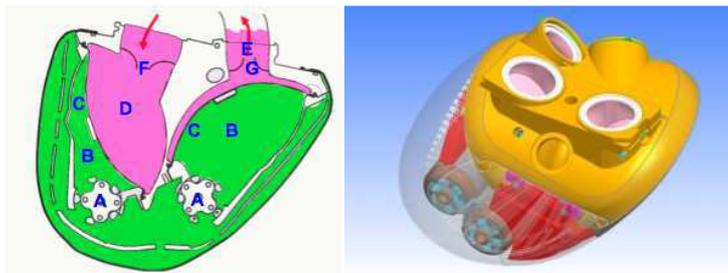


FIG.1.1. Prothèse gérée électroniquement faisant fonction d'un cœur artificiel (Invention 2010 de CARMAT. SAS, France)

Parmi les exemples les plus marquant de cas réels d'interférences *EM* et qui remonte à une période où l'électronique n'était pas aussi élaborée et miniaturisée qu'aujourd'hui, le très grave accident survenu en 1967 aux larges des côtes du Vietnam sur le porte-avions *USS Forrestal* de la marine américaine. Un avion *F-4 Phantom II* en attente de catapultage sur le porte-avions a relâché un tir non contrôlé et non voulu de roquette air-sol qui a atteint un autre avion *A-4 Skyhawk*, ayant fait le plein de kérosène et de munitions, qui se trouvait sur le pont. Une centaine de marins furent tués à cause des explosions qui s'en suivirent ainsi que plusieurs avions subirent des dommages importants. Deux hypothèses sur la cause de l'accident ont été évoquées, la première est l'illumination de l'avion par un radar situé sur le porte-avions ; le signal radar avait interféré avec le système de feu à cause de défauts de terminaisons du blindage de câbles sur l'avion, l'autre hypothèse stipule que la roquette s'était allumée suite à une surtension lors du démarrage du réacteur. Cet événement a contraint la marine US à améliorer les règles CEM-système incluant des mesures spécifiques pour les explosifs commandés électriquement. Un problème similaire sur le système de contrôle de vol d'un appareil F-16 qui a entraîné sa chute lors de son passage à proximité d'un émetteur radio a également été rapporté.

Les praticiens de la *CEM* se doivent donc de chercher les moyens de réduire dans des limites fixées par des normes internationales les perturbations *EM* émises par un équipement électronique ou électrique, mais aussi de renforcer son immunité face aux agressions *EM* externes et cela dès la phase de conception. Ceci implique non seulement la caractérisation électromagnétique au niveau composant jusqu'à l'équipement entier, mais également la connaissance de l'environnement électromagnétique dans lequel évoluera l'équipement en question, or l'environnement réel est souvent complexe, difficile à déterminer de façon rigoureuse et quasi impossible à simuler dans la majorité des cas compte tenu des dimensions importantes (cas d'un cockpit ou d'un habitacle d'automobile). En effet, la simulation reste utile dans la phase de conception à l'échelle du composant ou de systèmes réduits, cependant elle reste très limitée si on désire traiter un problème plus global incluant l'environnement *EM* en vue de la phase de validation du produit.

Les techniques et moyens de mesures *CEM* élaborés ces dernières années sont en général plus adéquats pour la qualification des équipements électroniques. Parmi les moyens d'essais *CEM* les plus utilisés actuellement sont les mesures en champ libre, les mesures en champ proche, la cellule Giga-TEM et la chambre anéchoïque (*CA*). Or, les tests effectués avec la plupart de ces moyens de mesures ne reflètent pas exactement la réalité. En effet, les contraintes *EM*, subies par l'équipement dans son environnement réel, sont souvent aléatoires et ne favorisent pas une direction ou une polarisation donnée, ce qui est le cas avec les moyens cités. Par ailleurs, vouloir agresser un équipement avec des champs forts de quelques centaines de V/m devient très vite hors de coût avec ce type de moyens d'essais ; de plus, à moins d'effectuer un nombre très important de mesures selon toutes les directions possibles d'illumination, ce qui est pénalisant en terme de temps, ce type de tests ne garantis pas de couvrir la direction la plus vulnérable mettant à défaut le fonctionnement de l'équipement. L'approche utilisée pour se conformer le plus possible au cas réel nécessite également une bonne maîtrise de l'incertitude et une quantification de l'erreur due au bruit environnant.

C'est dans ce contexte que le moyen d'essai *CEM* appelé Chambre Réverbérante à Brassage de Modes (*CRBM*) a fait son apparition et a commencé à prendre de l'essor de nos jours dans le milieu industriel ; bien que, paradoxalement, elle ait été introduite dans les années 70s. Ce moyen suscite actuellement tout l'intérêt de la communauté scientifique et des industriels de par son aspect économique. La facilité et la rapidité de mise en œuvre des mesures, son environnement *EM* très proche du cas réel, mais aussi les multiples ouvertures portant sur la recherche scientifique qu'offre cet outil en font un système de mesure adapté aux besoins. Cela ouvre un vaste champ de recherche dans la discipline de la *CEM* dont l'objectif est l'amélioration de la précision, du temps de mesure, et du coût des moyens d'essais utilisés dans la qualification des produits électroniques. Cette thèse traitera donc principalement de la chambre réverbérante à brassage de modes pour une application pour des mesures multiphysiques (*EM* et *thermiques*) visant à élaborer des tests destinés à la qualification d'équipements mécatroniques du domaine de l'automobile. La mécatronique étant un concept d'ingénierie multidisciplinaire devenu incontournable, nous y avons consacré une brève introduction avec les principaux enjeux dans la section suivante.

1.2 Enjeux et ascension de la mécatronique

Définition

L'évolution fulgurante qu'ont connue les domaines de l'électronique, l'automatique, les technologies de l'information, l'informatique et la mécanique durant les trois dernières décennies a conduit naturellement à l'émergence d'une méthode moderne d'ingénierie de conception appelée *Mécatronique*. Ce concept a été introduit pour la première fois au Japon dans les années 70s par la compagnie *Yaskawa Electric Corporation* [1], le terme *mécatronique* composé de « *méca* » dont l'origine est mécanisme ou mécanique et de « *tronique* » qui vient de « électronique » a été défini comme l'incorporation de l'électronique, de plus en plus et de façon organique dans les mécanismes des produits technologiques développés, pour finalement ne plus distinguer les contours de chaque domaine [2]. Cependant, la définition du terme mécatronique est restée en constante évolution jusqu'à ce jour en raison de la continuelle métamorphose de cette discipline qui est restée vivante au rythme des progrès des différentes sciences. La définition de la mécatronique la plus répondue dans la littérature scientifique est celle donnée par *Harashima, Tomizuka, et Fukada* en 1996 [3], d'après eux c'est : « l'intégration synergétique de l'ingénierie mécanique avec l'électronique et l'intelligence artificielle contrôlée par ordinateur dans la conception et la fabrication de produits et de procédés industriels ».

La mécatronique se place donc à la croisée des sciences de l'ingénieur comme le montre le diagramme de la figure 1.2, elle a trouvé ses applications dans divers domaines commençant d'abord par l'aéronautique et l'aérospatial (ex. Système d'atterrissage autonome), elle s'est ensuite étendue aux transports et à l'automobile (ex. régulateur de vitesse, *ABS Antiblockiersystem*, *ESP Electronic Stability Program* ou *contrôle dynamique de*

stabilité...etc.) et récemment à la médecine (ex. matériel médical ou remplacement d'organes humains).

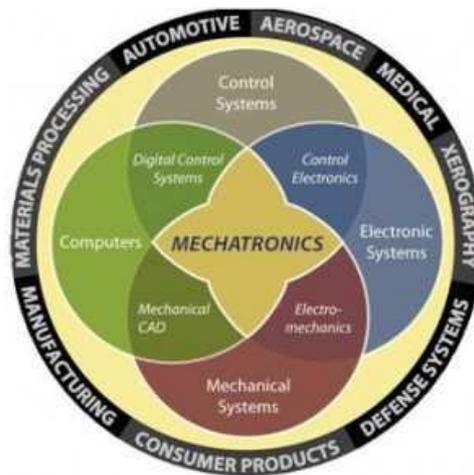


FIG. 1.2. La mécatronique à la croisée des techniques de l'ingénieur (source : <http://www.abmecatronique.com>)

Enjeux et défis de la mécatronique

Le domaine de l'automobile constitue un excellent exemple de l'évolution de la mécatronique, cette dernière est devenue avec le temps une discipline inévitable dans le monde de l'ingénierie des systèmes embarqués. En effet, dans les années 60s mis à part l'autoradio qui était le seul équipement électronique dans un véhicule, tous les autres systèmes étaient purement mécaniques ou électriques (système de charge de la batterie et starter). A la fin des années 70s l'un des premiers systèmes mécatroniques embarqués dans une voiture était le système d'allumage électronique, suivi par l'ABS (système anti blocage de roues), puis le système de contrôle dynamique de la stabilité *ESP* qui a été introduit en milieu des années 90s. De plus en plus d'équipements en relation avec la sécurité (ex. système d'airbag) ou le confort (ex. système mécatronique de climatisation) ont été conçus et intégrés dans les véhicules durant les deux dernières décennies de sorte que la mécatronique est devenue un enjeu stratégique pour l'industrie automobile. Ainsi, la course des industriels vers les économies d'énergie et de coûts, la simplification, l'intégration et la combinaison de fonctionnalités rendant la sécurité et le confort accrus, tout cela rendu possible grâce à la mécatronique, positionne cette dernière comme une réelle valeur ajoutée.

Cependant, les risques de dysfonctionnement des systèmes mécatroniques sont augmentés en raison de l'utilisation simultanée de multiples technologies qui doivent fonctionner dans des conditions parfois extrêmes et des environnements toujours plus perturbés. La possibilité d'interactions entre les causes d'un dysfonctionnement devient également fort probable. Une réflexion sur l'étude d'un système dans sa globalité intégrant son environnement s'impose dans ce cas surtout du point de vue sécurité de fonctionnement et fiabilité et cela depuis le début du cycle de développement. Or, actuellement l'étude de la sûreté de fonctionnement ou de la fiabilité de la partie électronique des systèmes mécatroniques est souvent menée indépendamment des autres contraintes physiques qui règnent dans l'environnement réel. En conséquence, il est difficile de savoir quel est le degré de fiabilité d'un équipement en présence de contraintes conjuguées. Sachant que l'électronique est

principalement sensible aux interférences *EM* mais aussi à la température, il suffit de s'interroger sur l'éventuel impact du stress thermique sur la *CEM* des équipements mécatroniques ou électroniques pour comprendre l'enjeu et le challenge que doivent relever les concepteurs de ces équipements. C'est dans ce contexte que s'inscrit une partie de cette thèse, traitant de mesures *CEM* dans un contexte de contraintes multiphysiques, et qui rentre dans le cadre d'un projet nommé MCEM¹ qui est une partie intégrante du programme d'envergure nationale nommé O2M² supporté par le pôle de compétitivité *MOV'EO* dont l'objectif final est la création d'une plateforme unique destinée à une nouvelle génération d'outils de modélisation et de conception mécatronique.

1.3 Objectifs et plan de la thèse

Avant d'aborder les objectifs et le contenu de cette thèse, il est utile de rappeler le contexte général. Le début de la thèse qui s'est déroulée à l'IRSEEM³ a coïncidé avec la volonté de l'équipe de recherche en *CEM* de développer ses compétences à travers des travaux de recherche et d'exploitation d'un nouveau moyen d'essais suite à l'acquisition récente d'une chambre réverbérante à brassage de mode dotée d'un brasseur de type mécanique. Sachant que la *CRBM* est devenue un moyen d'essais incontournable pour la qualification *CEM* dans l'industrie automobile et aéronautique. Cet outil, qui a été longtemps délaissé à cause des principes statistiques utilisés qui rendent l'interprétation de son fonctionnement difficile, laisse un certain nombre de questions, que nous citeront ci-dessous, ouvertes. Ces questions, restées insuffisamment traitées par les normes internationales ou les travaux de recherche précédents, sont devenues le centre d'intérêt de la recherche scientifique. En effet, la *CRBM* présente plusieurs avantages par rapport aux autres moyens d'essais *CEM* dont les principaux sont l'uniformité et l'isotropie statistiques du champ *EM* généré ainsi que la possibilité d'atteindre des niveaux de champ très élevés sous des puissances relativement faibles. Cependant, il reste plusieurs zones d'ombre à éclaircir notamment ce qui concerne la conservation de l'uniformité et l'isotropie statistiques dans la *CRBM* dans le cas où l'on introduit un objet dissipatif de volume important qui peut être un véhicule ou tout autre matériau plus ou moins absorbant. Certains travaux de recherche [4] parlent d'un ratio de 8% du volume de la *CRBM* à ne pas dépasser en volume de la charge (ou l'*EST*) pour éviter la dérive des propriétés statistiques du champ *EM* dans la chambre. Cette conclusion est confortée par des tests statistiques pratiqués sur des résultats de simulation. Les limites de dispersion des valeurs mesurées du champ *EM* imposées par les normes civiles ou militaires sont également le sujet de nombreuses controverses. Enfin, les normes *CEI 61000-4-21* [5] ou *DO-160D* [6] donnent des directives de mesures servant au calibrage de la *CRBM* qui laissent parfois l'utilisateur perplexe, plus précisément sur le choix du nombre de positions d'antenne pour l'évaluation des paramètres de calibrage avec une incertitude acceptable. Les points importants cités constituent des arguments lesquels justifient la réticence de quelques

¹ Modélisation des Composants Électroniques des Environnements Moteurs

² Outils de Modélisation et de conception Mécatronique

³ Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués

industriels quant à l'utilisation des chambres réverbérantes. Il paraît donc impératif de s'intéresser à ces problématiques.

Dans cette optique, cette thèse a été orientée de façon préalable et voulue vers l'applicatif et l'expérimentation. Elle propose, dans un premier temps, une étude expérimentale conduite en collaboration avec les membres du groupe de travail PICAROS⁴. Cette étude consiste en l'analyse et le traitement d'un grand nombre de mesures en *CRBM* suivant des protocoles déterminés afin de caractériser le comportement *EM* de la chambre en présence d'un ou de plusieurs objets dissipatifs et dans un contexte d'essai d'immunité rayonnée. Elle aborde également une étude sur l'influence du nombre de positions d'antenne sur l'incertitude de l'évaluation des paramètres de calibrage tel que le facteur de charge dans un contexte normatif. Cette partie est une contribution qui tente de répondre, par un raisonnement expérimental, à quelques questions d'actualité citées dans le paragraphe précédent.

Dans un second temps, cette thèse présente une contribution innovante au développement d'une nouvelle application pour la chambre réverbérante. Il s'agit de concevoir un banc de test intégré à la chambre pour réaliser des mesures d'immunité au champ rayonné conjugué à un stress thermique d'équipements automobile (électroniques ou mécatroniques) dans un contexte de contraintes multiphysiques. Le développement et la validation de ce banc de test pour un fonctionnement en environnement réverbérant repose en partie sur l'analyse des résultats issus de l'étude précédente. Cette partie répond aux besoins du projet *MCEM*. Les tests développés permettront à terme de fournir des données expérimentales destinées à la validation de nouveaux modèles qui seront développés par des partenaires du projet.

Ce document est donc naturellement scindé en trois parties, la première partie contient notamment un chapitre dédié à l'état de l'art et l'historique des *CRBM* et un autre chapitre qui aborde brièvement la théorie et quelques principes généraux de la *CRBM*. Ce travail a été entrepris en amont et en aval du déroulement de la thèse dans le but d'appréhender et de prendre en main ce moyen d'essais nouveau pour l'*IRSEEM*.

La deuxième partie, plus consistante, est consacrée, à travers le chapitre 4, à l'étude des distributions statistiques des données expérimentales en utilisant les tests d'ajustement statistiques et l'analyse des données de mesures normatives dans la chambre réverbérante en présence d'une charge dissipative. Cette étude permettra de comprendre son fonctionnement ainsi que l'influence des mesures sur l'interprétation des résultats de calibrage. Un bref rappel des modèles de distributions statistiques des grandeurs mesurées en *CRBM* (champ électrique et puissance) ainsi que les tests d'ajustement aux lois statistiques idéales usuellement appliqués seront d'abord présentés dans ce chapitre, nous montrerons ensuite les résultats d'évaluation de paramètres importants tels que l'*ACF*⁵, *IL*⁶, *CLF*⁷, et le facteur de qualité de la chambre pour différents nombres de positions d'antenne de réception ou nombre d'objets

⁴ Programme d'Inter-Comparaison entre ChAmbres Réverbérantes à brassage de mOdeS

⁵ Antenna Calibration Factor

⁶ Insertion Loss

⁷ Chamber Loading Factor

dissipatifs introduits dans la chambre. Enfin, nous aborderons l'étude de l'effet de la charge sur la distribution statistique des mesures lorsqu'elle est constituée d'un seul volume compact ou distribuée dans l'espace en plusieurs volumes identiques avec différentes orientations.

Enfin, la troisième partie concerne l'étude de l'effet du stress thermique sur l'immunité rayonnée d'équipements automobiles en *CRBM*. Cette étude a fait l'objet d'une réalisation d'un banc de test spécialement dédié à cette application. Cette partie constitue le chapitre 5 qui présente d'abord l'étude d'une enceinte thermo-régulée puis son développement. Cette dernière servira essentiellement à l'élaboration d'un banc de test qui sera intégré à la *CRBM*. L'élaboration de ce banc de test a été effectuée en prenant en compte les spécificités et contraintes de l'environnement réverbérant. L'analyse et les conclusions de la deuxième partie concernent l'étude du comportement *EM* de la *CRBM* en présence d'un objet dissipatif, ainsi que le cahier des charges défini dans le sous-projet *MCEM*. Des tests préliminaires sur un équipement automobile réel sont ensuite présentés afin de valider le banc de test et le protocole expérimental, puis pour tirer les conclusions quant à l'effet de la température sur la *CEM* de l'équipement. Ce travail a été initié dans le cadre du sous-projet *MCEM* (Modélisation des Composants Électroniques des Environnements Moteurs) faisant partie du grand projet collaboratif *O2M* (Outils de conception et de Modélisation Mécatronique) soutenu par les pôles de compétitivité *MOV'EO* (Automobile) et *System@matic* (Systèmes Embarqués). L'objectif final de notre contribution étant de fournir des données expérimentales de tests multiphysiques aux partenaires du projet afin de valider leurs modèles qui vont être intégrés par la suite dans une plateforme unique d'outils de simulation et de conception mécatroniques.

Chapitre 2

Etat de l'Art

Chapitre 2

Etat de l'art

Ce chapitre donne un aperçu de la littérature scientifique citée dans cette thèse essentiellement en relation avec la chambre réverbérante. Une attention particulière est accordée aux publications traitant des problèmes abordés dans nos travaux, à savoir : l'effet de la charge sur les mesures en *CRBM* et l'effet de la température sur la *CEM* des équipements électroniques. Cet aperçu est loin d'être exhaustif, mais cite les publications qui ont été jugées les plus pertinentes dans le contexte de cette thèse. Une synthèse sur l'historique de la *CRBM* est donnée au début de ce chapitre, nous avons ensuite fait un rappel des principaux travaux de recherche sur les méthodes statistiques utilisées pour la caractérisation des mesures en *CRBM* et sur les techniques de mesure de l'immunité rayonnée en environnement réverbérant. En fin de chapitre, nous avons abordé les différentes applications de la *CRBM* dont les plus récentes.

2.1 Historique de la *CRBM* du four à microondes au moyen d'essais *CEM*

Les prémices de l'utilisation de la chambre réverbérante ont commencé dès 1947 suite au dépôt d'un brevet intitulé « *Heating apparatus* » par *W.H. Hall* de la compagnie *Raytheon Co.* [7]. Cette invention qui n'était autre que le four à microondes était à l'origine de l'intérêt croissant porté par de nombreux chercheurs sur la résolution du problème fondamental de l'uniformité de la distribution de l'énergie à l'intérieur d'une cavité métallique. La chambre réverbérante ayant à juste titre le même principe de fonctionnement que le four à microondes, la différence réside dans les dimensions de la cavité blindée, la fréquence de fonctionnement et l'intensité du champ *EM* généré. Ainsi, l'homogénéité de la cuisson des aliments recherchée avec un four microondes est par analogie similaire à l'uniformité des champs *EM* souhaitée dans une chambre réverbérante pour illuminer de façon homogène et isotrope un équipement électronique.

Paradoxalement, l'intérêt porté aux cavités blindées pour en faire des moyens d'essais *CEM* n'a émergé qu'à la fin des années 60s et début des années 70s. Il y a d'abord eu les travaux de *Mendes* [8] (1968) sur les mesures des champs *EM* dans les cavités blindées. Les premières applications pour la *CEM* étaient réservées au domaine militaire comme en témoigne la norme *MIL-STD 1377 (NAVY)* publiée en 1971 qui spécifie les méthodes de test environnemental d'efficacité de blindage des systèmes d'armement en utilisant des cavités blindées. Le rapport écrit en 1972 par *Crawford* [9] du *National Bureau of Standards (NBS)* aux États-Unis (actuellement : *National Institute of Standards and Technology NIST*) fait partie des premières références couvrant l'utilisation de cavités à faible facteur de qualité pour les mesures du champ *EM*. D'autres travaux ont suivi en 1976 et 1978 aux États-Unis mais également en

Europe, notamment ceux des italiens *Corona, Latmiral et al* [10], abordant la mesure de puissance rayonnée dans la gamme des microondes dans une cavité réverbérante, et ceux de *Bean et Hall* [11] traitant des mesures de susceptibilité *EM* en chambre réverbérante. *Corona (et al.)* a publié un article en 1980 portant sur l'analyse du comportement d'une chambre réverbérante à géométrie variable [12]. Durant les années 80s le *NBS* (actuellement *NIST*) seul était à la pointe de la recherche sur l'exploitation et le fonctionnement de la chambre réverbérante, notamment avec les travaux de *Liu et Chang* [13] (1983) et ceux de *Crawford et Koepke* (1984 [14], et 1986 [15,16]). Les années 90s ont enregistré une croissance exponentielle des publications sur la *CRBM* avec l'apparition de nouveaux modèles statistiques pour l'analyse et la caractérisation des champs *EM* générés dans la cavité. Nous citons la publication de *Dunn* (1990 [17]) sur l'analyse du champ *EM* en *CRBM*, et les travaux de *Kostas et Boverie*, publiés en 1991, qui proposent un modèle statistique pour les mesures en chambre réverbérante. En 1998, il y a eu la fameuse note technique publiée par *Hill* au *NIST* [18] mettant en œuvre une théorie des *CRBM* basée sur le modèle d'ondes planes pour décrire le champ généré dans la *CRBM* comme un phénomène stochastique. Ce modèle a été repris dans de nombreuses publications y compris les plus récentes.

Au milieu des années 90s, les aspects électromagnétiques et physiques de la *CRBM* ont atteint un degré de maturité qui a permis son utilisation comme moyen d'essais *CEM* fiable capable de concurrencer les autres moyens d'essais tel que la chambre anéchoïque. Auparavant, l'utilisation de la *CRBM* était réservée au domaine militaire et à quelques laboratoires qui étaient à la pointe dans ce domaine. Toutefois, chaque partie avait ses propres critères et exigences de tests et se basait sur son unique expérience ou travaux de recherche internes. La démocratisation de la *CRBM* aux industries civiles, aéronautique et automobile, nécessitait un effort de normalisation afin d'unifier et d'uniformiser les critères de tests *CEM* appliqués ainsi que la procédure de calibrage. C'est la *Commission Electrotechnique Internationale (CEI)* qui s'est attelée à cette tâche colossale en s'appuyant sur les publications de spécialistes tels que *Crawford, Koepke* [15,16], et *Hill* [19,20,21,18,22], et sur les travaux de recherche de *Hatfield* [23,24,25], *Freyer* [26,27], *Ladbury* [28,29], *Lundén, Bäckström* [30], et *Arnaut* [31,32].

Le projet d'élaboration de la première norme civile dédiée aux *CRBMs* a été lancé en 1994 conjointement par les comités nationaux *CISPR*⁸ et *TC77B Joint Task Force (JTF)* faisant partie de la *CEI*. Cette norme a pris forme en 2001 avant la phase finale d'approbation par la *CEI* sous la nomination *CEI 61000-4-21*. Elle décrit les procédures et techniques liées aux essais d'émission ou d'immunité en *CRBM* ainsi que ses applications. Après les dernières modifications recommandées, une première édition a été votée et publiée en août 2003 [5]. La publication de la deuxième édition de cette norme est prévue en février 2011 [33], elle comportera quelques modifications dans la nomination des paramètres de calibrage tels que *CVF (Chamber Validation Factor)* au lieu de *CCF (Chamber Calibration Factor)* actuellement, et *AVF (Antenna Validation Factor)* qui remplacera *ACF (Antenna Calibration Factor)*. Elle recommande également de vérifier la linéarité et le bruit des capteurs ou sondes

⁸ COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES (sous-comité A)

en raison de la gamme dynamique des variations de champ *EM* en *CRBM* plus large que celle en *CA*. D'autres modifications qui prennent en compte les résultats de recherche les plus récents (2003 à 2008) y sont incluses. Nous pouvons citer les travaux de *Arnaut* [34,35,36,37,38,39,40], *Hill* [41], *Krauthäuser (et al.)* [42,43], et *Garbe (et al.)* [44].

Quelques essais en *CRBM* ont également été traités dans d'autres normes civiles et militaires, notamment la norme *CEI 61726* publiée en 1999 [45]. Cette dernière a été rarement citée dans les publications sur la *CRBM*, et la norme *RTCA DO-160 D/E/F* [6] qui aborde les spécifications des essais en chambre réverbérante d'équipements de l'aéronautique. Dans le domaine militaire la norme *MIL STD 461 E/F* établit les exigences pour le contrôle des interférences électromagnétiques caractéristiques des sous-systèmes et équipements destinés aux applications militaires et aérospatiales. Il peut y avoir des différences importantes d'une norme à une autre, que ce soit au niveau des configurations de mesures (nombre de positions d'antenne, nombre de positions angulaires du brasseur servant au calibrage), mais également des niveaux d'exigence d'uniformité du champ *EM* ou des niveaux d'agression.

Les procédés de calibrage du champ ainsi que les protocoles d'essais d'immunité ou d'émissivité électromagnétique sont détaillés dans les normes citées. Cependant, les textes normatifs ne définissent pas de façon précise la limite de validité des essais lorsque l'environnement électromagnétique de la cavité devient complexe : par exemple l'insertion d'un équipement de grand volume possédant des propriétés d'absorption électromagnétique. La limite de la charge admissible étant fixée à un *ACF*⁹ de *12dB* dans les normes *DO160 D* [6] et *CEI 61000-4-21* [5], or l'influence d'un objet dissipatif, induisant une charge quelconque, sur la distribution statistique du champ *EM* ne figure pas dans ces normes.

Différents types de brassage de modes

Le principe de la chambre réverbérante repose sur le brassage de modes permettant d'obtenir les caractéristiques souhaitées du champ *EM* (uniformité, homogénéité). Ce brassage est généralement réalisé à l'aide d'un certain nombre de structures métalliques appelées brasseurs de modes disposés à l'intérieur de l'enceinte blindée. Un brasseur mécanique classique est en général constitué de pâles métalliques fixées sur un axe de rotation (FIG. 2.1). Le brasseur en mouvement fait varier les conditions aux limites dans la cavité modifiant la structure spatiale des modes. Un brassage efficace est conditionné par une modification conséquente de cette structure modale de façon à créer une cavité surdimensionnée. Dans ces conditions, la diversité des environnements *EM*, créés à chaque changement des conditions aux limites, confère au champ *EM* une nature stochastique, bien que l'analyse statistique des champs sur un tour de brasseur (en brassage pas à pas) soit déterministe. Depuis quelques années différentes approches et tentatives pour se démarquer du brassage traditionnel ont été proposées. Parmi les exemples trouvés dans la littérature, on a : le brassage fréquentiel (ou électronique) [46,47] , l'utilisation de diffuseurs (FIG. 2.2) [48,49,50] ou de fils [51,52], le brassage combiné en utilisant des pâles métalliques et des parois ondulées [53], la chambre réverbérante à paroi mobile [54], la chambre réverbérante intrinsèque (FIG. 2.3) [55] et la

⁹ Antenna Calibration Factor

chambre réverbérante intrinsèque à parois vibrantes (*Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber VIRC*) [56,57,58] (FIG. 2.4). L'utilisation de plusieurs brasseurs (sur deux parois par exemple) a été également expérimentée.

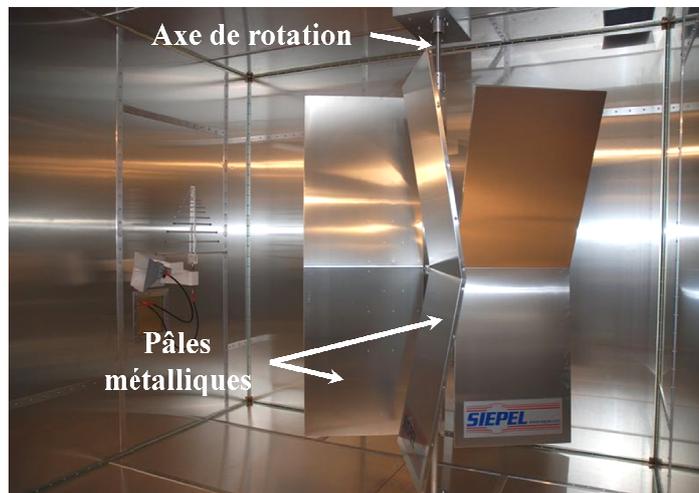


FIG. 2.1. Brasseur de modes mécanique (CRBM de l'IRSEEM)

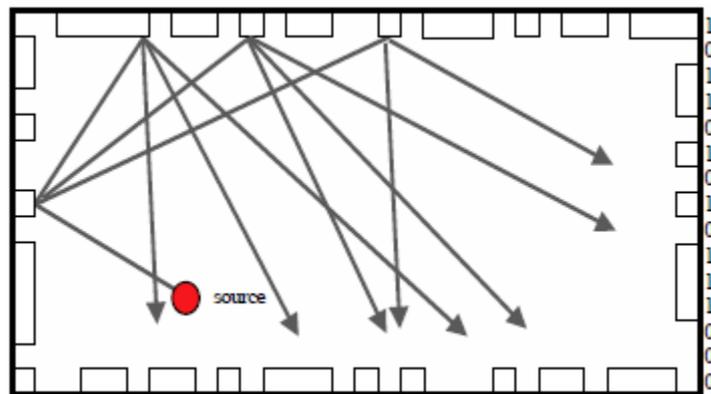


FIG. 2.2. Brassage de modes par diffuseurs de Schroeder [49,50]

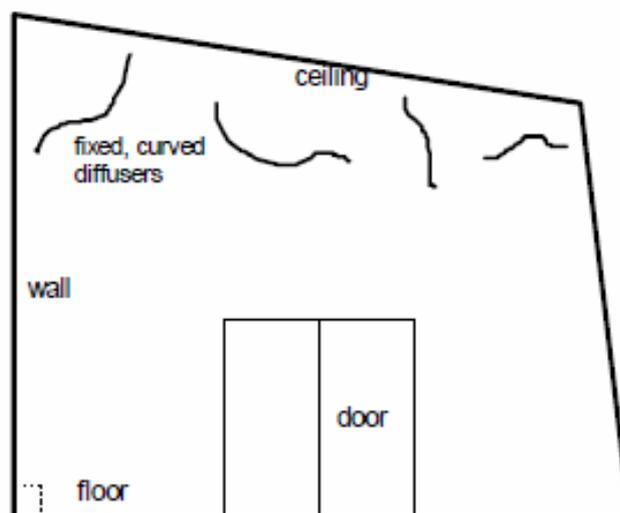


FIG. 2.3. Chambre réverbérante intrinsèque [55]



FIG. 2.4. Chambre réverbérante intrinsèque à parois vibrantes (VIRC) [59]

2.2 Utilisation des statistiques dans l'évaluation du comportement électromagnétique de la CRBM

L'utilisation des statistiques dans la caractérisation des champs EM n'est pas très récente. En effet, les statistiques ont été utilisées par exemple pour décrire les phénomènes de diffraction sur des surfaces rugueuses dont la rugosité est aléatoire, et les phénomènes de propagation des champs EM dans les milieux aléatoires [60]. Nous pouvons également citer l'utilisation des techniques statistiques pour l'aide à la caractérisation de la surface efficace radar (*Radar Cross-section*) d'objets complexes de grandes dimensions [61]. Concernant les champs EM dans une cavité, c'est plutôt l'analyse déterministe qui est la plus répandue et la plus diversifiée dans la littérature scientifique.

Les techniques d'analyse de l'électrodynamique quantique ont d'abord été utilisées dès 1963 pour démontrer que la distribution des composantes rectangulaires du champ électrique $E(r,t)$ dans une cavité parallélépipédique suit une *loi normale* (ou *gaussienne*) dans les fréquences de la bande visible du spectre EM [62]. L'avènement de la chambre réverbérante pour les essais de compatibilité et d'interférences électromagnétiques a accentué la nécessité d'utiliser d'autres méthodes d'analyse, notamment les méthodes statistiques, pour étudier les champs EM dans les cavités complexes. En effet, la cavité parallélépipédique formant la CRBM est rendu complexe par l'incorporation d'un objet métallique électriquement large et de forme irrégulière appelé *brasseur de modes*, des antennes émettrice et réceptrice, des câbles et de l'EST. Cette complexité qui a rendu le traitement numérique extrêmement chronophage et sollicitant énormément de ressources informatiques a fini par dissuader un bon nombre de tentatives de simulations dans le domaine fréquentiel (*méthode des éléments finis*, *méthode des moments*) ou temporel (*TLM*, *FDTD*). Par ailleurs, l'analyse des mesures relevées dans plusieurs chambres réverbérantes, de conception différente et sous des conditions d'essai diverses et variées, indique que les variations des valeurs moyennes normalisées ne sont pas significatives d'une fréquence à une autre et d'une chambre à une autre [15]. L'idée d'une théorie ou d'un modèle statistique régissant un grand nombre de cavités complexes sur une large gamme de fréquences est alors née offrant une alternative au traitement numérique.

Le résultat qui a significativement poussé vers le développement des modèles statistiques pour les cavités blindées complexes fut exposé en 1988 [63] et publié en 1993 [64] par Price (et al.). Kostas et Boverie ont présenté un modèle statistique pour la CRBM en 1991 [65]. Ils sont partis de l'hypothèse d'une cavité surdimensionnée (i.e. un grand nombre de modes est simultanément excité dans la cavité) et ont pris les amplitudes des modes comme des variables aléatoires. Ainsi, ils ont démontré par le biais du *théorème de la limite centrale* que la phase et le module d'une composante rectangulaire du champ suivent les *distributions uniforme et normale* (gaussienne) respectivement. Il en résulte que l'amplitude de la composante rectangulaire du champ est distribuée selon la *loi de Rayleigh*. Ainsi, l'amplitude élevée au carré de la composante rectangulaire du champ est distribuée selon la *loi exponentielle*. Ces résultats ont été validés via l'application du test d'ajustement statistique du *khi-deux*. Néanmoins, ce modèle simplifié ne permet pas une description complète des fonctions de distributions en incluant les coefficients de corrélation, pourtant celui-ci est bien adapté aux cavités surmodées.

En 1993, Lehman [66] présenta une formulation de la théorie statistique des champs EM dans une cavité complexe qui donne les distributions statistiques ainsi que les fonctions de corrélation des variables de champ. Cette théorie s'appuie sur plusieurs hypothèses dont celle d'une cavité surdimensionnée ; elle tient compte également de la complexité d'une cavité à pertes électriquement large et contenant des sources de champ. Or, l'évaluation de l'incertitude due à cette hypothèse est restée un champ ouvert car elle n'est jamais vérifiée dans la réalité.

Le modèle statistique du champ basé sur les ondes planes, proposé par Hill en 1998 [22], a marqué un tournant dans l'analyse des lois de distributions statistiques des mesures en CRBM. Ce modèle a été repris ultérieurement dans de nombreuses publications parmi lesquelles [35,67]. Dans son modèle, Hill a proposé des lois de distributions (*lois de Rayleigh* et *loi exponentielle*) qui s'accommodent parfaitement à un modèle de cavité réverbérante idéale. Seulement, d'autres travaux de recherche ont signalé des écarts entre les données empiriques relevées dans une CRBM réelle et le modèle idéal de Hill, spécifiquement dans les basses fréquences où le nombre de modes excités n'est pas suffisant. Nous pouvons citer les travaux de Corona [68], Bunting [69], Orjubin [70] et Lemoine [71] qui ont proposés d'autres lois de distribution alternatives, comme la loi de Weibull ou de Rice, pour l'évaluation de la réponse statistique de la CRBM dans les conditions de sous réverbération. Corona et Orjubin ont utilisé des techniques numériques, et Lemoine des techniques statistiques via des *tests d'ajustement* adaptés (*goodness-of-fit tests*). Nous avons donc retenu l'utilisation des tests statistiques d'ajustement usuellement appliqués pour l'analyse des données en CRBM afin d'étudier expérimentalement le comportement EM de la chambre de l'IRSEEM en présence d'objets absorbants. En effet, ces tests s'adaptent très bien à l'analyse d'un très grand nombre de données issues des mesures en CRBM, ce qui est le cas dans notre étude. Ils donnent également une meilleure perception de la dégradation de l'uniformité statistique du champ EM lorsque la chambre est chargée. L'application de tests d'ajustement différents (test de Kolmogorov-Smirnov et test de Anderson-Darling) donne également une idée sur la puissance de chaque test (i.e. sa capacité de rejeter l'hypothèse nulle lorsqu'elle est fautive ;

Voir chapitre 4, section 4.1.5.1), mais aussi une meilleure comparaison avec les résultats du protocole normatif.

Chargement de la CRBM

La multiplication des applications en *CRBM*, durant ces dix dernières années, a fait que des objets divers aussi bien par leur taille que par leur composition y sont testés soit en immunité, soit en émission électromagnétiques. Ces objets engendrent parfois une absorption supplémentaire d'énergie non négligeable, il apparaît donc nécessaire de prendre en compte l'impact de l'*EST* sur les propriétés de la *CRBM*. D'autres techniques de mesure nécessitent également l'introduction d'objets dissipatifs (absorbants *RF*) dans la chambre afin de recréer un environnement de propagation électromagnétique similaire à la réalité (FIG. 2.5). La communauté des *CRBM* s'est donc intéressée à l'étude de l'impact de la charge sur les propriétés de réverbération de la *CRBM*.



FIG. 2.5. Simulation d'environnements de propagation spécifiques en *CRBM* (Holloway, NIST)

Dans son papier, publié en 2001 titré « *Reverberating chambers and absorbers* » [72], Corona (*et al.*) a démontré par comparaison des fonctions de densité de probabilité empirique et théorique de données de champ *EM*, dans le cas d'une chambre chargée par plusieurs absorbants, que c'est la position des absorbants plutôt que leurs nombre qui joue un rôle critique sur la distribution du champ. Il conclut également que la présence des absorbants dans la *CRBM* pourrait générer différentes structures de champ qui seraient avantageuses dans certaines applications appropriées. D'autres publications traitant le même thème ont suivi en 2004, comme celle de Lammers [73] qui a utilisé un calcul numérique pour montrer la détérioration de l'homogénéité du champ lorsque la chambre est chargée par un ou plusieurs objets dissipatifs positionnés sous de multiples arrangements, ou celle de Baranowski [74] qui a étudié l'impact d'un objet métallique ou absorbant sur la réponse fréquentielle de la *CRBM* dans les premiers modes de cavité.

Petit [75] (2002) s'est également intéressé à l'influence d'un objet métallique parfaitement conducteur sur les résultats statistiques dans une *CRBM* en utilisant la simulation numérique en utilisant la méthode *FDTD* et le test statistique de *Kolmogorov-Smirnov*. Son étude montre que la présence de cet objet dégrade le taux de réussite au test de Kolmogorov-Smirnov basé sur la comparaison des fonctions de répartition empiriques et théoriques. Lorsque cet objet est de dimensions relativement importantes, il perturbe fortement la répartition du champ particulièrement dans son voisinage proche où sont relevées les valeurs et dans toute la chambre généralement. Or, cette étude n'a pas considéré le cas de plusieurs objets répartis dans le volume de travail de la *CRBM*, ni le changement de position de l'objet sous test. Les résultats issus de modélisation et de traitement numérique pourraient donc ne pas prendre en compte avec précision toute la complexité d'une *CRBM* réelle en présence d'un ou de plusieurs objets dissipatifs.

D'autres auteurs se sont intéressés à la possibilité d'exploiter la *CRBM* en dessous de sa fréquence minimale d'utilisation. En effet dans ce cas, le champ n'est plus uniforme, du fait du nombre insuffisant de modes excités. Des publications ont montré qu'un brassage plus efficace offrant un grand nombre d'échantillons indépendants permet de repousser la limite de fonctionnement de la chambre en deçà de la *LUF* [76,77]. Ainsi, *Pocai* [78] a démontré que le fait d'apporter une charge supplémentaire dans la cavité afin de baisser le facteur de qualité Q favorise le recouvrement modale et repousse la *LUF* vers les basses fréquences. Cette notion n'est pas facile à maîtriser, car l'augmentation des pertes produit l'élargissement de la bande de cohérence.

Nous citons dans ce qui suit les publications les plus récentes s'intéressant à l'effet de la charge sur le comportement des champs en *CRBM*. En 2008, Bo Zhang (*et al.*) a présenté dans sa publication [79] les résultats d'une étude expérimentale portant sur l'effet de la position des antennes réceptrice, émettrice et de l'*EST* sur la charge de la chambre réverbérante lors des mesures de calibrage. Pour ce faire, il s'est basé sur l'observation de l'écart-type normatif (*CEI 61000-4-21*) du champ maximum mesuré dans le volume utile ainsi que sur le facteur de calibrage de la chambre (*CCF*) pour différentes positions d'antennes ou d'*EST*. L'auteur a utilisé uniquement le critère normatif pour évaluer l'uniformité statistique du champ. Dans cette étude l'*EST* a été simulé par une antenne log-périodique placée sur un mat. L'auteur a conclu que la position de l'*EST* ou des antennes dans la chambre affectent très peu l'uniformité statistique du champ mais font varier la valeur du *CCF* en basse fréquence. En revanche, l'uniformité statistique du champ est meilleure en basse fréquence lorsque la chambre est chargée. Ces conclusions sont à prendre avec une grande précaution car les résultats n'ont pas été validés par d'autres méthodes d'évaluation de l'uniformité du champ. À nos yeux, le critère normatif seul est insuffisant, en effet, ce dernier étant plus un compromis qu'un critère rigoureux d'après les publications récentes. Par ailleurs, l'auteur n'a pas vérifié l'uniformité du champ pour d'autres quantités de charge ou d'autres objets plus volumineux. Il est important de vérifier si ces paramètres influencent les résultats. C'est ce que nous nous sommes efforcés d'investiguer dans la deuxième partie de la présente thèse.

Cantalice [80] a récemment publié (2009) un papier portant sur l'effet du positionnement d'un cube métallique de petites dimensions sur l'uniformité statistique du champ dans la *CRBM*. L'étude a été réalisée dans une *CRBM* de petites dimensions ($LUF=800MHz$) à travers l'observation de l'écart-type normatif global du maximum de champ mesuré ou simulé. L'auteur a souligné l'importance de la position de l'objet sous test dans le volume utile dans la dégradation de l'uniformité statistique du champ. Cependant, il a fourni très peu de données de comparaison et n'a pas utilisé de techniques statistiques afin de compléter l'étude par les critères statistiques. Enfin, le calcul numérique effectué ne tiens pas compte de la complexité de la *CRBM* avec ses câbles et ses antennes ou capteurs de champ. L'étude que nous présentons au chapitre 4 de cette thèse traitera, à travers une approche expérimentale, de l'influence d'objets dissipatifs (par leur nombre, leurs volumes, ou leurs positions spatiales) sur la distribution statistique du champ *EM* à l'intérieur de la chambre réverbérante en confrontant les résultats obtenus selon le critère normatif (norme *CEI 61000-4-21*) à ceux obtenus par l'application de tests d'ajustement statistiques.

En juillet 2010, *Coder et Ladbury (et al.)* ont présenté les résultats d'une étude expérimentale très intéressante [81] qui rejoint une partie des conclusions présentées dans cette thèse. L'objectif de leurs travaux était d'explorer le meilleur emplacement d'une même entité d'absorbants *RF* à l'intérieur de la *CRBM* pour lui garantir une efficacité d'absorption maximale dans un contexte de tests nécessitant l'utilisation d'absorbants pour recréer un environnement particulier (comme l'environnement urbain pour les tests sur les équipements de communication sans fils). Les auteurs ont montré que le changement de position d'une même quantité d'absorbants, au sein de la *CRBM*, influençait les résultats de mesure des pertes d'insertion de la chambre, et par la même occasion l'efficacité des absorbants. Toutefois, cette étude ne s'est pas intéressée aux distributions statistiques du champ *EM*.

La seule étude publiée, comparable à celle présentée dans cette thèse, est l'œuvre d'une collaboration entre partenaires du groupe de travail *PICAROS* dont nous sommes membres. Cette étude, présentée par *Lemoine (et al.)* en 2010 [82], porte sur l'effet de la charge sur la statistique des mesures en *CRBM*. Elle a été menée parallèlement à la notre et ne concerne qu'un seul cas de configuration sur la position des absorbants. Les travaux présentés dans la présente thèse apportent des investigations plus poussées sur d'autres configurations expérimentales rendant l'étude de l'effet de la charge plus complète.

2.3 Applications de la *CRBM*

La *CRBM* ne s'est pas contentée d'être un outil de recherche, au contraire, comme nous l'avons déjà souligné, les applications mettant en jeu la *CRBM* se diversifient de plus en plus et concernent des domaines variés comme l'aéronautique, l'automobile et même la biologie (FIG. 2.6). En effet, le comportement isotropique et l'uniformité statistique du champ *EM* dans la *CRBM* trouvent leur utilité dans différentes applications et offrent plusieurs opportunités de tests électromagnétiques allant des télécoms jusqu'aux tests sur la matière vivante.

Les applications les plus courantes de la *CRBM* sont évidemment la mesure de l'efficacité de blindage des matériaux [83] ou de câblages [84], mais aussi la mesure d'immunité rayonnée d'équipements électroniques ou électriques. Nous avons trouvé une large panoplie de publications sur ces applications dans la littérature scientifique, nous nous contentons d'en citer quelques unes à titre d'exemple. *Hatfield* [85] a comparé deux approches de mesures d'efficacité de blindage réalisées en *CRBM* et *Masterson* a utilisé deux chambres réverbérantes imbriquées pour évaluer l'efficacité de blindage de connecteurs pour fibre optique [86]. *Hoad* (et al.) a publié des résultats expérimentaux de tests de susceptibilité *EM* réalisés sur plusieurs ordinateurs placés dans une *CRBM* [87]. *Kim* (et al.) a utilisé la *CRBM* pour l'évaluation des effets d'interférences *EM* sur un microcontrôleur d'ordinateur [88]. *Silfverskiöld* et *Bäckström* (et al.) ont réalisé des mesures de couplage du champ hyperfréquence sur un câble [89] dans une *CRBM* pour le comparer au couplage qui se produit en chambre anéchoïque.

La *CRBM* est également utilisée dans la caractérisation de l'émission rayonnée par des équipements électroniques ou électriques [90]. Par exemple, *Kuriger* (et al.) a utilisé la *CRBM* du *NIST* pour investiguer l'influence du rayonnement indésirable des téléphones portables sur les équipements de navigation et de communication d'un avion [91].

On peut trouver d'autres applications dans le domaine des télécommunications, comme la caractérisation d'antennes [92,93], ou la mesure de diversité de gain [94]. *Holloway* a également utilisé la *CRBM* pour simuler un environnement de type canal de *Rice* afin de tester des appareils de communications sans fil [95].

Enfin, des travaux menés en Italie [96] et en France [97] ont montré l'utilité de la *CRBM* dans l'expérimentation du « *bio-électromagnétisme* », l'exposition de matières vivantes au champ statistiquement uniforme et de polarisation aléatoire, généré dans la *CRBM*, serait en effet équivalente à l'exposition réelle aux champs *EM* dans la nature.

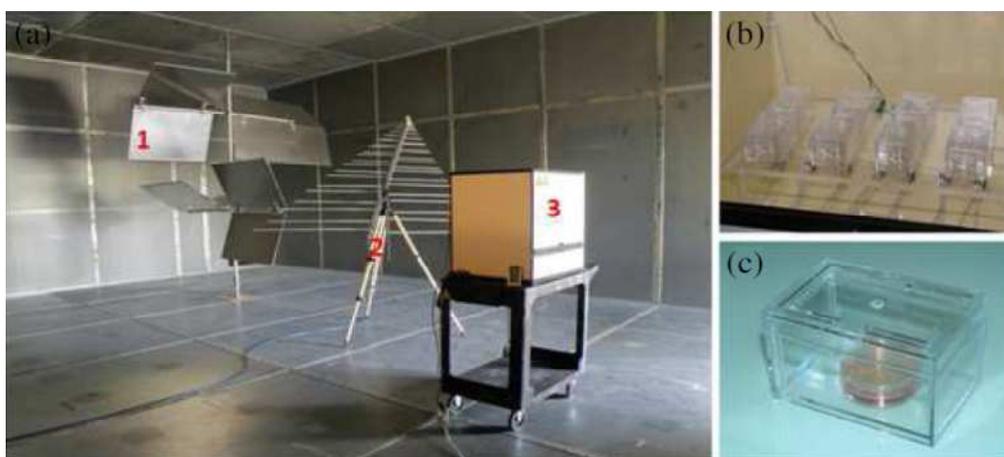


FIG. 2.6. CRBM du LASMEA (a) utilisée pour l'exposition de cultures de cellules biologiques vivantes (b, c) au champ EM

2.4 Sur la CEM et les contraintes thermiques

Très peu d'études portant sur l'étude des effets thermiques pour les problèmes *CEM* ont été réalisées comme en témoigne le faible nombre de publications trouvées dans la littérature, du moins dans le domaine civil. Les informations sur les éventuelles investigations dans le domaine militaire étant très difficiles à obtenir en raison de leur caractère confidentiel. En effet, cette thématique très récente dans le domaine civil est née avec les nouvelles tendances du « tout électrique » dans l'aéronautique comme dans l'automobile. Pourtant, face à ces tendances, où l'électronique, l'électrique et le moteur sont entremêlés, les chercheurs doivent inévitablement se poser la question de l'évaluation de la *CEM* pour chaque système en prenant en compte son environnement thermique. Le défi de la gestion thermique et *CEM* est donc actuellement très pressant, il devient impératif pour les industriels de prendre en compte les phénomènes thermiques et *EM* « **ensemble** » dans la conception de leurs produits. En revanche, pour comprendre l'impacte d'une entité physique sur l'autre il convient de commencer par l'exploration de ses phénomènes conjugués de façon expérimentale. L'étude de l'effet du stress thermique sur la réponse *EM* d'un équipement en est un exemple.

Les premières expérimentations sur l'influence de la température sur l'émission *EM* de composants électroniques sur silicium ont été présentées par *Dienot* [98] en 2005, suivi par *Ben Dhia* en 2007 [99]. *Baffreau* [100] a également présenté des travaux sur l'impact de l'environnement thermique sur le comportement en immunité conduite d'un microcontrôleur *16-bits* en utilisant la technique *DPI* (*Direct Power Injection*), il a montré que, dans certaines conditions, la température pourrait influencer significativement les niveaux d'immunité du microcontrôleur.

Par ailleurs, l'investigation de l'immunité rayonnée d'équipements électroniques en prenant en compte l'effet thermique, **en utilisant une chambre réverbérante**, n'a jamais été expérimentée à notre connaissance, sauf éventuelles études entreprises dans le domaine militaire. Nous avons donc entrepris à l'*IRSEEM* des investigations dans cette optique, mais à l'échelle du système et non du composant, à travers une étude expérimentale associant les mesures en *CRBM* [101,102,103], nous y avons consacré la troisième partie de cette thèse.

Chapitre 3

La chambre réverbérante

Chapitre 3

La chambre réverbérante

De l'anéchoïque à la réverbération

Il y a quelques années de cela, les essais de compatibilité électromagnétique se faisaient principalement en chambre anéchoïque (CA), en procédant (pour les mesures de susceptibilité) par illumination électromagnétique directe avec une onde plane caractérisée par une polarisation et une incidence bien définies (déterministes). L'utilisation d'un plateau tournant, pour une illumination sous différents angles, permet alors de déterminer le niveau d'immunité le plus pénalisant pour le système étudié. Le principe de cet outil étant de simuler une agression ou une émission électromagnétique en espace libre, alors les parois de la cage faradisée sont recouvertes de mousse en polyuréthane chargée en carbone et de forme pyramidale, ou de plaques de ferrite qui jouent le rôle d'absorbants d'ondes électromagnétiques (FIG. 3.1). Ces absorbants servent à éviter l'arrivée par réflexion de toute onde *EM* indésirable hormis l'onde que l'on voudrait appliquer à l'*EST*. De cette façon, les mesures sont maîtrisées avec une grande précision du point de vue polarisation, direction de propagation et intensité du champ *EM* appliqué. Dans la majorité des cas le plancher de la CA, comprenant un plateau tournant sur lequel est posé l'équipement ou tout autre engin à tester (ex. voiture), n'est pas recouvert d'absorbants pour des raisons pratiques, on parle alors de chambre semi-anéchoïque (FIG. 3.1). Dans ce cas, un traitement de la mesure est nécessaire afin de corriger l'effet du trajet indirect causé par la réflexion sur le plancher de l'onde émise.



FIG. 3.1. Tests CEM sur véhicule en chambre semi-anéchoïque de l'IRSEEM

La *CA* a été favorisée pour les tests *CEM* ou *IEM* dans le monde de l'industrie en raison de la maîtrise des conditions d'illumination de l'*EST* ainsi que la reproductibilité des résultats. Mais cela n'empêche qu'elle présente certains inconvénients qui rendent les mesures fastidieuses et coûteuses. En effet, chercher la position la plus vulnérable de l'*EST*, en l'agressant selon plusieurs angles d'incidence, augmente sérieusement le temps d'exécution des essais et demande une mobilisation humaine constante, et si on veut l'agresser avec un champ d'intensité élevée (une centaine de *V/m*) sur une large gamme de fréquences, il faudra des amplificateurs *RF* de forte puissance (plusieurs milliers de *Watts*) couvrant la bande de fréquences désirée. Or, ce type d'amplificateurs a un coût énormément élevé, cela s'ajoute aux coûts de la cavité elle-même souvent très grande à cause des distances *EST*-antenne imposées par les normes (1 à 3 mètres), et de la mousse absorbante nécessaire au tapissage des parois.

Une alternative à la chambre anéchoïque est l'utilisation de la chambre réverbérante à brassage de modes, cette dernière permet d'éviter les inconvénients cités ci-dessus.

La chambre réverbérante à brassage de modes est un moyen d'essais *CEM* qui est constitué d'une enceinte blindée dont les dimensions sont très grandes par rapport à la longueur d'onde, on parle alors de cavité surdimensionnée. La cavité est généralement parallélépipédique et ses parois sont complètement dépourvues d'absorbants (FIG. 3.2) contrairement à la *CA*. Les conditions aux limites imposées par les parois métalliques font installer un régime d'ondes stationnaires où on a des maxima et des minima de champ répartis de façon localisée. Lorsqu'on injecte une onde électromagnétique à l'intérieur de la chambre les premiers modes de résonance apparaissent à certaines fréquences qui dépendent des dimensions de la cavité.



FIG. 3.2. Chambre réverbérante de l'IRSEEM

Pour exploiter la structure modale du champ électromagnétique, généré dans la cavité, on utilise un brasseur de modes, ce dernier est généralement constitué de pâles métalliques fixées sur un axe pivotant (FIG. 3.2). En changeant l'angle du brasseur on applique une modification sur les conditions aux limites qui permettant de décaler les fréquences d'apparition des modes de résonance. Ainsi, dès lors que la densité de modes est suffisamment élevée, la chambre peut entrer en résonance quelque soit la fréquence d'excitation, on parle alors de cavité surdimensionnée. Le régime de cavité surdimensionnée assure la génération de champ à des niveaux élevés par injection de puissances relativement faibles.

Une seconde propriété du brassage de modes réside dans sa faculté de rendre le champ statistiquement isotrope et homogène sur une révolution de brasseur. Ceci signifie que sur une rotation complète du brasseur la valeur maximale du champ électromagnétique est quasiment identique en tous points de la chambre et suivant toutes les directions. Les propriétés apportées par le brasseur sont limitées en basses fréquences du fait de la faible densité de modes de résonance des cavités réverbérantes.

Les performances d'une chambre réverbérante dépendent de plusieurs paramètres dont les dimensions, le facteur de qualité composite Q , le nombre de modes de propagations disponibles, et la fréquence minimale d'utilisation. Les sections suivantes vont aborder le rôle de chaque paramètre. Cependant, la *CRBM* présente certains inconvénients connus qui lui ont valu d'être très peu exploitée par les industriels pendant de longues années. En fait, la polarisation du champ *EM* ainsi que sa distribution, lors de l'insertion de l'*EST*, sont généralement impossibles à évaluer à un instant t et en un point donnée du volume de test. La direction la plus vulnérable de l'*EST*, dans le cas des tests en immunité rayonnée, ou la directivité de ce dernier, en émissivité rayonnée, ne seront jamais connues en fin de compte. En conséquence, la *CRBM* est en général traitée comme un bon moyen de détermination des plages de fréquences d'apparition de défauts de fonctionnement sur l'*EST*. En revanche, ce dernier inconvénient peut devenir un avantage certain de la *CRBM* notamment lorsque l'*EST* est un système complexe dont le diagramme de rayonnement est impossible à évaluer et la direction la plus vulnérable difficilement détectable en *CA*.

Les principales recommandations pour la construction d'une chambre réverbérante qui fonctionne correctement sont données comme suit [5]:

- Le brasseur mécanique doit être exclusivement métallique et doit pouvoir effectuer un mouvement rotatif par pas angulaires sur 360° . Il doit être construit avec une dimension équivalente au minimum à un quart de la plus grande longueur d'onde (i.e. à la plus faible fréquence d'essai). Sa taille devrait être en adéquation avec le volume global de la chambre de façon à faire coïncider une de ses dimensions à 75% de la plus petite dimension de la cavité. Enfin, sa structure doit être asymétrique pour garantir l'indépendance des environnements *EM* créés lors de chaque changement de position.

- La cavité ne doit comporter aucun objet supplémentaire qui présente des propriétés d'absorption EM comme des supports ou plancher en bois susceptibles de dégrader son facteur de qualité.
- La position des antennes émettrice et réceptrice doit être éloignée des parois de la cavité et de tout objet métallique d'une distance minimale correspondant au quart d'onde ($\lambda/4$) à la plus basse fréquence d'essai. Une illumination directe du volume de test ou de l'antenne de réception doit être évitée dans le positionnement de l'antenne émettrice.
- Les dimensions de la chambre doivent être choisies selon la fréquence minimale d'utilisation désirée, et de manière à pouvoir contenir le brasseur, les antennes et l'EST.

3.1 Théorie de la CRBM

La caractérisation des champs EM dans les cavités relève généralement de l'étude modale où il est relativement facile de déterminer analytiquement l'expression des modes de cavité quand celle-ci est de géométrie simple (parallélépipédique ou sphérique). En revanche, cette méthode devient très compliquée et présente des limites quand on est en présence d'une cavité complexe comme la chambre réverbérante. Le mouvement du brasseur introduit dans la cavité engendre une multitude d'environnements électromagnétiques équivalents à une succession de plusieurs cavités aux conditions aux limites différentes. La diversité de ces environnements EM est telle que les valeurs de champ relevées sur un tour de brasseur deviennent de nature stochastique. L'approche statistique vient donc compléter l'étude modale afin de décrire le champ EM généré dans la $CRBM$. Dans cette section, nous allons aborder brièvement les différentes formulations des deux approches modale et statistique usuellement usités dans la description de la théorie de la $CRBM$. Nous donnerons également quelques définitions des paramètres servant à la caractérisation d'une chambre réverbérante.

3.1.1 Approche déterministe (modale)

3.1.1.1 Modes dans une cavité idéale

Considérons une cavité métallique de forme parallélépipédique (FIG. 3.3), de dimensions ($w \times h \times l$) dans le repère orthonormé (Ox, Oy, Oz), et dont les parois sont supposées d'une conductivité infinie. Si un champ EM est excité par une antenne à l'intérieur de cette cavité, dans les conditions de résonance, il se produit des ondes stationnaires et la cavité emmagasine alors une certaine quantité d'énergie EM . Ces ondes stationnaires peuvent être exprimées analytiquement en résolvant les équations de *Maxwell* données sous la forme différentielle suivante :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{B} \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{D} + \vec{J} \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

Où \vec{E} et \vec{H} sont les intensités des champs électrique et magnétique respectivement, \vec{D} et \vec{B} sont les densités de flux électrique et magnétique respectivement. \vec{J} désigne la densité de courant électrique et ρ la densité de charge volumique. Pour une cavité idéale, nous assumons que la densité de charge volumique est nulle ($\rho = 0$), et que le milieu dans la cavité est linéaire, homogène et isotrope de façon à avoir les relations suivantes :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.7)$$

Avec : ϵ est la permittivité diélectrique, μ est la perméabilité magnétique et σ la conductivité.

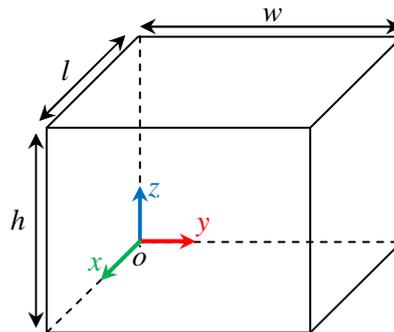


FIG. 3.3. Cavité métallique parallélépipédique

La résolution des équations de *Maxwell*, en respectant les conditions aux limites imposées par les parois métalliques, aboutit à la formulation de deux types de modes *EM*, transverse électrique (TE_{mnp}) et transverse magnétique (TM_{mnp}), fonctions propres de l'opérateur de *Laplace* et solutions de l'équation d'*Helmholtz* (3.8). À ces modes propres correspondent des valeurs propres appelées fréquences de résonance dont l'expression sera explicitée plus loin. Le champ *EM* total à une fréquence f , à un instant t et un point de coordonnées (x, y, z) sera la résultante des modes excités à cette fréquence.

$$\left(\vec{\nabla}^2 + k^2 \right) \begin{cases} \vec{E} \\ \vec{H} \end{cases} = 0 \quad (3.8)$$

Où k est le nombre d'onde, avec $(k^2 = \omega^2 \mu \epsilon)$ et $(\omega = 2\pi f)$ est la pulsation.

L'expression des composantes cartésiennes des champs électrique et magnétique de chaque mode sont alors données ci-dessous où les termes en $(e^{j\omega t})$ correspondant au régime

transitoire sont délibérément omis et la direction de propagation est prise par défaut selon l'axe Oz :

Mode TE_{mnp} :

$$\begin{cases} E_x(x, y, z) = \frac{j\omega\mu}{k_{mn}^2} \left(\frac{n\pi}{h}\right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ E_y(x, y, z) = \frac{j\omega\mu}{k_{mn}^2} \left(\frac{m\pi}{w}\right) H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ E_z(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} H_x(x, y, z) = -\frac{1}{k_{mn}^2} \left(\frac{m\pi}{w}\right) \left(\frac{p\pi}{l}\right) H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ H_y(x, y, z) = -\frac{1}{k_{mn}^2} \left(\frac{n\pi}{h}\right) \left(\frac{p\pi}{l}\right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ H_z(x, y, z) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \end{cases} \quad (3.10)$$

Mode TM_{mnp} :

$$\begin{cases} E_x(x, y, z) = -\frac{1}{k_{mn}^2} \left(\frac{m\pi}{w}\right) \left(\frac{p\pi}{l}\right) E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ E_y(x, y, z) = -\frac{1}{k_{mn}^2} \left(\frac{n\pi}{h}\right) \left(\frac{p\pi}{l}\right) E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ E_z(x, y, z) = E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} H_x(x, y, z) = \frac{j\omega\epsilon}{k_{mn}^2} \left(\frac{n\pi}{h}\right) E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ H_y(x, y, z) = -\frac{j\omega\epsilon}{k_{mn}^2} \left(\frac{m\pi}{w}\right) E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{w}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{h}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \\ H_z(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Les entiers positifs m , n et p correspondent au nombre de demi-longueurs d'onde (ventres et nœuds) de l'onde stationnaire dans les directions Ox , Oy et Oz respectivement. Notons que ces entiers ne peuvent pas être nuls deux à deux, p ne peut prendre la valeur nulle que dans le cas des modes TM_{mnp} , et m ou n ne sont jamais nuls dans le cas des modes TM_{mnp} . La composante E_z est toujours nulle dans le cas des modes TE_{mnp} d'où la nomination « *transverse électrique* » ce qui veut dire que le champ électrique est toujours perpendiculaire

à la direction de propagation. Par contre, pour les modes TM_{mnp} , c'est la composante H_z qui est nulle, dans ce cas c'est le champ magnétique qui est dans toutes les conditions orthogonal à la direction de propagation, d'où l'expression « *transverse magnétique* ». La constante k_{mn} utilisée pour simplifier les expressions des modes est donnée comme suit :

$$k_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2} \quad (3.13)$$

Les fréquences de résonance des modes de la cavité EM idéale sont déterminées par l'équation (3.14) [104]:

$$f_{mnp} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{w}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2} \quad (3.14)$$

Avec : c_0 la célérité de la lumière dans le vide (ou l'air).

Notons que pour des indices m , n et p tous différents de la valeur nulle, une même fréquence de résonance pourrait faire coexister plusieurs modes en même temps, on parlera alors de modes dégénérés. Par ailleurs, l'apparition des modes de résonance dans la cavité idéale se fait à des fréquences discrètes formant un spectre monochromatique comme le montre la figure 3.4 qui représente le calcul des premières fréquences de résonance de la $CRBM$ de l' $IRSEEM$ où les lignes verticales représentent la présence d'un mode, ce qui n'est pas le cas pour une cavité réelle présentant des pertes.

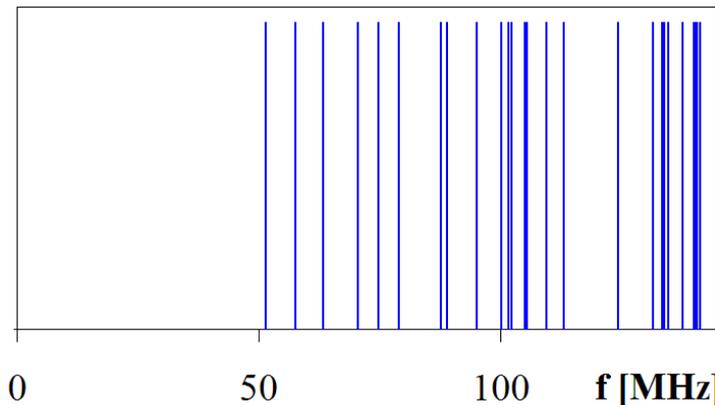


FIG. 3.4. Premières résonances de la CRBM de l'IRSEEM (3,62 m × 3,06 m × 4,80 m)

3.1.1.2 Cas d'une cavité à pertes

Les pertes dans une cavité réelle dont les parois possèdent une conductivité finie engendrent un élargissement du facteur de surtension (ou de qualité) Q_i de chaque mode de résonance (3.15), cela implique qu'il y'a une courbe de résonance autour de la fréquence

propre (f_{0i}) du mode i d'une largeur de Δf_{Q_i} . Dans ce cas, un mode de résonance peut être excité dans une bande de fréquence finie de $f_{0i} \pm (\Delta f_{Q_i}/2)$ [104].

$$Q_i = 2\pi f_{0i} \frac{W_i}{P_i} \quad (3.15)$$

Où W_i et P_i désignent respectivement l'énergie du mode i contenue dans la cavité (énergie réactive) et la puissance dissipée par ce mode.

La relation entre la largeur de bande Δf_{Q_i} et le facteur de surtension Q_i est définie comme suit :

$$\Delta f_{Q_i} = \frac{f_{0i}}{Q_i} \quad (3.16)$$

Nous pouvons constater que le coefficient de surtension Q_i croît avec la fréquence f_{0i} engendrant une diminution de la bande Δf_{Q_i} , dans ce cas l'excitation simultanée de plusieurs modes n'est vérifiée que dans le cas de modes dégénérés. En revanche, si Q_i est faible on aura un élargissement de la bande Δf_{Q_i} provoquant le chevauchement entre les bandes de résonance des modes proches, dans ce cas l'excitation de plusieurs modes à une fréquence donnée est réalisable. Cette propriété est particulièrement intéressante dans le cas du champ généré dans une *CRBM* en dehors de l'application d'un brassage supplémentaire. En effet, l'uniformité du champ dans la *CRBM* est conditionnée par un fonctionnement en régime multimodes, cette condition n'étant pas suffisante, il est donc nécessaire de recourir à la technique de brassage de modes.

3.1.2 Approche statistique (théorie de Hill)

L'approche déterministe, consistant à décrire le champ *EM* sous forme modale, est utile dans la connaissance de paramètres importants tels que le nombre de modes à une fréquence donnée ou la densité modale dans une cavité de géométrie simple. Cependant, cette approche est limitée quand il s'agit d'une cavité complexe comme la chambre réverbérante qui fonctionne en régime multimodes. En effet, la modélisation du champ sur un tour de brasseur reste très difficile en raison des changements des conditions aux limites imposées par le brasseur, en plus des phénomènes de diffraction ou d'absorption engendrés par ce dernier ou tout autre objet inséré dans la cavité (antennes, EST, câbles...). Les changements de la structure du champ d'un pas de brasseur à l'autre sont de nature stochastique en raison de l'asymétrie de ce dernier, des techniques statistiques sont donc nécessaires pour modéliser la distribution du champ EM ou la réponse d'un objet sous test sur un tour de brasseur. Une alternative consiste à supposer que, dans le cas d'une cavité surdimensionnée, le champ relevé sur une révolution de brasseur, en un point donné du volume de test, résulte d'une infinité d'ondes planes pondérées par des phases et des polarisations aléatoires. Cette théorie, inspirée de l'optique géométrique et de la théorie du chaos [105], repose sur le phénomène de réflexion d'une multitude de rayons sur les parois de la cavité dont chacun est assimilé à une onde plane. Elle a été introduite par Hill [22] en 1998 sous le nom « *plane-wave integral representation for fields in reverberation chamber* ».

L'hypothèse adoptée par *Hill* n'est, d'une part, valable que lorsqu'on est en configuration de cavité surmodée, d'autre part, le recouvrement modal occasionné par les pertes dans la chambre permet de décomposer le champ *EM* en modes associés à leur tour à des ondes planes. La richesse du spectre modal, quasi continu dans le cas d'une évolution quadratique de la densité de modes, permet donc de souscrire à l'hypothèse de départ de *Hill* qui admet la continuité du spectre en ondes planes. Dans cette configuration, on aboutit à l'expression donnée par l'équation (3.17) du champ électrique complexe en un point repéré par le vecteur \vec{r} dans un volume sphérique à l'intérieur de la chambre réverbérante (FIG. 3.5).

$$\vec{E}(\vec{r}) = \iint_{4\pi} \vec{F}(\Omega) \exp(j\vec{k}(\Omega) \cdot \vec{r}) d\Omega \quad (3.17)$$

Où Ω est l'angle solide abrégant les angles d'azimut α et d'élévation β déterminant la direction du vecteur d'onde \vec{k} donné par l'équation (3.18), tel que $d\Omega = \sin\alpha d\alpha d\beta$.

$$\vec{k} = -k(\bar{x}\sin\alpha\cos\beta + \bar{y}\sin\alpha\sin\beta + \bar{z}\cos\alpha) \quad (3.18)$$

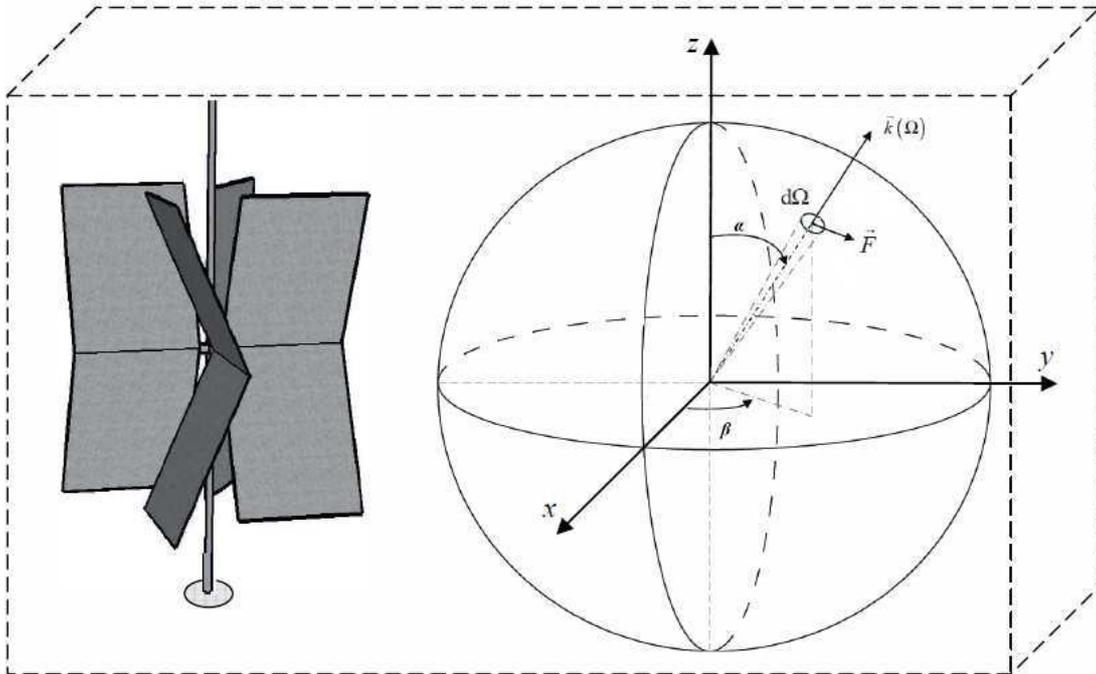


FIG. 3.5. Représentation polaire d'une onde plane

Dans l'équation (3.17) \vec{F} est une fonction aléatoire du spectre angulaire qui décrit le comportement de la polarisation de l'onde (Eq. 3.19) selon le changement de position du brasseur.

$$\vec{F}(\Omega) = \vec{\alpha} F_{\alpha}(\Omega) + \vec{\beta} F_{\beta}(\Omega) \quad (3.19)$$

Où $\vec{\alpha}$ et $\vec{\beta}$ sont les vecteurs unitaires formant un repère orthogonal avec le vecteur \vec{k} , F_{α} et F_{β} sont des nombres complexes tels que :

$$\begin{aligned} F_{\alpha}(\Omega) &= F_{\alpha r}(\Omega) + j F_{\alpha i}(\Omega) \\ F_{\beta}(\Omega) &= F_{\beta r}(\Omega) + j F_{\beta i}(\Omega) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Si l'on considère que la fonction \vec{F} est le résultat d'une multitude de réflexions d'ondes de phases aléatoires, la valeur moyenne des termes F_{α} et F_{β} devrait donc être nulle. En plus, du moment que les ondes se diffractent dans une configuration multi-trajets, dans le cas de la *CRBM*, ce qui fait qu'à chaque réflexion il se passe un changement de phase et plusieurs rotations de polarisation, alors les composantes de la fonction \vec{F} seront sans doute décorréliées. À partir de ce constat, *Hill* a considéré que les parties réelles et imaginaires des composantes de la fonction \vec{F} suivent une loi normale de moyenne nulle ($\mu=0$) et de même écart-type (σ) afin de modéliser au mieux le comportement du champ *EM* idéalement brassé dans la *CRBM*. En effet, les propriétés statistiques des termes $F_{\alpha r}$, $F_{\alpha i}$, $F_{\beta r}$ et $F_{\beta i}$ confèrent à l'ensemble des ondes planes un poids et une variance identiques rendant le champ *EM* isotrope.

Tenant compte de ces conclusions, nous pouvons facilement déduire que, en un point du volume utile, la valeur moyenne du champ électrique $\langle \vec{E}(\vec{r}) \rangle$ devient nulle (3.21), et que sa variance est constante à n'importe quelle position spatiale (3.22). Les mêmes conclusions sont valables pour le champ magnétique $\vec{H}(\vec{r})$ vu que le modèle de *Hill* est soumis à la réciprocité des équations de Maxwell. Ces propriétés correspondent au comportement attendu du champ *EM* statistiquement uniforme et isotrope idéalement brassé dans la *CRBM*.

$$\begin{aligned} \langle \vec{E}(\vec{r}) \rangle &= \vec{0} \\ \langle \vec{H}(\vec{r}) \rangle &= \vec{0} \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \langle |\vec{E}(\vec{r})|^2 \rangle &= 16\pi\sigma^2 \\ \langle |\vec{H}(\vec{r})|^2 \rangle &= \frac{16\pi\sigma^2}{\eta^2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Où η est l'impédance caractéristique du milieu.

Les distributions statistiques des composantes quadratiques du champ seront abordées plus en détails dans le chapitre 4.

3.2 Fréquence minimale d'utilisation (LUF)

Pour satisfaire aux critères statistiques du champ EM dans la $CRBM$, il est essentiel que la densité de modes EM soit suffisante, c'est-à-dire que la quantité de modes de cavité potentiellement excitable dans un intervalle Δf centré sur la fréquence de travail soit suffisamment élevée pour atteindre le recouvrement modal. La fréquence minimale à partir de laquelle la $CRBM$ est opérationnelle est nommée LUF (pour *Lowest Usable Frequency*).

La LUF est définie de plusieurs façons dans les normes [5,6], soit comme la fréquence égale à trois fois la fréquence du mode fondamental de la cavité ($LUF=3f_c$), soit la fréquence à partir de laquelle un minimum de 60 modes sont excités avec une densité modale de 1.5 modes/MHz , ou encore la fréquence minimale à laquelle l'uniformité statistique du champ, relevé sur les huit points extrêmes du volume de test, est vérifiée.

La première fréquence de résonance étant celle du fondamental ($m=1, n=1$ et $p=0$), la LUF de la $CRBM$ de l' $IRSEEM$ est donc évaluée à 200 MHz (*donnée constructeur*).

3.3 Nombre de modes de cavité

Le nombre de modes excités dans une cavité de volume V , à une fréquence donnée correspondant à la longueur d'onde λ , est obtenu par l'approximation de Weyl (3.23) valable pour des fréquences relativement élevées [13] :

$$N(f) = \frac{8 \pi V}{3 \lambda^3} \quad (3.23)$$

A partir de l'équation (3.23) nous pouvons dériver l'expression de la densité de modes suivante :

$$n(f) = \frac{dN}{df} = \frac{8 \pi V f^2}{c_0^3} \quad (3.24)$$

La densité de modes est proportionnelle à la fréquence f , plus la fréquence augmente plus le nombre de modes est élevé, cela est illustré par la figure 3.4 (section 3.1.1.1).

La relation qui donne le nombre de modes de cavité existant dans une bande de fréquence Δf_Q à une fréquence de travail f est donnée comme suit :

$$N(\Delta f_Q) = \frac{8 \pi V f^3}{c_0^3 Q} \quad (3.25)$$

Q étant le facteur de qualité global de la cavité résultant de la contribution des facteurs de qualité de chacun des modes [13], V est le volume de la cavité et c_0 la vitesse de la lumière dans le vide.

Les pertes prises en compte dans l'équation (3.25) ne correspondent qu'à la dissipation d'énergie dans les parois de la cavité. Cependant, les pertes dans le cas de la *CRBM* sont d'origines multiples. Les fuites d'énergie par les ouvertures de traversée de parois, par les jonctions entre les parois de la cavité, et par les joints de la porte d'accès sont à prendre en compte. Il y'a aussi tous les objets supplémentaires insérés dans la cavité comme le brasseur de modes, les antennes, l'équipement sous tests et même les câbles qui engendrent plus ou moins de dissipation d'énergie et affectent en conséquence de façon relative le facteur de qualité global de la chambre comme nous le verrons plus en détails dans les prochaines sections.

Nous avons déjà parlé du rôle du recouvrement modal (chevauchement) dans le bon fonctionnement de la *CRBM*. Si on revient maintenant à l'expression (3.25), on peut noter une proportionnalité du nombre de modes excités avec le volume et inversement avec le facteur de qualité de la cavité, ainsi qu'une augmentation très rapide avec la fréquence. Il est donc possible, à priori, d'augmenter le nombre de modes excités soit en augmentant la fréquence de la source d'émission, soit en diminuant le facteur de qualité par ajout d'éléments dissipatifs, ou encore en augmentant le volume de la cavité.

3.4 Facteur de qualité

Le facteur de qualité Q est souvent utilisé pour caractériser la capacité d'un système à emmagasiner de l'énergie. Dans le cas de la *CRBM*, un Q élevé indique qu'il y'a de faibles pertes dans la chambre permettant une bonne conservation de l'énergie. La caractérisation de la *CRBM* repose en partie sur ce paramètre important puisqu'il permet d'estimer l'intensité moyenne du champ généré dans la chambre avec une certaine puissance injectée, il donne également une estimation de l'efficacité de blindage ainsi que la constante de temps de la chambre. Soit U l'énergie emmagasinée dans une cavité, ω la pulsation de l'onde excitée dans la cavité et P_d la puissance dissipée. L'expression générique du facteur de qualité de la cavité est donc donnée par l'équation (3.26) [106].

$$Q = \frac{\omega U}{P_d} \quad (3.26)$$

Hill [106] a établi une équivalence entre la puissance dissipée dans la cavité (P_d) et la puissance transmise à la cavité (P_t) par une antenne selon le principe de la conservation d'énergie. Alors, dans l'hypothèse où la valeur quadratique moyenne du champ électrique E_0^2 est constante dans tout le volume de la cavité (cas idéal de la *CRBM*), E_0^2 et P_t sont reliés par l'expression (3.27) via le facteur Q .

$$E_0^2 = \frac{QP_t}{\omega \epsilon V} \quad (3.27)$$

Sachant que par la même hypothèse précédente, la densité moyenne d'énergie $\langle W \rangle$ dans la cavité est donnée par l'équation (3.28), et l'énergie emmagasinée est donnée en fonction du volume et de la densité moyenne d'énergie par l'équation (3.29).

$$\langle W \rangle = \varepsilon \cdot E_0^2 \quad (3.28)$$

$$U = V \cdot \langle W \rangle = V \cdot \varepsilon \cdot E_0^2 \quad (3.29)$$

Où V est le volume de la cavité et ε la permittivité du milieu.

De plus, la puissance moyenne reçue dans la cavité, par une antenne supposée adaptée sur toute la gamme de fréquences, est donnée par l'expression suivante [106]:

$$\langle P_r \rangle = \frac{\lambda^2}{8\pi} \frac{E_0^2}{Z} \quad (3.30)$$

Avec λ la longueur d'onde et Z l'impédance d'onde.

L'expression du facteur de qualité global de la chambre, déduite des équations (3.27) et (3.30), est donc donnée par :

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3} \left\langle \frac{P_r}{P_t} \right\rangle \quad (3.31)$$

En pratique on mesure un facteur de qualité moyen de la *CRBM*, sur un tour de brasseur, en utilisant une antenne émettrice et une autre réceptrice pour mesurer les puissances moyennes $\langle P_r \rangle$ et $\langle P_t \rangle$ sur une révolution de brasseur.

L'expression (3.31) englobe les contributions des facteurs de qualité partiels reliés aux différentes sources de dissipation d'énergie *EM* évoquées précédemment. La perte d'énergie totale P_d (3.32) dans la *CRBM* sera donc la somme des pertes liées à la dissipation d'énergie dans les parois P_{d1} , des pertes liées aux fuites d'énergie par les ouvertures et les joints P_{d2} , des pertes dues à l'absorption d'énergie par des objets introduits dans la chambre P_{d3} , et celles dues aux charges dans les antennes P_{d4} .

$$P_d = P_{d1} + P_{d2} + P_{d3} + P_{d4} \quad (3.32)$$

Le facteur de qualité composite (global) de la *CRBM* est donc lié aux facteurs de qualité partiels par l'expression suivante :

$$Q^{-1} = Q_1^{-1} + Q_2^{-1} + Q_3^{-1} + Q_4^{-1} \quad (3.33)$$

Les facteurs de qualité partiels, relatifs à chaque puissance dissipée, sont donnés ci-dessous (3.34) [106]. Ces relations sont données pour une *CRBM* de volume V dont les parois sont supposées d'une conductivité très élevée et d'une épaisseur de peau δ . On suppose également que la chambre contient un ou plusieurs objets dissipatifs caractérisés par leur section efficace d'absorption moyenne (*Absorption Cross Section*) notée $\langle\sigma_a\rangle_\Omega$, et présente des fuites d'énergie par les joints et ouvertures caractérisés par la section efficace de transmission moyenne notée $\langle\sigma_o\rangle_\Omega$. Enfin, les antennes utilisées dans cette chambre ont une efficacité η et un facteur de désadaptation m .

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{\omega U}{P_{d1}} \approx \frac{3V}{2\mu_r \delta A} \\
 Q_2 &= \frac{\omega U}{P_{d2}} = \frac{2\pi V}{\lambda \langle\sigma_a\rangle_\Omega} \\
 Q_3 &= \frac{\omega U}{P_{d3}} = \frac{4\pi V}{\lambda \langle\sigma_t\rangle_\Omega} \\
 Q_4 &= \frac{\omega U}{P_{d4}} = \frac{16\pi^2 V}{m\eta\lambda^3}
 \end{aligned}
 \tag{3.34}$$

3.5 Efficacité de brassage

L'efficacité de brassage ou (*Stirring Ratio* « *SR* » en anglais) est un paramètre qui sert à estimer la capacité des mouvements de brasseur à effectuer des changements dans la distribution du champ *EM* généré dans la *CRBM* en décalant les fréquences de résonance des modes. Il est obtenu en observant les mesures sur une révolution de brasseur de la puissance transmise (gardée constante) par une antenne d'émission et des puissances minimale et maximale reçues par une antenne de réception placées toutes les deux dans la chambre. L'efficacité de brassage (*SR*) est définie généralement par l'expression (3.35) pour un brassage pas à pas, mais il est souvent calculé en décibels à partir de l'équation (3.36).

$$SR = P_{recMax} - P_{recMin}
 \tag{3.35}$$

$$SR_{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{recMax}}{P_{recMin}}\right)
 \tag{3.36}$$

Un brassage efficace correspond à un *SR* élevé, d'une valeur supérieur ou égale à *20dB* [107], qui garanti un taux d'énergie brassée supérieur au taux d'énergie non brassée (*couplage EM direct entre les antennes ou l'objet sous test*) de manière à favoriser l'uniformité statistique du champ sur une révolution de brasseur.

Deuxième partie

CONTRIBUTION À UNE MEILLEURE
CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT DE
LA CRBM EN PRÉSENCE D'UNE CHARGE
PAR L'ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS
STATISTIQUES EMPIRIQUES ET DES
MESURES NORMATIVES

Chapitre 4

Étude expérimentale du fonctionnement de la CRBM en présence d'une charge

Chapitre 4

Étude expérimentale du fonctionnement de la CRBM en présence d'une charge

Introduction

Bien que la théorie des cavités électromagnétiques à géométries déterminées soit largement développée dans la littérature [108,109], la complexité des chambres réverbérantes a permis l'apparition de nombreuses méthodes théoriques servant à la caractérisation électromagnétique de ces dernières. Parmi ces méthodes dites déterministes la méthode modale est la plus répandue concernant la chambre réverbérante [13]. Ces modèles déterministes sont difficilement applicables aux Chambres Réverbérantes. La description complète d'une CRBM avec la résolution des équations de *Maxwell* pour connaître les champs électromagnétiques (*EM*) résultants, à un instant déterminé et une position spatiale donnée, est relativement difficile (selon la fréquence et le calculateur utilisé) en raison de la complexité du brasseur, des antennes et de l'équipement sous test (*EST*). En effet, la diversité d'environnements électromagnétiques créés par la rotation du brasseur, le changement de fréquence, le changement de position des antennes ou de l'*EST*, ou par la combinaison des trois « brassages », nécessite l'utilisation de méthodes statistiques pour prédire la valeur du champ *EM* [65,66]. Cependant, ces méthodes statistiques sont de façon intuitive toujours rattachées et comparées au modèle déterministe. *Hill* [22] a été un pionnier dans l'application d'une théorie stochastique appliquée aux CRBM. Cette théorie, basée sur une représentation intégrale en ondes planes des champs *EM* dans un environnement réverbérant, démontre que la théorie associée aux méthodes statistiques est compatible avec les équations de *Maxwell*.

Les méthodes statistiques utilisées pour une chambre vide (sans l'*EST*) ont permis de bien identifier les lois de distribution des amplitudes des champs *EM* ou de puissance qui garantissent l'uniformité et l'isotropie statistiques de cet environnement *EM* constituant les conditions préalables aux tests *CEM*. Cependant, la présence d'objets supplémentaires dans la CRBM complique d'avantage la situation quant à l'uniformité statistique du champ. En effet, si l'*EST* est composé de matériaux absorbants dans les ondes hyperfréquences, induisant des pertes électromagnétiques importantes ; on dit que la chambre est chargée. Cette charge doit être évaluée avant la réalisation des tests *CEM*, elle ne doit pas dépasser la charge maximale déterminée lors du calibrage chambre chargée [5]. Autrement, les performances de la CRBM se trouveront dégradées [110,111], et les résultats de mesures seront éventuellement biaisés [72]. Par ailleurs, une idée reçue, suite à la publication de quelques travaux récents [79], stipule que l'uniformité statistique du champ est meilleure en basse fréquences lorsque la chambre est chargée. Cependant, ces travaux se basent uniquement sur des critères normatifs et aucune indication n'est donnée concernant la limite de la charge au delà de laquelle l'uniformité du champ n'est pas vérifiée.

Dans cette partie, nous voulons analyser de façon expérimentale le comportement électromagnétique de la *CRBM* en présence d'un ou de plusieurs éléments dissipatifs en utilisant les critères normatifs ainsi que des méthodes statistiques. Une attention particulière sera d'abord accordée au nombre de positions d'antenne de réception pour l'acquisition des données servant au calcul des paramètres d'évaluation de la *CRBM* tel que le facteur de charge de la chambre. Nous allons ensuite appliquer les tests d'ajustement (*goodness-of-fit tests*) sur les mesures expérimentales de champ électrique et de puissance reçue afin de caractériser l'effet de la charge sur leurs distributions statistiques. Ainsi cette étude constituera une évaluation complète de la chambre réverbérante de l'*IRSEEM* en présence d'objets dissipatifs. Un rappel détaillé des modèles statistiques ainsi que des tests d'ajustement usuellement utilisés pour les chambres réverbérantes fera l'objet de la section suivante.

4.1 Rappel des modèles de la distribution statistique du champ EM pour une CRBM idéale

L'interprétation d'une série de mesures consécutives de la puissance ou du champ au sein de la *CRBM* n'est pas une chose facile si l'environnement électromagnétique change à chaque acquisition. Les modèles probabilistes, basés sur l'interprétation statistique de la distribution de ses mesures, viennent donc faciliter la compréhension du fonctionnement de la *CRBM* avec une incertitude acceptable vu la complexité de l'environnement *EM*. Une multitude de publications traitent la question de la distribution du champ *EM* sur une révolution de brasseur dans le volume de test de la *CRBM*, leur point commun est la prise en compte du modèle idéal de *Hill* [22] comme base de départ. Les lois de distribution communément admises par la communauté des *CRBM* pour le champ et la puissance, mesurés dans le volume de test d'une cavité surdimensionnée, seront présentées ci-dessous. Nous aborderont également les tests d'ajustement standards usuellement pratiqués par la communauté des *CRBM* pour vérifier la distribution des mesures expérimentales dans le volume de test.

4.1.1 Statistiques du champ EM et fonction de densité de probabilité

L'approche statistique de *Hill* partant de la décomposition du champ électromagnétique en ondes planes a été abordée dans le troisième chapitre. Dans ce qui suit, nous voulons juste rappeler les différentes formulations conduisant aux lois de distribution déduites du modèle de *Hill* [22]. Les mêmes considérations statistiques ont été constatées sur les champs électrique comme magnétique au sein de la *CRBM* ; par souci de simplicité, nous nous intéresserons qu'au champ électrique dans cette section.

Le champ électrique, en une position spatiale donnée de la CRBM, peut être décomposé en trois composantes cartésiennes E_x , E_y et E_z [66,112] et chaque composante peut être exprimée sous la forme complexe suivante :

$$\begin{aligned} E_x &= E_{xr} + iE_{xi} \\ E_y &= E_{yr} + iE_{yi} \\ E_z &= E_{zr} + iE_{zi} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Selon Hill, les séries de données formées par les parties réelles et imaginaires du champ, observées dans un volume sphérique de la CRBM et sur une rotation complète du brasseur, représentent une large série de variables aléatoires (E_r ou E_i) obéissant à la loi normale (ou gaussienne, de moyenne μ et d'écart type σ) grâce au *théorème de la limite centrale* [113], tel que :

$$\mu = \langle E_{xr} \rangle = \langle E_{yr} \rangle = \langle E_{zr} \rangle = \langle E_{xi} \rangle = \langle E_{yi} \rangle = \langle E_{zi} \rangle = 0 \quad (4.2)$$

$$\sigma^2 = \langle E_{xr}^2 \rangle = \langle E_{yr}^2 \rangle = \langle E_{zr}^2 \rangle = \langle E_{xi}^2 \rangle = \langle E_{yi}^2 \rangle = \langle E_{zi}^2 \rangle = \frac{E_0^2}{6} \quad (4.3)$$

Avec $E_0^2 \equiv \langle |\vec{E}(\vec{r})|^2 \rangle$ est la valeur moyenne au carré du champ électrique.

Du moment qu'il a été démontré que les parties réelle et imaginaire des composantes cartésiennes du champ E sont décorrélées [18] et puisque gaussiennes donc indépendantes [113,114], les équations ci-dessus répondent donc aux prescriptions d'homogénéité et d'isotropie statistiques du champ EM . La fonction de densité de probabilité (ou *PDF* pour *Probability Density function*) pour les parties réelle et imaginaire d'une composante cartésienne est alors exprimée sous la forme générale suivante :

$$f(E_{R\theta}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{E_{R\theta}^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4.4)$$

L'indice R correspond à l'une des coordonnées cartésiennes (x , y , z) et ($\theta = r$ ou i) désigne la partie réelle ou imaginaire d'une composante cartésienne E_R . On peut déduire à partir des équations (4.2), (4.3) et (4.4) les distributions statistiques du module du champ total E_T , du module de la composante E_R et de la puissance P sur une révolution de brasseur.

4.1.2 Statistiques de l'amplitude d'une composante rectangulaire et du champ total

Compte tenu de la section précédente, et afin d'arriver à la loi de distribution statistique de l'amplitude de la composante rectangulaire du champ E_R ou de l'amplitude du champ total E_T , il est plus facile d'exprimer d'abord la loi de distribution des mesures de l'amplitude au carré de la composante rectangulaire du champ.

Il est démontré [114] que si une série de n variables aléatoires indépendantes (X_1, \dots, X_n) suivent toutes la *loi normale* $\mathcal{N}(\mu=0, \sigma)$, de moyenne nulle et d'écart type σ , alors la variable aléatoire $Y_n = \sum_{i=1}^n X_i^2$ suit une loi dite du *Khi-deux* à n degrés de liberté, notée $\chi^2(n)$. Rappelons que l'amplitude au carré de la composante rectangulaire E_R n'est autre que la somme des carrés des parties réelle et imaginaire de E_R :

$$E_R^2 = E_{Rr}^2 + E_{Ri}^2 \quad (4.5)$$

On déduit que E_R^2 est elle-même une variable aléatoire qui suit la loi du $\chi^2(2)$ à deux degrés de liberté, appelée aussi *loi exponentielle*, dont la densité de probabilité est :

$$f(E_R^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left[-\frac{E_R^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.6)$$

De même, l'amplitude au carré du champ électrique total ($E_T^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$) sur un tour de brasseur répond à la loi du $\chi^2(6)$ à six degrés de liberté dont la densité de probabilité est la suivante [113]:

$$f(E_T^2) = \frac{E_T^4}{16\sigma^2} \exp\left[-\frac{E_T^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.7)$$

Par ailleurs, on peut également démontrer [113] que $\sqrt{E_R^2}$ est une variable aléatoire qui suit la loi du *khi* à deux degrés de liberté $\chi(2)$, dite aussi *loi de Rayleigh*, dont la densité de probabilité est donnée par l'équation (4.8), sachant que E_R^2 est une variable aléatoire qui suit la loi du *khi-deux* à deux degrés de liberté (4.6). Par conséquent, la distribution des mesures sur une révolution de brasseur de l'amplitude de la composante rectangulaire du champ électrique E_R suit la *loi de Rayleigh*.

$$f(E_R) = \frac{E_R}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{E_R^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.8)$$

De la même manière que précédemment, à partir de (4.7) l'amplitude du champ électrique total est distribuée selon la loi du *khi* à six degrés de liberté, et sa densité de probabilité est donné par :

$$f(E_T) = \frac{E_T^5}{8\sigma^6} \exp\left[-\frac{E_T^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4.9)$$

4.1.3 Statistiques de la puissance reçue

D'après l'équation (4.10), la puissance reçue P est proportionnelle aux parties réelle et imaginaire du courant ($I=I_r+il_i$) induit dans une antenne placée dans le volume de test de la CRBM [18]. R_r étant la résistance de rayonnement de l'antenne. Hill a souligné également que l'utilisation de la méthode du *maximum d'entropie* permet de déterminer que I_i et I_r suivent chacun une *distribution normale* de moyenne nulle et d'écart type σ_i , et dont les densités de probabilité sont données par les équations (4.11) et (4.12). On peut démontrer également que l'amplitude du courant I suit une loi de distribution du *khi* à deux degrés de liberté (*distribution de Rayleigh*). L'amplitude du courant au carré ($|I|^2$) est distribuée selon la *loi du khi-deux* à deux degrés de liberté (*distribution exponentielle*), sa fonction de densité de probabilité est donnée par l'équation (4.13).

$$P = |I|^2 R_r \quad (4.10)$$

$$f(I_r) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{I_r^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (4.11)$$

$$f(I_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{I_i^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (4.12)$$

$$f(|I|^2) = \frac{1}{2\sigma_i^2} \exp \left[-\frac{|I|^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (4.13)$$

Il est donc facile, compte tenu de la section précédente, d'arriver à la loi de distribution des mesures de la puissance reçue à la sortie d'une antenne sur un tour complet de brasseur. La puissance P suit dans ce cas la loi du *khi-deux* à deux degrés de liberté (*loi exponentielle*) et sa densité de probabilité est la suivante :

$$f(P) = \frac{1}{2\sigma_i^2 R_r} \exp \left[-\frac{P}{2\sigma_i^2 R_r} \right] \quad (4.14)$$

4.1.4 Modèle statistique idéal versus données empiriques

Le modèle statistique de Hill, pour une chambre réverbérante idéale (i.e. infinité de modes), a fait l'objet de plusieurs travaux de validation sur des données expérimentales ou numériques [115,116,117] et semble être adopté par toute la communauté CRBM. La validation se faisait la majorité du temps par comparaison visuelle des fonctions de répartition ou de densité cumulative, des séries de données empiriques, à celles des lois théoriques citées dans les sections précédentes. Les données empiriques étaient souvent issues des mesures de la puissance reçue par une antenne placée dans le volume de test de la CRBM, les propriétés statistiques du champ sont ensuite extraites de celles de la puissance. D'autres méthodes de validation par des tests d'ajustement (*Goodness-of-fit tests*) ont vu le jour et

commencent à prendre de l'essor depuis quelques années [118,75,119,71], parmi les plus utilisées nous citons le test du *Khi-deux* (χ^2), le test de *Kolmogorov-Smirnov* (*KS*), et le test d'*Anderson-Darling* (*AD*). Les deux derniers qui nous intéressent seront abordés en détails dans la prochaine section. Le choix de ces deux tests est motivé par le nombre de résultats récents présentés pour le test *KS* et l'originalité du test *AD* figurant dans les travaux de *Lemoine* [120]. Ces méthodes de validation semblent néanmoins poser quelques problèmes liés à l'interprétation des résultats. En effet, *Lemoine* [120] a mis l'accent dans sa thèse sur des problèmes récurrents dans les publications en relation avec l'application de ces tests, en l'occurrence : l'écart entre les effectifs des échantillons empirique et théorique (à ne pas tolérer), le choix de critères de test inadaptés à la loi théorique et enfin le choix de valeurs critiques inadéquates.

Notre intention n'est pas de traiter les problèmes signalés ci-dessus, ni le développement de nouvelles méthodes statistiques, mais d'attirer l'attention du lecteur sur les contraintes liés aux méthodes statistiques existantes et de souligner que les tests appliqués dans notre étude sont effectués avec les précautions requises.

4.1.5 Tests d'ajustement aux lois de distribution statistiques

Parmi les techniques d'analyse de données empiriques développées par les statisticiens afin de déterminer un modèle ou une loi auxquels obéissent ces séries de valeurs, on trouve les tests d'ajustement. L'ajustement d'une série de données issues d'un processus aléatoire à une loi de distribution statistique bien définie a été largement traité dans la littérature des statistiques [113,121,122]. Nous allons expliquer dans ce qui suit de façon claire et synthétique quelques généralités sur les tests statistiques, puis nous aborderons les différents tests d'ajustement que nous allons appliquer aux mesures issues de notre étude expérimentale.

4.1.5.1 Hypothèses, erreurs et puissance d'un test

Tout test d'ajustement est le plus souvent basé sur une alternative constituée de deux hypothèses H_0 et H_1 , qui s'excluent mutuellement et que l'on appelle respectivement l'*hypothèse nulle* et l'*hypothèse alternative*. Une hypothèse est dite paramétrique si elle se rapporte aux paramètres d'une loi ; elle est dite non paramétrique dans les autres cas. On accepte ou on refuse une hypothèse, avec un risque d'erreur déterminé, selon une règle de décision (*test d'hypothèses*) basée sur l'observation d'un échantillon. On appelle *risque d'erreur de première espèce* (ou *niveau de significativité du test* $1-\alpha$) le paramètre α lié à l'erreur qui consiste à rejeter l'hypothèse H_0 à tort (bien qu'elle soit vraie). Le *risque d'erreur de deuxième espèce* est noté β , c'est le risque d'erreur que l'on prend en rejetant l'hypothèse vraie H_1 . On définit dans ce cas la *puissance du test* notée $\eta=1-\beta$ [113]. Dans notre cas par exemple H_0 est l'hypothèse que la distribution empirique observée sur un tour de brasseur est bien ajustée à la loi théorique.

En règle générale, le seuil α à ne pas dépasser est pris par défaut égal à 5% pour limiter les risques à des niveaux acceptables. Compte tenu de cette contrainte, les tests les plus performants sont donc ceux ayant la plus grande puissance possible. En réalité, il est impossible de trouver un test très puissant pour la majorité des cas pratiques, on devrait donc se contenter de plusieurs tests d'une puissance acceptable.

Pour chaque test on doit déterminer le paramètre à évaluer (t), appelé aussi *statistique du test*, qui sera comparé à des valeurs critiques adaptées que l'on trouve sous forme de tableaux. Ces valeurs critiques dépendent de la taille de l'échantillon N et du seuil de risque α . Soit $t_\alpha(N)$ la valeur critique donnée par la table des valeurs critiques selon N et α . Le test appliqué donne donc deux réponses possibles (ex. pour $\alpha = 5\%$) :

- si $t \leq t_\alpha(N)$, l'hypothèse H_0 est acceptée avec le seuil de risque α (i.e. il y'a 5% de risque pour que la distribution empirique ne soit pas ajustée à la loi théorique).
- si $t > t_\alpha(N)$, l'hypothèse H_0 est rejetée avec le seuil de risque α (i.e. il y'a 95% de chance pour que la distribution empirique ne soit pas ajustée à la loi théorique).

4.1.5.2 Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS)

Le test d'ajustement non paramétrique de *Kolmogorov-Smirnov* [113] compare les fonctions de répartition empirique $F_n(x)$ et théorique $F_0(x)$, et évalue la statistique t représentant l'écart maximum entre les deux, tel que :

$$t = \max |F_n(x) - F_0(x)| \quad (4. 15)$$

La conclusion sur le rejet ou l'acceptation de l'hypothèse H_0 (i.e. la distribution empirique suit la loi de distribution théorique) est subordonnée par la comparaison entre t et la valeur critique $C_\alpha(N)$.

4.1.5.3 Le test de Anderson-Darling (AD)

Le test de *Anderson-Darling* [123] est une variante du test *KS*, ce qui lui confère une plus grande sensibilité pour les valeurs extrêmes (queue de distribution). Sa deuxième particularité est que le calcul des valeurs critiques dépend de la distribution théorique, d'où l'inconvénient de devoir calculer les valeurs critiques pour chaque distribution testée. Les tables de valeurs critiques pour les lois de distributions *normale*, *log-normale*, *exponentielle* et *Weibull* sont disponibles dans les publications de Stephens [124,125,126,127]. La statistique du test *AD* est donnée par :

$$A^2 = -N - S \quad (4. 16)$$

Avec :

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{N+1-i}))] \quad (4.17)$$

Le test consiste à comparer la statistique A^2 à la valeur critique, cette dernière étant tabulée selon la distribution théorique, le nombre d'échantillons N et le seuil de risque α , afin d'accepter ou de rejeter l'hypothèse H_0 .

4.1.6 Estimateur et valeurs critiques adaptées pour les lois exponentielle et de Rayleigh

Lors des tests d'ajustement, on est souvent confronté à l'estimation des paramètres inconnus de la loi théorique attendue à partir des échantillons empiriques. Donc, il est de rigueur de trouver la bonne estimation de ces paramètres pour ne pas introduire de biais dans le test. Les estimateurs de la loi exponentielle et celle de Rayleigh par la méthode du maximum de vraisemblance vont être rappelés ci-dessous.

Dans cette section, nous voulons également préciser les tables de valeurs critiques qui seront utilisées dans notre étude pour les tests d'ajustement cités. *Lemoine* [120] avait donné une synthèse très bien expliquée sur les valeurs critiques usuellement utilisées avec les tests d'ajustement en référence aux travaux de *Lilliefors* [128], *Stephens* [123] et *Durbin* [129], nous jugeons utile de rappeler les conclusions importantes qu'il avait évoquées ainsi que les tables de valeurs critiques adaptées aux lois de distribution qui nous intéressent, en l'occurrence la *loi exponentielle* et la *loi de Rayleigh*.

4.1.6.1 Estimateur de la loi exponentielle

L'estimateur ψ_e du paramètre inconnu de la *loi exponentielle* est trouvé en appliquant la méthode du *maximum de vraisemblance*, il a l'expression suivante [120] :

$$\psi_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (4.18)$$

N est la taille de l'échantillon et P la puissance reçue.

4.1.6.2 Estimateur de la loi de Rayleigh

L'expression de l'estimateur ψ_r du paramètre inconnu de la *loi de Rayleigh* calculé à partir des échantillons empiriques en passant par la *théorie du maximum de vraisemblance* est donnée par [120] :

$$\psi_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{R_i}^2 \quad (4.19)$$

N étant la taille de l'échantillon et E_R la composante rectangulaire du champ.

4.1.6.3 Valeurs critiques adaptées aux lois théoriques régissant la CRBM

D'après *Lemoine* [120], les valeurs critiques de *Massey*, couramment utilisées dans la littérature des *CRBM* concernant les tests d'ajustement, ne sont pas adaptées aux mesures en *CRBM*. Par ailleurs, un mauvais choix des valeurs critiques pourrait engendrer des biais importants dans le résultat d'un test. Il est donc fortement recommandé d'utiliser les valeurs critiques de *Stephens* pour les tests de *Kolmogorov-Smirnov* et *Anderson-Darling* appliqués à la *loi exponentielle*, calculées pour un effectif d'échantillons N et un seuil de risque α à partir des tableaux 4.1 et 4.2. S'appuyant sur les travaux de *Margolin* et *Maurer* [130], *Lemoine* a conclu aussi que la table de valeurs critiques de *Stephens* pour le test *AD* d'une *loi exponentielle* est également valable pour le test *KS* de la *loi de Rayleigh*.

| Stephens (1974) | Seuil critique pour $\left(d - \frac{0,2}{N}\right)\left(\sqrt{N} + 0,26 + \frac{0,5}{\sqrt{N}}\right)$ | | | | |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|
| α | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,025 | 0,01 |
| Valeur critique | 0,926 | 0,990 | 1,094 | 1,190 | 1,308 |

Tab. 4.1. Table des valeurs critiques de Stephens pour le test de Kolmogorov-Smirnov d'une loi exponentielle

| Stephens (1974) | Seuil critique pour $A^2\left(1 + \frac{0,6}{N}\right)$ | | | | |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|
| α | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,025 | 0,01 |
| Valeur critique | 0,926 | 0,990 | 1,094 | 1,190 | 1,308 |

Tab. 4.2. Table des valeurs critiques de Stephens pour le test de Anderson-Darling d'une loi exponentielle

4.1.7 Conclusion

Jusqu'à présent nous avons présenté un rappel des principales propriétés statistiques du champ *EM* pour une chambre réverbérante idéale, nous avons ensuite expliqué le principe des tests statistiques d'ajustement qui nous intéressent dans la suite de notre étude expérimentale. Les estimateurs des paramètres inconnus des lois idéales (*Lois de Rayleigh* et *exponentielle*) découlant du modèle de *Hill* sont également présentés. Enfin, les tables des valeurs critiques adaptées aux lois théoriques testées ont été rappelées. Ces informations vont servir dans une partie de notre étude expérimentale qui va suivre, où les tests d'ajustement cités vont être appliqués dans le but d'évaluer les propriétés statistiques des mesures observées dans la *CRBM* de l'*IRSEEM* en présence d'objets dissipatifs.

4.2 Application à l'étude de l'effet de la charge sur le comportement EM de la CRBM

Un équipement destiné aux tests en *CRBM* peut charger cette dernière en fonction de la nature des matériaux qui le composent et de son volume. Dans ce cas, la prise en compte des effets de charge est plus que nécessaire préalablement à tout essai. Dans sa partie informative la norme *IEC 61000-4-21* [5] aborde très brièvement les effets de la charge induite par l'équipement sous test (*EST*) faisant référence aux travaux de *Hatfield* [131]. Il est stipulé d'une part que l'énergie éventuellement absorbée par l'*EST* ne sera plus disponible pour générer le niveau de champ *EM* désiré, donc la puissance injectée doit être augmentée pour compenser cette perte. D'autre part, elle recommande d'évaluer l'uniformité statistique du champ dans des conditions de charge sévères afin de déterminer la limite de chargement d'une chambre réverbérante. Cependant, les effets de la charge sur l'uniformité statistique du champ ne sont pas clairement explicités. Curieusement, si on prend l'exemple donné par la norme en question [5], l'écart type du champ E_{max} d'une chambre chargée entre 10 dB et 23 dB (avec 27 absorbants de forme pyramidale) (FIG. 4.1) montre une légère augmentation qui n'implique pas de dégradation (ni d'amélioration) significative de l'uniformité de champ (FIG. 4.2), bien que la norme préconise en générale un niveau de charge limite de 12 dB . Donc on pourrait se demander si ce seuil est généralisable à toutes les dimensions de *CRBM* ?



FIG. 4.1 Distribution des absorbants pour l'essai relatif aux effets de charge [5]

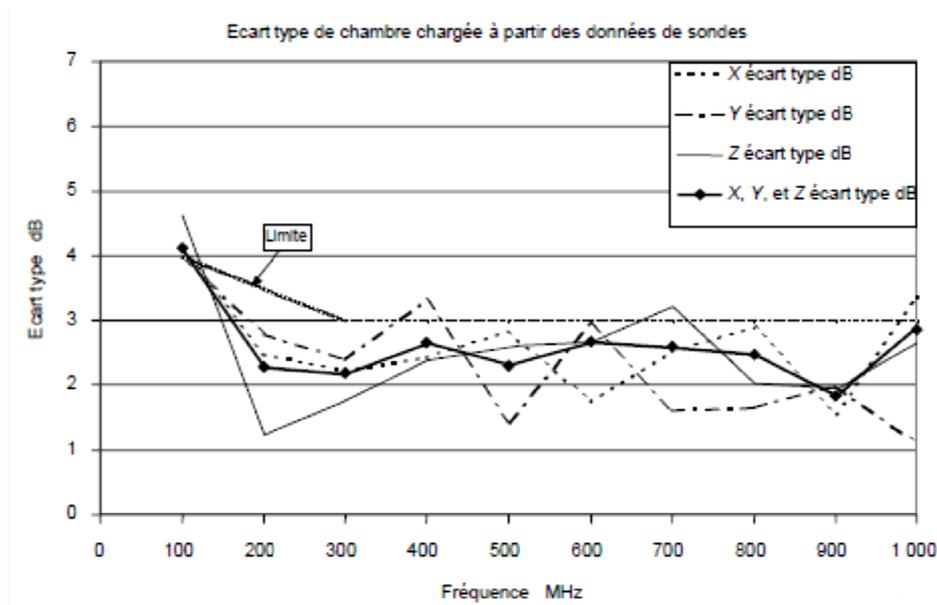


FIG. 4.2 Ecart type des données pour les composantes du champ E de 8 sondes (chambre chargée) [5]

Par ailleurs, la norme citée s'appuie sur le calcul du facteur de charge de la chambre CLF (*Chamber Loading Factor*) pour évaluer la charge, elle indique aussi la possibilité de le calculer soit à partir de la puissance reçue moyenne, soit à partir de la puissance reçue maximale sans spécifier de différence. Le choix du nombre d'échantillons servant au calcul du CLF est laissé lui aussi à la convenance de l'utilisateur.

A partir des éléments cités ci-dessus on pourrait se poser les questions suivantes : quel est le nombre de positions d'antenne adéquat au calcul du CLF ?, le choix de la puissance reçue moyenne ou de la puissance reçue maximale pour le calcul du CLF influence-t-il le résultat final ?, l'écart type du champ est-il le meilleur paramètre pour juger de la dégradation de l'uniformité statistique du champ EM ?, Jusqu'à quel niveau de charge peut-on aller dans un volume de test donné sans dégrader significativement l'uniformité statistique du champ ?, quel est le rapport du volume de la charge au volume de test qui permet de charger fortement la $CRBM$?, comment peut-on simuler la charge due à l' EST avec des charges type absorbants ? Et enfin, peut-on utiliser une charge afin d'améliorer l'uniformité statistique du champ en basses fréquences par dégradation du facteur de qualité ? Autant de questions à élucider pour mieux comprendre le comportement de la $CRBM$.

Des expérimentations menées par les partenaires du Programme $PICAROS^{10}$, dont l' $IRSEEM$ est membre, ont montré certaines incohérences relatives à la mesure du CLF après insertion de l' EST par rapport au CLF issu du calibrage chambre vide. Nous avons donc mené une étude expérimentale afin d'élucider certains aspects liés à la charge puis aux dimensions (ou volume) des objets absorbants insérés dans la $CRBM$.

¹⁰ Programme d'Inter-comparaison entre ChAmbres Réverbérantes à brassage de mOdeS

Le travail mené ici consiste à vérifier l'hypothèse selon laquelle l'insertion d'un objet dissipatif dans la *CRBM* améliorerait son effet réverbérant en basses fréquences, et prouver sa véracité ou son inexactitude à travers l'étude approfondie de l'influence de la charge et du volume (ou surface) qu'elle occupe sur la structure du champ électrique dans la *CRBM*. Notre attention a été concentrée, dans un premier temps, sur l'évaluation du *CLF* à partir de la puissance reçue moyenne ou de la puissance reçue maximale en tenant compte du nombre de positions d'antenne de réception servant au calcul de la moyenne spatiale de ces grandeurs. Le nombre important d'échantillons de mesure obtenus nous a ensuite permis d'analyser la distribution de ces données à travers les tests statistiques de bon ajustement aux lois de distribution théoriques.

4.2.1 Protocole expérimental

Avant de présenter les résultats des mesures et leur analyse, nous allons décrire le protocole expérimental retenu pour cette étude et les différents équipements utilisés.

Protocole

Nous nous proposons d'analyser et d'évaluer quelques paramètres clés des chambres réverbérantes (Facteur de charge *CLF*, fréquence basse de la chambre f_s , puissance de test P_{test} , facteur de qualité Q , écart-type du champ E_{max} et uniformité statistique du champ $E...$) à travers une série de calibrages de la *CRBM* de l'*IRSEEM*, selon qu'elle soit vide ou chargée avec un ou plusieurs absorbants chargés en Carbone, identiques, de forme rectangulaire et de dimensions $1,22 \times 0,61 \times 0,15 \text{ m}^3$. Dans un premier temps, ces absorbants seront placés de façon compacte (couchés et empilés sur le plancher de la chambre) au centre du volume de test selon la configuration n°1 montrée par les figures 4.3 et 4.4. Dans un deuxième temps, nous utiliserons deux absorbants dans différentes positions et orientations de façons à faire varier la distribution spatiale de la charge ou la section efficace d'absorption vue par le champ *EM* en les disposant successivement selon les configurations n°2 à 5 (FIG. 4.5 et FIG. 4.6 respectivement). Le calibrage chambre vide fera office de référence pour le reste des calibrages chambre chargée. Neuf calibrages, en totalité, ont été réalisés dans le cadre de cette étude. Le premier étant le calibrage chambre vide. Les quatre suivants sont des calibrages chambre chargée selon la première configuration avec un absorbant (FIG. 4.4.a), deux absorbants empilés (FIG. 4.4.b), trois absorbants empilés (FIG. 4.4.c) et quatre absorbants empilés (FIG. 4.4.d) respectivement. Les deux calibrages suivants sont réalisés avec deux absorbants joints posés verticalement (FIG. 4.5.a et FIG. 4.6.a) disposés selon les configurations n° 2 et 4 respectivement. Les deux derniers calibrages sont effectués avec deux absorbants séparés et posés verticalement (FIG. 4.5.b et FIG. 4.6.b) disposés respectivement selon les configurations n° 3 et 5.

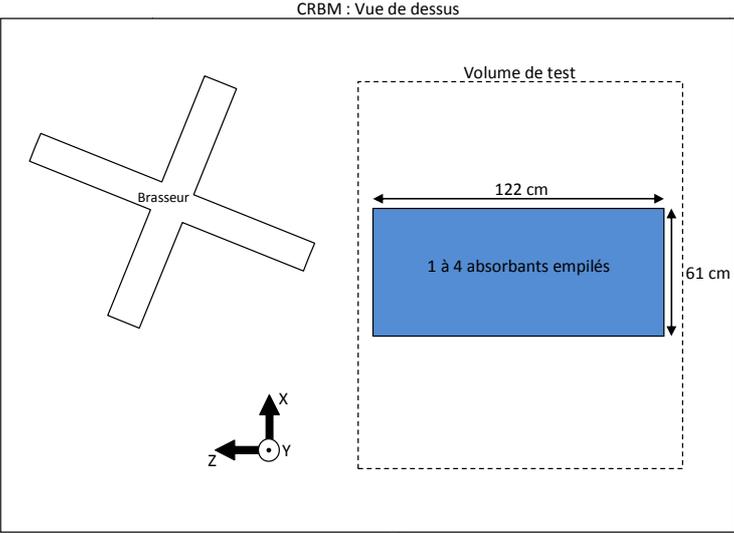


FIG. 4.3. Positionnement des absorbants empilés dans le volume de test de la CRBM (config. 1)

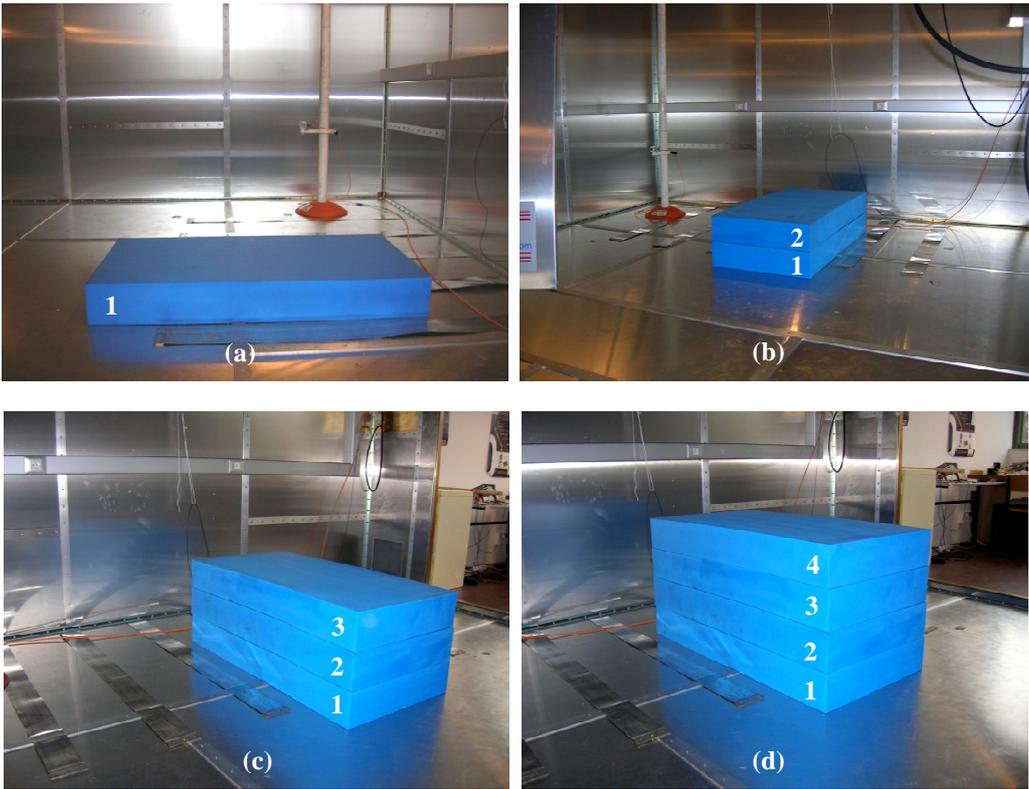


FIG. 4.4. Différents cas de charge et positionnement des absorbants dans la CRBM (config. 1)

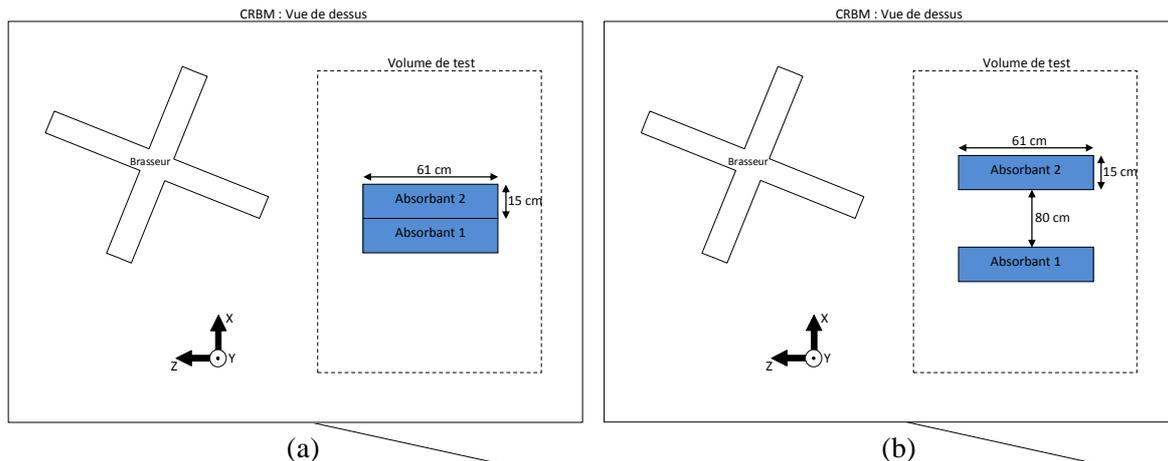


FIG. 4.5. Positions des deux absorbants debout : (a) joints (config. 2) et (b) séparés (config. 3)

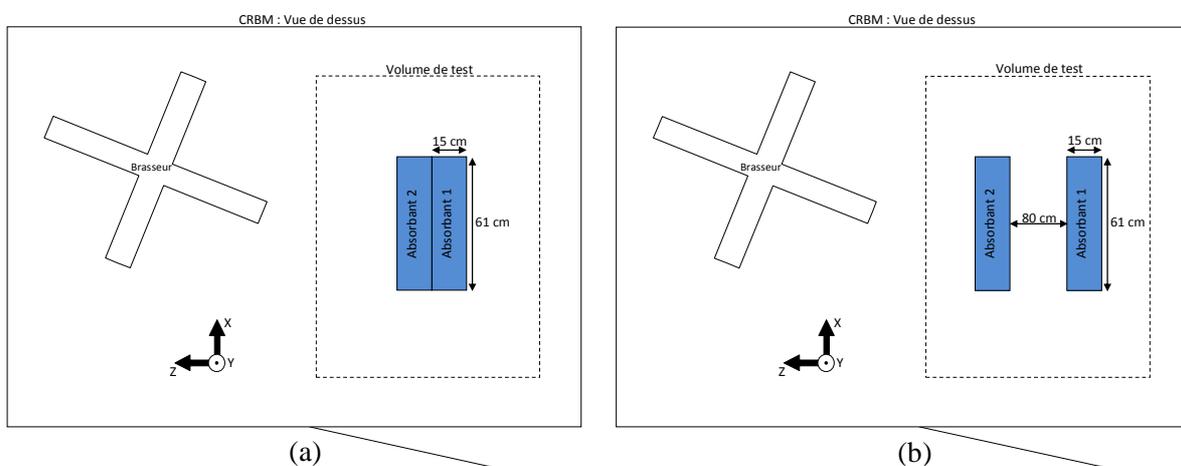


FIG. 4.6. Positions des 2 absorbants debout : (a) joints (config. 4) et (b) séparés (config. 5)

Les conditions de calibrage appliquées ici s'appuient sur la description de l'étalonnage de chambre par brassage de mode pas à pas dans l'annexe B de la partie normative de la norme IEC 61000-4-21 [5], avec quelques variantes pour lesquelles nous avons opté afin de mettre en évidence quelques anomalies en rapport avec des idées reçues quant au fonctionnement de la CRBM. Les mesures seront réalisées sur huit positions spatiales entre les fréquences f_s et $10 f_s$ et sur trois positions au-delà de $10 f_s$, avec un pas fréquentiel de 50 points par décade jusqu'à $10 f_s$ puis de 20 points par décade au-delà de $10 f_s$, f_s étant la plus basse fréquence d'utilisation de la chambre. Le brassage sera en mode pas à pas avec 60 pas de brasseur sur toute la gamme de fréquences pour garantir un brassage efficace et un nombre suffisant d'échantillons supérieur au nombre minimal requis par la norme.

La procédure de calibrage commence par le positionnement de l'antenne de réception à un emplacement donné à l'intérieur du volume de test de la chambre, puis le positionnement de la sonde de champ isotropique à l'un des huit coins du parallélépipède délimitant le périmètre du volume de test. Ensuite, l'injection d'une puissance de 1 Watt sur l'antenne d'émission à une fréquence initiale supérieure ou égale à f_s est synchronisée avec la rotation du brasseur en mode pas à pas sur 360° . Les instruments de mesure associés à la chambre sont asservis de façon à faire l'acquisition de la puissance d'entrée (P_{inc}), de la puissance issue de l'antenne

de réception ($P_{reç}$), et du champ électrique issu des trois axes de la sonde de champ (E_x , E_y , E_z et E_{tot}) pour chaque fréquence sur une révolution complète du brasseur. Les mêmes opérations sont reproduites pour huit positions différentes d'antenne de réception et de sonde de champ en balayant toute la bande de fréquences choisie qui va de $200MHz$ à $2GHz$ pour la CRBM de l'IRSEEM ($f_s=200MHz$) avec les pas fréquentiels cités précédemment. Un échantillon de 60 mesures de chaque grandeur est obtenu pour chaque fréquence et chaque position spatiale, ce qui résulte en une totalité de 152 640 données à traiter pour un seul calibrage et un peu plus d'un million de données à traiter pour l'ensemble des calibrages.

Une distance minimale de $\lambda/4$ correspondant à la fréquence f_s est toujours maintenue entre la sonde de champ, l'antenne de réception et les absorbants, cette distance est respectée aussi entre les éléments cités et les parois de la chambre ainsi que les pâles du brasseur [5].

Pour chaque type de calibrage, les mesures de la puissance reçue moyenne ($P_{Reç Moy}$), maximale ($P_{Reç Max}$) et de la puissance incidente ($P_{Entrée}$) sur une position, ou moyennée sur deux ou trois positions d'antenne de réception, vont être exploitées pour le calcul du CLF_{Moy} et du CLF_{Max} correspondant respectivement à $P_{Reç Moy}$ et $P_{Reç Max}$ relatives au nombre de positions d'antenne considérées. A partir des deux types de CLF calculés et des mesures de champ électrique nous obtenons deux estimations de la puissance nécessaire à la génération d'une sévérité de champ électrique de $100V/m$. Le facteur de qualité de la chambre est ensuite évalué selon l'état de chargement de la CRBM et le nombre de positions d'antenne de réception.

Moyens expérimentaux

Nos expérimentations sont réalisées dans la CRBM de l'IRSEEM (FIG. 4.7) de $53m^3$ de volume (longueur $4.84m$; largeur $3.62m$; hauteur $3.06m$), permettant d'effectuer des essais CEM à partir d'une fréquence théorique de $155,7 MHz$ qui est la fréquence minimale d'utilisation de la chambre (f_s), cette dernière est égale à trois fois la fréquence du mode fondamental de la cavité $f_{110}=51.9MHz$. Néanmoins, la fréquence $f_s=200MHz$, donnée par le constructeur et estimée expérimentalement lors d'un calibrage chambre vide, est celle qui est retenue. L'uniformité statistique du champ EM n'est plus garantie en dessous de cette fréquence critique. Cette CRBM est dotée d'un brasseur mécanique composé de quatre pales métalliques brassant un volume cylindrique d'environ $3.16m^3$, et d'un volume de test pouvant aller jusqu'à $2 \times 2 \times 2 m^3$. L'énergie y est injectée à travers une antenne log-périodique dans la bande $230-1000 MHz$ et une antenne cornet fonctionnant entre 1 et $18GHz$. Une autre antenne log-périodique, de $87.1 cm$ de longueur et $74.9 cm$ de largeur, est prévue pour la réception dans la bande $190-4000MHz$. La mesure des trois composantes rectangulaires du champ électrique se fait à l'aide d'une sonde de champ isotropique (FIG. 4.9) composée de trois monopoles dirigés suivant les trois axes cartésiens (Ox , Oy et Oz), elle fonctionne dans la gamme $10Khz - 4GHz$ avec une isotropie de $\pm 0.25 dB$ (à $1GHz$) et une linéarité de $\pm 0.5 dB$ ($\pm 0.5 V/m$).

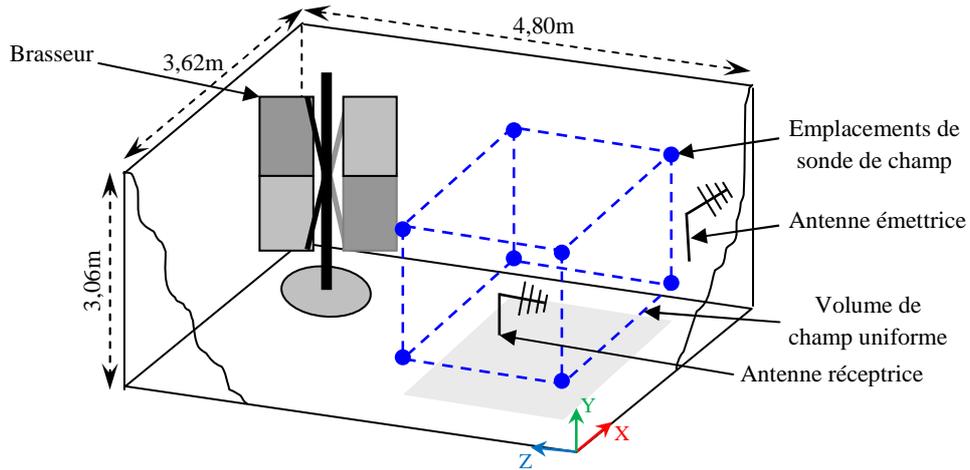


FIG. 4.7. Synoptique de calibrage de la CRBM

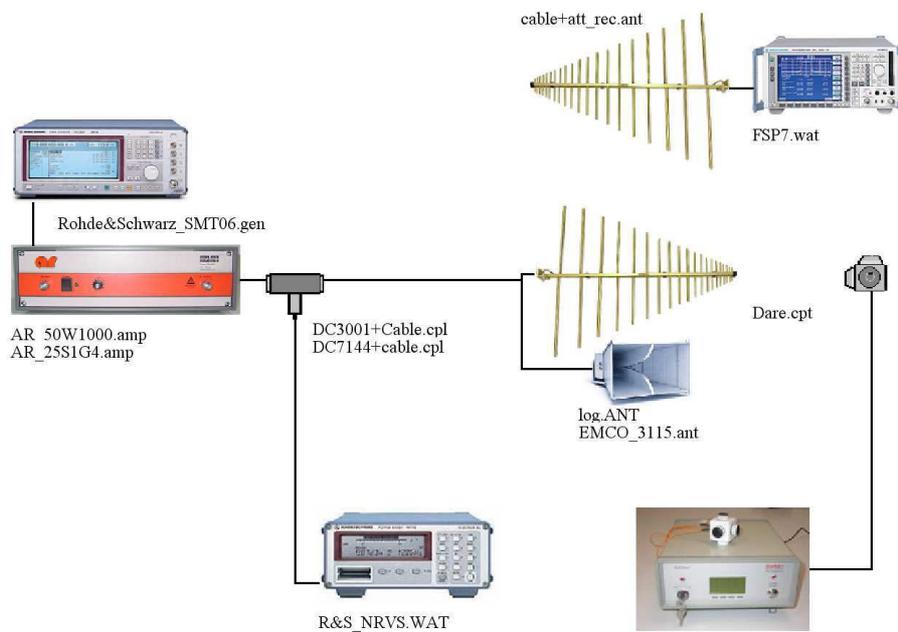


FIG. 4.8. Configuration matérielle utilisée pour le calibrage de la CRBM

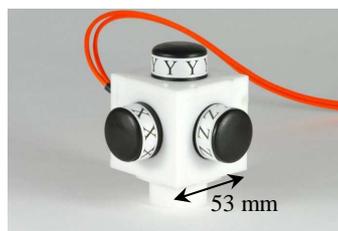


FIG. 4.9. Sonde de champ isotropique (RadiSense RSS1004A)

4.2.2 Influence de la charge et du nombre de positions d'antenne sur les paramètres de calibrage

Les mesures expérimentales sur une révolution de brasseur d'une composante rectangulaire E_R (E_x , E_y ou E_z) du champ électrique et de la puissance reçue, issues des huit positions de la sonde de champ et de l'antenne de réception respectivement, sont exploitées dans le calcul des différents paramètres servant au calibrage de la CRBM pour évaluer l'influence du nombre de positions d'antenne puis de l'insertion d'objets dissipatifs sur le fonctionnement de la chambre. Les mesures brutes seront ensuite exploitées pour réaliser des tests d'ajustement statistiques aux lois théoriques idéales. La première configuration de chargement de la CRBM consiste à y introduire successivement un à quatre absorbants empilés l'un au-dessus de l'autre sur le plancher de la chambre comme le montre la figure 4.4. Les premiers résultats présentés dans les sections 4.2.2 et 4.2.3 ne concernent donc que les calibrages avec la première configuration citée. Les configurations de chargement n° 2 à 5 feront l'objet de la section 4.2.4 où l'on abordera l'effet de la distribution spatiale et de changement d'orientation de la charge dans le volume de test de la chambre.

4.2.2.1 Evaluation de la puissance reçue

Une partie de l'étude que nous avons menée met l'accent sur le nombre de positions d'antenne servant au calcul des paramètres de calibrage de la CRBM. Nous avons donc mesuré, à l'aide de l'analyseur de spectre, la puissance reçue sur une révolution de brasseur et sur huit positions d'antenne de réception espacées au minimum de $\lambda/4$ et pour une puissance moyenne injectée de 1Watt . Il est question ici de voir l'évolution de l'écart entre une position et une autre et la variation de puissance après introduction des absorbants. La figure 4.10 montre les courbes de puissance reçue sur les huit positions d'antenne pour les calibrages chambre vide (FIG. 4. 10.a) et chambre chargée avec un seul absorbant (FIG. 4. 10.b), deux absorbants (FIG. 4. 10.c), trois absorbants (FIG. 4. 10.d) et quatre absorbants (FIG. 4. 10.e) selon la configuration n°1. Nous constatons pour tous les calibrages une même allure des courbes de puissance reçue, cette dernière varie faiblement d'une position à une autre hormis quelques écarts en début de bande fréquentielle.

Les figures 4.11.a, 4.11.b et 4.11.c montrent les courbes superposées des puissances reçues, issues des différents calibrages, pour les trois positions d'antenne choisies pour le calcul des paramètres de calibrage de la CRBM que nous verrons ultérieurement. Nous constatons clairement sur ces courbes la diminution de la puissance reçue due aux pertes engendrées par l'insertion des absorbants dans la chambre, une différence de 5 à 10 dBm est observée dès l'insertion d'un seul absorbant. Cependant, l'effet marquant est la diminution de la puissance avec une moindre proportion à partir de l'insertion du deuxième jusqu'au quatrième absorbant par rapport à l'insertion du premier absorbant uniquement. Ceci sous entend, à priori, que la quantité d'énergie dissipée n'est pas uniformément répartie sur le nombre d'objets dissipatifs identiques insérés dans la chambre. En vérité cela est lié à la façon de positionner les absorbants dans la chambre qui détermine la surface dissipative

vue par le champ EM , ce qui est communément appelé la section efficace d'absorption (ACS : *Absorption Cross Section*) que nous allons aborder en section 4.2.2.6.

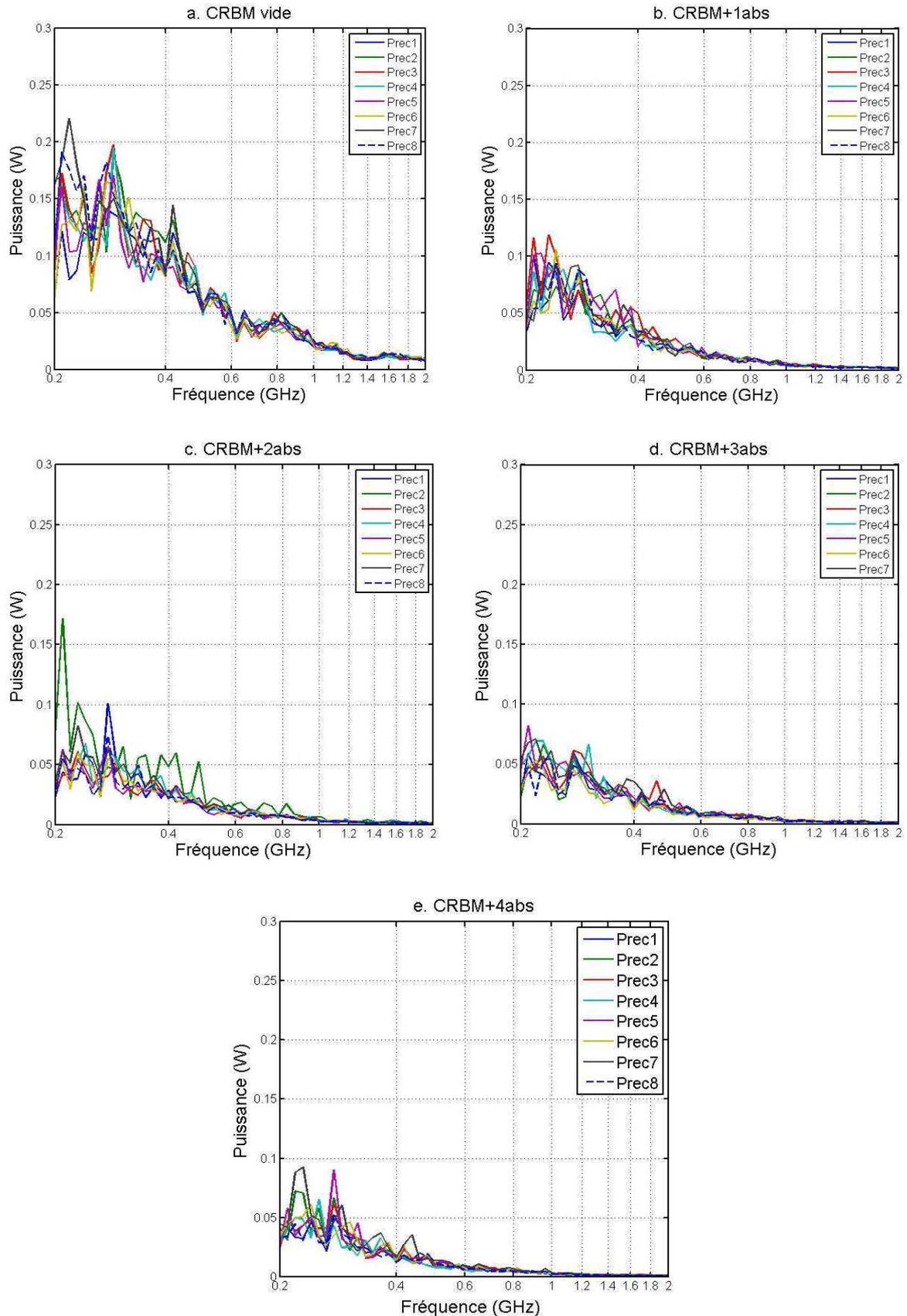


FIG. 4. 10. Puissance reçue (en Watt) sur les huit positions d'antenne de réception (config.1)

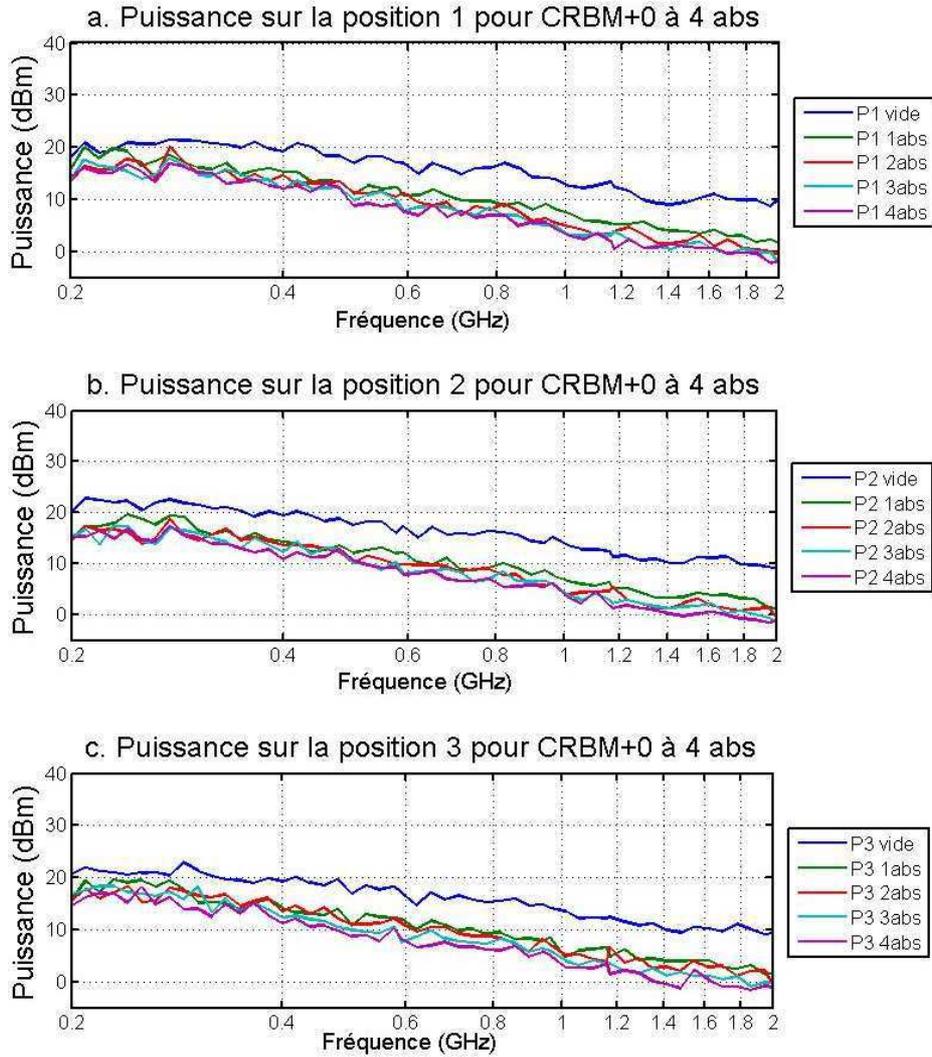


FIG. 4.11. Puissance reçue (en dBm) sur les positions d'antenne 1, 2 et 3 (CRBM vide et config.1)

4.2.2.2 Evaluation du facteur d'étalonnage d'antenne ACF et des pertes d'insertion IL

Le facteur d'étalonnage de l'antenne de réception (ACF : *Antenna Calibration Factor* en anglais) ainsi que les pertes d'insertion (IL : *Insertion Losses* en anglais) seront utilisés ultérieurement dans le calcul de la charge et du facteur de charge de la chambre (sections 4.2.2.3 et 4.2.2.4), ils sont calculés dans un premier temps pour la chambre vide puis pour la chambre chargée avec les n absorbants identiques selon les équations (4.20) et (4.21) respectivement :

$$ACF = \left\langle \frac{P_{MoyRec}}{P_{Entrée}} \right\rangle_{8 \text{ pour } \leq 10 f_s \text{ ou } 3 \text{ pour } \geq 10 f_s} \quad (4.20)$$

$$IL = \left\langle \frac{P_{MaxRec}}{P_{Entrée}} \right\rangle_{8 \text{ pour } \leq 10 f_s \text{ ou } 3 \text{ pour } \geq 10 f_s} \quad (4.21)$$

Les courbes de l'ACF et de *IL* sont données en figure 4.12. Les mêmes constatations précédentes ont été observées puisque l'insertion du premier absorbant seul provoque l'écart le plus important (2 à 8 dB pour l'ACF et 3 à 8 dB pour *IL*) par rapport à la chambre vide et les insertions successives des autres absorbants induit une variation supplémentaire moins importante allant de 0.5 à 1dB pour chaque absorbant supplémentaire.

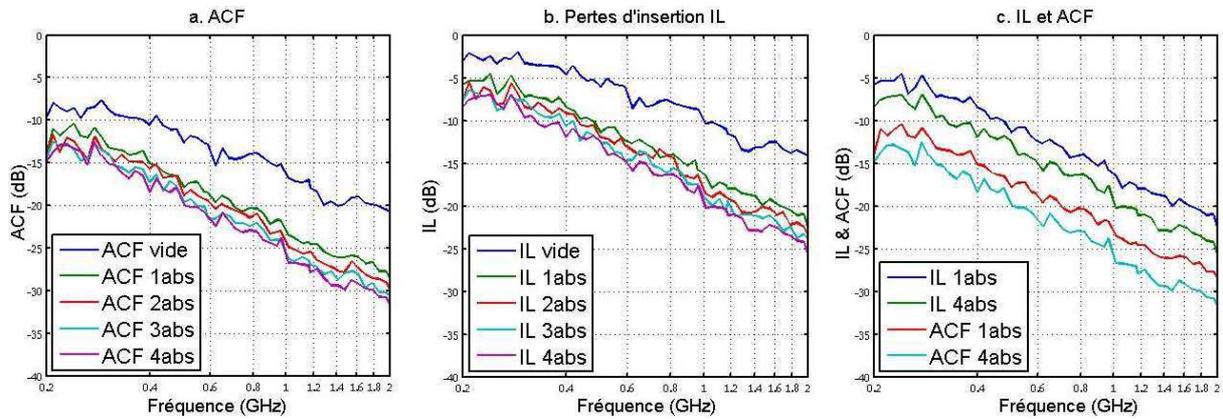


FIG. 4.12. Facteur d'étalonnage d'antenne et pertes d'insertions selon la charge de la chambre (config.1)

4.2.2.3 Evaluation de la charge due aux absorbants

La charge induite par l'introduction de l'*EST* ou d'un quelconque objet dissipatif dans la *CRBM* est calculée à partir des *ACF* chambre vide et chambre chargée selon l'expression suivante :

$$Charge = \frac{ACF_{Chambre\ vide}}{ACF_{Chambre\ chargée}} \quad (4.22)$$

Les courbes de la figure 4.13 décrivent la variation de la charge (en dB) induite par l'insertion successive des quatre absorbants (configuration n°1) entre 200 et 2000 MHz. Nous remarquons que la charge a tendance à augmenter avec la fréquence ce qui est logique puisque les absorbants chargés en Carbone deviennent plus efficaces lorsque la fréquence est élevée. Cependant, la charge ne varie pas uniformément par rapport au nombre d'absorbants mis en jeu. Nous pourrions penser que logiquement la charge induite par deux absorbants exactement identiques sera égale à deux fois la charge d'un seul des deux absorbants, et que la charge augmentera équivoquement pour chaque absorbant identique supplémentaire inséré. L'expérience menée ici nous donne la preuve du contraire de l'idée précédente, car si on observe la charge par exemple à 900MHz (FIG. 4.13) celle-ci est égale à environ 7.1 dB dans le cas d'un seul absorbant, 8.3 dB dans le cas de deux absorbants, 9 dB pour trois absorbants et 9.4 dB pour quatre absorbants. Ces résultats indiquent aussi la charge maximale obtenue avec quatre absorbants dans le cas de la *CRBM* de l'IRSEEM, elle est égale à 11dB à 2GHz. D'après ces résultats, nous pouvons d'ores et déjà affirmer que ce n'est pas le volume des objets dissipatifs qui détermine la quantité de charge, mais cela peut être d'autres paramètres que nous verrons plus loin.

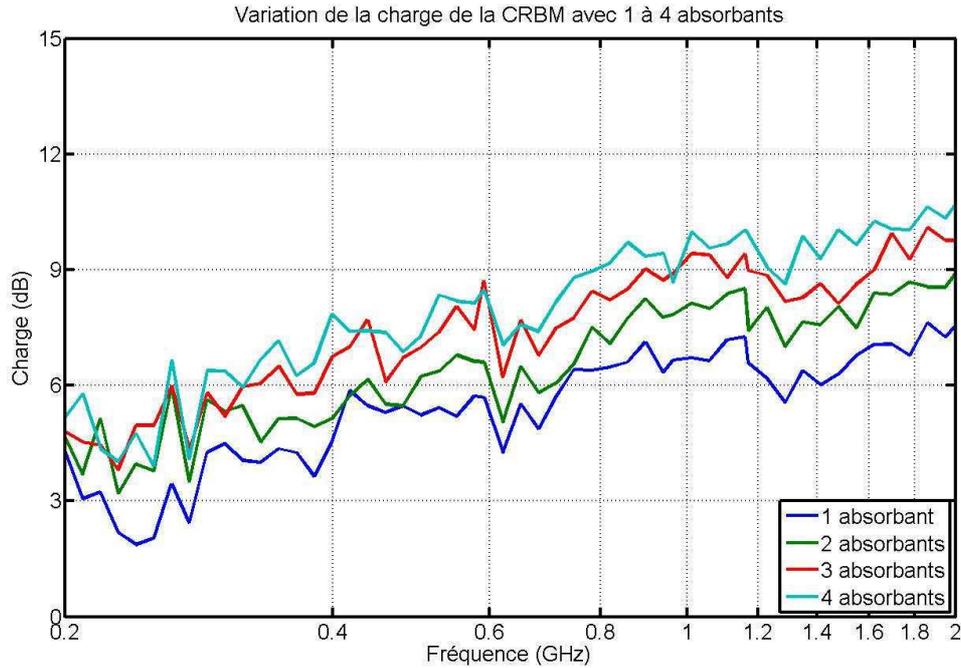


FIG. 4.13. Variation de la charge de la CRBM selon le nombre d'absorbants insérés (config.1)

4.2.2.4 Evaluation du facteur de charge de la chambre CLF

Le facteur de charge de la chambre *CLF* (*Chamber Load Factor* en anglais) est utilisé dans l'évaluation des performances de la *CRBM* quand l'*EST* est inséré dans le volume de test. Il est calculé en utilisant les mesures de puissance sur un nombre n de positions d'antenne comme le montre l'équation (4.23) :

$$CLF = \frac{CCF}{ACF} \quad (4.23)$$

Avec *CCF* est le facteur d'étalonnage de la chambre calculé comme suit :

$$CCF = \left\langle \frac{P_{MoyRec}}{P_{Entrée}} \right\rangle_n \quad (4.24)$$

La norme en vigueur [5] laisse le choix libre du nombre n de positions d'antenne mais stipule qu'une seule position est suffisante, elle préconise aussi l'utilisation des mesures de la puissance moyenne reçue plutôt que la puissance maximale reçue. Nous voulons par notre expérience enlever le doute sur le nombre minimum de positions d'antenne qui donne la meilleure estimation du *CLF* ainsi que la possibilité d'utiliser la puissance maximale au lieu de la puissance moyenne.

a. Estimation du CLF à partir de l'ACF chambre vide

Nous avons calculé le *CLF* à partir des mesures de la puissance moyenne reçue sur une position d'antenne ou moyennée sur deux ou trois positions d'antenne (CLF_{moy1} , CLF_{moy2} et CLF_{moy3} respectivement) pour tous les types de calibrage cités précédemment et en utilisant dans un premier temps l'ACF issu du calibrage chambre vide comme le préconise la norme [7]. Ensuite, nous avons réitéré le même calcul en utilisant cette fois la puissance maximale reçue pour obtenir les CLF_{max1} , CLF_{max2} et CLF_{max3} respectivement. Les résultats de ces calculs sont donnés dans les figures 4.14 en linéaire et 4.15 en *dB*.

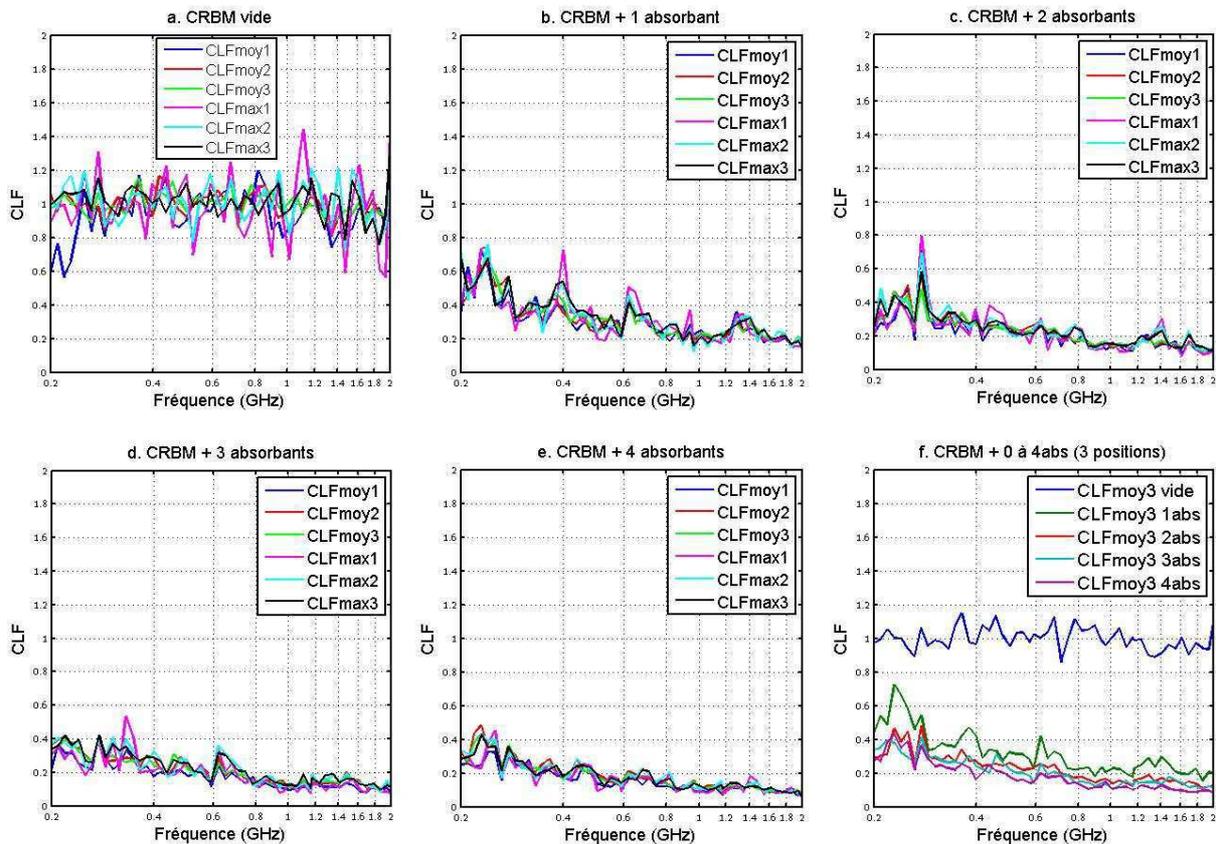


FIG. 4.14. CLF moyen et maximum selon le nombre d'absorbants et de positions d'antenne (config.1)

Dans le cas chambre vide le *CLF* est très proche de la valeur unité. Si on regarde les résultats dans un premier temps du point de vue du nombre de positions d'antenne, nous constatons qu'un minimum de trois positions d'antenne est nécessaire pour une bonne estimation du *CLF* à partir de la puissance moyenne ou de la puissance maximale reçue. En effet, le calcul du *CLF* à partir des mesures d'une seule position d'antenne a tendance à surestimer ce paramètre de 2 à 3*dB* (FIG. 4.15) particulièrement lorsqu'il s'agit de la puissance maximale reçue, cela se manifeste sur les courbes ci-dessus sous forme de fluctuations plus importantes que dans le cas où l'on considère plus d'une position d'antenne.

L'augmentation de la charge fait chuter le CLF de 3 à 11 dB (FIG. 4.15) selon la fréquence et le nombre d'absorbants insérés. Par ailleurs, l'écart sur le CLF engendré par l'insertion d'un nombre x d'absorbants n'est pas proportionnel à x , conséquence qui découle du constat effectué précédemment sur les mesures de puissance reçue.

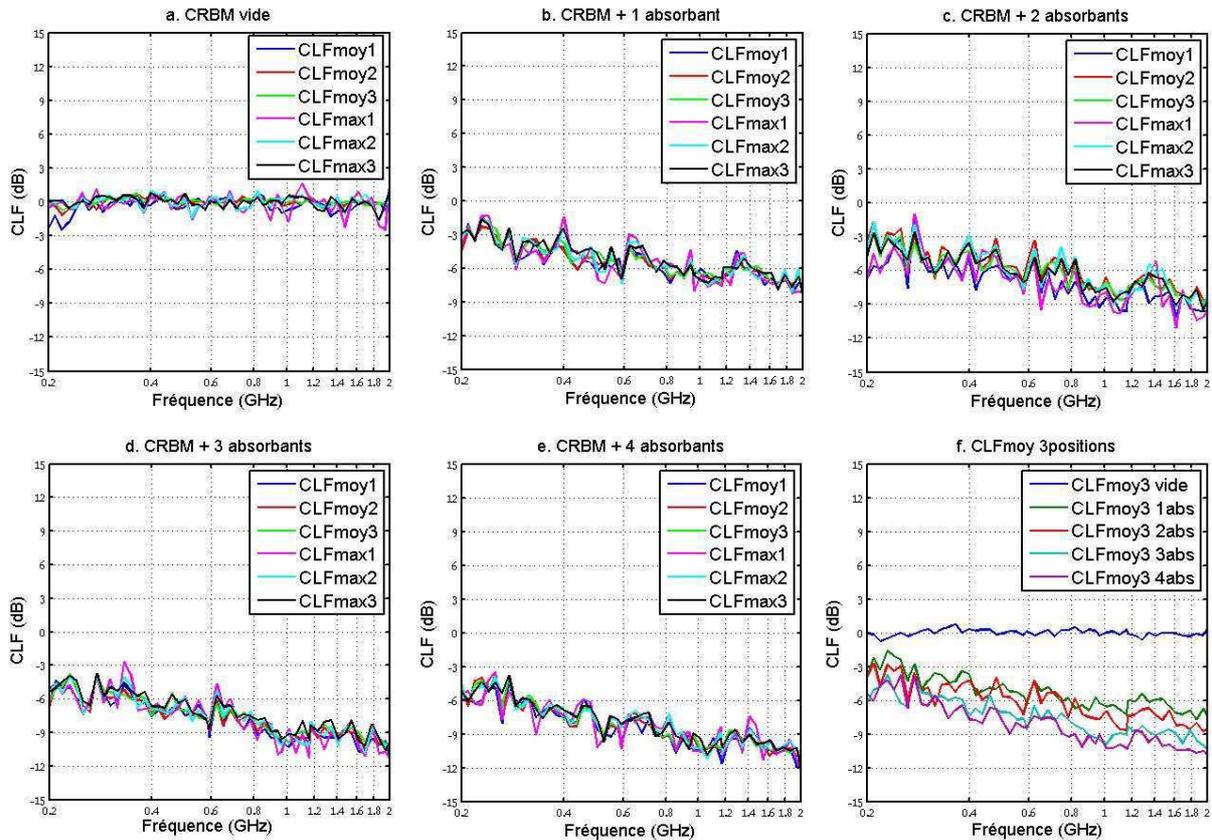


FIG. 4.15. CLF moyen et maximum (dB) selon le nombre d'absorbants et de positions d'antenne (config.1)

b. Estimation du CLF à partir de l'ACF chambre chargée

Le besoin d'évaluer le CLF à partir de l'ACF chambre chargée (c.à.d. en présence d'un objet dissipatif) contrairement à ce que les normes préconisent vient de l'idée récurrente utilisée à tort par les industriels qui consiste à dégrader le facteur de qualité d'une CRBM au moyen d'un absorbant pour augmenter le nombre de modes excités en basse fréquence afin de pouvoir effectuer des tests en dessous de la fréquence minimale d'utilisation LUF (Lowest Usable frequency). Dans ce cas, l'objet dissipatif inséré (ou absorbant) devient une partie de la chambre et sera pris en compte dans le calibrage chambre vide, et l'ACF chambre vide sous entend « ACF chambre chargées avec l'absorbant en question ». Nous verrons plus loin dans ce chapitre la raison de l'utilisation de l'expression « à tort ».

Dans cette section nous focalisons notre attention particulièrement sur l'effet de la quantité de charge et du nombre de positions d'antenne sur le CLF . Nous réitérons les mêmes opérations de calcul du CLF que la section précédente sauf que l'ACF est pris cette fois à partir des cas

chambre chargée relativement au nombre d'absorbants insérés et au nombre de positions d'antenne allant de un jusqu'à huit. Les résultats de ces calculs sont donnés pour un seul absorbant et quatre absorbants, en comparaison au cas chambre vide, dans la figure 4.16. Les courbes d'écart type des CLF_{moy} et CLF_{max} selon le nombre de positions d'antenne pour les différents cas de charge sont données dans la figure 4.17.

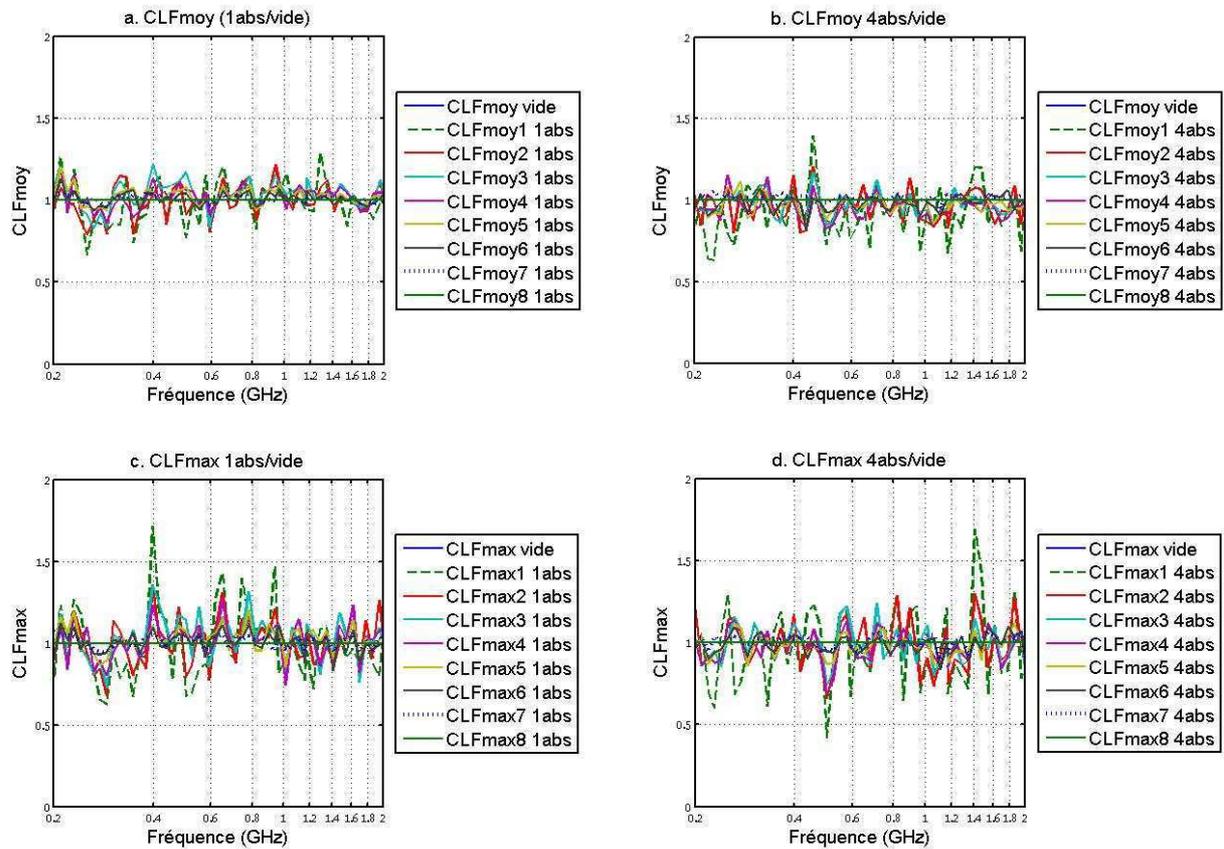


FIG. 4.16. CLF moyen et maximum estimé à partir de l'ACF chambre chargée (config.1)

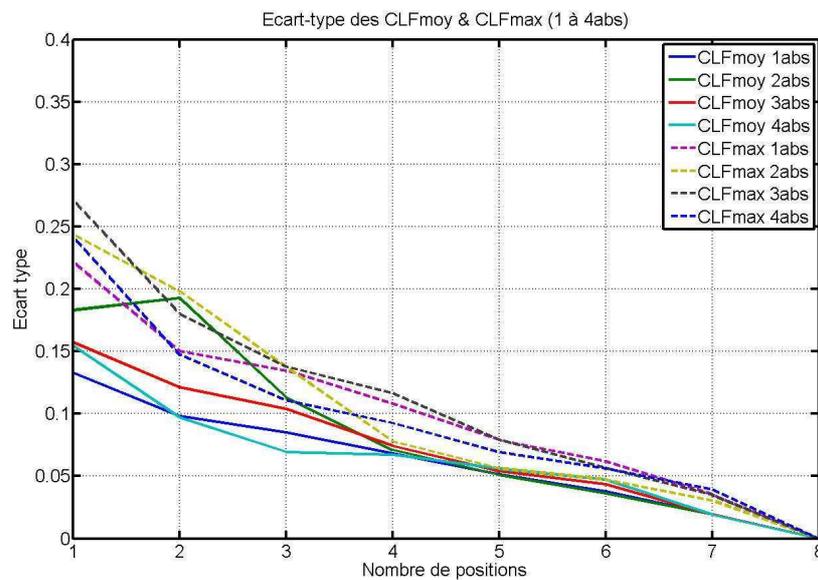


FIG. 4.17. Ecart type du CLF moyen et maximum selon la charge et le nombre de positions d'antenne (config.1)

Les résultats montrent qu'un minimum de trois positions d'antenne suffit pour estimer le CLF avec une erreur admissible (FIG. 4.17), plus le nombre de positions d'antenne augmente plus l'écart est réduit. La considération de la puissance maximale reçue dans les calculs confirme la tendance à surestimer le CLF et la quantité de charge agit surtout sur la valeur du CLF .

4.2.2.5 Estimation de la puissance nécessaire pour générer $100V/m$ à partir du CLF

Conséquence de la perte d'énergie dans la $CRBM$, la puissance P_{test} nécessaire pour générer une sévérité de champ électrique E_{test} doit être estimée avant de pouvoir effectuer des tests CEM . La puissance de test est évaluée à l'aide de l'expression suivante :

$$P_{test} = \left[\frac{E_{test}}{\langle \vec{E} \rangle_{24} \times \sqrt{CLF}} \right]^2 \quad (4.25)$$

Nous avons utilisé les deux CLF_{moy} et CLF_{max} calculés en section 4.2.2.4.a pour les différents cas de charge de la chambre pour calculer la puissance de test P_{clf} nécessaire pour générer une sévérité de $100V/m$ en tenant compte du nombre de positions d'antenne et de la quantité de charge. Les résultats sont donnés ci-dessous (FIG. 4.18) pour le calibrage chambre vide et les autres calibrages chambre chargée.

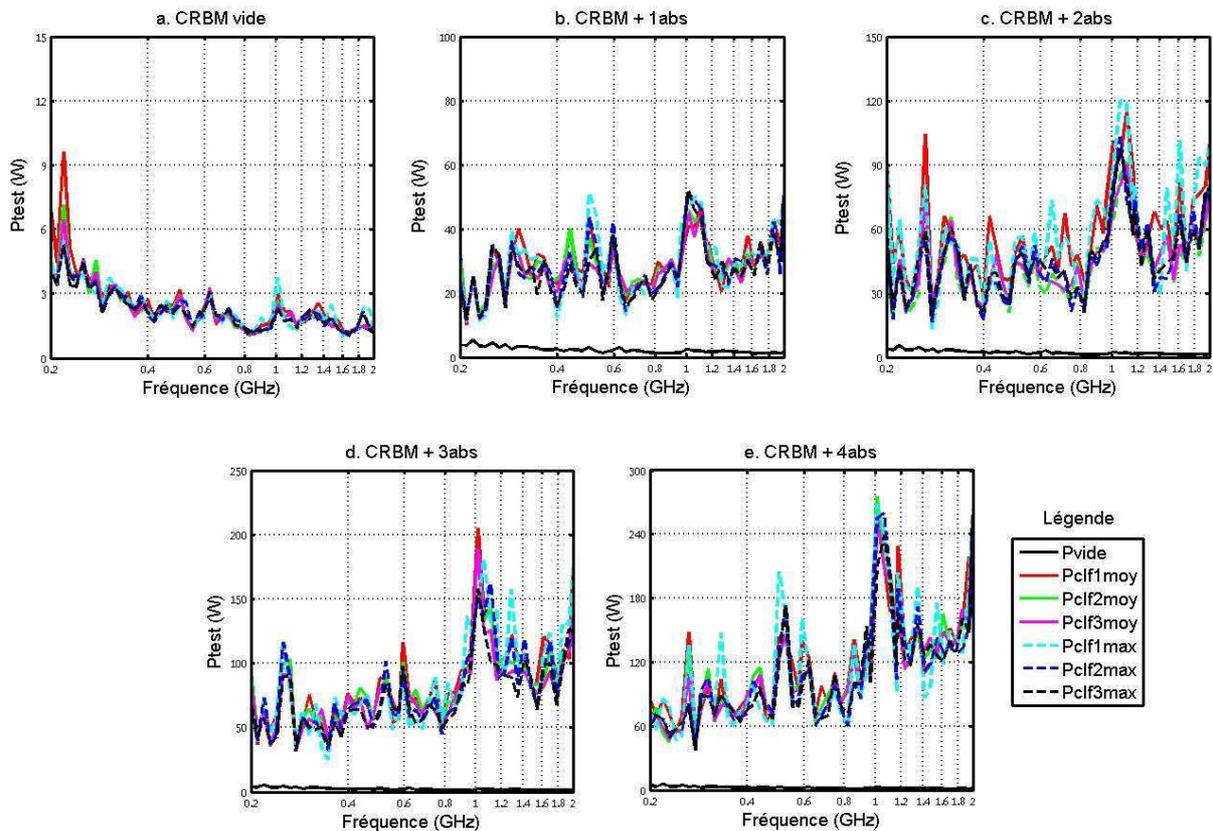


FIG. 4.18. Variation de la puissance de test selon la charge et le CLF (config.1)

La première constatation, relative au nombre de positions d'antenne R_x , confirme qu'il y'a une surestimation de la puissance de test lorsque les calculs sont faits avec moins de trois positions d'antenne, ce qui se traduit par des écarts visibles sur les courbes ci-dessus pour tous les cas de charge. Le deuxième constat concerne la différence entre $P_{clf\ moy}$ et $P_{clf\ max}$ mettant en jeux les CLF_{moy} et CLF_{max} respectivement, les deux types de courbes ne montrent pas de différence pour trois positions d'antenne, mais des écarts apparaissent particulièrement avec une seule position d'antenne où la puissance de test semble être surestimée lorsque le CLF_{max} est pris en compte. Quant à l'effet de l'insertion des absorbants, il apparait logiquement sur les graphiques 4.18.b, 4.18.c, 4.18.d et 4.18.e que la puissance de test augmente avec l'accroissement de la charge (par le nombre d'absorbants ou avec l'augmentation de la fréquence) pour compenser les pertes et permettre d'atteindre la consigne de champ souhaitée. La puissance de test augmente très rapidement si l'on insère plus d'un absorbant et peut dépasser facilement les *100 Watts* selon la fréquence. Il est utile aussi de rappeler qu'à la fréquence de *1GHz* il s'opère un changement de matériel (antennes et amplificateurs) lors des calibrages, ce qui justifie les valeurs quelque peu incohérentes avec l'allure des courbes traduites par des pics importants à cette fréquence précisément.

4.2.2.6 Evaluation du facteur de qualité de la chambre et notion de section efficace d'absorption

Jusqu'à présent, le nombre de positions d'antenne de réception utilisé pour la détermination expérimentale du facteur de qualité de la *CRBM* est laissé un choix totalement libre à déterminer à la convenance de chaque opérateur. En effet, les normes en vigueur ne donnent pas d'argumentation précise sur ce choix et laissent l'utilisateur perplexe quant à l'éventuelle influence de ce choix sur ses résultats. Nous voulons donc, dans un premier temps, éclaircir ce point essentiel à nos yeux.

Dans le cadre de nos expérimentations les facteurs de qualité de la *CRBM* vide (Q_v) et de la *CRBM* chargée avec n absorbants (Q_{cn}) sont calculés en utilisant les formules suivantes [5]:

$$Q_v = \frac{16 \pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{V\ MoyRec}}{P_{Entrée}} \right\rangle \quad (4.26)$$

$$Q_{cn} = \frac{16 \pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{C\ MoyRec}}{P_{Entrée}} \right\rangle \quad (4.27)$$

$P_{V\ Moy\ Rec}$ et $P_{C\ Moy\ Rec}$ sont respectivement les puissances moyennes reçues chambre vide et chambre chargée, V est le volume de la chambre, λ est la longueur d'onde en espace libre, et η_{Tx} et η_{Rx} sont les facteurs de rendement des antennes de transmission T_x et de réception R_x respectivement, dont les valeurs estimées sont *0.75* pour les *antennes log périodiques* et *0.9* pour les *antennes cornet* selon la norme *CEI 61000-4-21*.

Afin de garantir un effet réverbérant efficace (i.e. l'énergie totale brassée est supérieure à l'énergie totale non brassée), le facteur de qualité global de la CRBM (Q) doit être largement supérieur à un seuil critique ($Q \gg Q_s$) fonction de la fréquence et du volume de la chambre [132]. La figure 4.19 montre le seuil minimal Q_s pour la CRBM de l'IRSEEM vide calculé à partir de l'équation :

$$Q_s = \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{2/3} \frac{V^{1/3}}{2\lambda} \quad (4.28)$$

Nous verrons plus loin que le facteur de qualité obtenu pour chaque type de calibrages que nous avons réalisés (FIG. 4.20) reste largement supérieur à se seuil pris comme référence.

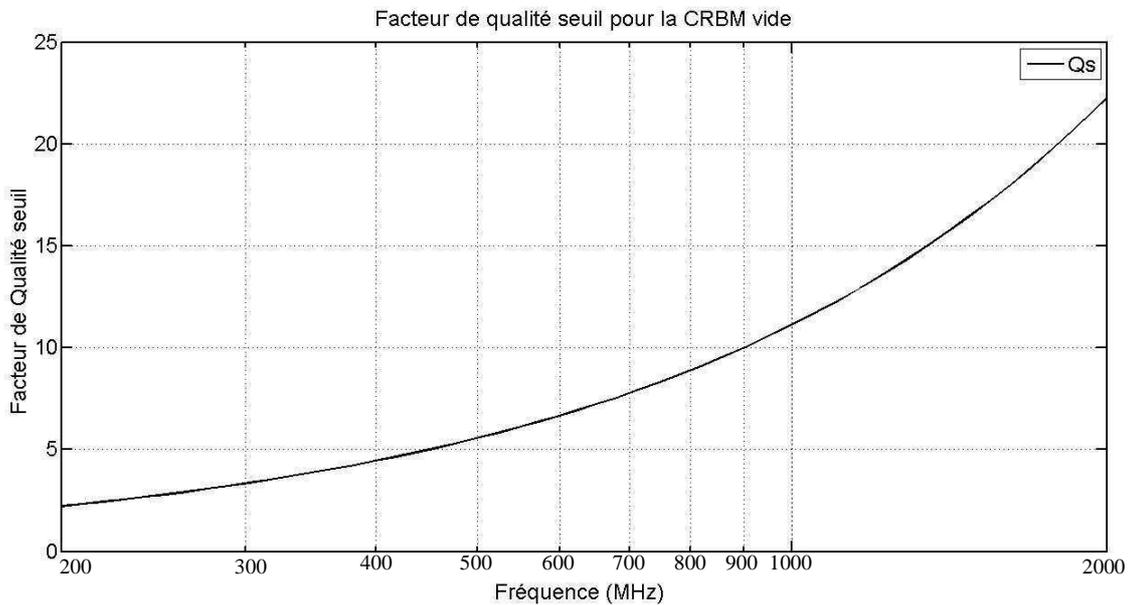


FIG. 4.19. Seuil minimal du Facteur de qualité de la CRBM vide de l'IRSEEM

Les figures 4.20.a, 4.20.b, 4.20.c, 4.20.d et 4.20.e ci-dessous montrent clairement la dégradation du facteur de qualité de la chambre selon le nombre d'absorbants insérés, à 900MHz il chute d'une valeur de $1,33 \cdot 10^4$ pour le cas chambre vide à 2557 après insertion du premier absorbant, et continue à chuter jusqu'à 1517 lorsque les quatre absorbants sont insérés. Notons que ces valeurs restent cependant supérieures au seuil critique présenté en figure 4.19, ce qui garanti la conservation d'un effet réverbérant. Par ailleurs, le nombre de positions d'antenne R_x ne semble pas affecter de façon significative le facteur de qualité de la chambre.

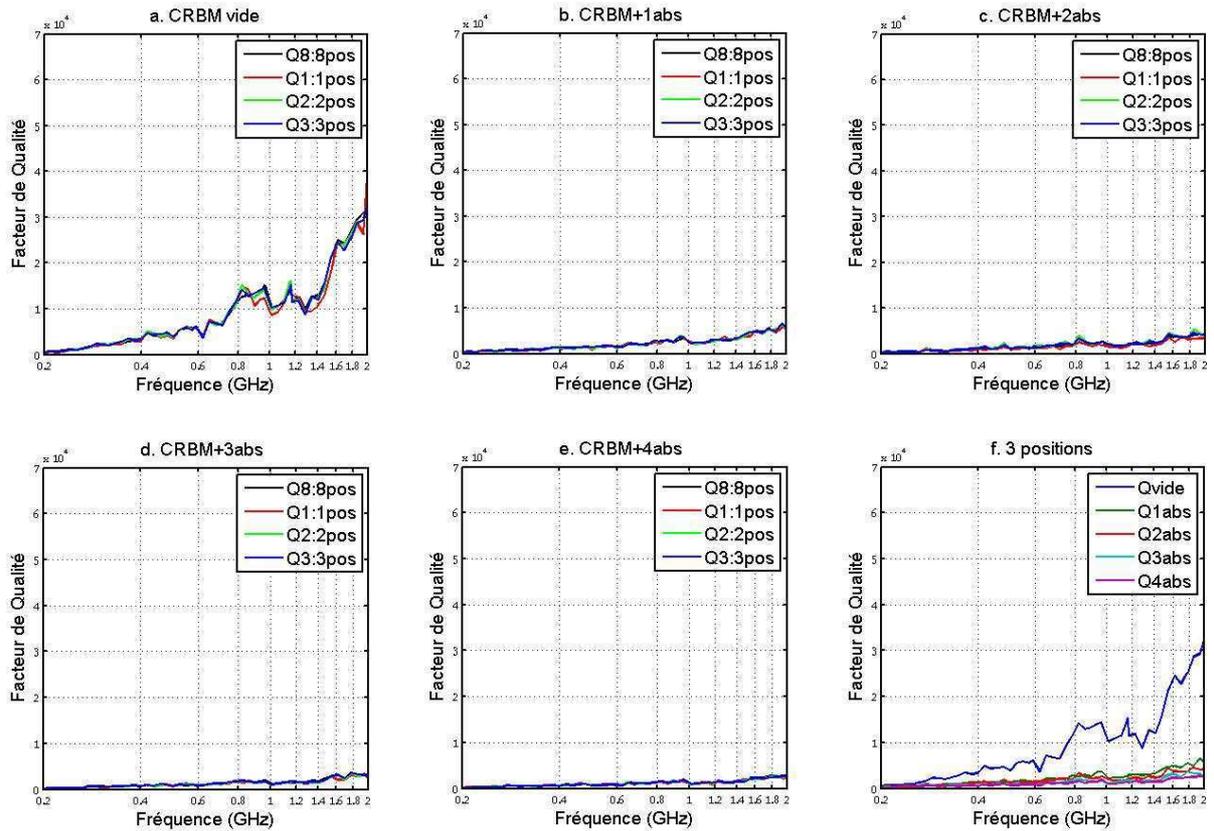


FIG. 4.20. Facteur de qualité de la CRBM selon la charge et le nombre de positions de R_x (config.1)

L'autre point important de notre étude est la compréhension de l'influence de la charge dans la CRBM à travers le facteur de qualité (Q). La mesure du facteur de qualité de la chambre est utilisée dans la déduction de l'efficacité d'une antenne ou de la section efficace d'absorption (ACS : *Absorption Cross Section*) de matériaux dissipatifs. Selon Hill [19], la puissance totale dissipée P_d dans la chambre réverbérante est décomposée comme suit :

$$P_d = P_{d1} + P_{d2} + P_{d3} + P_{d4} \quad (4.29)$$

Les éléments du second terme de l'équation (4.29) représentent respectivement la puissance dissipée dans les parois de la cavité, la puissance absorbée par les objets dissipatifs (EST ou absorbants), les pertes de puissance dues aux fuites dans les ouvertures et la puissance dissipée par la charge des antennes. Cette relation nous mène à l'expression généralisée du facteur de qualité de la CRBM chargée (en présence d'objets dissipatifs) :

$$Q_c^{-1} = Q_1^{-1} + Q_2^{-1} + Q_3^{-1} + Q_4^{-1} \quad (4.30)$$

Dans l'équation (4.30), Q_1 varie inversement à la puissance dissipée dans les parois de la chambre, Q_2 varie inversement à la puissance dissipée dans les objets absorbants, Q_3 dépend inversement des pertes de fuite à travers les ouvertures et Q_4 varie inversement aux pertes dues aux antennes. La plus petite valeur parmi Q_1 , Q_2 , Q_3 et Q_4 aura la contribution la plus dominante dans le calcul du facteur global Q .

Si la *CRBM* est vide de tout objet dissipatif supplémentaire en dehors des éléments la constituant (antennes, brasseur, câbles, sonde de champ), le terme Q_2^{-1} devient nul, en conséquence le facteur de qualité globale chambre vide (Q_v) devient :

$$Q_v^{-1} = Q_1^{-1} + Q_3^{-1} + Q_4^{-1} \quad (4.31)$$

Intéressons nous maintenant à la partie du facteur de qualité globale, relative aux objets dissipatifs, qui est représentée par le facteur Q_2 . D'après *Hill*, un objet dissipatif de forme quelconque, inséré dans une *CRBM* de volume V , sera illuminé par une superposition d'ondes planes sur 4π stéradians angles d'incidence avec les deux polarisations possibles (TE et TM), Q_2 se présente alors sous la forme [19]:

$$Q_2 = \frac{2\pi V}{\lambda \langle S_a \rangle} \quad (4.32)$$

Où S_a est la section efficace d'absorption (ACS) de l'objet dissipatif, $\langle \rangle$ indique la moyenne sur tous les angles d'incidence et sur les deux types de polarisations (Eq. 4.33) et λ est la longueur d'onde dans le milieu (généralement assimilé à l'espace libre).

$$\langle S_a \rangle = \frac{1}{8\pi} \iint_{4\pi} (S_{aTE} + S_{aTM}) d\Omega \quad (4.33)$$

Dans le cas où l'on insère N objets dissipatifs dans la chambre, l'ACS dans l'équation (4.32) sera alors la somme des ACSs des N objets, avec $\langle S_{an} \rangle$ la section efficace d'absorption du $n^{\text{ième}}$ objet dissipatif.

$$\langle S_a \rangle = \sum_{n=1}^N \langle S_{an} \rangle \quad (4.34)$$

Si les N objets sont identiques et ont chacun une ACS moyenne $\langle S_0 \rangle$ alors :

$$\langle S_a \rangle = N \langle S_0 \rangle \quad (4.35)$$

A partir des équations (4.30) et (4.31) on déduit l'équation :

$$Q_2^{-1} = Q_c^{-1} - Q_v^{-1} \quad (4.36)$$

Des équations (4.32) et (4.36) nous obtenons l'expression de l'ACS moyenne des absorbants insérés en fonction des facteurs de qualité mesurés Q_c et Q_v :

$$\langle S_a \rangle = \frac{2\pi V}{\lambda} (Q_c^{-1} - Q_v^{-1}) \quad (4.37)$$

L'équation (4.37) va nous permettre de tracer les courbes de variation de l'ACS moyenne selon le nombre et le positionnement des absorbants insérés dans la *CRBM* (FIG. 4.21, FIG.

4.22 et FIG. 4.56), puis d'analyser à travers ces courbes l'influence de l'orientation ou du nombre d'absorbants sur le facteur de qualité obtenu pour les différents cas de charge.

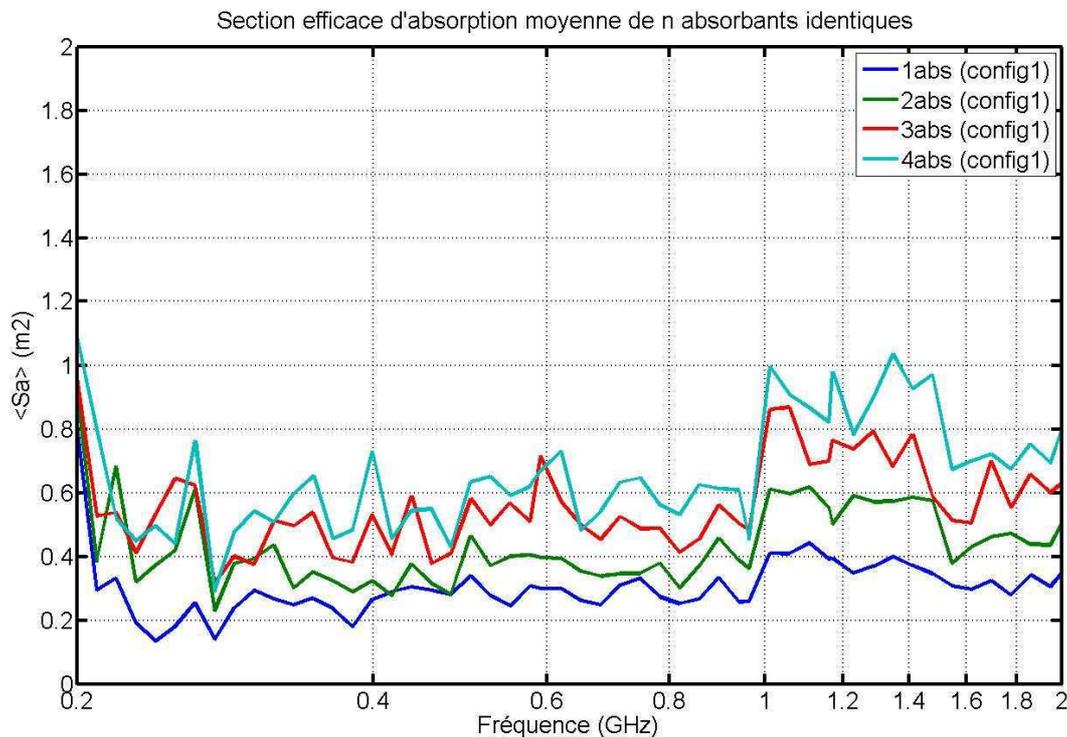


FIG. 4.21. ACS moyenne de 1 à 4 absorbants empilés (config.1)

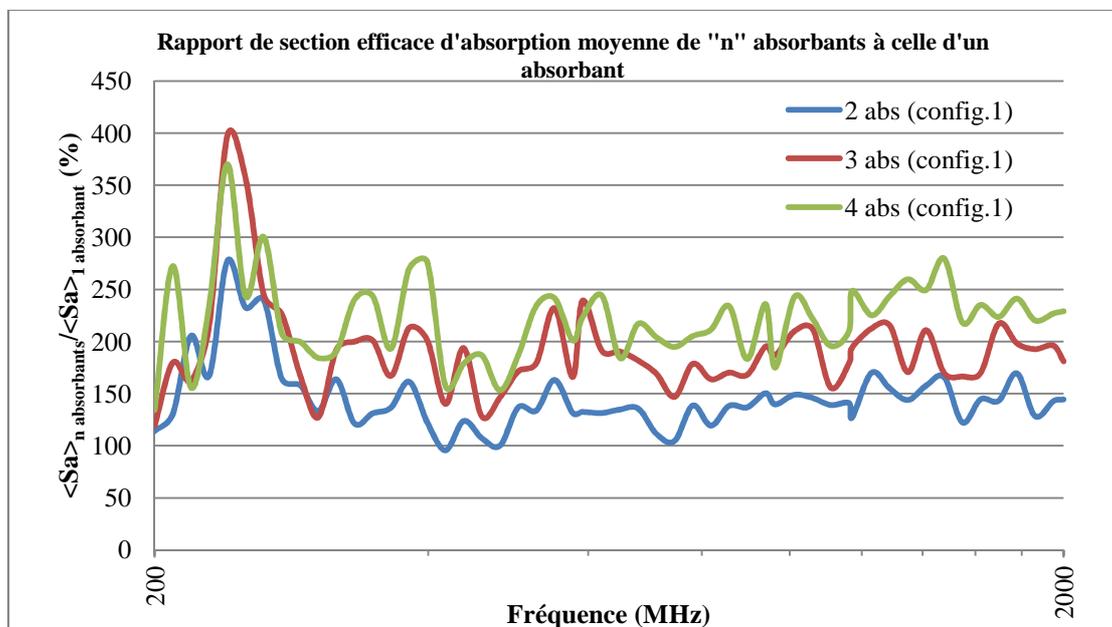


FIG. 4.22. Rapport en pourcent de l'ACS de n absorbants à celle d'un absorbant dans la même configuration n°1

Les courbes de la section efficace d'absorption moyenne $\langle S_a \rangle$ des absorbants insérés dans la chambre, représentées en figure 4.21, confirment l'idée de la non proportionnalité de la charge avec le nombre d'absorbants identiques mis en jeux. Une autre analyse plus simple consiste à dire qu'il n'y a pas de doublement de l'ACS après insertion de deux absorbants identiques par rapport à l'ACS de l'un des deux absorbants uniquement, ceci est clairement confirmé par la figure 4.22 qui donne le pourcentage du rapport de l'ACS moyenne de n absorbants sur l'ACS moyenne d'un seul absorbant. La aussi nous confirmons que ce n'est pas le volume des absorbants qui détermine la section efficace d'absorption.

Dans l'objectif de faciliter la compréhension de la section suivante nous ouvrons une parenthèse concernant l'influence de la distribution de la charge ou du changement de son orientation dans le volume de test de la CRBM, plus particulièrement leurs impact sur la section efficace d'absorption (ACS). Dans ce cas, les configurations n° 2 à 5 citées précédemment sont mises à contribution en plus de la configuration n°1. La figure 4.23 présente les courbes de l'ACS moyenne en fonction de la fréquence issues des différentes configurations citées. Si nous regardons les courbes relatives à deux absorbants, nous constatons que le fait de changer l'orientation des absorbants sans les séparer (configs. 2 et 4) fait varier l'ACS moyenne de $0,1$ à $0,3 \text{ m}^2$ par rapport à la configuration n°1. Nous remarquons aussi que la distribution spatiale de la charge dans le volume de test de la CRBM (i.e. séparation des absorbants de 80 cm (configs. 3 et 5)) engendre une augmentation significative de l'ACS moyenne allant de 0.2 à 0.9 m^2 par rapport à la configuration n°1. Nous reviendrons plus en détails sur l'aspect de la variation de l'orientation et de la distribution de la charge plus loin en section 4.2.4.

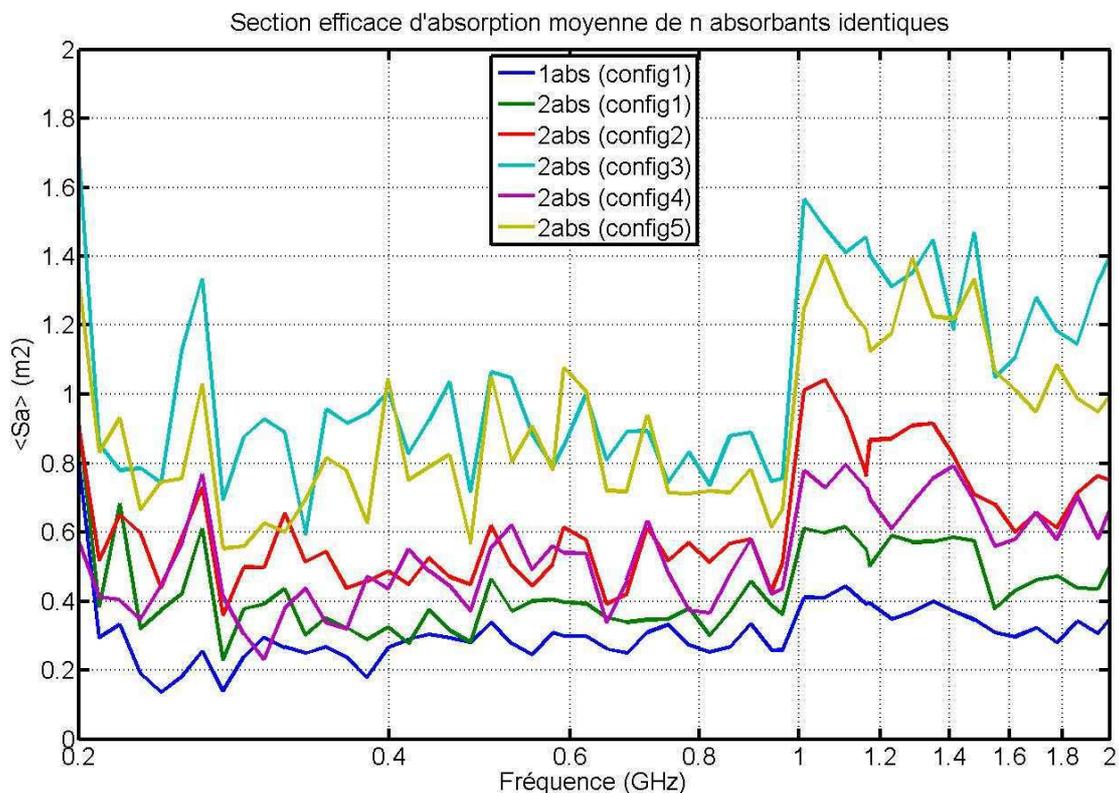


FIG. 4.23. Section efficace d'absorption moyenne de n absorbants identiques (configs. 1 à 5)

Le calcul de l'ACS moyenne pour ces différentes configurations par une autre expression ne faisant pas intervenir le volume de la CRBM est donné en Annexe A.

4.2.3 Effet de la charge sur la statistique des mesures en CRBM

4.2.3.1 Effet sur l'indépendance des échantillons

L'utilisation de la théorie basée sur les statistiques régissant le champ EM dans les CRBM implique la capacité de générer un nombre élevé d'échantillons indépendants dans la chambre [66,18] et garantir l'application du théorème de la *limite centrale* (ch.1). La théorie étant basée sur l'hypothèse qu'un nombre infini de structures modales indépendantes sont disponibles dans la chambre, il faudra donc, au minimum, garantir un nombre très élevé d'environnements EM statistiquement indépendants pour prétendre appliquer cette théorie avec une incertitude acceptable.

L'idée reçue dans le domaine des chambres réverbérantes à brassage mécanique consiste en la possibilité d'augmenter le nombre d'échantillons indépendants en combinant la dégradation du facteur de qualité de la chambre (à l'aide d'une charge) avec un brasseur efficace en utilisant un nombre élevé de pas angulaires sur une révolution complète [76,77]. Le but étant l'obtention d'un champ EM statistiquement uniforme en dessous de la LUF permettant d'exploiter la CRBM dans les basses fréquences. Les expériences menées ici démontrent paradoxalement que le fait d'augmenter le nombre de positions angulaires du brasseur ne coïncide pas avec l'augmentation du nombre d'échantillons indépendants lorsque le facteur de qualité de la chambre est dégradé.

Il est commun dans la littérature des statistiques et des chambres réverbérantes de vérifier l'indépendance d'échantillons quelconques d'un processus stochastique par le calcul de la fonction d'autocorrélation au premier ordre. Dans le cas de la CRBM, il s'agit d'évaluer l'indépendance des séries de données acquises sur chaque position angulaire du brasseur pour une position de sonde donnée et une fréquence fixe.

Pour un échantillon contenant une série de n réalisations d'un processus stochastique $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$, de moyenne \bar{X} , la fonction d'autocorrélation de premier ordre est définie par le coefficient de corrélation ρ_n entre la série de taille n et la même série décalée d'un rang ($X_2, X_3, \dots, X_n, X_1 = Y_1, Y_2, \dots, Y_n$). Dans ce cas ρ_n est estimé par [114] :

$$\rho_n = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.38)$$

La fonction d'autocorrélation ρ_n est définie dans l'intervalle $[-1, 1]$. Quand ρ_n prend l'une des valeurs extrêmes, la corrélation est totale. Lorsque ρ_n est nul, la corrélation est inexistante [114]. Rappelons que la valeur exacte de la fonction d'autocorrélation ρ ($n \rightarrow \infty$) n'est donnée

que pour un nombre infini d'échantillons, ρ_n n'est donc qu'une estimation de l'autocorrélation puisque l'on dispose, en pratique, que d'un nombre fini d'échantillons.

Le processus stochastique dans le cas de nos mesures représente la valeur du champ électrique sur une révolution du brasseur. Les n réalisations sont les données relevés pour chacune des 60 positions angulaires du brasseur. La fonction d'autocorrélation est donc calculée pour chaque série de 60 échantillons d'une composante rectangulaire E_R (E_x , E_y ou E_z) ou champ total E_{tot} à une position de sonde donnée, et à fréquence fixe. Nous obtenons sur les trois axes un total de 1440 échantillons (60 pas \times 8 positions de sonde \times 3 axes). Les résultats de la fonction d'autocorrélation obtenus à partir des différents calibrages effectués sont donnés ci-dessous, sachant que la valeur seuil ρ_s communément admise par les normes [5,6] au-delà de laquelle il y'a une forte corrélation est :

$$\rho_s = \pm \frac{1}{e} \approx \pm 0.37 \quad (4.39)$$

Les figures 4.24 à 4.32 montrent la fonction d'autocorrélation en fonction de la fréquence des composantes rectangulaires E_x , E_y et E_z et du champ total E_{tot} , relevés sur un tour de brasseur à partir des huit positions de sonde, pour les cas chambre vide (FIG. 4.24) et chambre chargée selon les configurations n°1 à 5 (FIG. 4.25 à FIG. 4.32) respectivement.

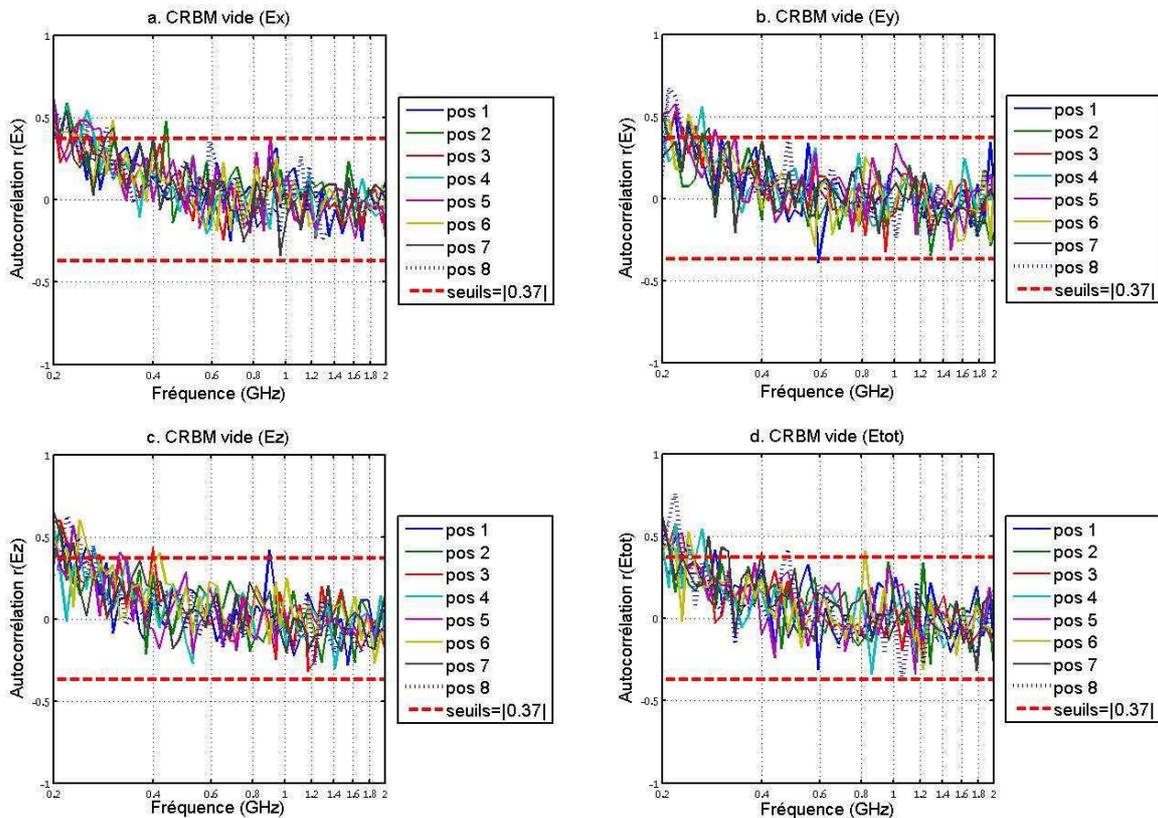


FIG. 4.24. Fonction d'autocorrélation pour la CRBM vide

Dans le cas chambre vide (FIG. 4.24), nous constatons que l'indépendance des échantillons est vérifiée à partir de 300 MHz selon les critères normatifs pour les trois composantes rectangulaires et pour le champ électrique totale. La suite des résultats, pour les cas chambre chargée où le facteur de qualité se trouve dégradé, sont présentés ci-dessous (FIG. 4.25 à FIG. 4.32). Ces résultats montrent que l'indépendance des échantillons est de façon globale dégradée dans les basses fréquences (jusqu'à 600 MHz) quelque soit la composante rectangulaire et proportionnellement au nombre d'absorbants insérés dans la chambre, elle est aussi plus ou moins dégradée, de façons particulière, selon l'axe considéré et la configuration des absorbants ((empilés (config.1), joints (configs. 2 et 4) ou distribués (configs. 3 et 5)). Ces résultats sont une première preuve qu'un nombre de pas de brasseur plus élevé (60 pas) combiné avec un facteur de qualité dégradé diminue sensiblement le nombre d'échantillons indépendants surtout dans les basses fréquences ce qui risque d'accentuer l'erreur dans l'évaluation de l'uniformité statistique du champ EM . Nous verrons plus loin (sections 4.2.3.2 et 4.2.3.3), à travers des tests statistiques et des critères normatifs, l'impact de ces résultats sur l'uniformité statistique du champ EM . Par ailleurs, nous avons établi le même constat pour les mesures de la puissance reçue observées sur les huit positions d'antenne pour chaque type de configuration de la $CRBM$ (FIG. 4.33).

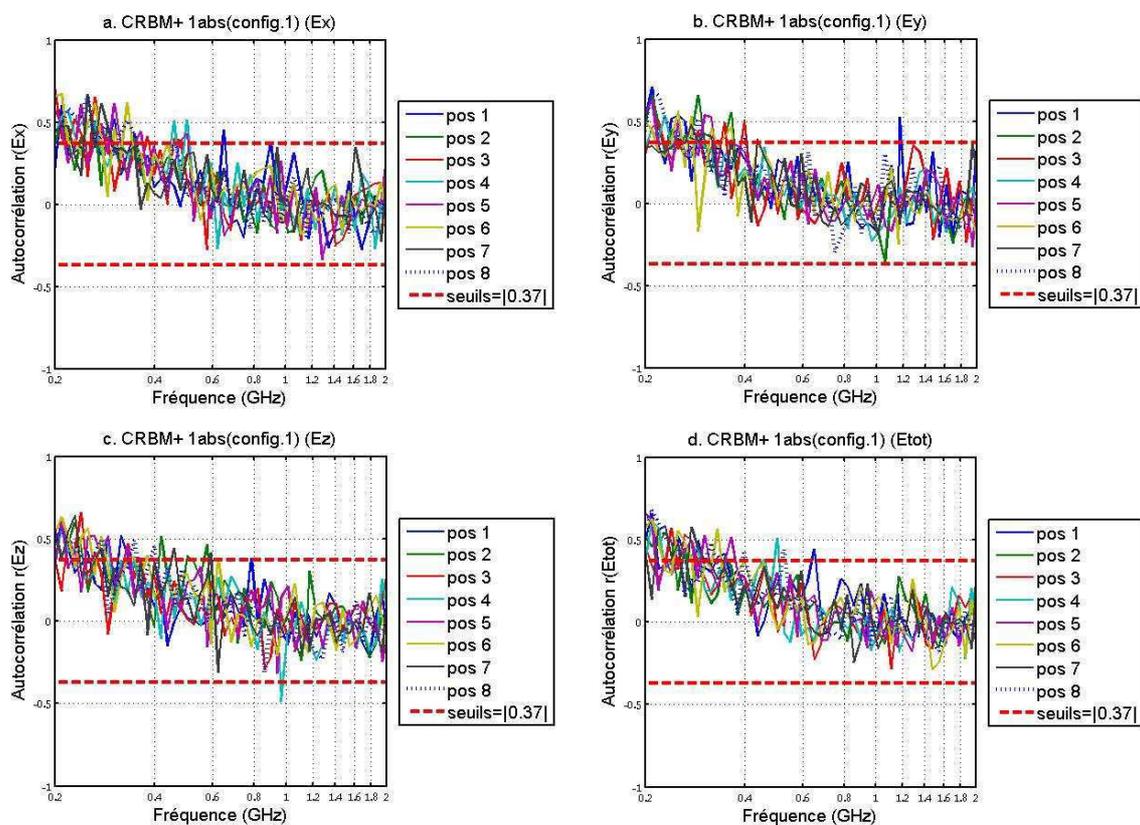


FIG. 4.25. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 1 absorbant (config.1)

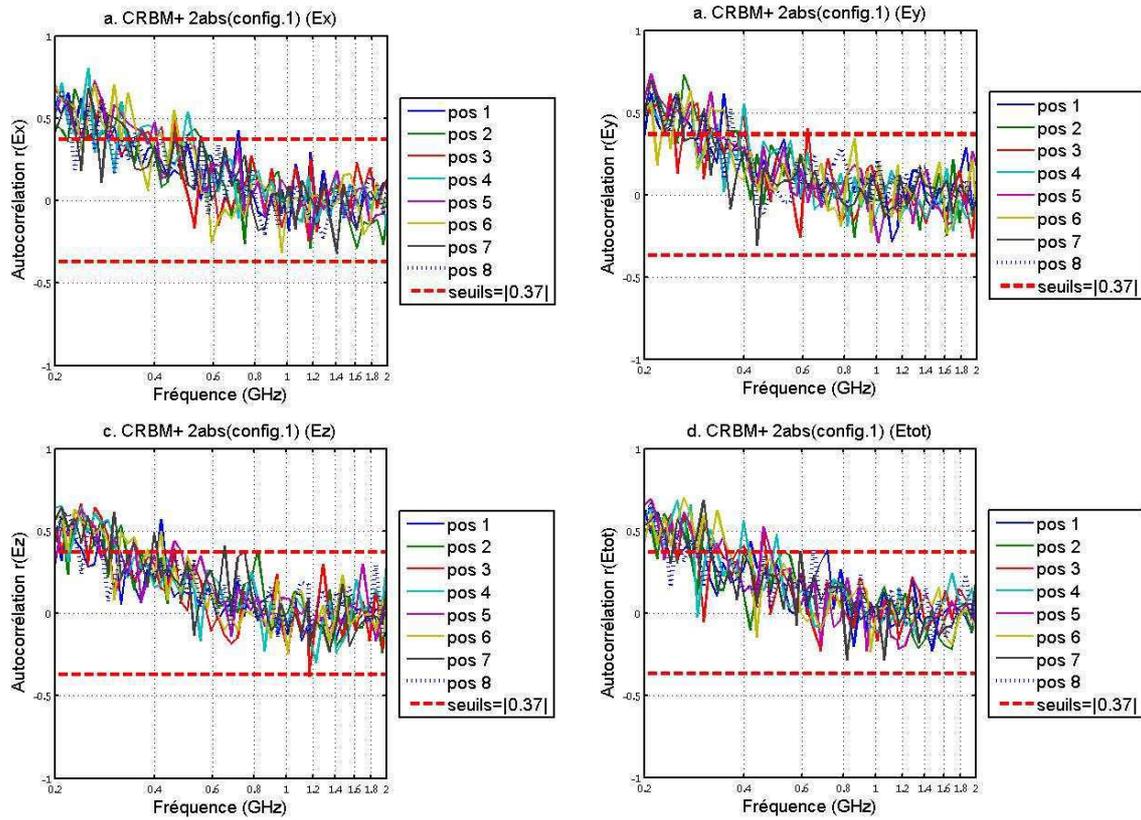


FIG. 4.26. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config.1)

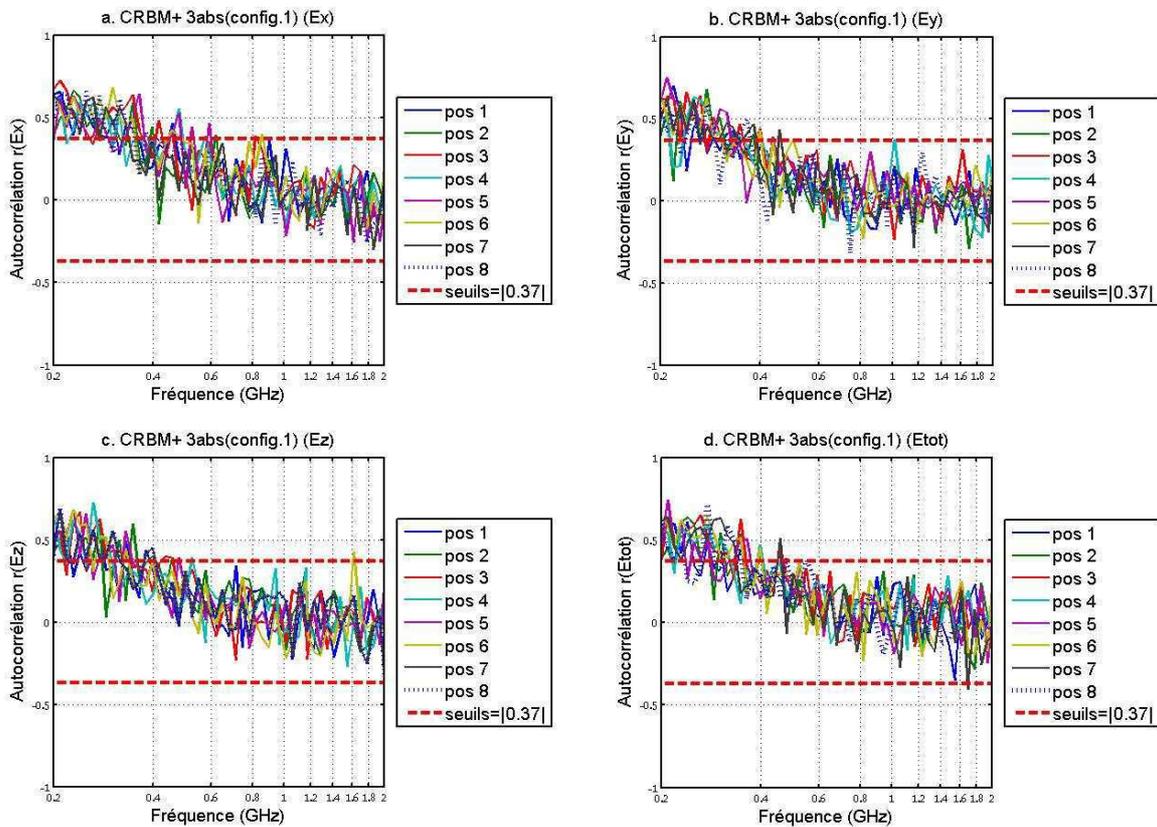


FIG. 4.27. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 3 absorbants (config.1)

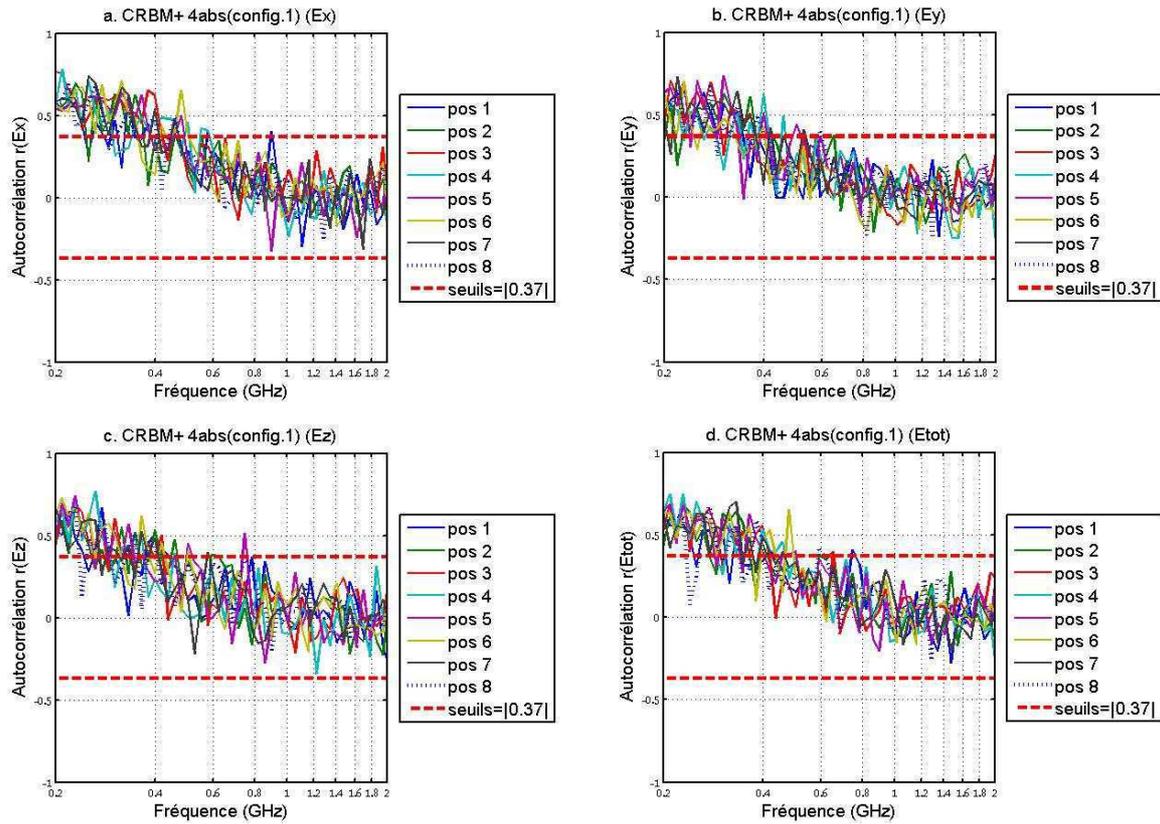


FIG. 4.28. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 4 absorbants (config.1)

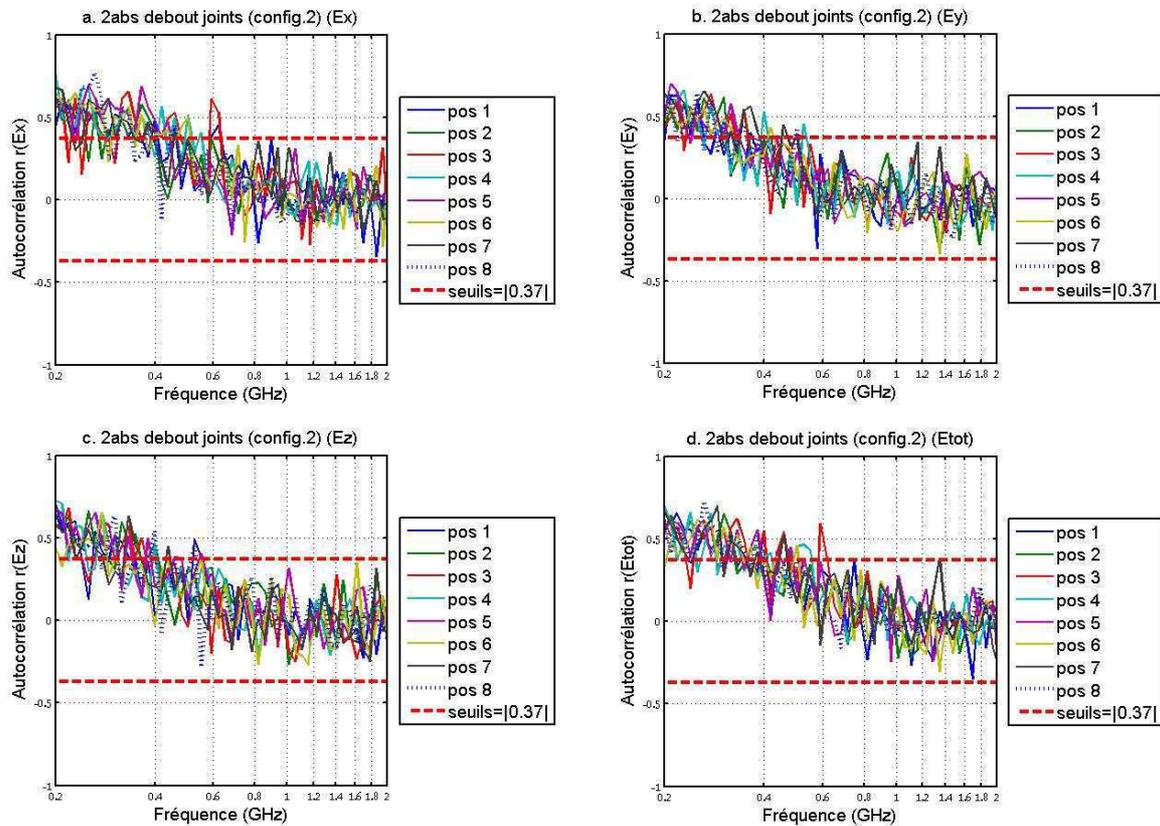


FIG. 4.29. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config. 2)

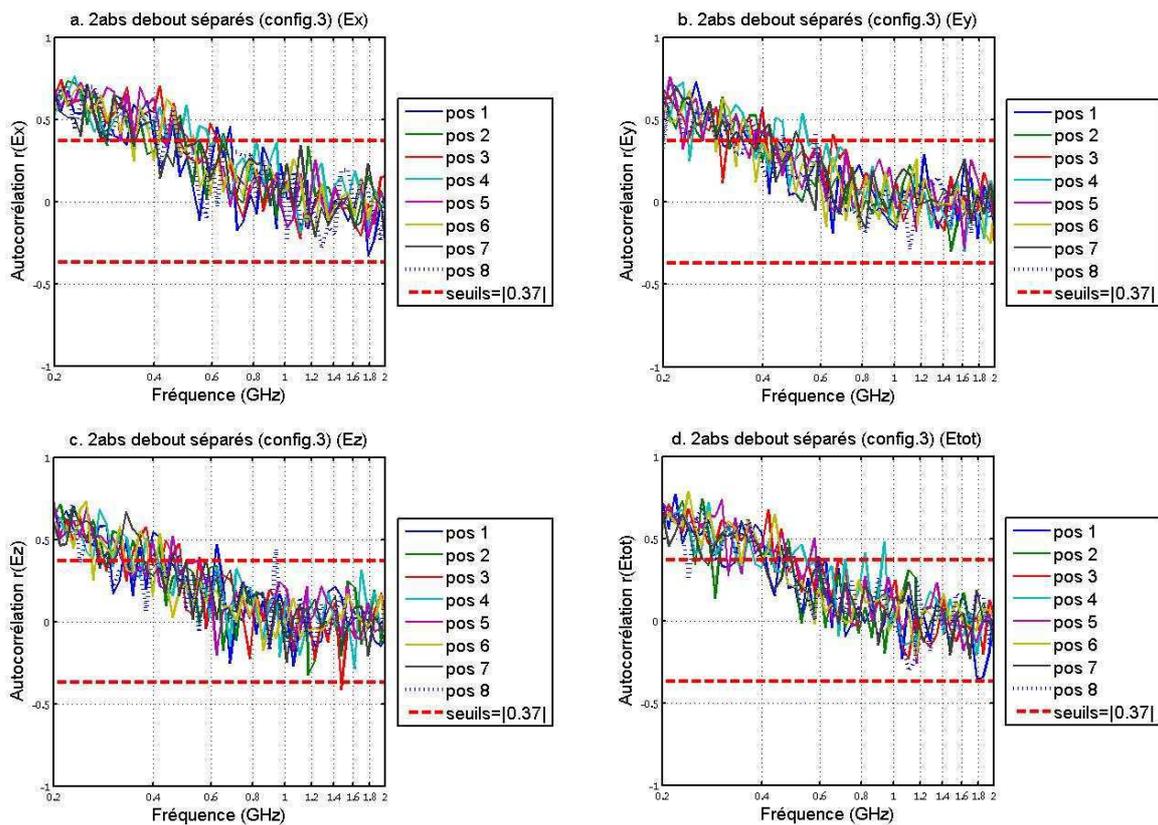


FIG. 4.30. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config.3)

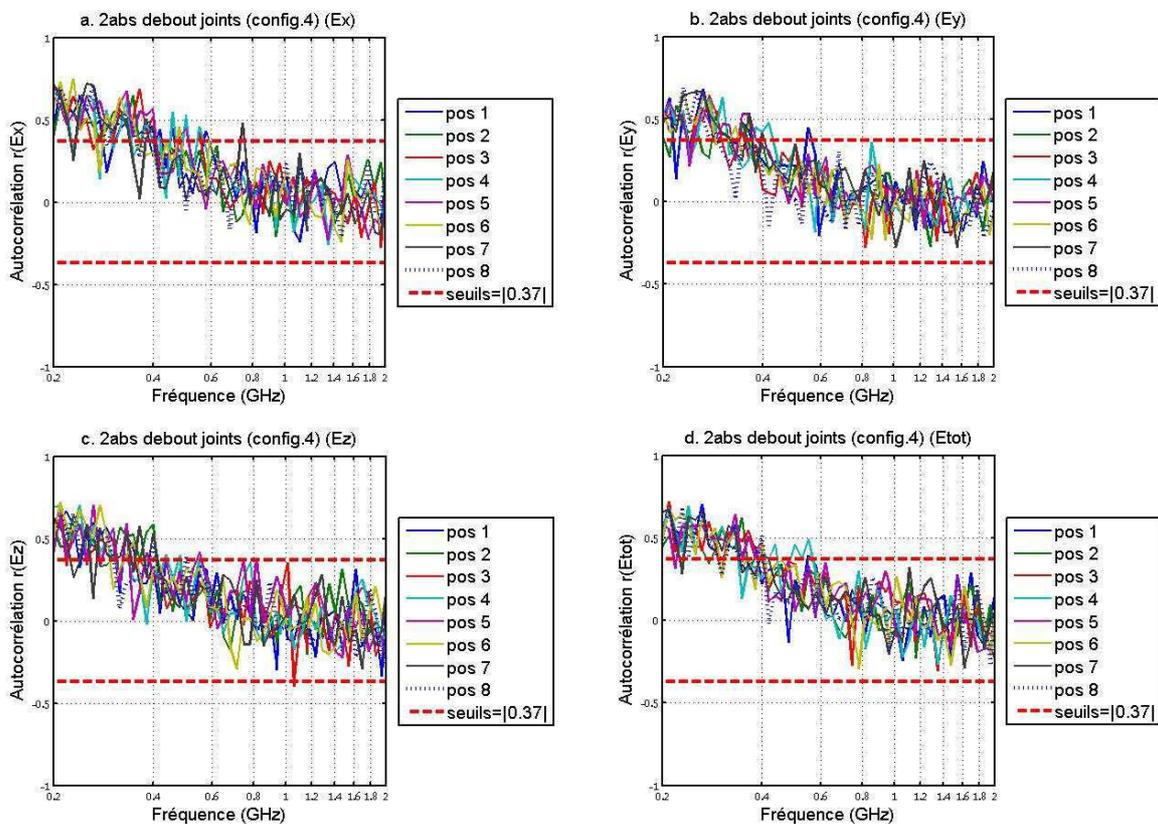


FIG. 4.31. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config.4)

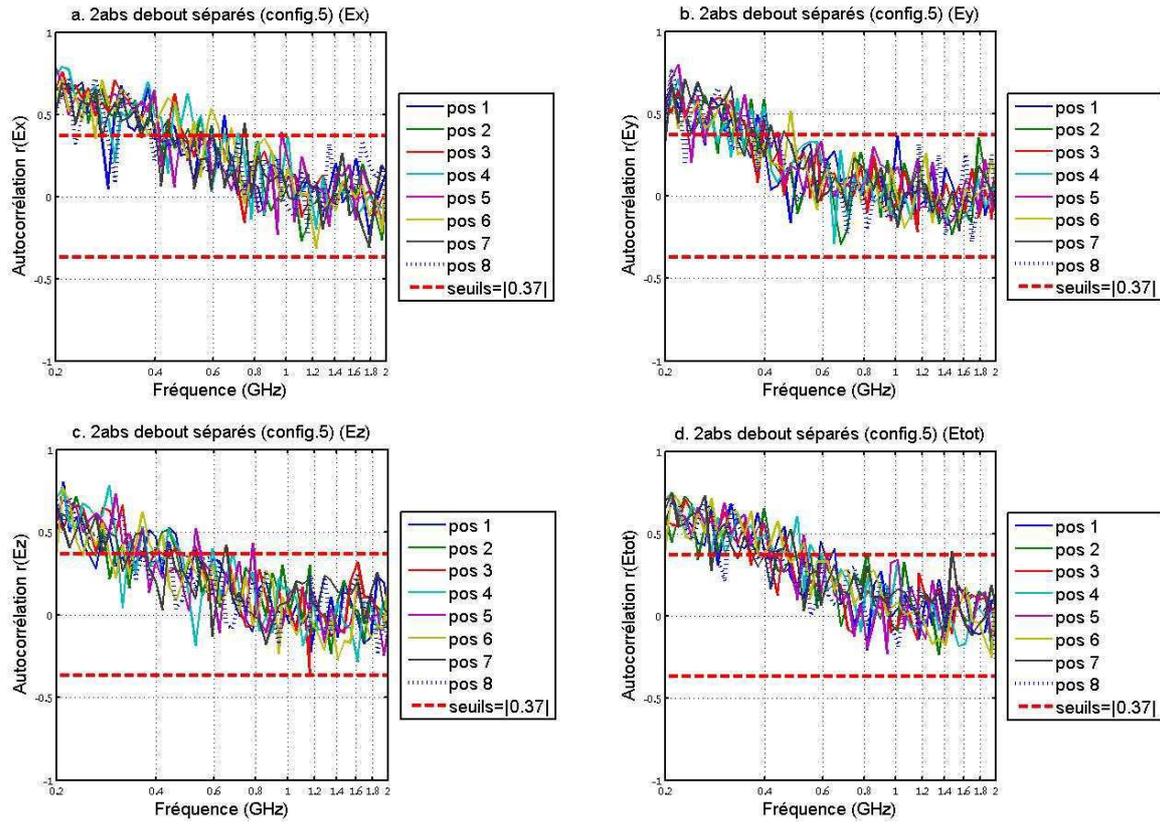


FIG. 4.32. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config.5)

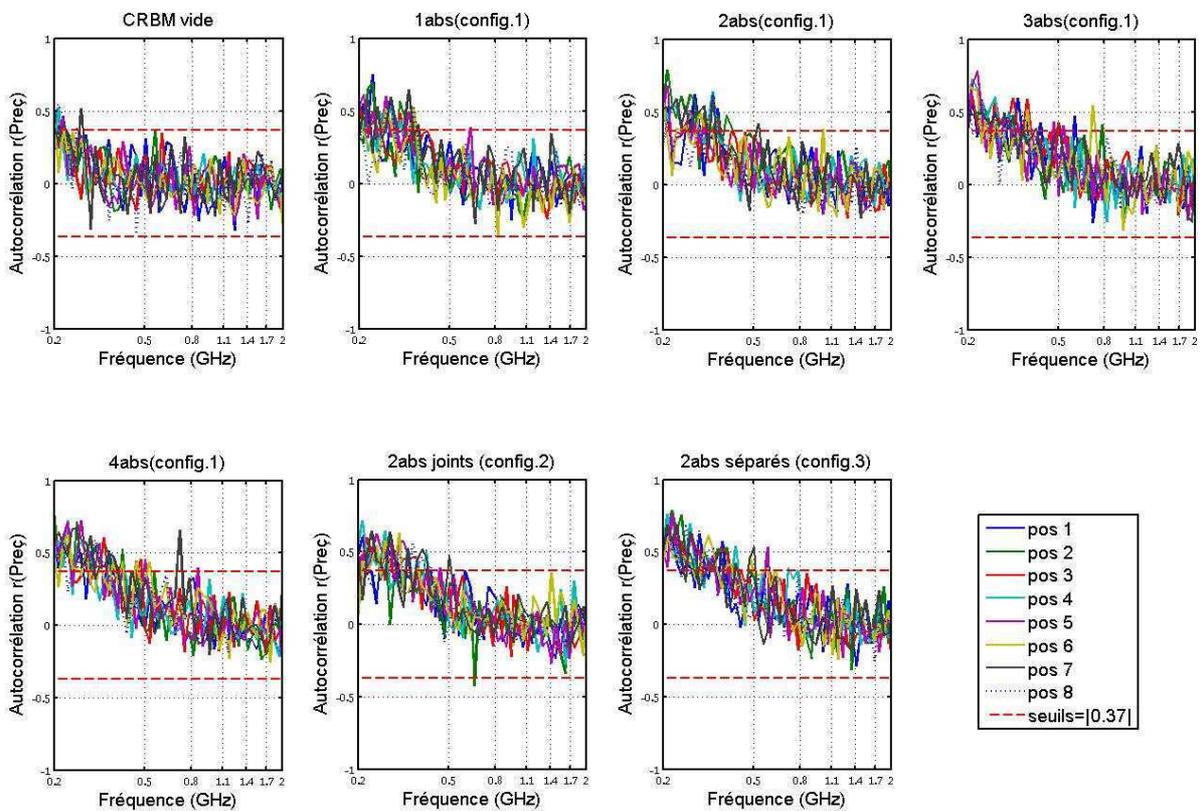


FIG. 4.33. Fonction d'autocorrélation des échantillons de la puissance reçue (CRBM vide et configs. 1 à 3)

Le Tableau 4.3 indique les valeurs calculées de la fonction d'autocorrélation au premier ordre de nos échantillons de la composante (E_x) relevés sur une position de sonde pour différentes configurations de charge de la CRBM. Il est clair d'après ces résultats que la quantité, l'orientation et la distribution spatiale de la charge ont un impact plus ou moins significatif sur l'indépendance des échantillons, principalement pour les fréquences inférieures à 600MHz. L'observation et l'analyse de nos résultats expérimentaux n'étant pas suffisantes pour une explication rigoureuse de ce phénomène physique, nous avons développé dans le paragraphe suivant un raisonnement logique, avec des équations qui donnent suite aux informations scientifiques trouvées dans la littérature, afin d'expliquer analytiquement le lien physique entre le nombre d'échantillons indépendants et la charge insérée dans une chambre réverbérante.

De nombreux travaux ont été effectués par la communauté CRBM afin d'arriver à un modèle théorique du nombre d'échantillons indépendants disponibles avec un brassage mécanique. L'un des travaux qui a retenu notre attention présente un modèle basé sur le facteur de qualité de la chambre [133] valide pour un brasseur mécanique d'une dimension électrique effective minimale de 2λ , où le nombre d'échantillons indépendants N_{ind} est donné pour une révolution de brasseur par l'équation (4.40) :

$$N_{ind} = C_{méca} \frac{QV_s}{V} \quad (4.40)$$

V est le volume de la chambre, V_s est le volume équivalent du brasseur (i.e. le plus petit cylindre englobant le brasseur), $C_{méca}$ est une constante proche de l'unité liée au brassage mécanique [133], et Q est le facteur de qualité de la chambre.

| $f(\text{MHz})$ | $\rho_{Er}(\text{vide})$ | ρ_{Er} 1 abs Config.1 | ρ_{Er} 2 abs Config.1 | ρ_{Er} 3 abs Config.1 | ρ_{Er} 4 abs Config.1 | ρ_{Er} 2 abs Config.2 | ρ_{Er} 2 abs Config.3 | ρ_{Er} 2 abs Config.4 | ρ_{Er} 2 abs Config.5 |
|-----------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 200 | 0,41 | 0,19 | 0,61 | 0,63 | 0,58 | 0,43 | 0,59 | 0,45 | 0,65 |
| 229 | 0,43 | 0,32 | 0,44 | 0,39 | 0,57 | 0,41 | 0,54 | 0,54 | 0,65 |
| 302 | 0,21 | 0,52 | 0,44 | 0,49 | 0,47 | 0,52 | 0,40 | 0,34 | 0,53 |
| 381 | 0,16 | 0,30 | 0,31 | 0,18 | 0,44 | 0,26 | 0,61 | 0,45 | 0,67 |
| 437 | 0,005 | 0,16 | 0,14 | 0,30 | 0,28 | 0,25 | 0,28 | 0,21 | 0,46 |
| 479 | 0,04 | -0,02 | 0,15 | 0,25 | 0,26 | 0,07 | 0,15 | 0,08 | 0,25 |
| 550 | -0,06 | 0,20 | 0,01 | 0,07 | 0,06 | 0,09 | -0,11 | 0,23 | 0,36 |
| 620 | 0,22 | 0,03 | 0,07 | 0,16 | 0,23 | 0,45 | 0,45 | 0,21 | 0,17 |
| 712 | 0,03 | -0,10 | 0,43 | 0,25 | 0,22 | 0,03 | -0,18 | 0,01 | 0,01 |
| 818 | -0,17 | 0,15 | -0,07 | -0,02 | 0,008 | -0,26 | -0,08 | -0,18 | 0,06 |
| 897 | 0,25 | 0,38 | 0,02 | 0,36 | 0,40 | 0,36 | 0,22 | 0,05 | 0,19 |
| 963 | -0,05 | -0,04 | 0,07 | -0,01 | -0,03 | 0,10 | 0,23 | 0,09 | 0,03 |
| 1059 | 0,19 | 0,31 | 0,22 | 0,10 | 0,08 | -0,07 | 0,02 | -0,17 | 0,14 |
| 1170 | 0,08 | -0,21 | 0,29 | 0,03 | -0,01 | -0,14 | -0,16 | -0,02 | -0,001 |
| 1229 | -0,17 | 0,04 | -0,11 | -0,05 | 0,05 | 0,10 | 0,01 | 0,12 | 0,07 |
| 1348 | -0,22 | -0,26 | -0,07 | 0,09 | -0,01 | -0,005 | -0,14 | 0,20 | 0,04 |
| 1478 | -0,20 | -0,15 | 0,05 | 0,14 | -0,19 | -0,03 | -0,03 | 0,05 | -0,04 |
| 1620 | 0,014 | -0,11 | -0,17 | 0,05 | 0,14 | 0,14 | -0,03 | 0,07 | 0,23 |
| 1697 | -0,25 | -0,27 | 0,06 | -0,001 | -0,03 | -0,26 | 0,14 | 0,02 | 0,04 |
| 1860 | -0,05 | 0,05 | 0,04 | -0,10 | -0,16 | -0,34 | -0,22 | 0,01 | -0,06 |
| 1948 | 0,05 | -0,02 | 0,11 | -0,09 | -0,10 | -0,01 | -0,02 | -0,14 | 0,08 |
| 2000 | 0,12 | 0,19 | 0,07 | -0,15 | 0,11 | 0,10 | -0,03 | 0,12 | 0,15 |

Tab. 4.3. Valeurs de la fonction d'autocorrélation au 1^{er} ordre des mesures de la composante rectangulaire de champ E_R

Nous allons donc appliquer l'équation (4.40) aux cas de nos expérimentations. Soient Q_v et Q_c les facteurs de qualité de la chambre vide et chargée respectivement, nous obtenons alors les deux équations 4.41 et 4.42 relatives aux deux cas précédents :

$$N_{indV} = C_{méca} \frac{Q_v V_s}{V} \quad (4.41)$$

$$N_{indC} = C_{méca} \frac{Q_c V_s}{V} \quad (4.42)$$

À partir de l'expression de l'ACS moyenne $\langle S_a \rangle$ (Eq. 4.37) et des équations 4.41 et 4.42 nous obtenons l'équation suivante :

$$\langle S_a \rangle = C_{méca} \frac{2\pi V_s}{\lambda} \left(\frac{N_{indV} - N_{indC}}{N_{indV} N_{indC}} \right) \quad (4.43)$$

Dans l'hypothèse où N_{indV} est connu puisque nous recherchons l'impact de la charge sur le nombre d'échantillons indépendants, dans ce cas pour une chambre chargée nous déduisons de l'équation 4.43 l'expression suivante du nombre d'échantillons indépendants sur une révolution de brasseur en fonction de l'ACS moyenne pour une CRBM chargée :

$$N_{indC} = \frac{2\pi V_s C_{méca} N_{indV}}{\lambda \langle S_a \rangle N_{indV} + 2\pi V_s C_{méca}} \quad (4.44)$$

L'équation 4.44 est cohérente du moment que si l'on se met dans le cas chambre vide (i.e. $\langle S_a \rangle = 0$) alors N_{indC} sera égale à N_{indV} , par contre si la charge dans la chambre augmente en insérant des éléments dissipatifs d'une certaine section efficace d'absorption (i.e. $\langle S_a \rangle \neq 0$) alors le nombre d'échantillons indépendants diminue avec l'augmentation de $\langle S_a \rangle$ en comparaison avec le nombre d'échantillons indépendants de la chambre vide. Ceci conforte très bien l'analyse de nos résultats expérimentaux présentés précédemment. Rappelons que cette formule n'est valable que pour un brassage mécanique, une éventuelle utilisation pour un brassage électronique reste à vérifier.

Revenons maintenant à l'idée reçue selon laquelle la dégradation du facteur de qualité de la chambre, permettant d'exciter simultanément un nombre élevé de modes combinée avec un brassage efficace, pourrait créer un nombre important d'échantillons indépendants exploitables. Nous avons montré, à travers les résultats expérimentaux obtenus ainsi que le développement ci-dessus, que cette technique est utilisée sans beaucoup de précautions si ce n'est à tort par la communauté scientifique et industrielle.

Nous pouvons expliquer physiquement cela de la manière suivante, en effet un faible facteur de qualité augmente la largeur de bande des modes de résonances, ce qui rend la tâche difficile au brasseur pour faire décaler les fréquences de résonance en dehors de la largeur de bande de la chambre. Un large mouvement de brasseur (ou un grand pas angulaire) sera alors

nécessaire pour créer un nouvel environnement EM statistiquement indépendant de l'environnement précédent, cela revient donc à augmenter le pas angulaire (i.e. diminuer le nombre de pas sur une révolution complète) entraînant une diminution du nombre d'échantillons disponibles sur une révolution de brasseur. Cependant, la majorité des méthodes statistiques ou normatives exigent un nombre d'échantillons élevé pour une meilleure précision dans l'évaluation de la distribution du champ EM , ce qui pousse les opérateurs à augmenter le nombre de pas de brasseur pour obtenir plus d'échantillons. L'inconvénient vient du fait que le nombre d'échantillons indépendants diminue même en augmentant le nombre de pas de brasseur du fait de ce que nous avons expliqué précédemment.

Nous verrons dans la section suivante que le fait d'introduire des absorbants dans la chambre, diminuant ainsi le nombre d'échantillons indépendants, donne l'impression que le champ EM reste statistiquement uniforme même en basses fréquences. La réalité est toute autre puisque l'erreur induite par la corrélation des échantillons devient si importante que les méthodes statistiques et surtout normatives utilisées pour vérifier la distribution du champ EM deviennent moins rigoureuses.

4.2.3.2 Evaluation de l'uniformité statistique du champ E par la méthode normative

Dans cette section, nous comparons les valeurs de champ électrique relevées sur les différentes positions du volume de test. Cette comparaison, basée sur les critères de la norme *IEC-61000-4-21*, se fait à travers le calcul de l'écart-type par rapport à la valeur moyenne normalisée des valeurs maximales normalisées (à la racine carrée de la puissance moyenne d'entrée) relevées sur un tour de brasseur, ce qui permet d'évaluer l'homogénéité du champ mais aussi son isotropie. On observe d'une part l'écart-type sur les trois composantes du champ (E_{xmax} , E_{ymax} et E_{zmax}) en chaque point, afin de vérifier son isotropie, et d'autre part, sur l'ensemble des composantes (E_{xyzmax}), pour évaluer son homogénéité.

Soient m le nombre de positions spatiales de la sonde isotropique servant à l'acquisition des données de champ, \vec{E}_i la valeur maximale normalisée du champ à une fréquence donnée, $\langle \vec{E} \rangle_m$ la moyenne arithmétique des valeurs \vec{E}_i issues de l'ensemble des m positions.

L'écart-type est donné indépendamment des axes Ox , Oy et Oz par l'équation (4.45).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \left(\vec{E}_i - \langle \vec{E} \rangle_m \right)^2}{m-1}} \quad (4.45)$$

Si l'on considère les mesures prises dans un seul axe indépendamment des autres, sur les huit positions de la sonde, alors l'équation (4.45) deviendra par exemple pour l'axe Ox :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum \left(\vec{E}_i - \langle \vec{E} \rangle_8 \right)^2}{8-1}} \quad (4.46)$$

Si l'on considère cette fois l'ensemble des trois axes « n » sur les huit positions de la sonde « m » donnant 3×8 mesures alors l'écart-type est exprimé par l'équation (4.47) :

$$\sigma_{24} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^3 \left(\vec{E}_{m,n} - \langle \vec{E} \rangle_{24} \right)^2}{24 - 1}} \quad (4.47)$$

La norme stipule alors que le champ peut être considéré comme homogène lorsque l'écart type global en dB est inférieur aux prescriptions de tolérances données par le tableau 4.4.

| Gamme de fréquence | Prescription de tolérance pour l'écart-type |
|----------------------|--|
| 80 MHz à 100 MHz | 4 dB* |
| 100 MHz à 400 MHz | 4 dB à 100 MHz décroissant linéairement à 3dB à 400 MHz* |
| Supérieure à 400 MHz | 3 dB* |

* Un maximum de 3 fréquences par octave peuvent dépasser l'écart-type autorisé dans une proportion ne dépassant pas 1 dB de la tolérance exigée.

Tab. 4.4. Prescriptions de tolérance pour l'uniformité de champ

Les résultats pour les différents cas de charge de la CRBM sont présentés ci-dessous (FIG. 4.34 et FIG. 4.35). Des variations ne dépassant pas $1dB$ sont constatées sur l'écart-type mais les résultats ne montrent pas de dépassement du gabarit normatif pour la chambre vide ou la chambre chargée avec x absorbants. L'isotropie et l'uniformité statistiques du champ ne semblent pas donc être affectées par la charge insérée dans la chambre selon le critère normatif [5], cependant les tests statistiques d'ajustement pratiqués sur les mêmes données (section 4.2.3.3) vont révéler le contraire.

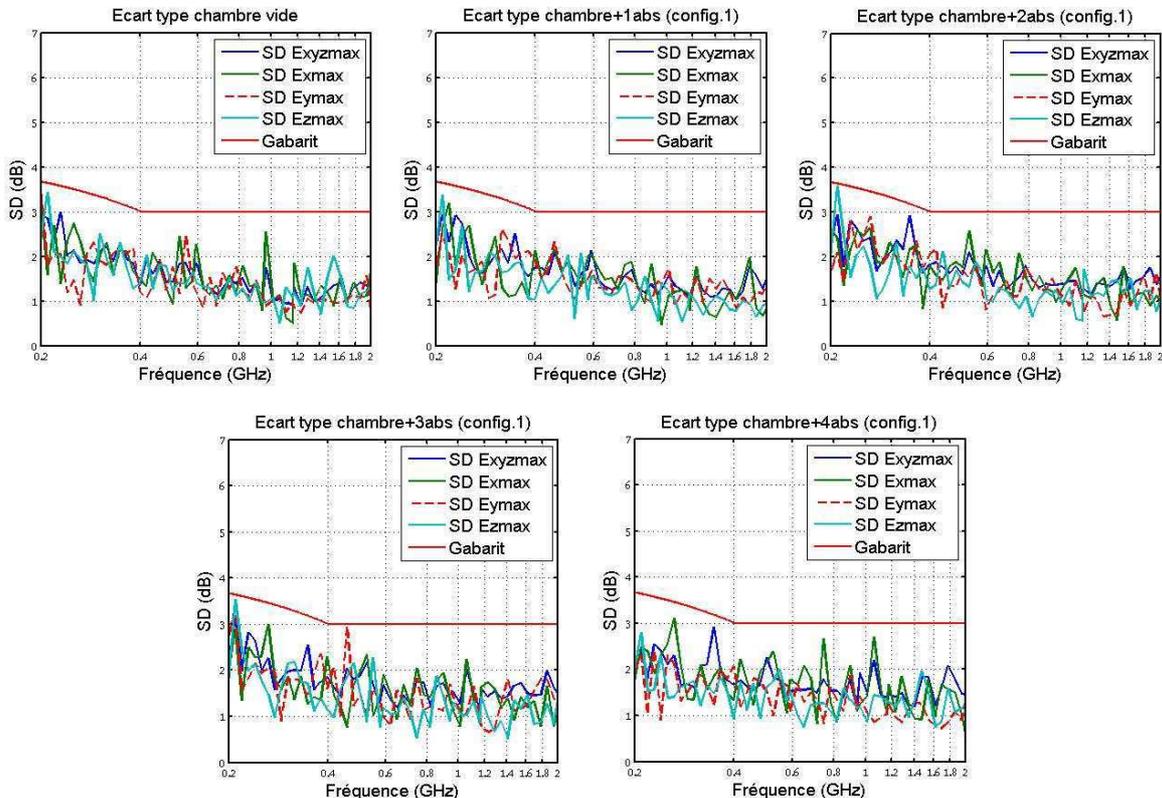


FIG. 4.34. Ecart type (en dB) du champ électrique maximal selon l'état de charge de la CRBM (config. 1)

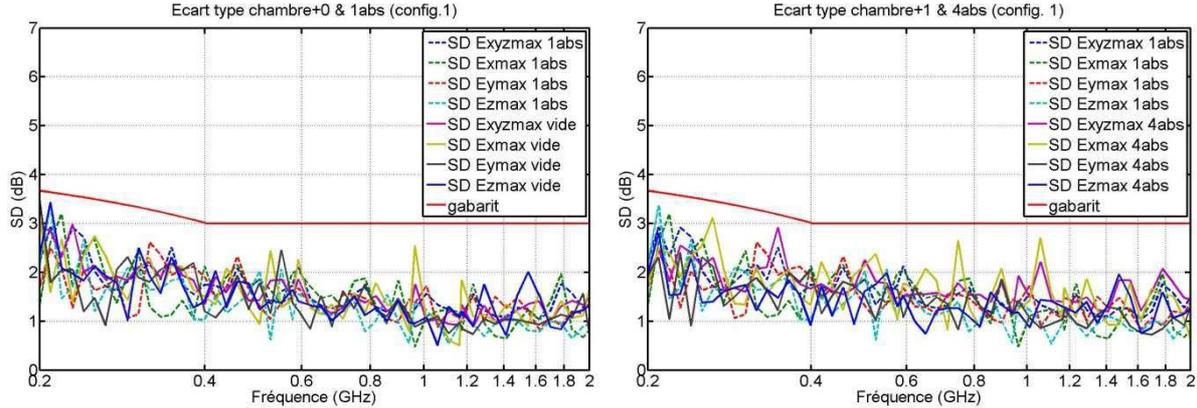


FIG. 4.35. Comparaison de l'Ecart type du champ électrique maximum (CRBM vide ou chargée avec 1 ou 4 absorbants)

4.2.3.3 Evaluation des distributions statistiques du champ E et de la puissance par les tests d'ajustement statistiques

Cette section concerne l'application des tests d'ajustement, cités précédemment, des lois *exponentielle* et de *Rayleigh* sur nos données empiriques issues des différents cas de calibrage. Compte tenu de la section 4.2.3.1, nous allons considérer dans un premier temps que l'indépendance des échantillons est garantie à partir de 300 MHz ce qui est le cas que pour la chambre vide uniquement. Nous signalons que tous les tests sont appliqués suivant un seuil de risque de 5% . Le nombre de mesures enregistrées nous a permis d'exécuter un nombre important de tests d'ajustement donnant plus de significativité à ces derniers. Les résultats seront donc présentés sous forme de taux de rejets résultant du rapport en % du nombre de tests ayant rejeté l'hypothèse H_0 sur le nombre total de tests effectués.

a. Tests d'ajustement appliqués aux mesures de champ E

Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, la loi théorique idéale préconisée par le modèle idéal de *Hill* pour le champ électrique est la *loi de Rayleigh*. Nous allons donc appliquer les deux tests *KS* et *AD* afin d'évaluer l'ajustement de la *loi de Rayleigh* à nos échantillons de la composante rectangulaire E_R du champ électrique. Ces échantillons mesurés vont servir au calcul de l'estimateur ψ_r pour la *loi de Rayleigh* (section 4.1.6). Les valeurs critiques prises en compte sont celles données par *Stephens* (section 4.1.6) d'où les désignations *KS-Stephens* et *AD-Stephens* sur les graphiques ci-dessous, néanmoins un test de *KS* avec le critère de *Massey* (*KS-Massey*) a été rajouté à titre de comparaison. La table de valeurs critiques de *Massey* figure dans de multitudes publications et ouvrages scientifiques et peut être facilement trouvée. Les résultats sont présentés ci-dessous pour la *CRBM* vide et pour la configuration de charge n°1. Les graphiques représentent le taux de rejet en % de l'hypothèse H_0 (hypothèse que la loi de Rayleigh est bien ajustée aux données observées) sur un ensemble de 24 tests d'ajustement par fréquence pour des séries d'effectif $N=60$ échantillons indépendants, à partir de 300 MHz pour le cas chambre vide et à partir de

600 MHz pour les cas chambre chargée (section 4.2.3.1). Les résultats des tests seront donc à prendre avec précaution en dessous de ces fréquences selon le cas.

Dans le cas chambre vide (FIG. 4.36), nous remarquons pour les trois tests présentés un taux de rejet assez fort qui dépasse largement le seuil de risque de 5% dans la gamme 200-600 MHz. Il faut noter que le test *KS-Massey* donne une réponse différente par rapport aux deux autres tests mieux adaptés, ce qui était totalement prévisible (section. 4.1.6). Le test *AD-Stephens* plus puissant donne le taux de rejet le plus élevé. D'après ces résultats l'ajustement de la *loi de Rayleigh* n'est pas confirmé, surtout dans les basses fréquences où le taux de rejet est le plus élevé. Il peut sembler bizarre d'arriver à ce genre de conclusion, cependant ces résultats confortent ceux de *Orjubin* [70] et *Lemoine* [120] qui ont constaté que la distribution de la composante E_R est mieux modélisée par la *loi de Weibull*, cette dernière est une loi plus générale que celle de *Rayleigh*, permettant de prendre en considération l'effet des pertes dans une *CRBM* réelle.

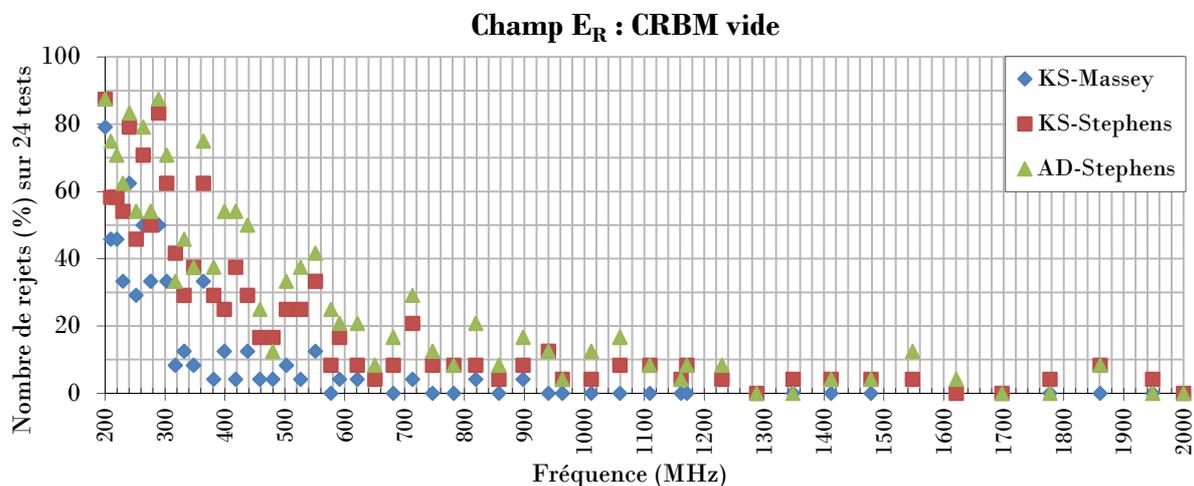


FIG. 4.36. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM vide)

L'insertion d'un ou de plusieurs absorbants dans la chambre engendre une diminution sensible du taux de rejet dans la gamme 200-600 MHz (FIG. 4.37 à FIG. 4.40), nous pouvons dire en quelques sortes que l'ajustement de la *loi de Rayleigh* aux distributions empiriques est meilleur en basses fréquences en présence d'éléments dissipatifs. Notons que le taux de rejet reste malgré tout au dessus du seuil de risque dans cette gamme de fréquences. Cependant, à partir de trois absorbants insérés nous constatons une augmentation non négligeable du taux de rejet dans les fréquences supérieures à 600 MHz, d'où l'influence négative de l'insertion d'éléments dissipatifs, dans cette configuration et cette gamme de fréquence, sur l'ajustement aux lois idéales. Ces résultats sont à prendre avec précaution pour les fréquences allant de 200 à 600 MHz, car nous ne devons pas perdre de vue l'indépendance des échantillons. En effet, d'après les résultats de la section 4.2.3.1 la diminution du taux de rejet dans les basses fréquences coïncide avec une augmentation de la corrélation des échantillons. Donc toute conclusion hâtive sur l'amélioration de l'effet réverbérant par insertion d'objets dissipatifs dans la *CRBM* pourrait paraître non rigoureuse. Par ailleurs, nous rappelons que les résultats obtenus semblent plus rigoureux que l'estimation par le critère

normatif (écart type) [5] de l'uniformité statistique du champ. Les mêmes tests d'ajustement appliqués sur les données de puissance feront l'objet de la section suivante.

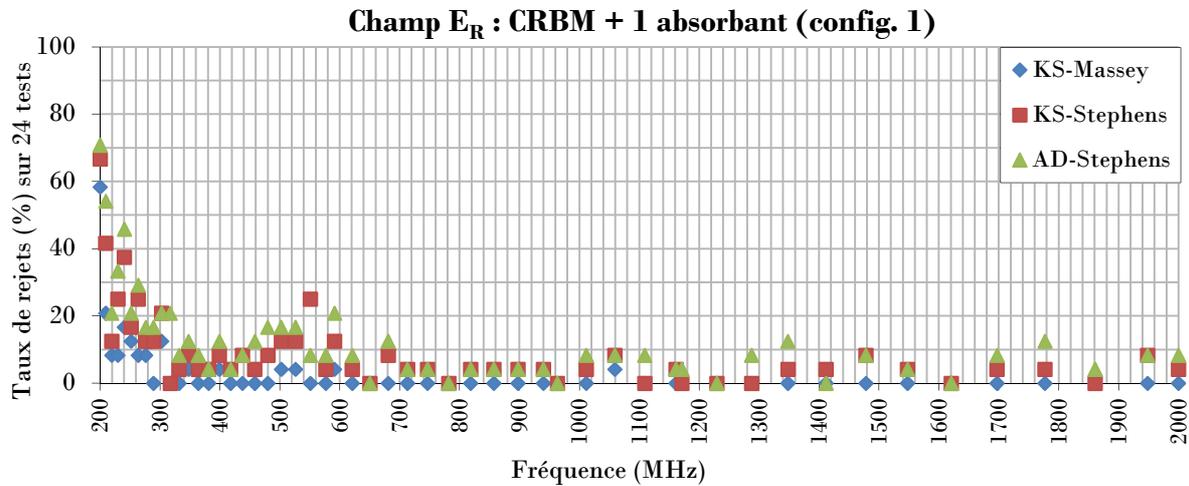


FIG. 4.37. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 1 absorbant – config.1)

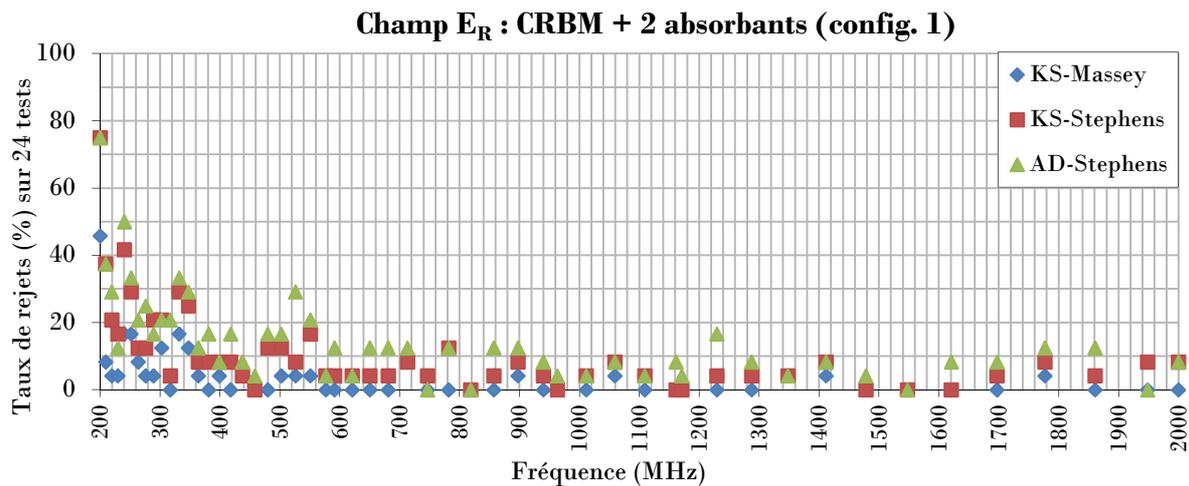


FIG. 4.38. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 2 absorbants – config.1)

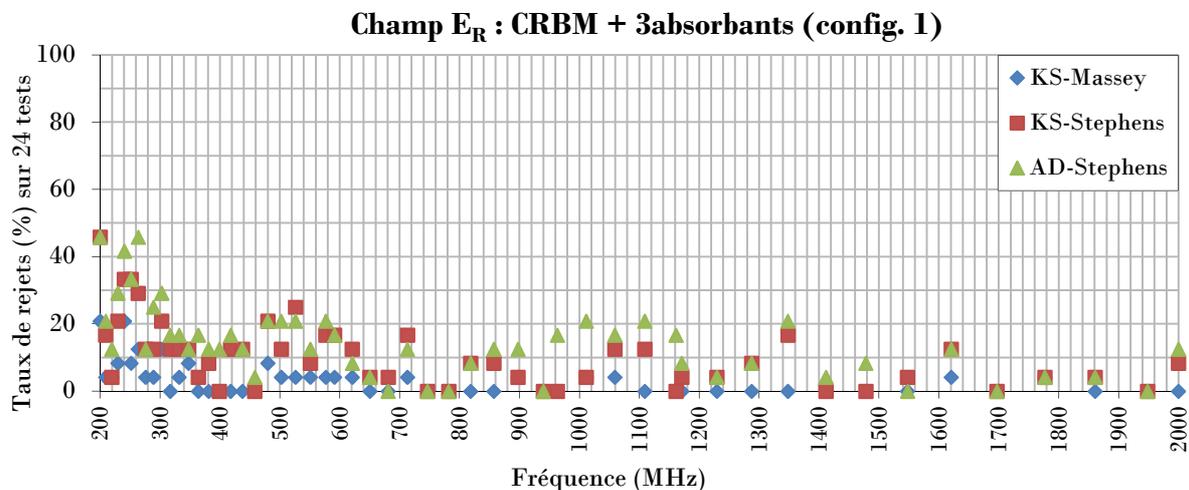


FIG. 4.39. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 3 absorbants – config.1)

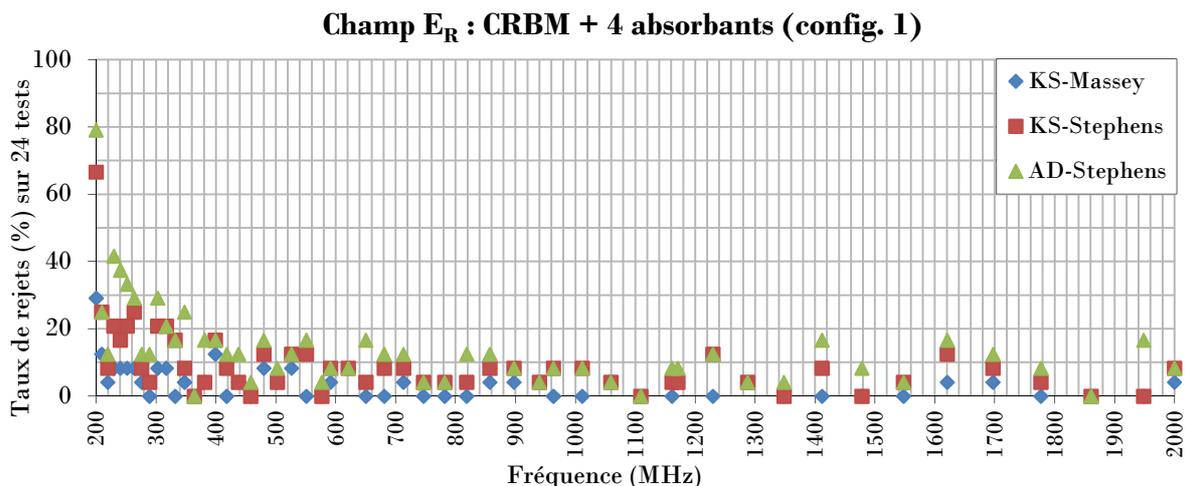


FIG. 4.40. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 4 absorbants - config.1)

b. Tests d'ajustement appliqués aux mesures de puissance

Les données observées sur un tour de brasseur de la puissance mesurée au bout de l'antenne de réception vont servir au calcul de l'estimateur ψ_e de la *loi exponentielle*. Nous allons ensuite appliquer les tests d'ajustement *KS* et *AD* de la *loi exponentielle* aux échantillons empiriques de la puissance reçue en utilisant une fois les valeurs critiques de *Stephens* pour les deux tests *KS-Stephens* et *AD-Stephens*, et l'autre fois les valeurs critiques de *Massey* pour le test *KS-Massey*. Nous rappelons que les mesures sont faites sur huit positions spatiales avec une antenne log-périodique (longueur 87.1 cm, largeur 74.9 cm) selon le protocole de mesure décrit en section 4.2.1.

Les résultats des tests d'ajustement sont donnés ci-dessous pour le cas chambre vide (FIG. 4.41) et les différents cas de la chambre chargée selon la configuration n°1 (FIG. 4.42 à FIG. 4.45). Le résultat est donné sous forme de taux de rejet en % sur un ensemble de huit tests. La première constatation faite, pour tous les cas confondus et pour les trois tests, est la diminution du taux de rejet par rapport aux tests sur la composante E_R . Rappelons que l'outil d'acquisition des deux grandeurs n'est pas le même, la petite sonde de champ isotropique est utilisée pour la composante E_R et l'antenne log-périodique pour la puissance. Le taux de rejet est important dans les fréquences allant de 200 à 600 MHz pour tous les cas de charge de la CRBM, il diminue faiblement dans cette gamme de fréquence suite à l'accroissement du nombre d'absorbants insérés. Dans les fréquences supérieures à 600 MHz, le taux de rejet est très faible, néanmoins le cas chambre vide présente quelques pics de rejet surtout avec le test *AD-Stephens* plus puissant. Nous n'enregistrons pas de différence significative dans ces fréquences après insertion des absorbants sauf pour le cas chambre chargée avec deux absorbants où le taux de rejet devient presque nul, cette configuration pourrait être une candidate à l'amélioration de l'ajustement aux lois idéales dans cette gamme de fréquences. Cependant, nous signalons que la diminution du taux de rejet dans la gamme 200-600 MHz suite à l'insertion des absorbants coïncide avec l'augmentation de la corrélation des échantillons de puissance (FIG. 4.33), comme ça a été constaté pour le champ électrique, nous ne pouvons donc pas statuer de façon rigoureuse sur cette partie.

L'influence de l'orientation ou de la distribution spatiale des absorbants insérés dans la CRBM sur les mesures du champ et de la puissance sera traitée dans la section suivante.

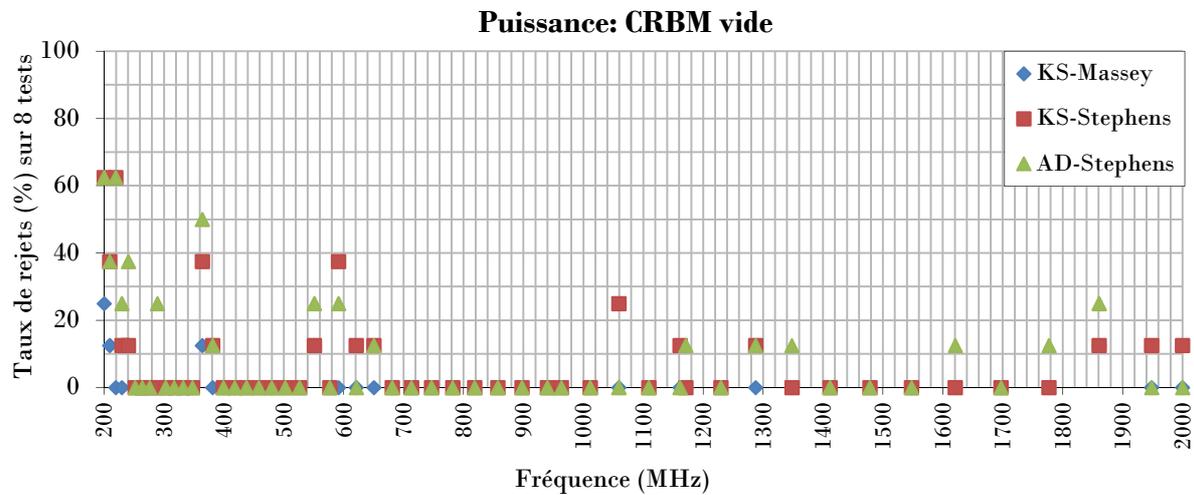


FIG. 4.41. Test d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM vide)

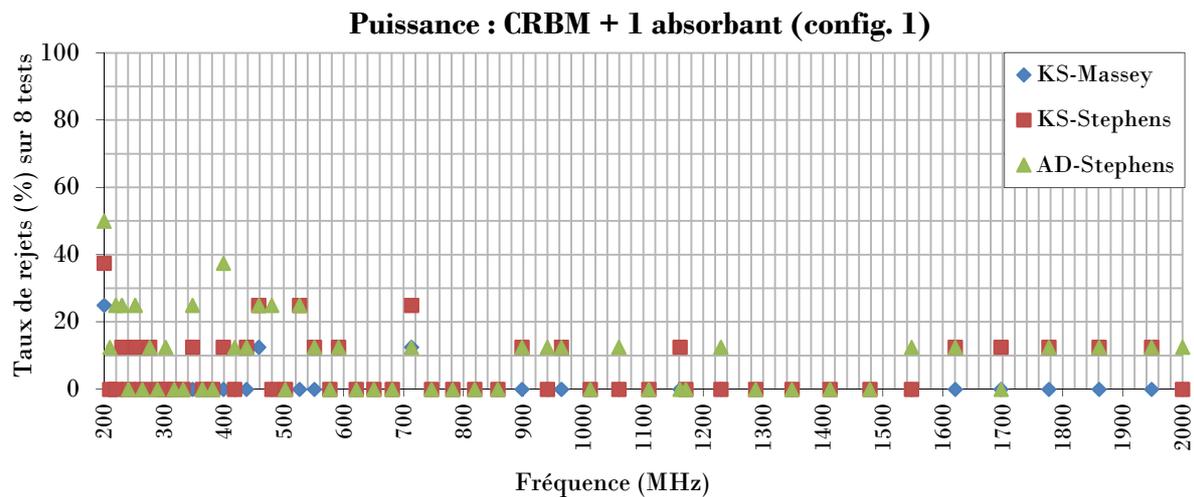


FIG. 4.42. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 1 absorbant - config.1)

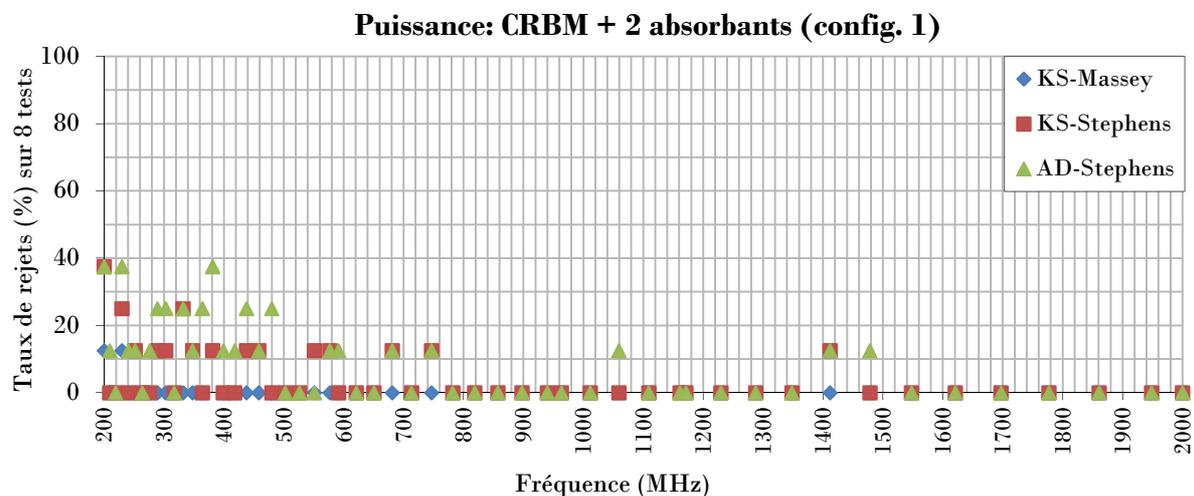


FIG. 4.43. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 2 absorbants - config.1)

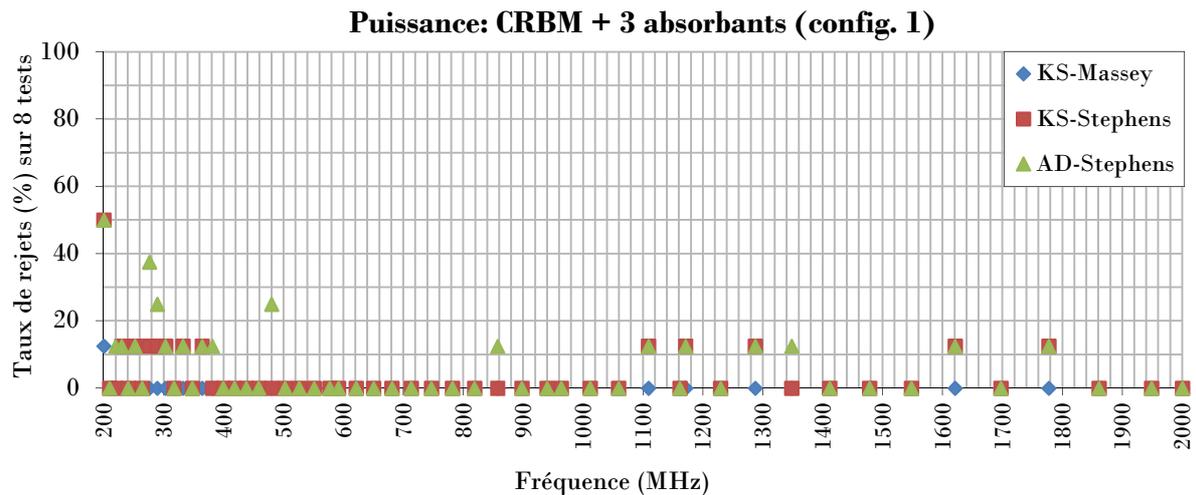


FIG. 4.44. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 3 absorbants - config.1)

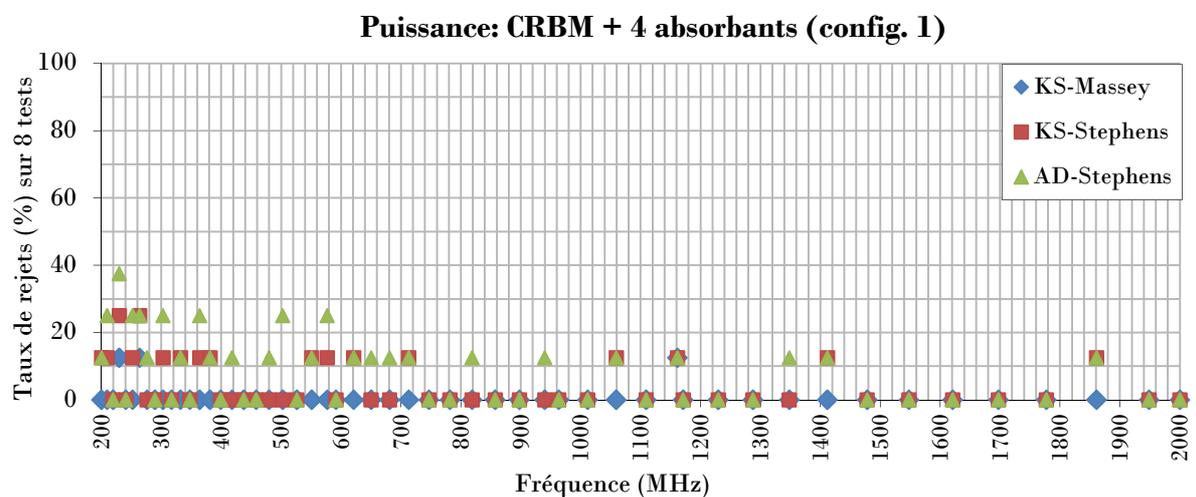


FIG. 4.45. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 4 absorbants - config.1)

4.2.4 Effet de l'orientation et de la distribution de la charge

Nous avons utilisé précédemment une configuration de la charge insérée dans la *CRBM* qui consiste à empiler les absorbants les uns sur les autres au centre du volume utile de la chambre (configuration n°1), de sorte que l'on avait toujours une seule masse compacte de la charge mais de dimensions (ou volume) variables. Nous voulons cette fois distribuer cette masse dans le volume de test selon différentes orientations, changeant ainsi la section efficace d'absorption (ACS) de la charge (section 4.2.2.6), afin de constater s'il y a un impact sur les paramètres d'évaluation de la chambre ou sur les distributions statistiques des grandeurs observées. Pour simplifier notre étude, nous ne nous sommes servis que de deux absorbants identiques parmi les quatre utilisés précédemment. Nous étudierons dans un premier temps les configurations 2 et 3 (FIG. 4.5 et FIG. 4.46) où les absorbants sont positionnés debout et joints (config. 2) et debout et séparés (config. 3). Une comparaison avec les résultats issus des configurations 4 et 5 (FIG. 4.6), où nous changeons seulement l'orientation des absorbants de

90° par rapport aux deux précédentes configurations, sera donnée par la suite. Les courbes issues de la configuration n° 1 et du cas chambre vide seront également intégrées dans les graphiques pour donner une comparaison plus globale des résultats. Les deux prochaines sections aborderont les résultats sur l'écart-type et sur les tests d'ajustement des configurations 2 et 3, la section 4.2.4.3 réunira une comparaison globale entre toutes les configurations (n° 1 à 5 et chambre vide) de tous les paramètres d'évaluation de la CRBM vus précédemment depuis le début de cette étude expérimentale.



FIG. 4.46. Variation de la distribution et l'orientation de la charge avec deux absorbants ((a) config.2 et (b) config.3)

4.2.4.1 Chambre chargée avec deux absorbants selon la configuration n°2

La configuration n° 2 consiste à mettre au centre du volume de test deux absorbants identiques collés l'un contre l'autre dans la position debout comme le montre la figure 4.46.a. La charge avec deux absorbants a donc subi deux rotations verticale et horizontale de 90° par rapport à la configuration n°1. La conséquence directe de ce changement est la variation de l'ACS moyenne de la charge (section 4.2.2.6). Nous présenterons dans la présente section l'effet de cette rotation spatiale de la charge sur l'uniformité du champ *EM* et les distributions du champ électrique et de la puissance reçue dans la CRBM.

a. Ecart type du champ électrique

L'écart type du champ électrique maximum a été recalculé avec les nouvelles données du calibrage selon la configuration n°2 et comparé au gabarit de la norme *IEC 61000-4-21*. La figure 4.47 montre l'écart type du champ dans les trois directions cartésiennes des configurations n°1 et 2. Nous constatons un très léger abaissement (< 1dB) dans les basses fréquences et une stabilité relative à partir de 400 MHz de l'écart type entre les deux configurations. Le gabarit normatif est toujours respecté avec la configuration n°2, donc le champ électrique sur un tour de brasseur est statistiquement isotrope et uniforme d'après le critère normatif.

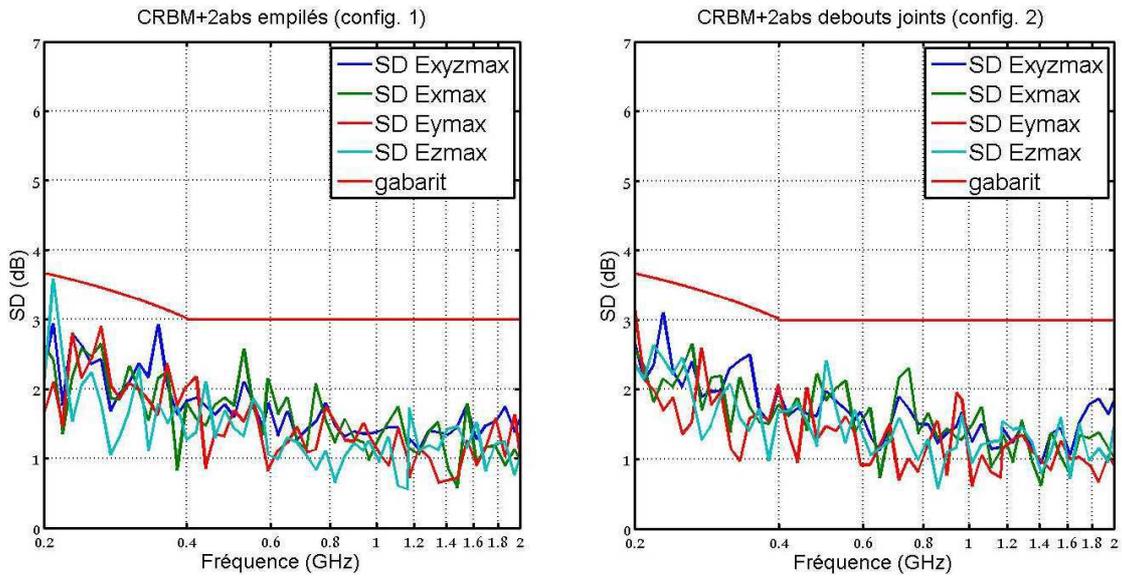


FIG. 4.47. Comparaison de l'Ecart type du champ électrique maximum des configurations n°1 et n°2 (2 absorbants)

b. Tests d'ajustement de la loi de Rayleigh

Les résultats des tests d'ajustement (*KS-Massey*, *KS-Stephens* et *AD-Stephens*) de la loi de Rayleigh aux mesures de champ (composante rectangulaire E_R), issues du calibrage selon la configuration n°2, sont présentés dans la figure 4.48. La réponse semble être différente d'un test à l'autre. Nous constatons essentiellement un taux de rejet élevé, presque sur toute la bande de fréquence, donné par le test *AD-Stephens*. La réponse des autres tests n'est pas très différente de celle obtenue avec la configuration n°1. Nous pouvons affirmer que la distribution de nos mesures de champ ne suit pas tellement la loi de Rayleigh dans ce cas, surtout au-delà de 600 MHz où l'indépendance des échantillons est garantie (FIG. 4.29, section 4.2.3.1). Par ailleurs, si nous revenons à la figure 4.23 de la section 4.2.2.6, nous remarquons que l'ACS moyenne pour la configuration n°2 a augmenté par rapport à celle de la configuration n°1, cet écart étant plus important en fin de plage fréquentielle, ce qui pourrait justifier une relation de cause à effet avec le fort rejet de la loi de Rayleigh.

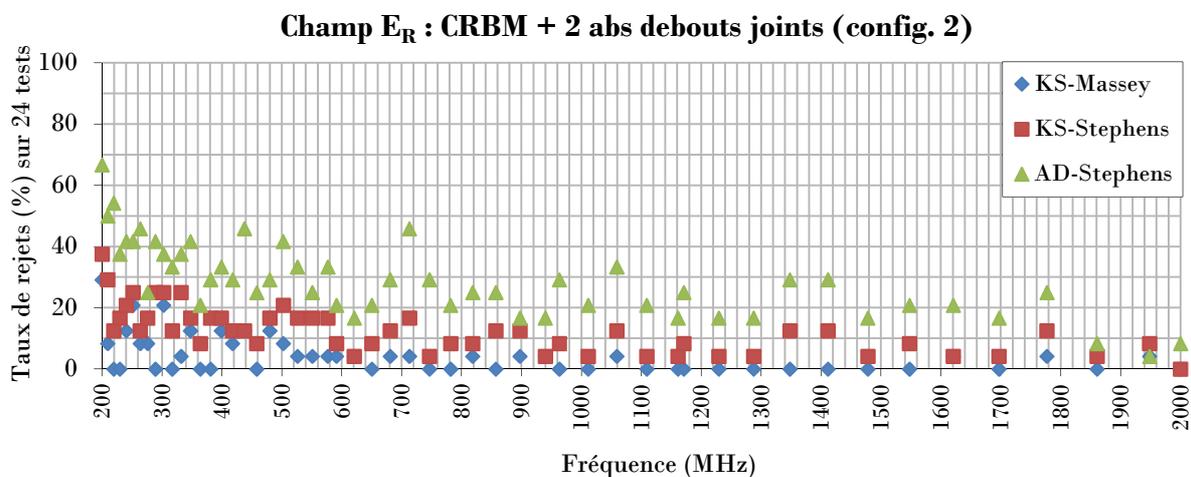


FIG. 4.48. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 2 absorbants debout joints – config.2)

c. Tests d'ajustement de la loi exponentielle

Restons toujours dans le cas de la configuration n°2. Les mêmes tests d'ajustement précédents sont appliqués cette fois sur la *loi exponentielle* avec l'hypothèse H_0 d'ajustement aux échantillons de la puissance reçue sur un tour de brasseur. La figure 4.49 présente les taux de rejet sur huit tests résultants des différents tests (*KS-Massey*, *KS-Stephens* et *AD-Stephens*). Nous constatons une diminution globale du taux de rejet ($< 30\%$) avec les tests *KS-Stephens* et *AD-Stephens* et un taux de rejet quasi nul ($< 5\%$), sur toute la bande de fréquence, pour le test *KS-Massey* par rapport à la configuration n°1 (FIG. 4.43). Les résultats de la configuration n°2 approchent plutôt ceux de la configuration n°1 avec quatre absorbants, nous verrons plus loin que ces résultats sont cohérents avec l'ACS moyenne des deux configurations. Néanmoins, nous avons enregistré précédemment une augmentation de la corrélation (> 0.37) dans la gamme de fréquence allant de 200 à 500 MHz (section 4.2.3.1), il est donc difficile de conclure sur l'ajustement tant que l'incertitude est élevée. Pour les fréquences supérieures à 500 MHz, le test *KS-Stephens* donne un bon ajustement de la *loi exponentielle* à la distribution des mesures de puissance, le test *AD-Stephens* un peu moins, vu le nombre et le taux de rejets supérieur. Le test *KS-Massey* donne un bon ajustement également mais ce dernier étant mal adapté d'après ce que nous avons expliqué auparavant.

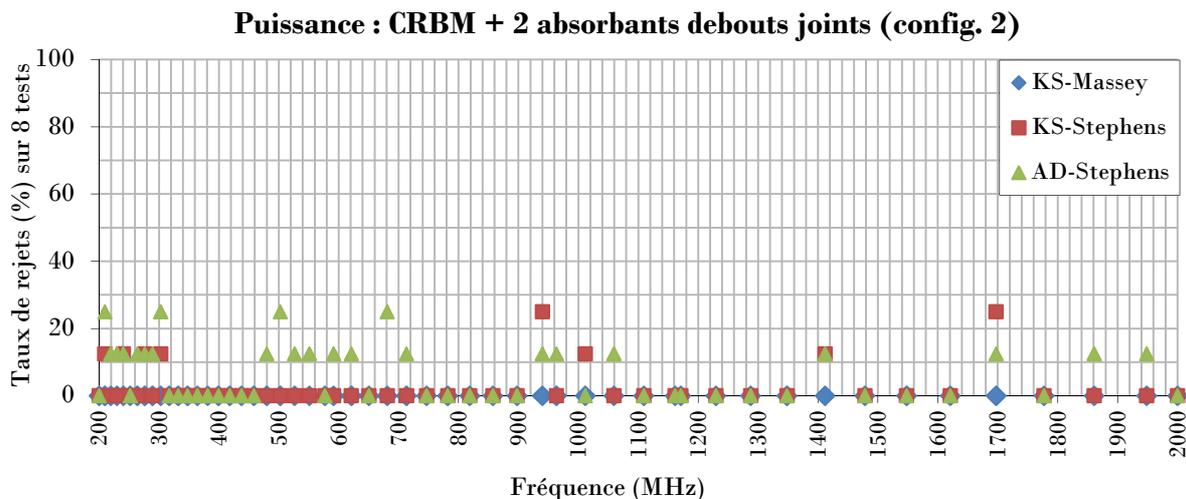


FIG. 4.49. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 2 absorbants debout joints – config.2)

4.2.4.2 Chambre chargée avec deux absorbants selon la configuration n° 3

La configuration n°3 consiste à séparer les deux absorbants utilisés dans la configuration n°2 d'une distance de 80 cm l'un de l'autre sans modifier leurs orientations. Ils sont positionnés au centre du volume utile en vis-à-vis comme le montre la figure 4.46.b. L'objectif étant de distribuer spatialement la charge initiale (de la configuration précédente), formée par les deux absorbants joints, en vue de déceler s'il y a un effet ou non sur les mesures en CRBM. Les données issues du calibrage avec cette configuration sont exploitées pour calculer l'écart-type du champ maximum sur un tour de brasseur, ainsi que dans l'application des tests d'ajustement. Les résultats sont présentés ci-dessous.

a. Ecart type du champ électrique

Les mêmes opérations de la section précédentes sont réitérées avec la configuration n°3. Les figures 4.50.a et 4.50.b montrent les courbes d'écart type des composantes E_x , E_y et E_z du champ maximum sur un tour de brasseur relatives aux configurations n°1 et 2 respectivement. Les courbes sont comparées au gabarit préconisé par la norme *CEI 61000-4-21*. A priori, le gabarit normatif reste respecté sur toute la bande de fréquences, et la différence entre les deux configurations reste insignifiant ($<1\text{dB}$). Dans ce cas l'isotropie et l'uniformité statistiques du champ électrique semblent être conservées.

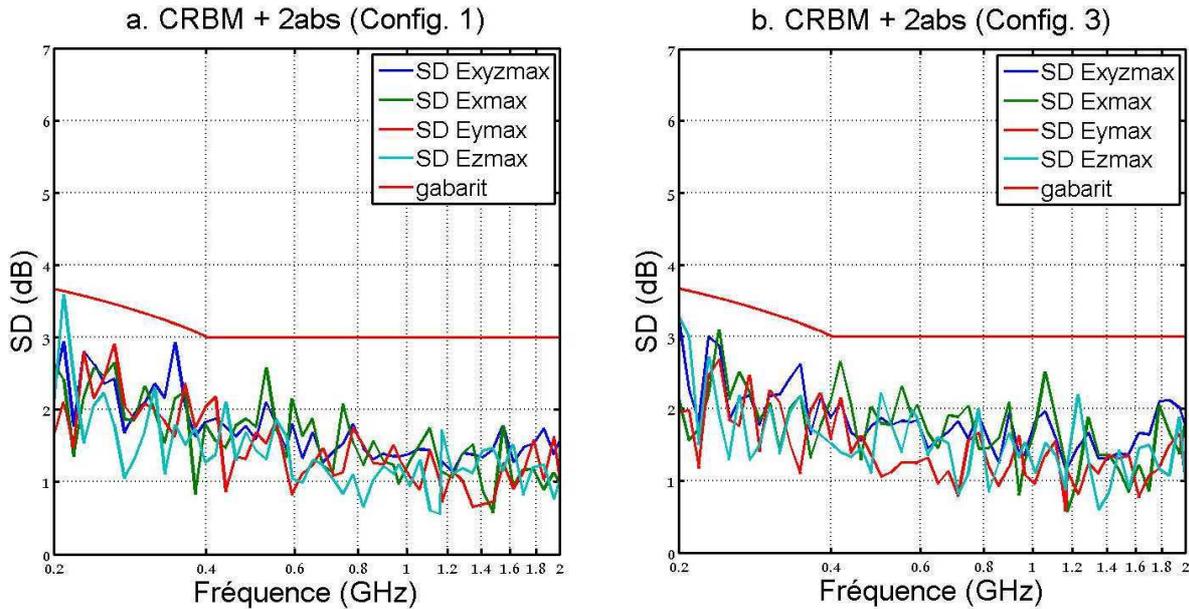


FIG. 4.50. Comparaison de l'Ecart type du champ électrique maximal des configurations n°1 et n°3 (avec 2 absorbants)

b. Tests d'ajustement de la loi de Rayleigh

Les tests d'ajustement de la *loi de Rayleigh* sont appliqués cette fois aux données de champ électrique (composante E_R) issues du calibrage chambre chargée selon la configuration n°3. Le taux de rejet sur 24 tests est présenté dans la figure 4.51 pour les tests *KS-Massey*, *KS-Stephens* et *AD-Stephens*. Le taux de rejet est très proche de celui obtenu avec deux et quatre absorbants, positionnés selon la configuration n°1 (FIG. 4.38 et FIG. 4.40), et très différent de la configuration n°2 avec deux absorbants joints (FIG. 4.48). Il apparaît clairement, d'après ces résultats, que le fait de remplacer un objet dissipatif compact par plusieurs objets de même nature distribués aléatoirement dans le volume de test de la *CRBM*, dont le volume total est égal au volume de l'objet initial, donne des mesures différentes modifiant la distribution du champ électrique. Cela a une relation directe avec l'ACS de la charge. Rappelons que les résultats ci-dessous ne sont donnés avec une erreur acceptable qu'à partir de 600 MHz , le taux de corrélation des échantillons de la composante rectangulaire E_R étant très important en dessous de cette fréquence (FIG. 4.30, section 4.2.3.1). En comparaison au calibrage chambre vide (FIG. 4.36), nous pouvons constater que l'ajustement de la *loi de Rayleigh* à la distribution des données empiriques est dégradé dans les fréquences supérieures à 1100 MHz .

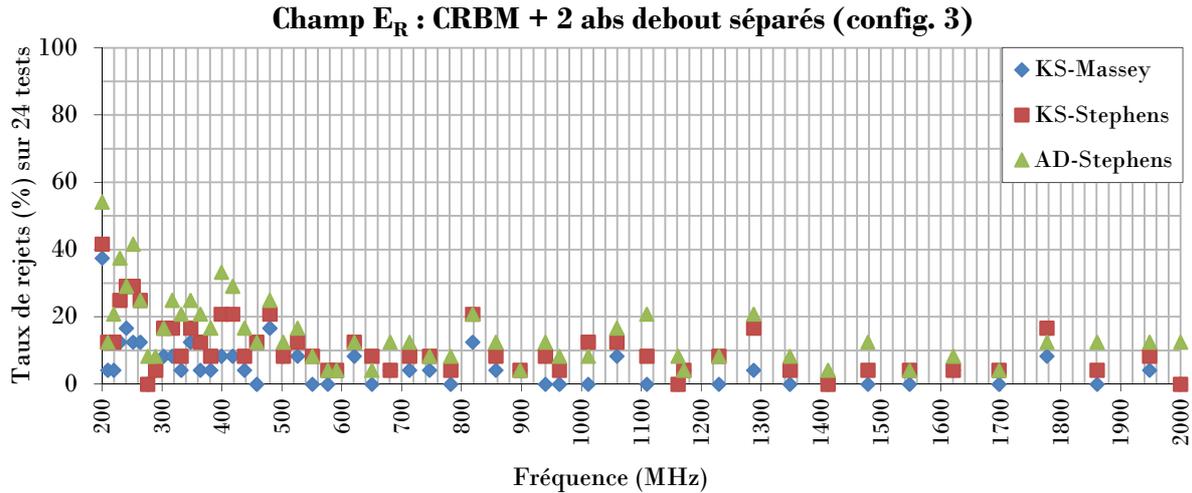


FIG. 4.51. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 2 absorbants debout séparés – config.3)

c. Tests d'ajustement de la loi exponentielle

Dans cette section, les tests d'ajustement *KS-Massey*, *KS-Stephens* et *AD-Stephens* de la *loi exponentielle* sont appliqués aux mesures de la puissance reçue issues du calibrage selon la configuration n°3. Le taux de rejet sur huit tests est donné par la figure 4.52. Il reste supérieur au seuil de risque de 5% dans les basses fréquences (200 à 600 MHz), enregistre une augmentation entre 600 et 1200 MHz et une nette diminution (<5%) au-delà de 1200 MHz par rapport au cas de la configuration n°1 avec deux absorbants (FIG. 4.43). Bien que le taux de rejet soit différent sur quelques fréquences, il reste cependant très proche du cas de la configuration n°2. La distribution de la puissance reçue sur un tour de brasseur présente un bon ajustement à la *loi exponentielle* dans les hautes fréquences (1200 à 2000 MHz) dans le cas de la configuration n°3, ce qui n'était pas le cas pour la chambre vide (FIG. 4.41).

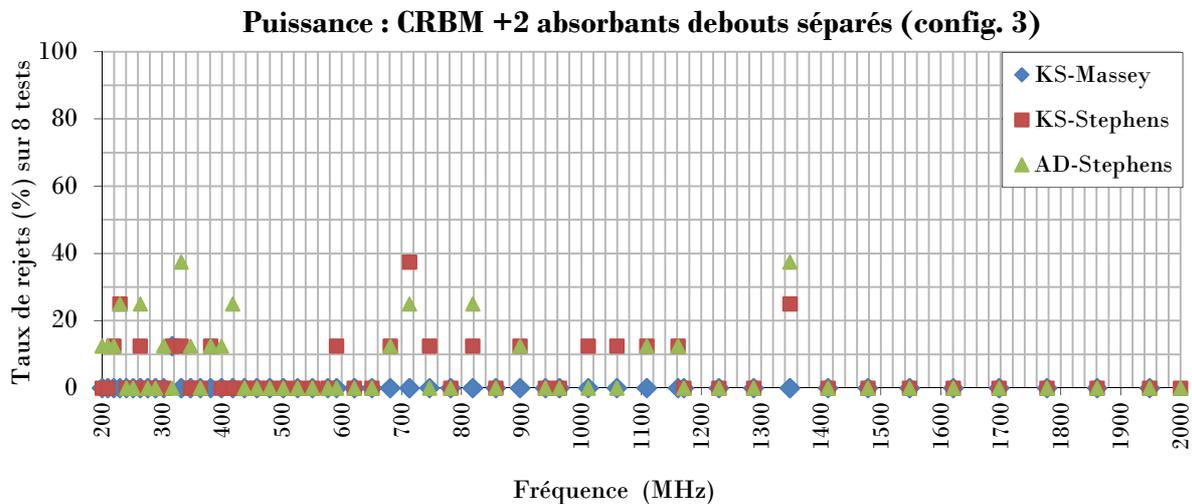


FIG. 4.52. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 2 absorbants debout séparés – config.3)

4.2.4.3 Comparaison des résultats des différentes configurations d'absorbants

Dans cette section nous allons comparer les résultats obtenus pour la *CRBM* chargée avec deux absorbants disposés selon les configurations n° 2 à 5 aux résultats obtenus avec les n absorbants positionnés selon la configuration n°1 ainsi qu'avec la chambre vide. Les configurations n° 4 et 5 sont identiques aux configurations n° 2 et 3 sauf que l'orientation des absorbants a subi une rotation de 90° (FIG. 4.6). Dans un souci de clarté, la comparaison est présentée, dans un premier temps, entre les cas chambre vide et chambre chargée selon les configurations n° 1 à 3. Les courbes des configurations n° 4 et 5 seront intégrées plus loin dans les graphiques.

Revenons au facteur de charge de la chambre (CLF_{moy}) calculé avec les mesures de la puissance moyenne sur trois positions d'antenne. Si nous regardons les nouvelles courbes du CLF , relatives aux configurations 2 et 3 présentées sur la figure 4.53, il est clair que deux absorbants identiques posés séparément selon la configuration n°3 engendrent un facteur de charge inférieur à celui enregistré avec deux absorbants joints formant une seule masse (config. 2 ou config.1) ; et ce qui pourrait surprendre, a priori, est le fait qu'il soit inférieur au CLF engendré par la configuration n°1 avec quatre absorbants. Le CLF issu de la configuration n°2 avoisine également le CLF calculé pour quatre absorbants (config. 1) et reste inférieur à celui de deux absorbants positionnés selon la configuration n°1.

Comparaison du CLF_{moy} 3pos (CRBM vide et configs. 1 à 3)

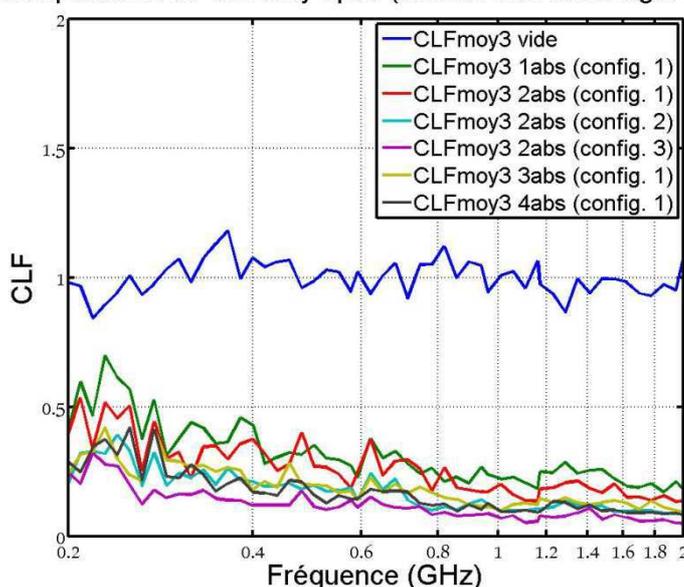


FIG. 4.53. CLF moyen sur 3 positions d'antenne selon différentes configurations de la charge

La figure 4.54 montre l'écart type en fonction du nombre de positions d'antenne des CLF_{moy} (calculé à partir de la puissance moyenne) et CLF_{max} (calculé à partir de la puissance maximale) issues des calibrages chambre chargée avec deux absorbants selon les configurations n° 1, 2 et 3. Ces résultats sont donnés pour justifier le choix du CLF_{moy} calculé à partir de trois positions d'antenne dans le graphique ci-dessus. En effet, l'écart type est moins important lorsqu'on choisit la puissance moyenne dans les calculs du CLF , et devient négligeable à partir de trois positions d'antenne (FIG. 4.54).

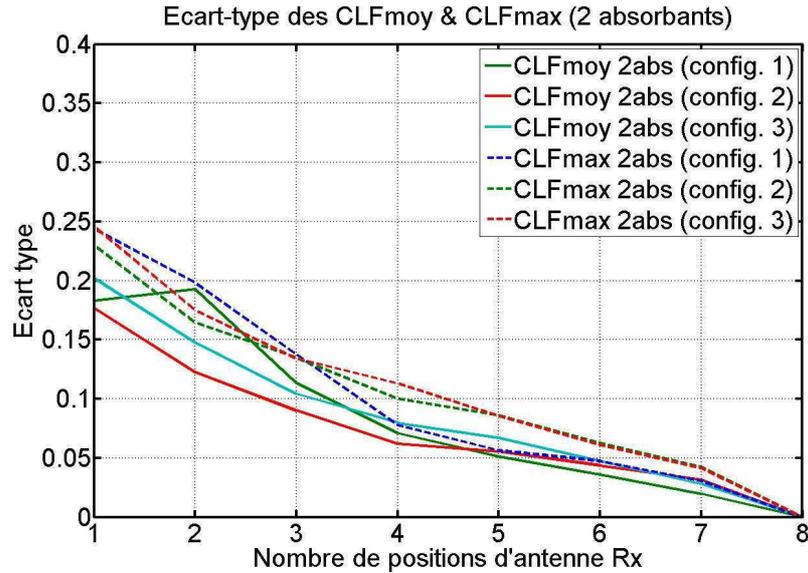


FIG. 4.54. Ecart type du CLF selon le nombre de positions d'antenne pour la CRBM chargée avec 2 absorbants

Les premiers résultats présentés confirment la dépendance des mesures en *CRBM* de l'orientation et de la distribution spatiale de la charge dans le volume de test. Le facteur de qualité de la chambre réverbérante mesuré à partir des différents calibrages cités (FIG. 4.55) met en évidence cette dépendance. Nous remarquons que la charge positionnée selon la configuration n°3 (2 absorbants debout séparés) est celle qui dégrade le plus le facteur de qualité en comparaison avec l'insertion de quatre absorbants de façon compacte (config. 1) ou deux absorbants joints dans différentes orientations (configs. 1 et 2), ceci est plus visible en fin de bande fréquentielle. Ce qui confirme également que la quantité de charge est déterminée par la position et l'orientation des objets dissipatifs dans le volume de test et non pas par leurs volumes. Toutes ces constatations sont expliquées par la section efficace d'absorption d'un objet dissipatif.

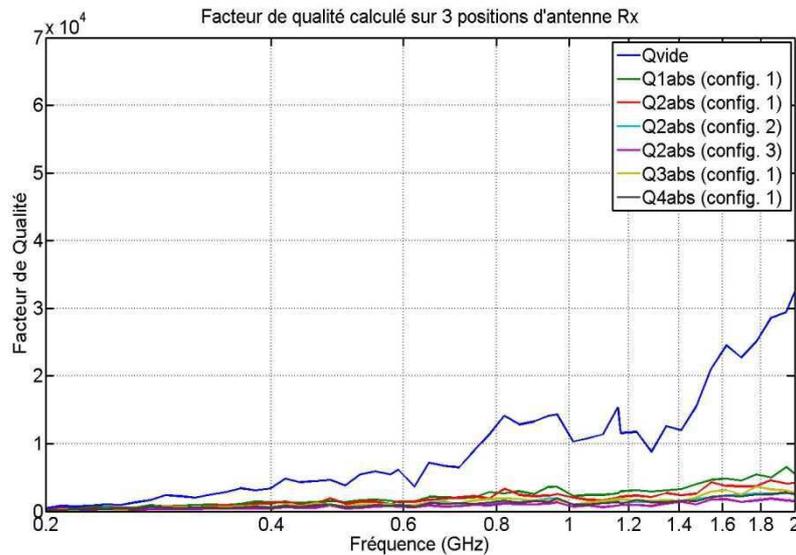


FIG. 4.55. Facteur de qualité de la CRBM selon la configuration de la charge.

Regardons maintenant les courbes de la section efficace d'absorption obtenues des calibrages chambre chargée selon les configurations n°2 et 3 et comparons les aux courbes obtenues auparavant pour la configuration n°1. La figure 4.56 montre la variation de l'ACS moyenne en fonction de la fréquence selon le nombre, la distribution et l'orientation des absorbants. Nous constatons que l'ACS moyenne d'une charge distribuée (config. 3) d'un volume total V est supérieure à l'ACS moyenne de la même charge compactée en une seule masse ayant le même volume V (config. 2). Elle est également supérieure à l'ACS moyenne d'une charge de même nature et de volume égal à $2V$ (config. 1 avec 4 absorbants). Nous pouvons expliquer ce phénomène de façon plus simple en observant la proportionnalité de l'ACS moyenne des deux absorbants positionnés selon les configurations n° 2 à 5 à celle des deux absorbants de la configuration n°1 (FIG. 4.57). Rappelons que tous les absorbants utilisés sont identiques et de même nature.

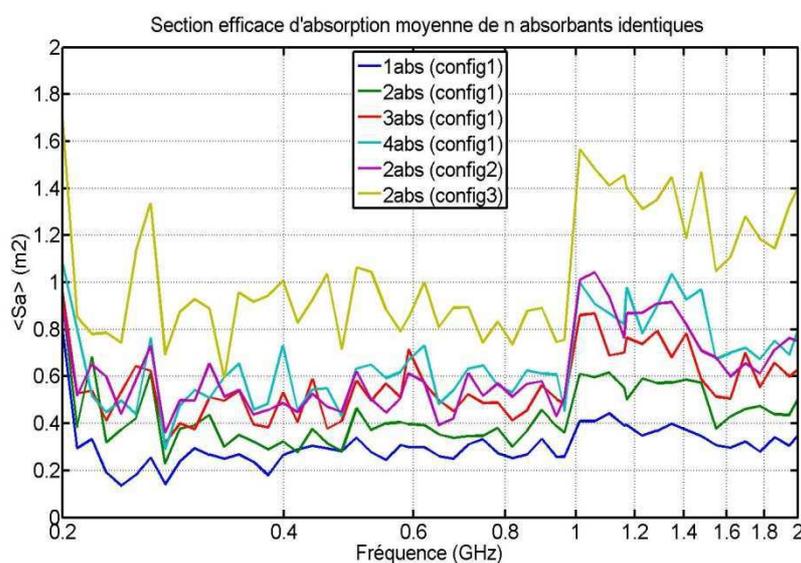


FIG. 4.56. ACS moyenne de n absorbants (configs. 1, 2 et 3)

La figure 4.57 montre les rapports en pourcent des ACS moyennes de deux absorbants positionnés selon les configurations n° 2, 3, 4 et 5 à celle de deux absorbants disposés selon la configuration n°1. Il est facile de constater avec ces courbes que c'est plutôt la distribution spatiale de la charge (ou des absorbants) dans le volume de test qui engendre le plus grand écart en section efficace d'absorption, le rapport pouvant atteindre 330% de l'ACS moyenne d'une charge compactée en une seule masse. Par ailleurs, l'effet de changement d'orientation des absorbants peut également engendrer des variations importantes de l'ACS moyenne allant jusqu'à 200% par rapport à la position initiale lorsque cette dernière permet de plaquer une face de la charge contre le plancher ou l'un des murs de la CRBM. Nous pouvons le voir avec les configurations n°2 et 4 comparées à la configuration n°1 où les absorbants étaient initialement posés sur le plancher de la CRBM. Le fait de changer l'orientation des absorbants sans révéler de surface importante de la charge par rapport à la position initiale (ex. config. 4 par rapport à config. 2) engendre des écarts importants sur quelques fréquences, mais dans une proportion ne dépassant pas les 100% quelle que soit la configuration, compacte ou spatialement distribuée, de la charge.

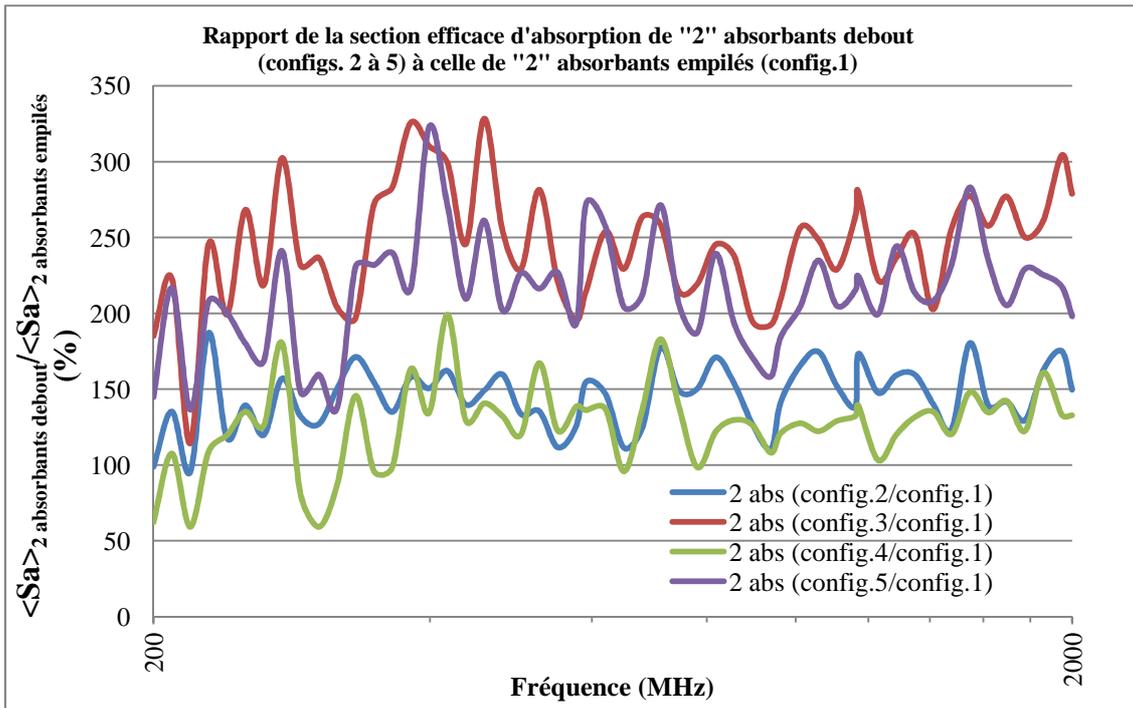


FIG. 4.57. Rapport en pourcentage de l'ACS moyenne de 2 absorbants en configurations n° 2 à 5 à l'ACS moyenne de 2 absorbants en configuration n°1

Les résultats précédents expliquent la répercussion du changement de la configuration des absorbants sur l'estimation de la puissance de test nécessaire à la génération d'une consigne de champ de $100V/m$ dans le volume de test de la CRBM. En effet, l'observation des courbes de la puissance de test, données par la figure 4.58, permet de voir comment la variation de l'orientation ou de la distribution de la charge, en gardant son volume constant, peut modifier notablement l'estimation de la puissance de test pour une même consigne de champ électrique.

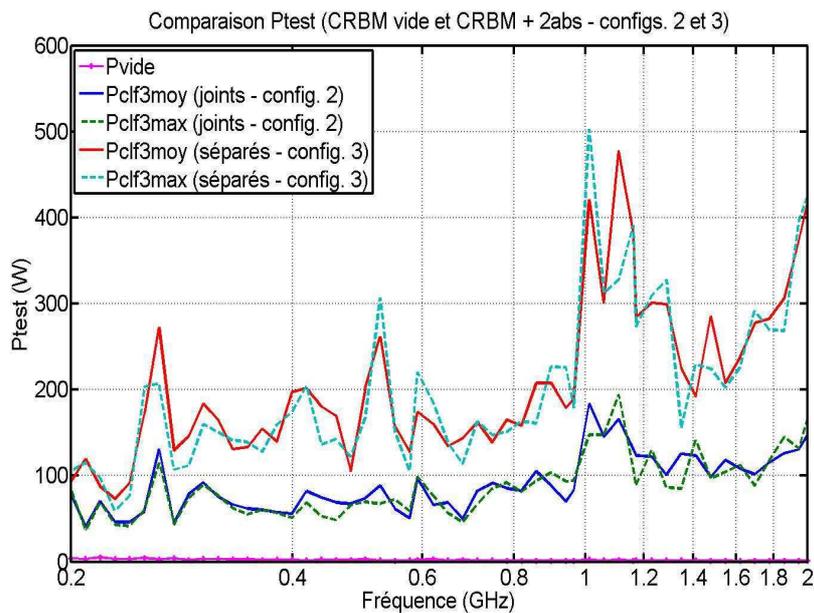


FIG. 4.58. Variation de la puissance de test pour générer 100 V/m pour les configurations n° 2 et 3 et CRBM vide.

La distribution spatiale ou le changement d'orientation des absorbants, dont la conséquence est l'augmentation de la section efficace d'absorption moyenne, engendrent des écarts qui peuvent être importants lors de l'évaluation de la charge de la chambre (FIG. 4.59), justifiant l'augmentation considérable de la puissance de test (FIG. 4.58). Les figures 4.59 et 4.60 présentent la différence absolue en décibels entre les charges induites par deux absorbants des configurations n°2 et 3 et celles de deux absorbants et quatre absorbants respectivement de la configuration n°1. Une double rotation spatiale de 90° de deux absorbants joints engendre une différence sur la charge évaluée allant jusqu'à 2 dB selon la fréquence (FIG. 4.59, courbe bleu). La séparation des deux absorbants en plus de la double rotation engendre jusqu'à $4,5\text{ dB}$ d'écart par rapport à la position initiale (config. 1) (FIG. 4.59, courbe verte), la charge dépasse ainsi celle induite par quatre absorbants disposés selon la configuration n°1 d'une quantité allant jusqu'à 2 dB (FIG. 4.60, courbe rouge).

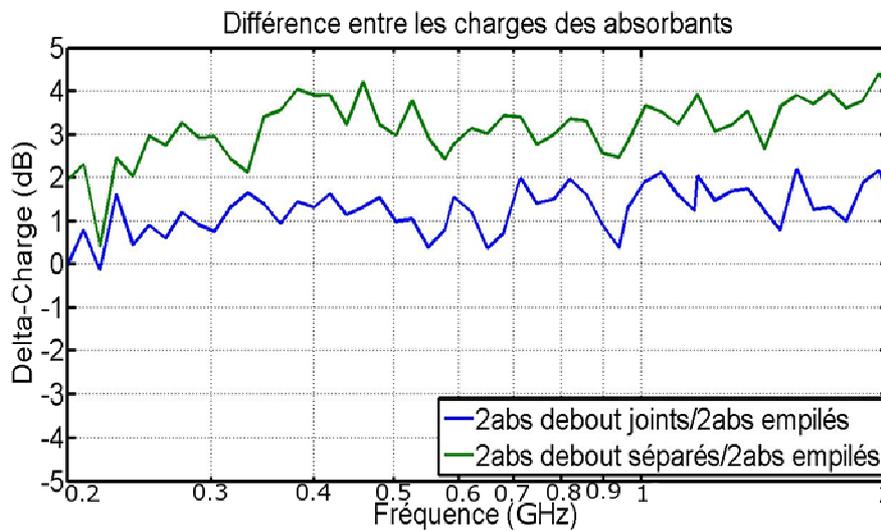


FIG. 4.59. Différence entre charge de 2 absorbants (configs. 2 et 3) et charge de 2 absorbants (config. 1)

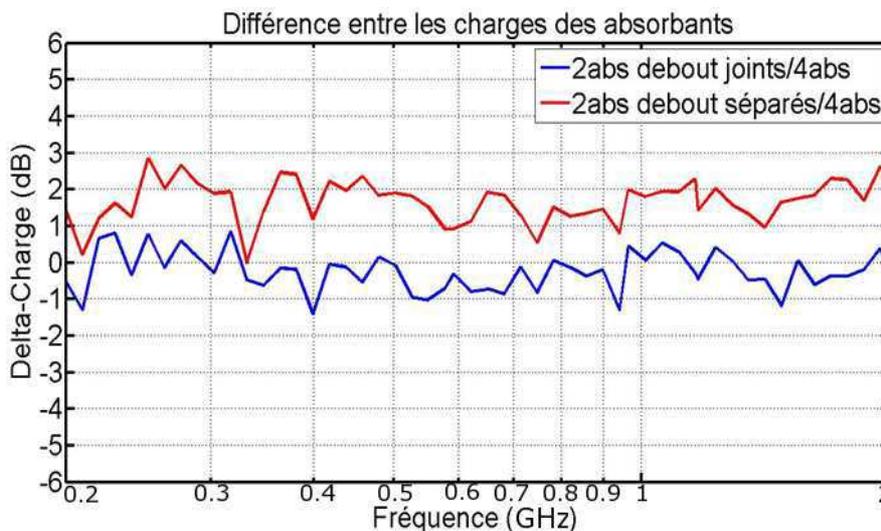


FIG. 4.60. Différence entre charge de 2 absorbants (configs. 2 et 3) et charge de 4 absorbants (config. 1)

D'après les figures 4.61 et 4.62, le changement de l'orientation des deux absorbants avant ou après séparation selon les configurations n° 4 et 5 par rapport aux configurations n° 2 et 3 montrent une différence de la charge allant jusqu'à 2 dB entre configurations de même type (i.e. deux absorbants joints (configs. 2 et 4) ou deux absorbants séparés (configs. 3 et 5)).

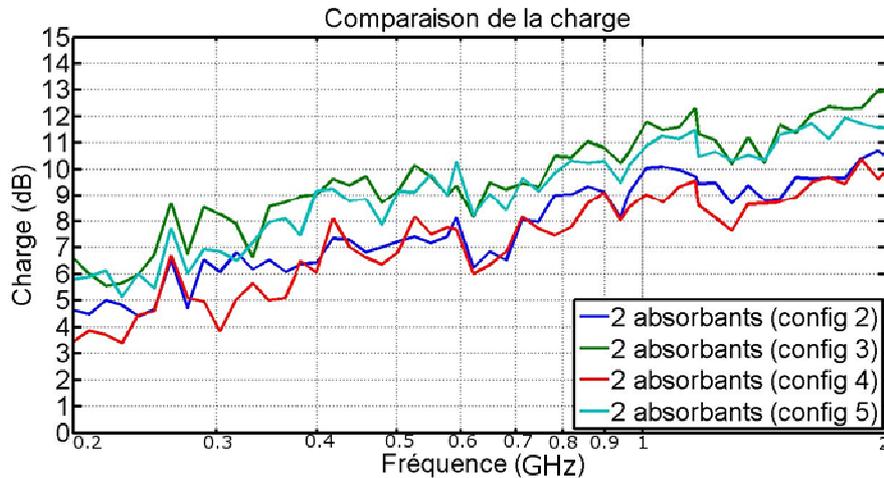


FIG. 4.61. Charge de 2 absorbants positionnés selon les configurations n° 2, 3, 4 et 5

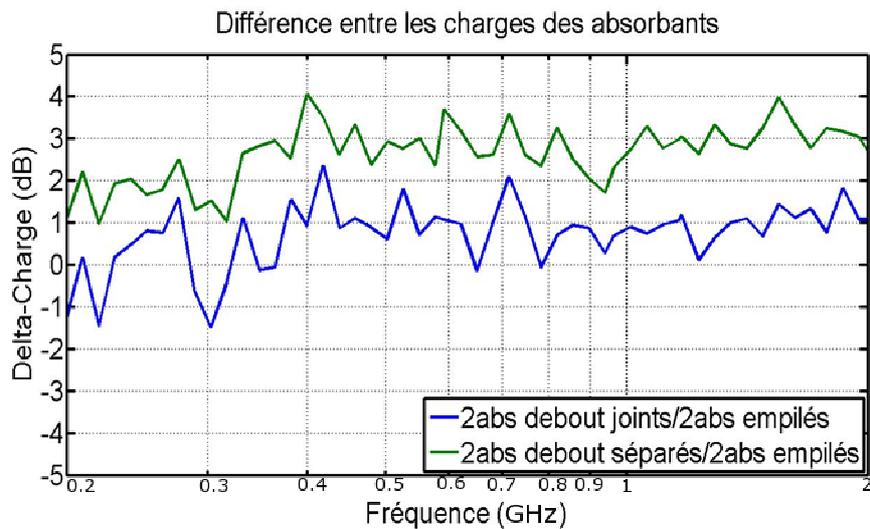


FIG. 4.62. Différence entre la charge de 2 absorbants debout (config 4 et 5) et la charge de 2 absorbants empilés (config 1)

Le test *AD-Stephens* a été retenu, en raison de sa puissance, afin d'établir des comparaisons entre les taux de rejet des lois statistiques idéales aux distributions empiriques issues de chacune des configurations de charge citées auparavant. La figure 4.63 montre une première comparaison des taux de rejet de l'hypothèse H_0 de l'ajustement de la *loi de Rayleigh* aux mesures de E_R relatifs aux configurations n° 2 à 5 avec deux absorbants. L'analyse sera faite uniquement sur la gamme de fréquence 600 à 2000 MHz où l'indépendance des échantillons est vérifiée. Ainsi, la configuration n° 3 (deux absorbants séparés) est celle qui donne le taux de rejet le plus faible globalement approchant le seuil de risque de 5%, et la configuration n°4 (deux absorbants joints) est celle qui donne le taux de rejet le plus élevé globalement dépassant largement le seuil de 5%.

Nous pouvons croiser ces résultats avec les courbes de l'ACS moyenne données par la figure 4.64. Nous pouvons constater que la configuration n°3 correspond à l'ACS moyenne la plus élevée, et la configuration n°4 engendre l'ACS moyenne la plus faible parmi les quatre configurations citées. Les ACS moyennes des configurations n°2 et 5 figurent entre les deux précédentes.

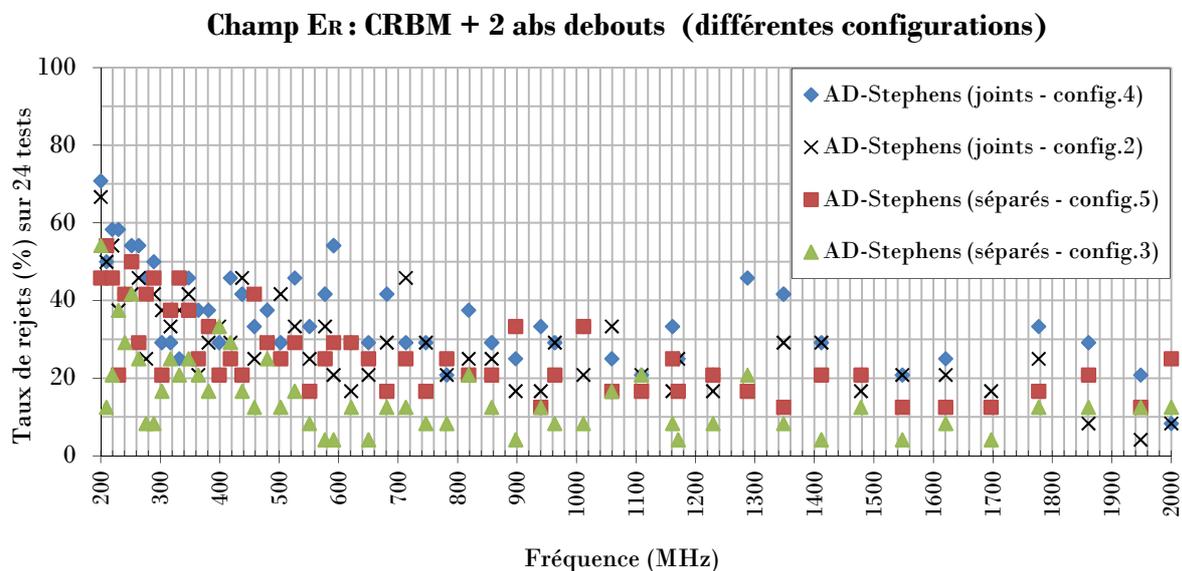


FIG. 4.63. Test AD-Stephens d'ajustement de la loi de Rayleigh aux mesures de champ E de la CRBM chargée avec 2 absorbants debout (joints ou séparés) dans différentes orientations (config 2,3,4 et 5)

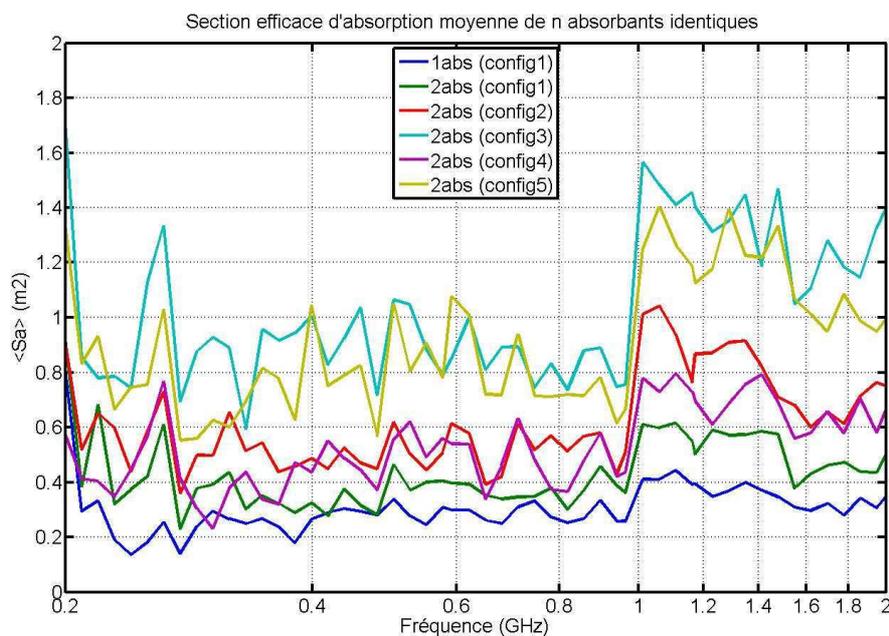


FIG. 4.64. Section efficace d'absorption moyenne de n absorbants identiques (configs. 1 à 5)

Une autre comparaison des taux de rejet de la *loi de Rayleigh*, relatifs aux configurations n° 1, 2 et 4 mettant à contribution deux absorbants solidaires (ou joints) disposés dans différentes orientations, est donnée dans la figure 4.65. Cette fois, le taux de rejet le plus faible est donné par la configuration n°1, correspondant à la plus petite ACS moyenne des trois configurations comparées, d'après la figure 4.64. La configuration n°4 donnant le taux de rejet le plus élevé correspond à une ACS moyenne plus élevée.

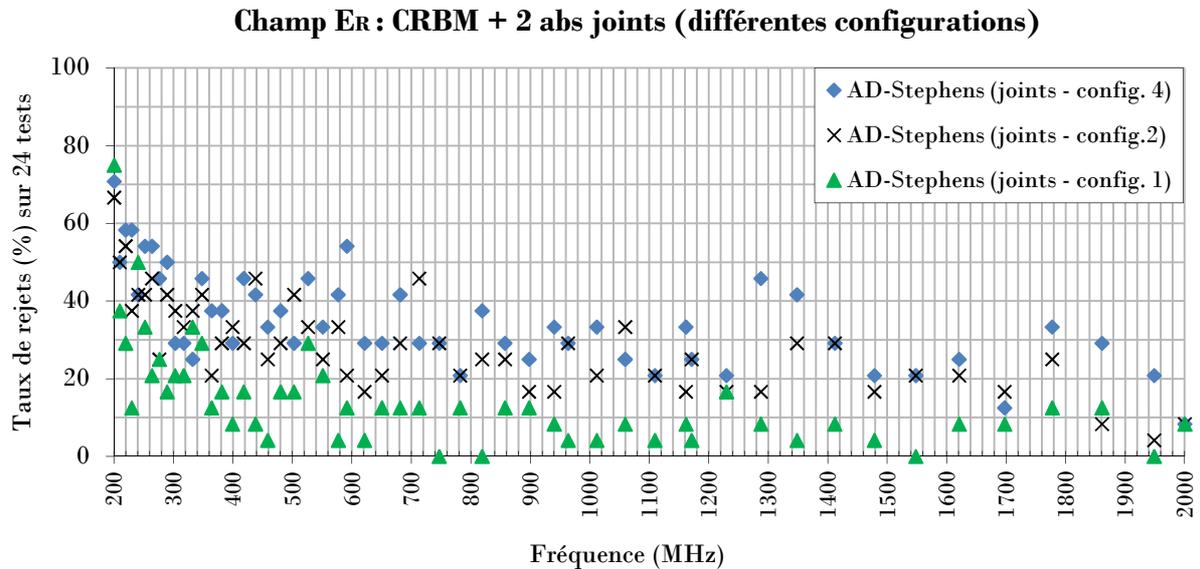


FIG. 4.65. Test AD-Stephens d'ajustement de la loi de Rayleigh aux mesures de champ E de la CRBM chargée avec 2 absorbants joints dans différentes orientations (config. 1, 2 et 4)

4.2.5 Discussion des résultats

L'analyse de nos résultats montre que le nombre de positions d'antenne de réception servant au calcul du *CLF* doit être supérieur ou égal à trois pour garantir une estimation correcte de ce paramètre. L'estimation du *CLF* à partir de la puissance maximale comporte des fluctuations susceptibles de conduire à une surestimation de ce dernier. Cependant, le nombre de positions d'antenne n'affecte pas de manière significative le facteur de qualité de la chambre. Par ailleurs, nous avons pu déterminer la valeur du *CLF* soit à partir de l'*ACF* chambre vide, soit à partir de l'*ACF* chambre chargée. Les deux résultats sont très différents, du moment que le premier montre que le *CLF* diminue avec l'augmentation de la charge, et le deuxième présente des fluctuations autour de la valeur unitaire. Dans ce cas si on utilise un objet dissipatif maintenu en permanence dans la *CRBM* pour dégrader le facteur de qualité lors des essais *CEM*, devenant une partie intégrante de cette dernière, on pourrait se demander quel est le bon *CLF* à prendre en compte. Nous avons vu également que la puissance de test peut être surestimée si la puissance maximale est mise en jeu au lieu de la puissance moyenne et que le nombre de positions d'antenne pris en compte est inférieur à trois.

Nous avons constaté également que certaines configurations de la charge peuvent améliorer sensiblement l'ajustement des observables aux lois idéales du modèle de *Hill* dans les hautes fréquences. Ceci dépend de la section efficace d'absorption de la charge. Une orientation ou une distribution spatiale différente de la charge dans le volume de test pourrait par contre dégrader sensiblement la distribution du champ *EM*. Nous avons vu que le volume de l'objet dissipatif ne contribue pas vraiment dans l'estimation de la charge de la chambre. C'est plutôt la géométrie et l'orientation de l'objet dissipatif qui détermine l'*ACS moyenne*, cette dernière dépend également de la direction d'incidence du champ *EM* et de la polarisation. L'*ACS moyenne* du (des) objet(s) dissipatif(s) insérés dans la *CRBM* détermine alors le niveau de charge de la chambre, et agit directement sur la distribution du champ *EM*.

Il ne faut pas négliger non plus l'impact d'un objet dissipatif sur le nombre d'échantillons indépendants. Nos résultats expérimentaux confortés par des relations théoriques ont clairement révélé la dépendance qui existe entre le nombre d'échantillons indépendants et l'*ACS moyenne* de la charge. Ne pas prendre en compte ce phénomène pourrait fausser l'interprétation des résultats.

Par ailleurs, les critères normatifs, utilisés pour vérifier l'uniformité et l'isotropie statistiques dans le volume utile, semblent beaucoup moins sévères que les tests d'ajustement aux lois de distribution idéales, surtout quand il s'agit d'une chambre chargée, ceci pourrait induire en erreur un opérateur non averti. Enfin, les tests d'ajustement appliqués nous ont aidés à élucider plusieurs aspects liés au comportement électromagnétique de la *CRBM* en présence d'objets dissipatifs, seulement, les lois théoriques testées (*exponentielle* et *de Rayleigh*) ont montré leurs limites quant à la description de la distribution statistique du champ ou de la puissance observés dans une *CRBM* réelle comportant des pertes. Ce problème a déjà été soulevé dans plusieurs publications scientifiques récentes traitant de la distribution statistique du champ *EM* dans les chambres réverbérantes. La *loi de Weibull* semble la candidate du moment pour refléter au mieux l'effet des pertes dans la *CRBM*, essentiellement en basses fréquences. L'application d'autres tests d'ajustement de la *loi de Weibull* à nos données expérimentales rendra cette étude très complète.

4.2.6 Conclusion

Le nombre de positions de l'antenne de réception choisi pour le calcul des paramètres d'évaluation de la *CRBM* peut influencer les résultats de manière à surestimer les valeurs du *CLF* et de la puissance de test, un nombre minimal de trois positions semble être un bon compromis pour une évaluation correcte de ces paramètres avec un temps de mesures réduit. Dans le même sens, il est préférable d'utiliser la puissance moyenne au lieu de la puissance maximale pour éviter les fluctuations entraînant une légère surestimation des paramètres de calibrages.

Le fait de changer la position et/ou la distribution spatiale d'un *EST* à pertes ou d'un quelconque objet dissipatif dans le volume de test de la *CRBM* peut changer significativement la charge de la *CRBM* (jusqu'à $4dB$). La configuration la plus favorable doit être trouvée afin de garantir la conservation de l'uniformité et l'isotropie statistiques du champ *EM*. Dans ce cas, nous recommandons fortement de chercher la configuration (ou position) la plus favorable de l'*EST* lors de la phase de calibrage chambre chargée (avec l'*EST* dans la *CRBM*) et de respecter rigoureusement cette configuration pendant toute la phase de mesures d'immunité rayonnée afin de garantir la conservation des propriétés statistiques requises du champ *EM*. La section efficace d'absorption moyenne (*ACS*) d'un objet dissipatif étant liée aux angles d'incidence et à la polarisation du champ, il est fort possible d'obtenir des estimations différentes de la charge induite par le même objet dissipatif dans des *CRBM* différentes, par leurs dimensions et la géométrie de leurs brasseurs, même en prenant le soin de positionner l'objet exactement de la même façon.

Nous recommandons également de ne pas se fier uniquement aux critères normatifs dans la vérification de l'homogénéité des mesures en *CRBM*, principalement lorsque les pertes sont non négligeables, l'application des tests d'ajustement statistiques est fortement conseillée dans ce cas mais en prenant les précautions nécessaires quant à l'indépendance des échantillons. En effet, il apparait clairement, d'après nos résultats, que l'augmentation de la charge dégrade de façon significative le nombre d'échantillons indépendants disponibles sur une révolution de brasseur dans les basses fréquences, dans ce cas l'erreur dans l'estimation de l'uniformité statistique du champ devient importante. En conséquence, l'hypothèse de départ quant à l'amélioration des performances de la *CRBM* en basses fréquences grâce à l'augmentation de la charge est difficilement vérifiable.

4.3 Conclusion et perspectives

Nous avons exploité dans cette partie une quantité très appréciable de données issues des mesures que nous avons effectuées dans la CRBM de l'IRSEEM selon différentes configurations de charge de la chambre. Une qualification complète de la CRBM a été entreprise, à travers les critères normatifs et les tests statistiques d'ajustement (*goodness-of-fit tests*) appliqués aux données empiriques, dans l'objectif d'étudier expérimentalement le comportement EM de cette chambre en présence d'éléments dissipatifs. Cette étude pourrait constituer une véritable base de comparaison et d'analyse pour la communauté des CRBM, elle contient notamment quelques conclusions importantes quant à l'utilisation d'une charge pour améliorer le fonctionnement de la CRBM dans les basses fréquences, ainsi que des remarques sur le nombre de positions d'antenne préconisées pour l'évaluation des paramètres de calibrage.

Nous sommes partis de l'hypothèse répondue chez la communauté CRBM selon laquelle la dégradation du facteur de qualité de la chambre, grâce à l'insertion d'un objet dissipatif, améliorerait l'effet réverbérant en basses fréquences. Cette idée, quoi qu'elle puisse paraître vraie quand on observe les données sur une seule fréquence ou en prenant en compte que les critères normatifs [79], devrait être abandonnée puisque nous avons pu démontrer expérimentalement que l'augmentation de la charge accentuait sensiblement la corrélation entre les échantillons observés. En conséquence, le nombre d'échantillons indépendants devient faible et ne permet pas l'application du théorème de *la limite centrale* même si on augmente le nombre de pas de brasseur.

Nous avons démontré également que la quantité de charge est tributaire plutôt de la géométrie et de la position de l'objet dissipatif au lieu de son volume, cela est relié à la polarisation ainsi que la direction d'incidence du champ sur l'objet. Ainsi, la quantité de charge induite par deux objets dissipatifs identiques, placés proches et séparés l'un de l'autre dans le volume de test de la chambre, est plus importante que celle induite par les deux objets disposés de façon à former une seule masse solidaire. Ce phénomène pourrait conduire aussi à des évaluations différentes de la charge induite par un même objet dans différentes CRBMs.

Par ailleurs, les tests statistiques d'ajustement ont montré que les critères normatifs ne sont pas assez sévères dans l'évaluation de l'uniformité statistique du champ dans la CRBM. L'utilisation de ces seuls critères pourrait conduire à une mauvaise appréciation de l'uniformité statistique. Cependant, les lois de distributions statistiques proposées dans le modèle de *Hill* pour une CRBM idéale ne reflètent pas exactement la distribution des mesures observées dans le cas réel où les pertes sont à prendre en compte. La *loi de Weibull* a déjà été proposée [119,120] et semble plus convenable pour modéliser la distribution des champs EM dans une chambre réelle. L'investigation pour trouver d'autres lois de distribution théoriques est préconisée. D'autres travaux sur la *loi de Weibull* ou d'autres lois inédites dans le domaine des CRBM, ainsi que sur la distribution spatiale d'objets dissipatifs de géométries différentes (ex. sphérique) dans le volume de test pourraient constituer une suite très intéressante pour cette étude.

Troisième partie

APPLICATION À LA MÉCATRONIQUE : ÉTUDE DE L'EFFET DU STRESS THERMIQUE SUR L'IMMUNITÉ RAYONNÉE D'ÉQUIPEMENTS AUTOMOBILES DANS UN ENVIRONNEMENT RÉVERBÉRANT

Chapitre 5

Elaboration et intégration d'une enceinte thermo-régulée dans une CRBM pour des tests d'immunité rayonnée sous contrainte de la température d'équipements automobile

Chapitre 5

Elaboration et intégration d'une enceinte thermo-régulée dans une CRBM pour des tests d'immunité rayonnée sous contrainte de la température d'équipements automobile.

Introduction

L'avènement de la mécatronique a bouleversé les protocoles de qualification d'équipements embarqués (domaines automobile ou aéronautique) qui se déroulaient auparavant de manières distinctes ; les tests *CEM* étant toujours conduits séparément de la qualification thermique. Par ailleurs, l'association de l'électronique aux moteurs, dans le domaine de l'automobile par exemple, fait que les contraintes de fonctionnement deviennent multiphysiques. L'environnement moteur ainsi que les commutateurs de puissance engendrent des variations de température extrêmes, allant de 25°C à plus de 150°C , et la proximité de sources de perturbations électromagnétiques locales ou externes rendent l'équipement mécatronique plus vulnérable. L'étude et la qualification de ces équipements dans un environnement qui soit le plus proche possible de leur milieu de fonctionnement pourrait aider à améliorer leur fiabilité. La reproduction des contraintes thermiques et électromagnétiques en laboratoire doit donc être appropriée. En effet, si on veut une illumination de l'*EST* à quelques centaines de V/m sur une gamme de fréquences allant de 200 à 3000 MHz , le choix de la chambre réverbérante (*CRBM*) s'impose. La contrainte thermique doit être reproduite à l'aide d'un banc de test qui accueillera l'*EST* et qui sera composé principalement d'une enceinte thermo-régulée pouvant être intégrée dans la *CRBM*. Cependant, le comportement *EM* de la *CRBM* ne doit pas être modifié par l'insertion du banc de test (Chapitre 4), le choix des matériaux constituant l'enceinte thermo-régulée doit donc être fait avec le plus grand soin.

L'influence de la température sur le rayonnement *EM* de composants électroniques sur silicium a été investiguée par Dienot puis Ben Dhia (*et al.*) [98,99]. Baffreau (*et al.*) a étudié l'impact de l'environnement thermique sur le comportement en immunité conduite d'un microcontrôleur *16-bits* en utilisant la technique *DPI* (*Direct Power Injection*), il a montré que l'immunité du microcontrôleur face à l'injection des perturbations sur certaines broches était tributaire de la température.

Par ailleurs, l'utilisation des *CRBM* en association avec l'effet thermique pour le test d'équipements électroniques n'a jamais été expérimentée à notre connaissance. L'étude expérimentale présentée dans cette partie a pour objectif, dans un premier temps, le développement et la validation d'un banc de test (enceinte thermo-régulée) incorporable à la *CRBM* (section 5.1), capable de reproduire une contrainte thermique allant de la température ambiante à 135°C , pour tester l'impact de la température sur les niveaux d'immunité rayonnée d'un *EST*. Des tests en *CRBM* appliqués sur un équipement automobile seront présentés dans un deuxième temps en vue de la validation du protocole de mesures avec le banc de test élaboré (section 5.2). Pour rappel, ces travaux rentrent dans le cadre du sous-projet *MCEM* (Modélisation des Composants Électroniques des Environnements Moteurs) faisant partie du grand projet collaboratif *O2M* (Outils de conception et de Modélisation Mécatronique) soutenu par les pôles de compétitivité *MOV'EO* (Automobile) et *System@matic* (Systèmes Embarqués). Notre contribution dans ce projet réside dans la caractérisation des effets de la température sur la *CEM* au niveau système et par la suite d'aider à la validation par des données expérimentales des modèles multiphysiques développés par d'autres partenaires pour être intégrés dans une plateforme unique d'outils de simulation et de conception mécatroniques.

5.1 Design et validation de l'enceinte thermo-régulée

Le but est de réaliser une enceinte adiabatique thermo-régulée, en utilisant des matériaux accessibles et de faible coût, pouvant être insérée dans la *CRBM* sans modifier notablement l'homogénéité statistique des mesures dans le volume utile. L'enceinte sera utilisée pour la régulation et le contrôle de la température dans l'environnement d'un équipement électronique ou mécatronique. Le choix des matériaux et des constituants de l'enceinte est tributaire de plusieurs paramètres et contraintes que nous allons détailler ci-dessous.

Deux types de contraintes ont été identifiées lors de notre étude pour la réalisation de l'enceinte thermo-régulée. Le premier type de contraintes est lié à la tenue en température des différents constituants de l'enceinte compte tenu de la température maximale désirée (135°C). La conductivité thermique des matériaux doit donc être la plus faible possible. Les autres contraintes sont essentiellement en relation avec l'environnement électromagnétique. En effet, l'enceinte ne doit pas modifier la structure du champ *EM* au voisinage de l'*EST*, et tout couplage entre ses éléments et l'*EST* doivent être évités. La perte d'énergie due à l'insertion de l'enceinte dans la *CRBM* doit également être tolérable. Enfin, le processus d'acquisition et de régulation de la température ne doit pas être perturbé par le champ *EM* généré dans la *CRBM*. Dans ce cas, il faudra choisir des matériaux dont la constante diélectrique (ϵ_r) est la plus faible possible, et la perméabilité magnétique proche de l'unité. Le choix du type d'acheminement des signaux d'*Entrée/Sortie* (*E/S*), du système de régulation de la température et ceux de l'*EST*, vers (ou de) l'extérieur de la *CRBM* doit être fait de façon à minimiser les perturbations dues au fort champ *EM*.

5.1.1 Choix des matériaux pour la constitution de l'enceinte thermo-régulée

Dans cette section nous allons exposer brièvement les caractéristiques des différents matériaux présélectionnés pour la réalisation de l'enceinte, compte tenu des critères cités précédemment, ainsi que les résultats de mesures visant à quantifier qualitativement le ε_r de ces matériaux (section 5.1.1.5). En effet, les propriétés électriques de certains de ces matériaux sont inconnues, nous avons donc réalisé des expériences pour évaluer leurs constantes diélectriques, ceci nous a aidé à faire le choix des matériaux appropriés à notre application.

5.1.1.1 Le Téflon

Le choix du Téflon est particulièrement intéressant dans le cas des tests en *CRBM* à cause de son faible ε_r . Ce polymère, dont la densité est de $2,2 \text{ g/cm}^3$, présente des propriétés intéressantes pour les besoins de notre application. En effet, le Téflon est facile à usiner et d'un coût relativement faible, ses principales caractéristiques se résument en sa constante diélectrique à 1 MHz variant de $2,0$ à $2,1$, sa résistivité allant de 10^{18} à 10^{19} Ohm/cm , sa conductivité thermique à 25°C égale à $0,25 \text{ W/mK}$, sa température maximale d'exploitation variant de 180 à 260°C , sa température minimale d'exploitation égale à -260°C , et sa température de fusion égale à 327°C . Ce matériau offre à priori une bonne rigidité mécanique, une isolation thermique et une tenue à la température acceptables. Il sera utilisé pour la réalisation de la structure rigide de l'enceinte thermo-régulée.

5.1.1.2 La Laine de Roche

Ce type de matériaux est largement utilisé dans l'isolation thermique ou acoustique, dans des domaines variés allant de la construction à l'aéronautique, il est commercialement disponible. La *Laine de Roche* dont les fibres minérales sont obtenues par fusion de roche volcanique ou d'oxyde de fer se présente sous forme de panneaux de 1 à 5 cm d'épaisseur. Sa constante diélectrique approximée, obtenue expérimentalement, sera donnée plus loin. Sa température maximale d'exploitation est de l'ordre de 700°C et sa conductivité thermique est très faible, elle varie de 0.038 W/m.k à 0.122 W/m.k selon la température.

5.1.1.3 Laine de Fibres de Silice

Ce matériau est obtenu avec une formation de fibres de *Silicates alcalino-terreuses*, il offre d'excellentes performances en haute température. Sa température maximale d'exploitation est de l'ordre de 1200°C et sa conductivité thermique vaut 0.08 W/m.k pour une densité de 128 Kg/m^3

5.1.1.4 Le polystyrène extrudé

Le polystyrène extrudé est un polymère qui offre une bonne rigidité mécanique et une assez bonne capacité d'isolation thermique grâce à sa structure cellulaire fermée. Sa température maximale d'exploitation, de l'ordre de 160°C , est moins importante que celle des matériaux cités ci-dessus, et sa conductivité thermique vaut 0.037 W/mK pour une densité de 45 Kg/m^3 , il est donc utilisé plutôt pour envelopper les autres couches d'isolation thermique citées. Sa constante diélectrique est supposée relativement faible vu sa structure physique, celle-ci sera évaluée expérimentalement dans la section suivante.

5.1.1.5 Evaluation de la constante diélectrique des matériaux

Nous nous proposons d'extraire la constante diélectrique d'un échantillon de dimensions connues de chaque matériau (*Polystyrène extrudé*, *Laine de Roche* et *Laine de fibres de silice*), nous avons donc procédé de la manière suivante :

Considérons d'abord une ligne de transmission, supposée sans pertes, constituée d'un conducteur cylindrique en cuivre de 3mm de diamètre et 1m de longueur, suspendu à une hauteur de 8mm au dessus d'un plan de masse de $1 \times 2\text{ m}^2$ de dimensions. La figure 5.1 montre le schéma de la maquette expérimentale utilisée avec la ligne de transmission. La phase Φ du paramètre de transmission S_{21} entre les deux ports de la ligne est mesurée à l'aide d'un Analyseur de Réseaux Vectoriel. L'insertion d'un échantillon du matériau dans la ligne de transmission (FIG. 5.1) provoque une variation de la phase ($\Delta\Phi$) (FIG. 5.2), celle-ci sera exploitée pour le calcul de la valeur approximée de la constante diélectrique ϵ_r de cet échantillon.

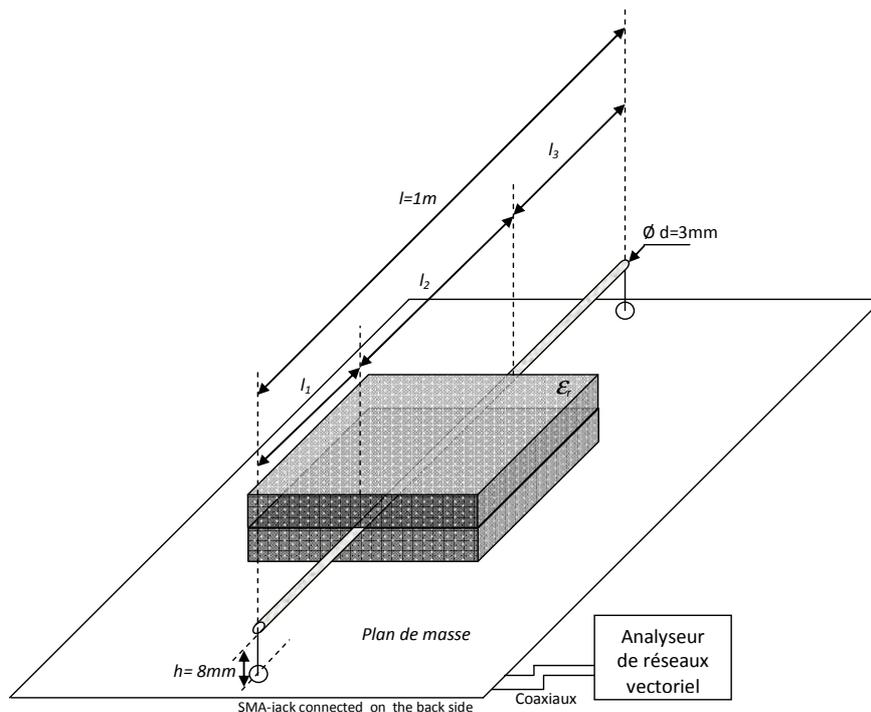


FIG. 5.1. Schéma synoptique de la maquette expérimentale de mesure du ϵ_r

Soit la phase du paramètre S_{21} d'une ligne sans pertes de longueur l définie par l'équation (5.1) :

$$\phi_{tot} = Arg(S_{21}) = \frac{2\pi l}{\lambda} \quad (5.1)$$

Pour la ligne sans l'échantillon de diélectrique (propagation dans l'air) on aura :

$$\phi_{tot}(air) = \frac{2\pi l}{\lambda} \quad (5.2)$$

La phase de S_{21} après insertion d'un échantillon de diélectrique de longueur l_2 est exprimée par :

$$\phi_{tot}(dielec) = \frac{2\pi l_1}{\lambda} + \frac{2\pi l_2}{\lambda'} + \frac{2\pi l_3}{\lambda} \quad (5.3)$$

Où $\lambda = \frac{c_0}{f}$ est la longueur d'onde dans le vide (air) à la fréquence f , $\lambda' = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r} f}$ est la longueur d'onde dans le diélectrique, c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide, et $l = l_1 + l_2 + l_3$ est la longueur de la ligne.

À partir des équations (5.2) et (5.3) on obtient :

$$\Delta\phi(f) = \phi_{tot}(dielec) - \phi_{tot}(air) \quad (5.4)$$

Nous déduisons ensuite de l'équation (5.4) l'expression de la constante diélectrique approximée de l'échantillon donnée par :

$$\epsilon_r \approx \left(\frac{l - l_1 - l_3}{l_2} + \frac{c_0 \Delta\phi}{2\pi f l_2} \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

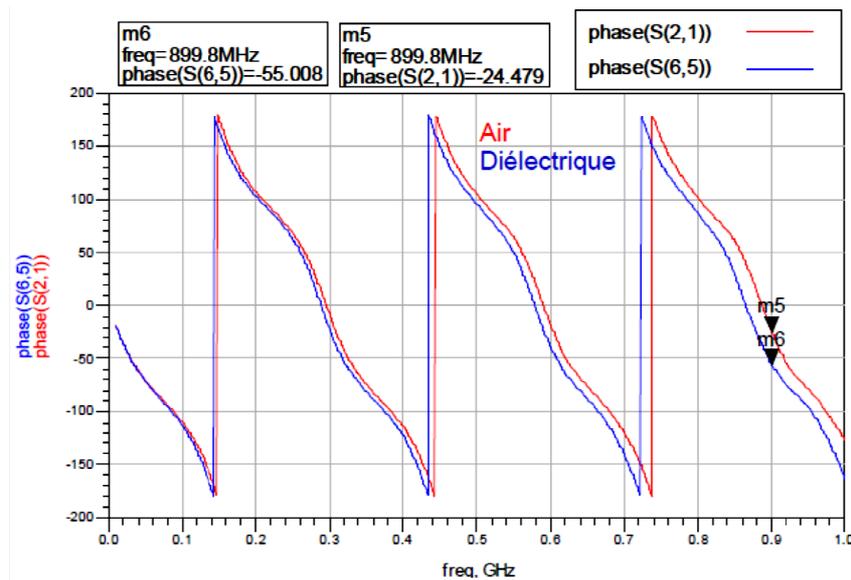


FIG. 5.2. Variation de la phase du paramètre S_{21} avec un échantillon de *Fibres de Silice*

Le tableau Tab. 5.1 donne quelques valeurs approximées de ϵ_r en fonction de la fréquence, d'échantillons de *Polystyrène extrudé*, *Laine de Roche* et *Fibres de Silice*, calculées à partir des mesures de la phase.

| $f(MHz)$ | 200.6 | 399.8 | 500,1 | 863.9 | 899.8 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| ϵ_r (<i>Polystyrène</i>) $l_2=470mm$ | 1.2 | 1.3 | 1.3 | 1.5 | 1.5 |
| ϵ_r (<i>Polystyrène</i>) $l_2=250mm$ | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.5 | 1.5 |
| ϵ_r (<i>Laine de Roche</i>) | 1.3 | 1.5 | 1.8 | 1.8 | 1.7 |
| ϵ_r (<i>Fibres de Silice</i>) | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 2.2 | 1.9 |

Tab. 5.1. Valeurs approximées de la constante diélectrique des matériaux

Par contre, les expressions analytiques proposées (équations 5.3, 5.4 et 5.5) ne sont valables que pour des échantillons de diélectrique qui couvrent toute la longueur de la ligne de transmission. Dans le cas où c'est un tronçon de diélectrique qui est inséré dans la ligne, cela engendre des désadaptations d'impédance aux interfaces air/diélectrique en raison de la transition d'impédance caractéristique d'un tronçon à l'autre de la ligne de transmission. En conséquence, la somme algébrique des phases, proposée par l'équation (5.3), relatives à chaque tronçon de la ligne composite, supposant que la propagation des ondes est purement progressive, devient inadéquate. En effet, les valeurs de la constante diélectrique, déduites de cette équation (Tab. 5.1), sont calculées avec une erreur importante, ce qui donne une estimation très grossière des constantes diélectrique des matériaux caractérisés.

Nous nous proposons de corriger les valeurs obtenues de la constante diélectrique à travers une simulation des paramètres S réalisée avec le logiciel *ADS (Advanced Design System)* d'une ligne de transmission modélisant la ligne de transmission physique de la figure (5.1). Pour cela, nous procédons en trois étapes, la première étape consiste à simuler et étalonner la ligne à air seule (sans tronçon de diélectrique), la deuxième étape consiste à étalonner le banc de mesure ainsi que la simulation avec un échantillon de diélectrique connu (Tronçon de Téflon de $\epsilon_r=2,1$). Une fois le banc de mesure étalonné nous pouvons procéder à la troisième étape qui consiste en l'ajustement des courbes simulées aux courbes mesurées avec des tronçons de diélectrique, de longueurs connues, des différents matériaux (*Polystyrène extrudé*, *Laine de Roche* et *Fibres de Silice*) en optimisant la valeur de la constante diélectrique simulée. Ces simulations vont nous permettre de trouver la valeur de la constante diélectrique corrigée pour chaque type de matériau inséré dans la ligne de transmission. Les étapes énumérées sont exposées en détails ci-dessous.

Première étape : la ligne de transmission

En partant des mesures de la ligne de transmission physique (FIG. 5.1), à air seul (sans diélectrique), d'un angle électrique $\theta_m=120^\circ$ à $0,1GHz$, d'impédance caractéristique $Z_{cm}=c_0 \cdot L_m=141,5 \Omega$, et d'inductance linéique $L_m=471,6 nH/m$, nous optimisons les paramètres (longueur électrique, inductance linéique et impédance caractéristique) de la ligne de transmission simulée (FIG. 5.3) afin d'ajuster les courbes de simulation (modules et phases de S_{11} et S_{21}) aux courbes des mesures (FIG. 5.4, FIG. 5.5 et FIG. 5.6). Les paramètres optimisés de la ligne simulée sont alors $\theta_s=121^\circ$, $Z_{cs}=142\Omega$, $L_s=473,3 nH/m$.

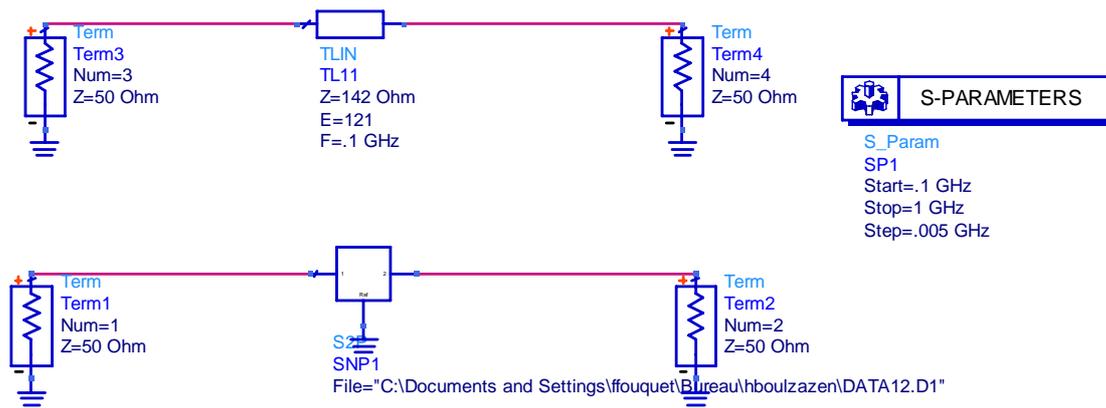


FIG. 5.3. Simulation de la ligne à air

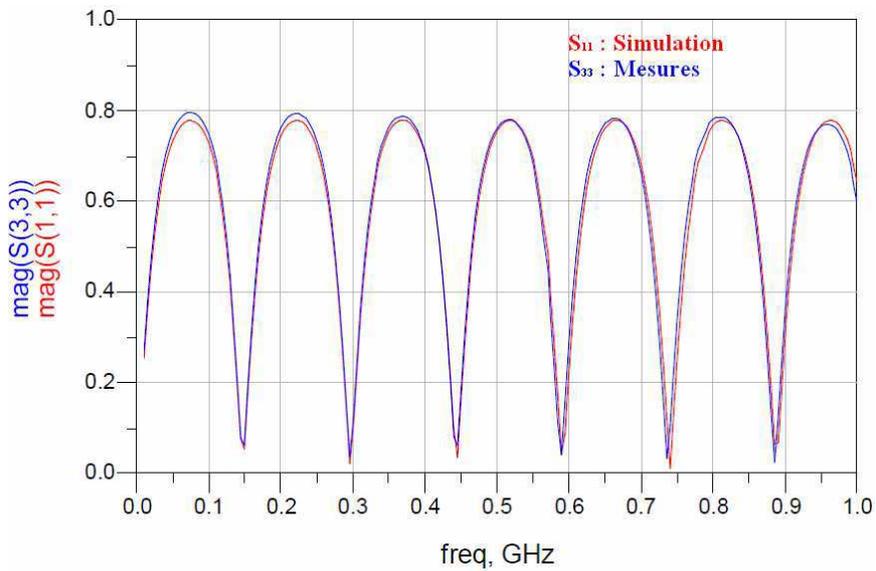


FIG. 5.4. Module du coefficient de réflexion de la ligne à air seul.

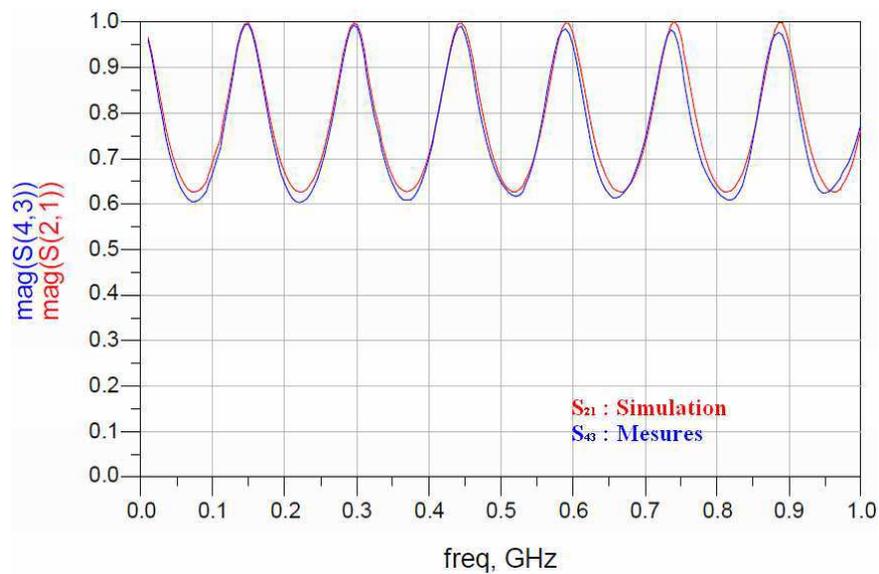


FIG. 5.5. Module du coefficient de transmission de la ligne à air seul.

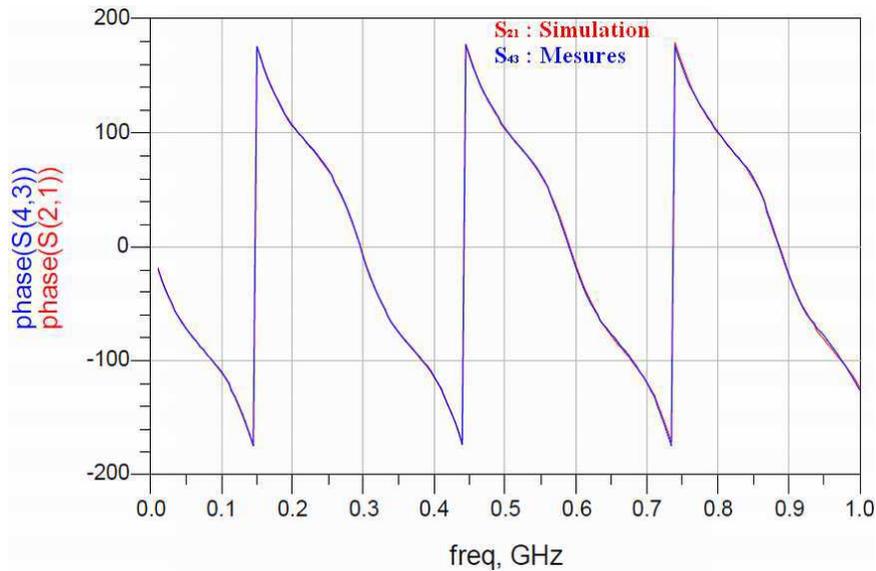


FIG. 5.6. Phase du coefficient de transmission de la ligne à air seul.

Deuxième étape : Etalonnage du banc

Dans cette section nous allons étalonner le banc de mesure composé de la ligne de transmission physique avec un diélectrique connu qui est le Téflon de constante diélectrique $\epsilon_r=2,1$. Pour cela, une section de la ligne d'une longueur de 30cm est placée dans du Téflon. Elle est entourée de deux lignes à air d'impédance égale à 142Ω et de 35cm de longueur soit 42° à $0,1\text{GHz}$. Cette section de ligne (entourée de Téflon) a les caractéristiques suivantes :

- Une impédance caractéristique : $Z_{cd}=142/(\epsilon_r)^{1/2}$,
- Un angle électrique à $0,1\text{GHz}$: $\theta_d=36 \cdot (\epsilon_r)^{1/2}$

La figure 5.7 montre la ligne de transmission simulée composée de trois tronçons de lignes modélisant la ligne de transmission physique avec le tronçon central à Téflon. La figure 5.8 montre une comparaison entre mesures et simulation pour une valeur optimisée du $\epsilon_r=2.08$. Ce résultat est bien cohérent avec la valeur annoncée de $2,1$ pour ce matériau. Nous allons donc utiliser le même principe en troisième étape, à l'aide de la simulation sur ADS et des mesures sur la ligne placée en partie dans des échantillons des matériaux présélectionnés, afin de trouver leurs constantes diélectriques respectives.

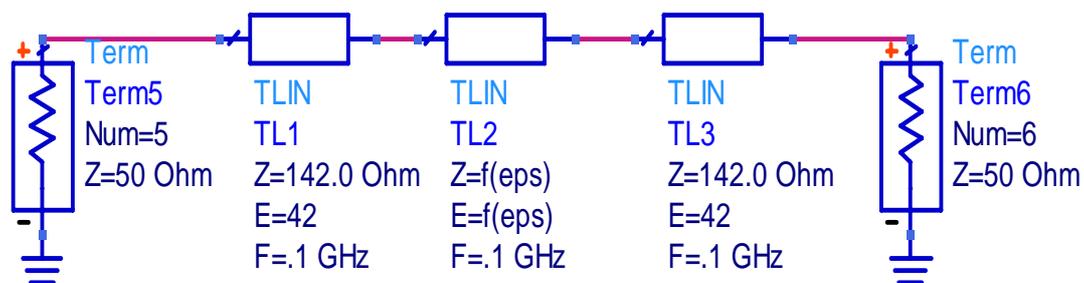


FIG. 5.7. Simulation de la ligne à tronçons à air et diélectrique.

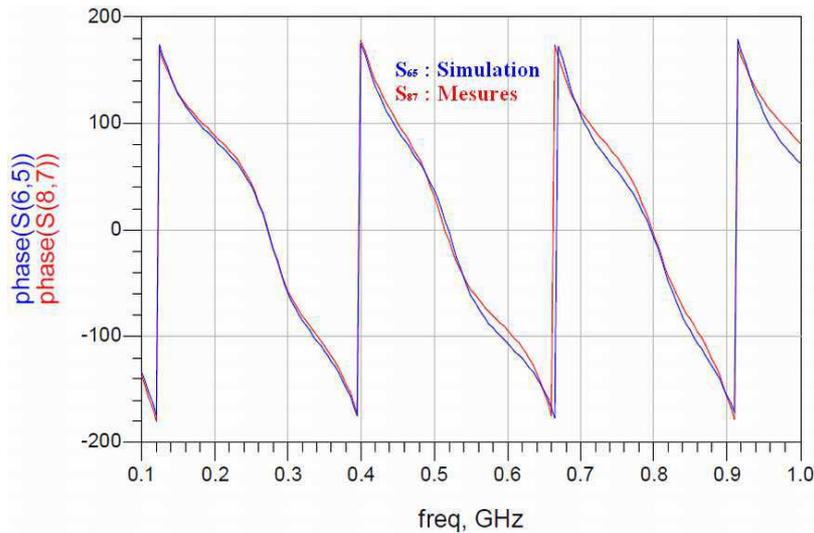


FIG. 5.8. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 30 cm de Téflon.

Troisième étape : Les mesures

- Ligne avec du Polystyrène extrudé (FIG. 5.9):

Le tronçon contenant le polystyrène extrudé de longueur $L_2=25cm$ et d'inductance linéique L_s a pour caractéristiques :

- Une impédance caractéristique : $Z_{cd}=c_d \cdot L_s=142/(\epsilon_r)^{1/2}$; avec $c_d=c_0/(\epsilon_r)^{1/2}$,
- Un angle électrique à 0,1GHz : $\theta_2=360 \cdot L_2 \cdot (0,1GHz)/c_0=30 \cdot (\epsilon_r)^{1/2}$

Les lignes à air d'un côté et de l'autre du tronçon à polystyrène ont respectivement des longueurs $L_1=35cm$ et $L_3=40cm$ correspondant aux angles électrique respectifs $\theta_1=42^\circ$ et $\theta_3=48^\circ$.

Les résultats d'ajustement de la simulation aux courbes de mesure (FIG. 5.10) donnent une valeur du ϵ_r pour le polystyrène extrudé égale à 1,09.

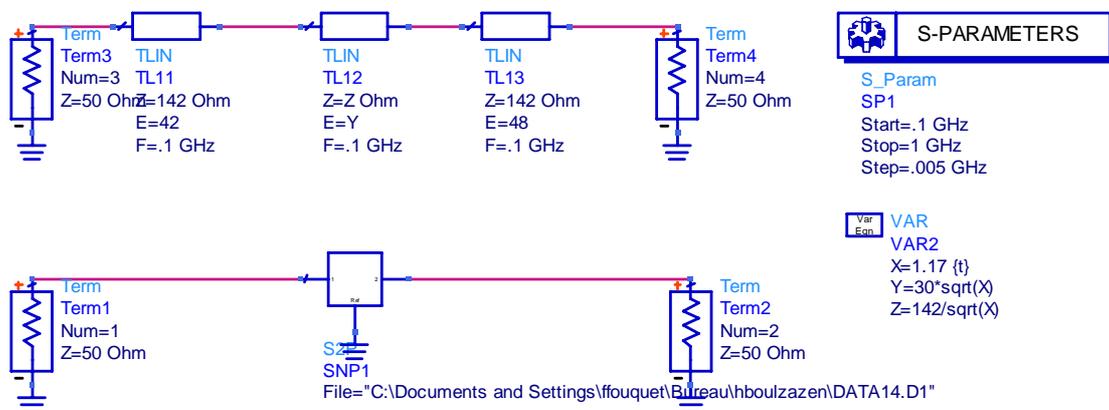


FIG. 5.9. Simulation de la ligne à tronçon de Polystyrène extrudé de 25cm.

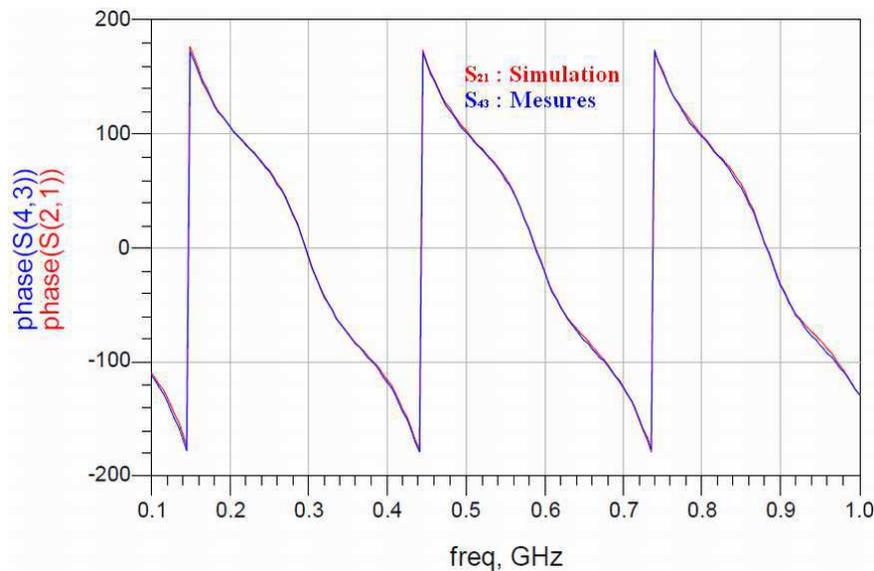


FIG. 5.10. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 25cm de polystyrène extrudé.

Une deuxième série de mesures avec un échantillon de polystyrène de 47cm a été faite. Le tronçon contenant le polystyrène a pour caractéristiques :

- Une impédance caractéristique : $Z_{cd} = c_d \cdot L_s = 142 / (\epsilon_r)^{1/2}$; avec $c_d = c_0 / (\epsilon_r)^{1/2}$,
- Un angle électrique à 0,1GHz : $\theta_2 = 360 \cdot L_2 \cdot (0,1\text{GHz}) (\epsilon_r)^{1/2} / c_0 = 56,4 \cdot (\epsilon_r)^{1/2}$

Les lignes à air d'un côté et de l'autre du tronçon à polystyrène ont respectivement des longueurs $L_1 = 29\text{cm}$ et $L_3 = 24\text{cm}$ correspondant aux angles électrique respectifs $\theta_1 = 34,8^\circ$ et $\theta_3 = 28,8^\circ$. Le résultat de la figure 5.11 est obtenu pour $\epsilon_r(\text{polystyrène}) = 1,07$.

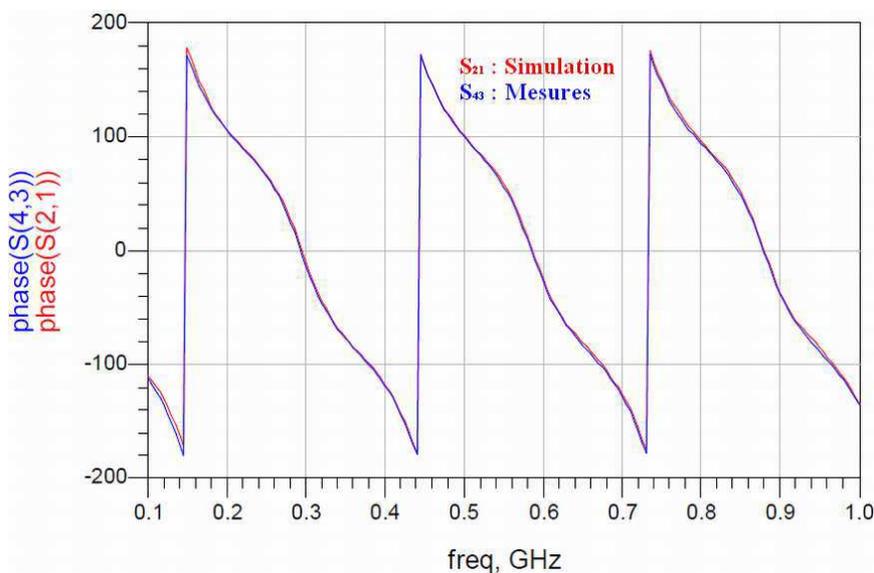


FIG. 5.11. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 47cm de polystyrène extrudé.

- Ligne avec de la laine en fibres de Silice :

Nous avons réitéré les expériences précédentes avec un tronçon de la ligne plongé dans un échantillon de laine en fibres de Silice de 62cm de longueur. Le résultat d'ajustement de la simulation aux mesures (FIG. 5.12) donne une constante diélectrique égale à $1,1$.

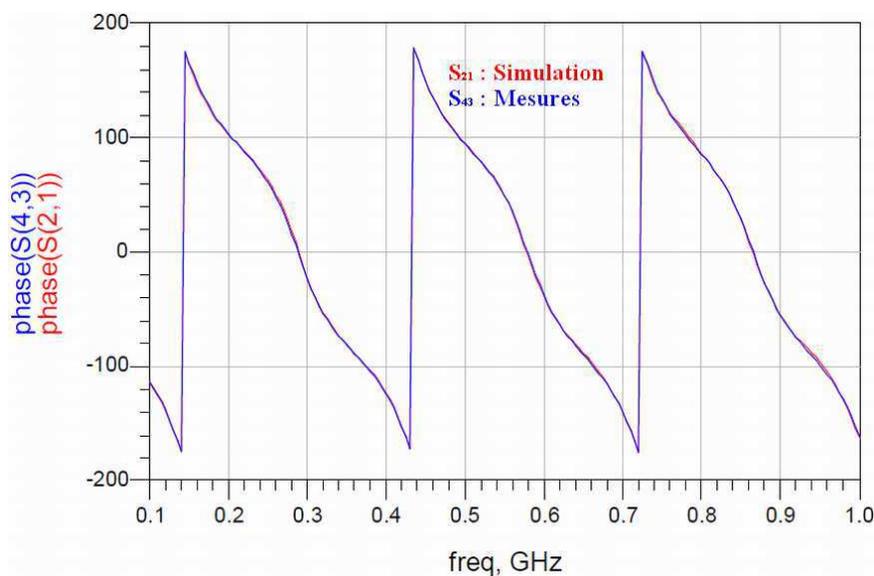


FIG. 5.12. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 62cm de fibres de Silice.

- Ligne avec de la laine de Roche :

La même méthode est appliquée pour trouver la constante diélectrique d'un échantillon de laine de Roche de 30cm de longueur. Nous avons obtenu un $\epsilon_r(\text{Laine de Roche})=1,1$ pour cet échantillon d'après les résultats d'ajustement de la figure 5.13.

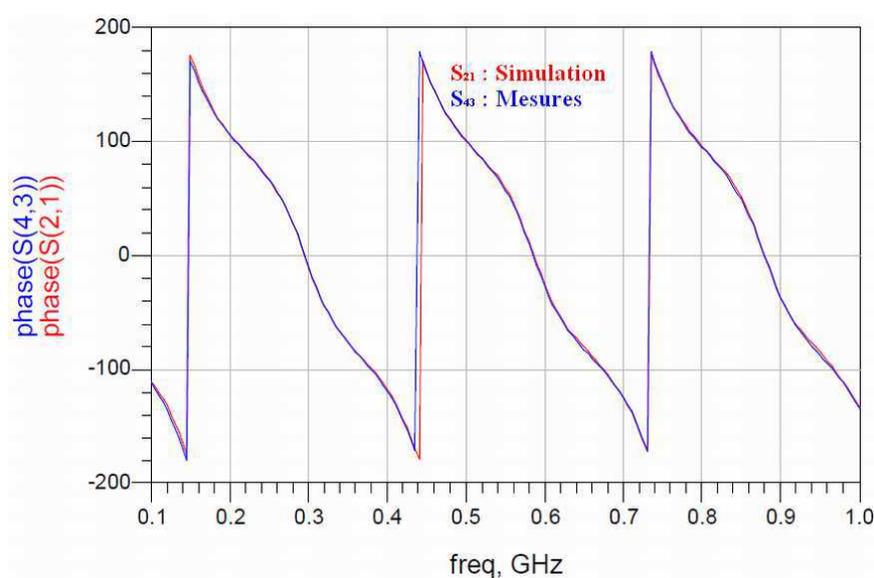


FIG. 5.13. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 30cm de laine de Roche.

Les résultats obtenus après correction des valeurs de la constante diélectrique des matériaux (Tab. 5.2) donnent une estimation plus cohérente de ce paramètre par rapport à la méthode analytique utilisée précédemment. Cette estimation préliminaire de la constante diélectrique de chaque matériau, résumée dans le tableau 5.2, nous a permis de faire le choix adéquat pour notre application. Les résultats montrent que le *Polystyrène extrudé* ainsi que la *Laine de Roche* présentent des constantes diélectriques relativement faibles devant la constante diélectrique du *Téflon* couramment utilisé dans les applications RF. Par conséquent nous avons fait le choix de réaliser la structure de l'enceinte thermo-régulée à partir du *Téflon*, qui sera recouvert de *Laine de Roche* et de *Polystyrène extrudé* pour l'isolation thermique. La laine en fibres de Silice étant écartée en raison de sa mauvaise rigidité mécanique par rapport à la Laine de Roche.

| Matériau | Téflon | Polystyrène extrudé | Fibre de Silice | Laine de roche |
|--------------|--------|---------------------|-----------------|----------------|
| ϵ_r | 2.08 | 1.09/1.07 | 1.1 | 1.1 |

Tab. 5.2. Valeurs approximées corrigées de la constante diélectrique des matériaux

5.1.2 Réalisation de l'enceinte thermo-régulée

Plusieurs étapes de réalisation de l'enceinte thermo-régulée ont eu lieu durant lesquelles nous avons pu fabriquer deux prototypes : le premier prototype, qui a été réalisé en utilisant du *Téflon* et du *Polystyrène* uniquement, a révélé quelques limites liées à la tenue en température et au couplage du champ *EM* avec les éléments métalliques ; ce premier prototype a subi des améliorations et des modifications donnant naissance au second prototype. L'organigramme donné par la figure 5.14 résume les phases de fabrication et de validation de l'enceinte thermo-régulée. Les détails de réalisation de ces deux prototypes seront donnés dans les paragraphes suivants.

La première version de l'enceinte thermo-régulée (FIG. 5.15) a été réalisée à partir d'une cuve parallélépipédique en *Téflon* de dimensions $30(L) \times 30(l) \times 15.6(H) \times 0.7(E) \text{ cm}^3$, entourée d'une couche isolante en *Polystyrène extrudé* de 4cm d'épaisseur. Une résistance chauffante de type immersion (200W , 20cm , acier inoxydable, 230 V c.a et charge de $3,7 \text{ W/cm}^2$) est utilisée pour le chauffage, et un ventilateur de format industriel avec turbine en thermoplastique (Débit : $40,7\text{m}^3/\text{h}$, dimensions : $80 \times 80 \times 25 \text{ mm}^3$) est placé dans la cuve pour brasser l'air chauffé. Un circuit électronique qui gère l'alimentation de la résistance chauffante et du ventilateur (FIG. 5.17), compte tenu de la tension aux bornes d'un capteur de température, est prévu pour la régulation de la température. Enfin, un thermostat de sécurité est également prévu.

Le premier prototype de l'enceinte thermo-régulée a été testé en température (plage et régulation) puis testé dans la *CRBM* en vue d'identifier d'éventuels défauts. Après ces vérifications, dont les résultats seront exposés plus loin (section 5.1.3), il s'est avéré que ce premier prototype se dégradait lorsqu'il était maintenu à une température élevée

pendant une longue durée, en conséquence, nous ne pouvions pas atteindre la température maximale désirée sans risque. L'autre constatation concerne des couplages parasites, modifiant le niveau de champ *EM* dans l'enceinte, engendrés par les éléments métalliques trop proches de l'emplacement de l'*EST* tels que la résistance chauffante (FIG. 5.15), ce problème sera abordé plus en détails en section 5.1.3.2. En conséquence, le prototype en question a été rejeté et un second prototype amélioré a été réalisé et testé, il sera abordé en détails dans ce qui suit.

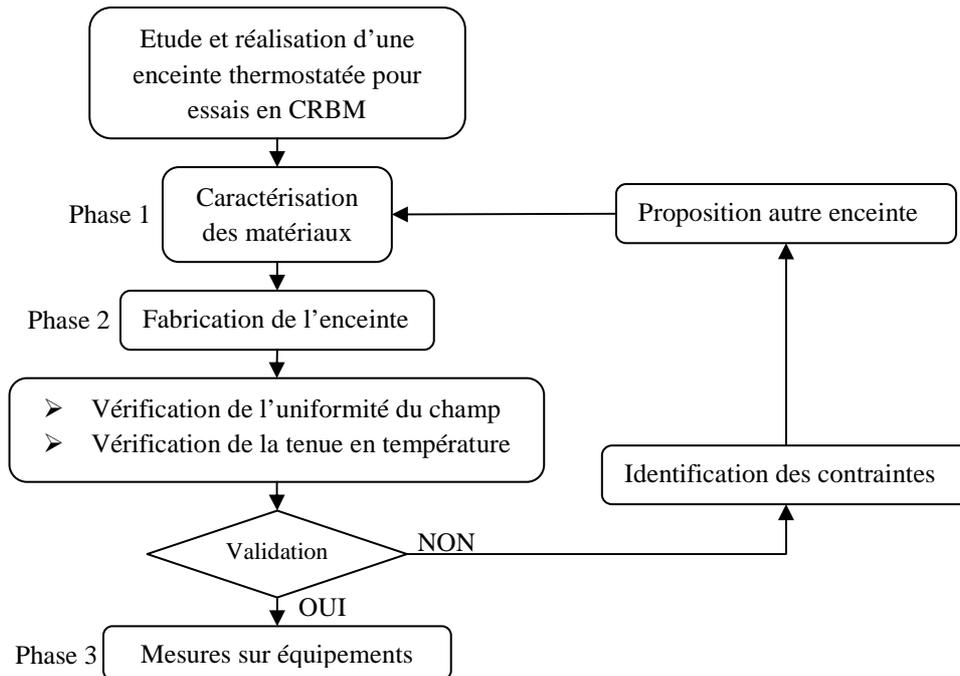


FIG. 5.14. Etapes de réalisation du banc de test thermo-régulé associé à la CRBM

Comme celle du prototype n°1, l'ossature de l'enceinte thermo-régulée n°2 a été réalisée à partir de plaques de *Téflon* pour lui garantir une bonne rigidité mécanique. Cependant, cette nouvelle version contrairement à la première est composée de deux compartiments distincts (FIG. 5.16). Le compartiment supérieur, réservé exclusivement à l'*EST*, est quasiment identique à celui du premier prototype. Le compartiment inférieur est spécialement dédié aux composants servant au chauffage et à la régulation de la température (résistance chauffante et ventilateur). Les composants métalliques ont été déportés loin de l'*EST* de façon à les rapprocher du plancher de la *CRBM* et prévenir tout couplage *EM*. Ensuite, les deux compartiments formant l'enceinte n°2 sont recouverts d'une couche de *Laine de Roche* de 5cm d'épaisseur, puis le tout est entouré de plaques de *polystyrène extrudé* de 4cm d'épaisseur (FIG. 5.18) pour renforcer l'isolation thermique. En raison de l'augmentation du volume de l'air à brasser par le ventilateur pour homogénéiser la température dans l'enceinte, ce dernier a été choisi d'un format plus grand et est renforcé par un moteur externe. Ainsi, avec ce deuxième prototype, nous sommes en mesure de contrôler la température avec une précision de 2°C entre 25°C et 135°C.

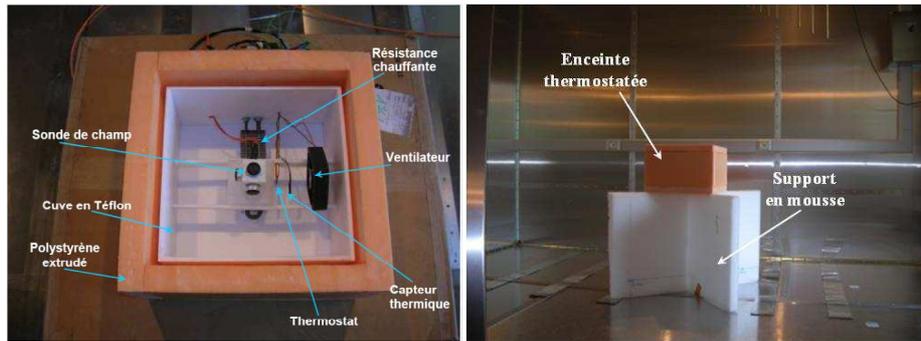


FIG. 5.15. Enceinte thermo-régulée (prototype n°1) avec sonde de champ et support



FIG. 5.16. Enceinte thermo-régulée (prototype n°2) en phase de réalisation

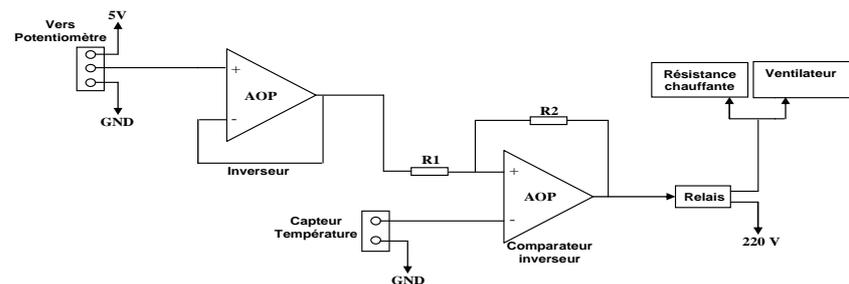


FIG. 5.17. Schéma synoptique du circuit de régulation de la température

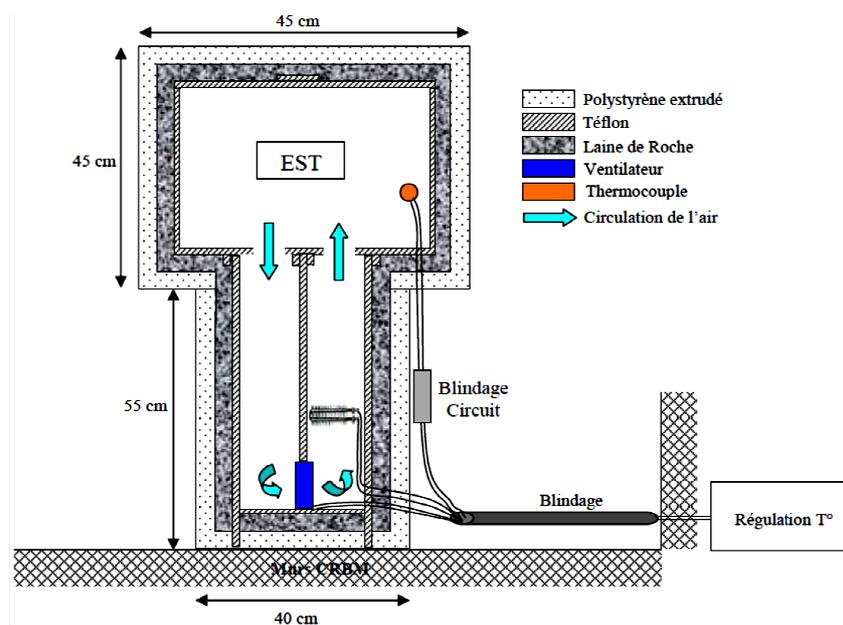


FIG. 5.18. Schéma synoptique de l'enceinte thermo-régulée (prototype n°2)

5.1.3 Mesures pour la validation de l'enceinte thermo-régulée

Dans cette section nous allons présenter des mesures de champ électrique, soit dans l'enceinte thermo-régulée (avec les deux prototypes) insérée dans la *CRBM*, ou des mesures issues de calibrages de la chambre vide ou en présence de l'enceinte. Dans un premier temps, nous avons réalisé trois calibrages de la *CRBM* selon la norme en vigueur pour le domaine automobile *CEI 61000-4-21* [5] dans la gamme de fréquence 80 à 3000MHz. Ces calibrages vont servir à vérifier l'éventuel impact des matériaux constituant l'enceinte sur l'uniformité statistique du champ *EM*. En effet, ces matériaux pourraient charger de façon non négligeable la chambre réverbérante et dégrader son facteur de qualité ainsi que l'uniformité statistique.

Les calibrages réalisés consistent en :

- un premier calibrage chambre vide (i.e. sans aucun équipement ou support dans la *CRBM*),
- un deuxième calibrage chambre chargé avec le premier prototype de l'enceinte,
- un troisième calibrage chambre chargé avec le second prototype de l'enceinte.

Ensuite, toujours dans la *CRBM*, deux mesures du champ électrique maximum sur un tour de brasseur ont été effectuées à l'intérieur de chaque prototype dans les fréquences allant de 150 à 3000MHz. Les mesures sont faites grâce à la sonde de champ isotropique déjà présentée dans le chapitre précédent, cette dernière sera positionnée à l'emplacement prévu pour l'*EST*. Ces données seront comparées à deux autres mesures effectuées avec la même sonde « seule » placée soigneusement à la même position spatiale que dans les deux cas précédents. Ainsi, il sera possible de comparer les niveaux de champ *E*, et de détecter d'éventuels écarts.

5.1.3.1 Uniformité du champ selon le critère normatif

Les figures 5.8 à 5.11 montrent les courbes d'écart-type de la moyenne normalisée (à la racine carrée de la puissance moyenne d'entrée) du champ électrique maximum (normalisé) mesuré sur une révolution de brasseur selon les trois directions cartésiennes (*x*, *y*, *z*). Ces courbes sont issues des calibrages : chambre vide, chambre en présence du prototype n°1 et son support et chambre en présence du prototype n°2. L'écart-type est comparé au gabarit donné par la norme *CEI 61000-4-21* [5] pour déterminer si l'homogénéité et l'isotropie statistiques du champ sont vérifiées. On observe d'une part l'écart-type sur les trois composantes du champ (E_{xmax} , E_{ymax} et E_{zmax}) en chaque point, afin de vérifier son isotropie, et d'autre part, sur l'ensemble des directions ($E_{xyz\ max}$), pour évaluer son homogénéité.

Les résultats montrent que le gabarit normatif est respecté pour les fréquences au dessus de la $LUF=200MHz$ (*Lowest Usable Frequency*) pour tous les cas cités, nous constatons néanmoins un dépassement de gabarit (toléré par la norme) dans la direction *Oz* à 329MHz pour le cas de la chambre en présence du prototype n°1 et son support (FIG. 5.22).

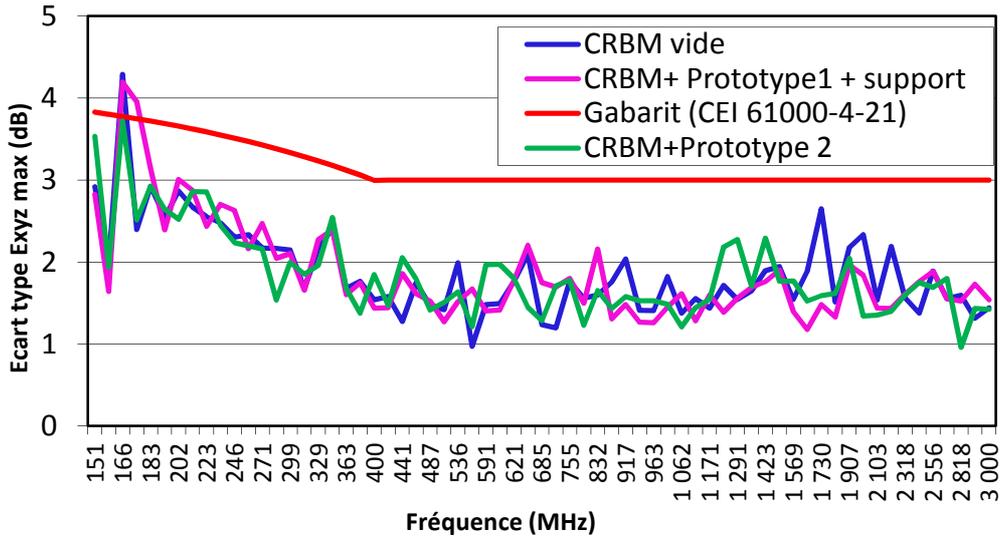


FIG. 5.19. Ecart-type du champ E_{max} mesuré dans les trois directions (Ox,Oy,Oz)

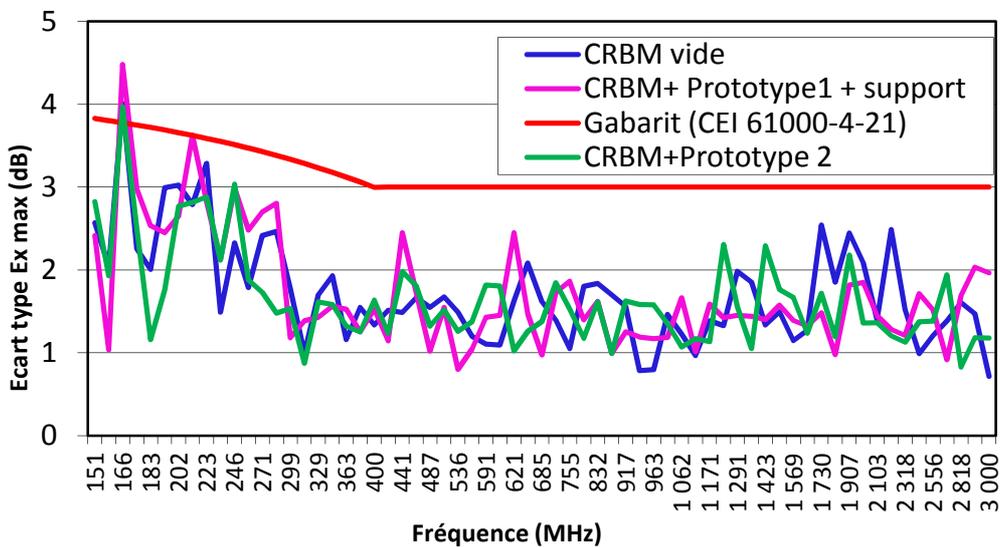


FIG. 5.20. Ecart-type du champ $E_{x_{max}}$

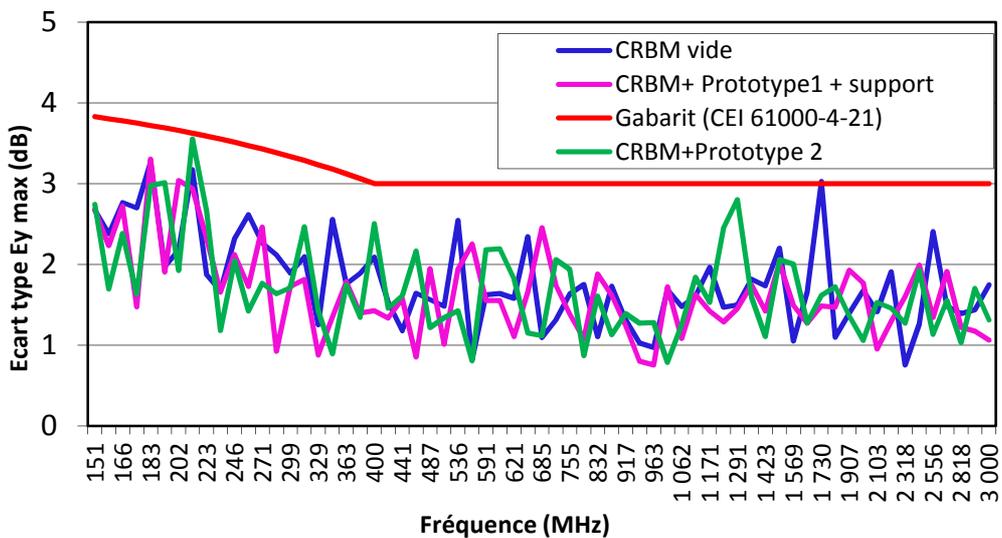


FIG. 5.21. Ecart-type du champ $E_{y_{max}}$

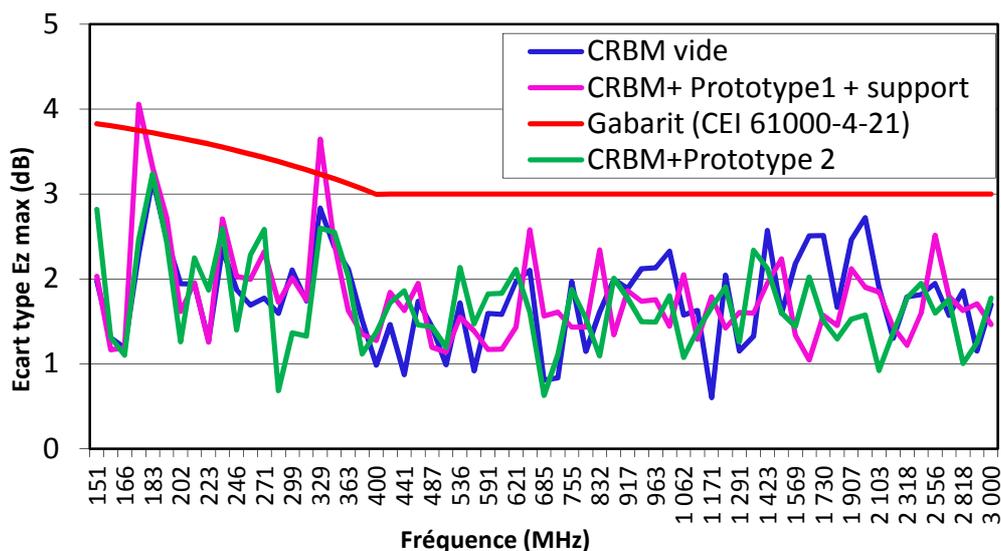


FIG. 5.22. Ecart-type du champ $E_{z,max}$

5.1.3.2 Niveaux de champ électrique dans l'enceinte thermo-régulée

Nous avons mesuré à l'aide de la sonde de champ les trois composantes quadratiques du champ électrique maximum sur une révolution de brasseur, tantôt à l'intérieur de l'enceinte thermo-régulée et tantôt à l'extérieur, en prenant le soin de garder la même position spatiale de la sonde. Le but de cette manipulation est de vérifier si le niveau de champ imposé dans la *CRBM*, en injectant *1Watt* de puissance, reste le même à l'intérieur de l'enceinte thermo-régulée. En effet, avant de pouvoir tester un équipement électronique en immunité rayonnée, il va falloir s'assurer que le niveau d'agression électromagnétique désiré soit atteint à l'intérieur de l'enceinte insérée dans la *CRBM*.

Lors des mesures visant à vérifier le niveau de champ électrique dans le prototype n°1 de l'enceinte thermo-régulée, nous avons observé des écarts supérieurs à *5dB* entre *200* et *650MHz* (FIG. 5.23 à FIG. 5.25) par rapport aux mesures avec la sonde seule, plus précisément sur la composante E_z (FIG. 5.25), sachant que la résistance chauffante était orientée selon l'axe Oz . Cette dernière étant proche de la sonde de champ, elle pourrait être la cause de couplages indésirables engendrant ces écarts de champs. Des écarts importants sont observés également en début de bande fréquentielle sur la composante E_y (FIG. 5.24).

Afin de confirmer l'hypothèse de l'implication de la résistance chauffante dans l'apparition d'écarts importants du champ électrique, nous avons effectué d'autres mesures dans le prototype n°1 avec une orientation différente de la résistance par rapport aux axes de la sonde de champ isotropique, celle-ci est orientée cette fois selon l'axe Ox (FIG. 5.26 à FIG. 5.28).

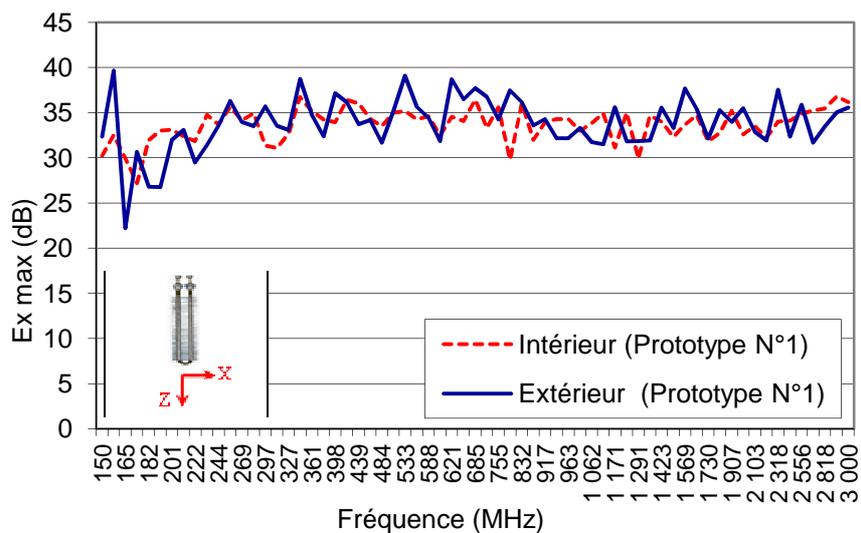


FIG. 5.23. Niveaux de champ E_{xmax} sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Oz)

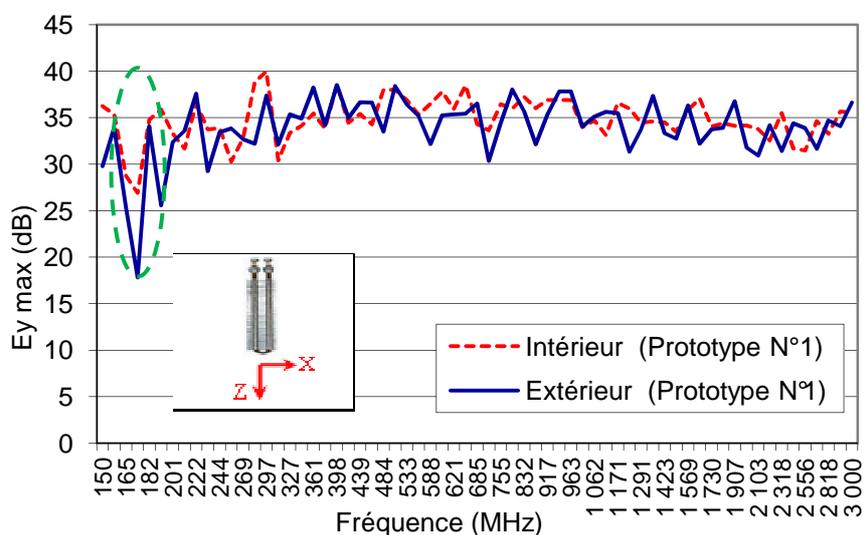


FIG. 5.24. Niveaux de champ E_{ymax} sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Oz)

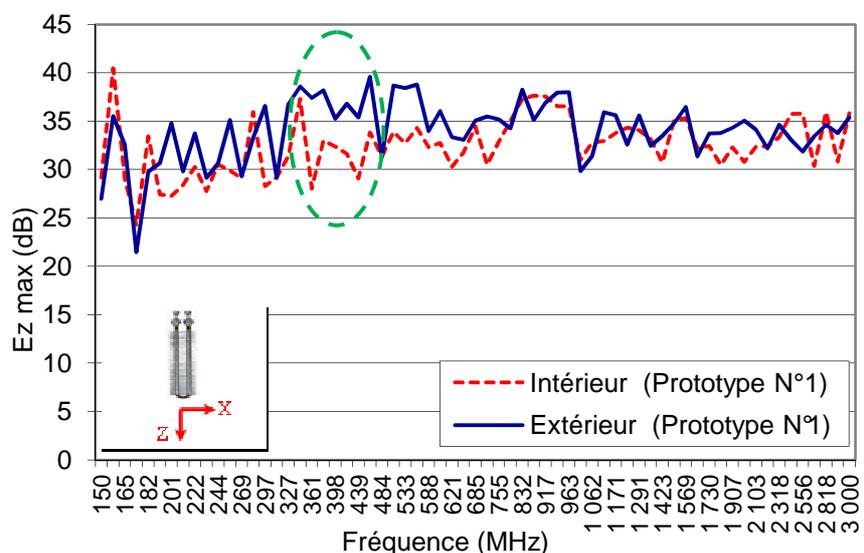


FIG. 5.25. Niveaux de champ E_{zmax} sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Oz)

Nous constatons d'après les figures 5.15 à 5.17, présentant les mesures effectuées cette fois avec une orientation de la résistance dans la direction Ox , que des différences significatives de niveau de champ électrique maximum sont apparues cette fois sur la composante E_x entre 150 et 650MHz. L'écart absolu entre les niveaux de champ électrique des deux mesures à l'intérieur et l'extérieur du prototype n°1, présenté sous forme d'histogrammes dans les figures 5.18 et 5.19 pour deux orientations différentes de la résistance chauffante, montre clairement que les mesures de champ électrique sont influencées par l'orientation de cette dernière. En effet, les écarts entre la mesure à l'intérieur de l'enceinte thermo-régulée (proximité de la résistance chauffante) et la mesure avec la sonde seule sont plus significatifs dans l'axe d'orientation de la résistance chauffante. Ces écarts ne doivent pas être négligés car dépassant parfois les 5dB par rapport à la consigne de champ souhaitée, une amélioration dans la conception de l'enceinte thermo-régulée a été donc entreprise pour éloigner suffisamment, de l'emplacement réservé à l'EST, tous les éléments métalliques susceptibles de créer des couplages parasites.

Le problème constaté avec le premier prototype, qui est dû au couplage du champ E avec la résistance chauffante, a été donc résolu grâce au prototype n°2 comme nous pouvons le constater sur les figures 5.20 à 5.22 représentant les niveaux de champ maximum mesurés dans l'enceinte n°2 comparés aux niveaux de champ mesurés avec la sonde seule. En effet, la mesure du champ E_{xmax} dans le second prototype, où la résistance chauffante est déportée loin du compartiment accueillant l'EST (représenté ici par la sonde de champ), et dont l'orientation est selon l'axe Ox , est en bonne adéquation avec la mesure donnée par la sonde seule (écart dans la limite de 3dB). Cependant, nous signalons l'apparition de quelques écarts ponctuels inexplicables avoisinant les 5dB dans les hautes fréquences. La figure 5.34 montre une comparaison entre les écarts de champ E_{xmax} (intérieur de l'enceinte par rapport à la sonde seule) enregistrés pour les deux prototypes n°1 et 2 lorsque la résistance chauffante est orientée dans la direction de l'axe Ox . Nous constatons que le second prototype a permis de diminuer sensiblement les écarts de champ dans les fréquences allant de 150 à 600MHz.

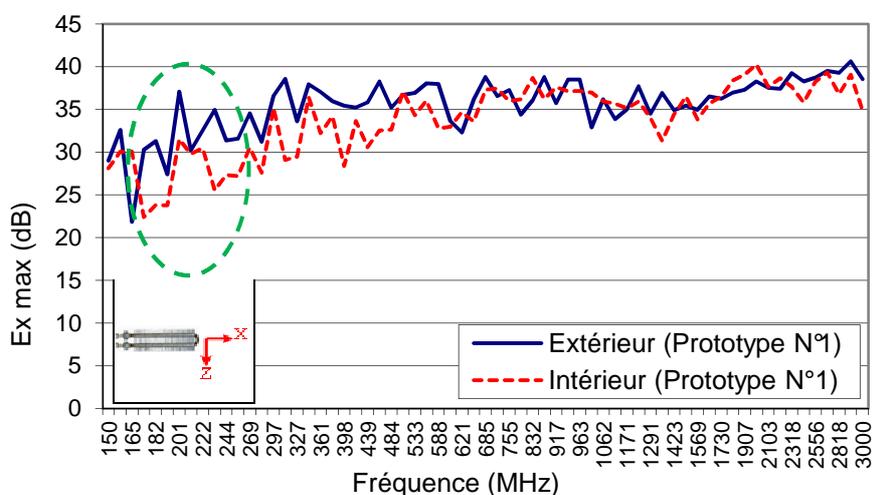


FIG. 5.26. Niveaux de champ E_{xmax} sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Ox)

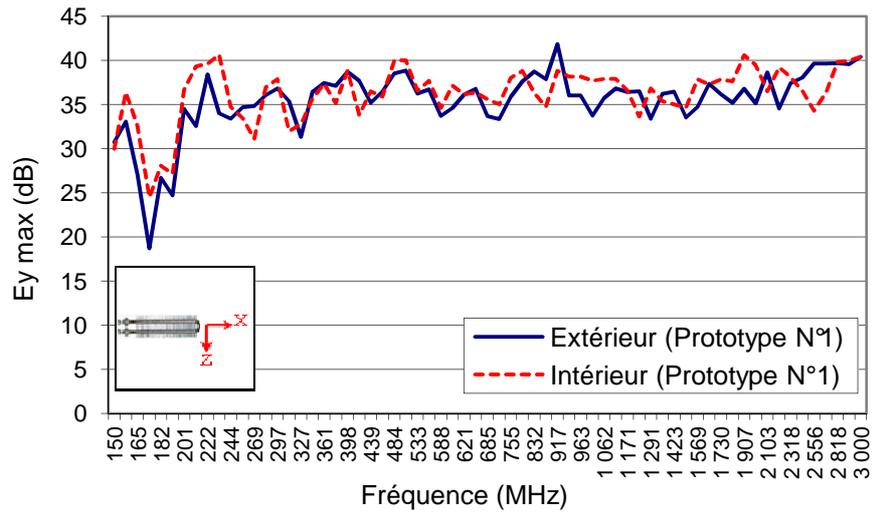


FIG. 5.27. Niveaux de champ $E_{y\max}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon O_x)

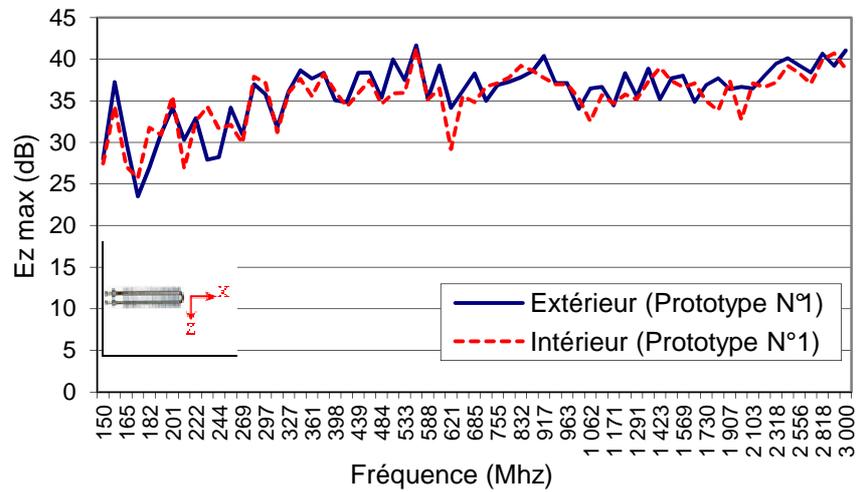


FIG. 5.28. Niveaux de champ $E_{z\max}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon O_x)

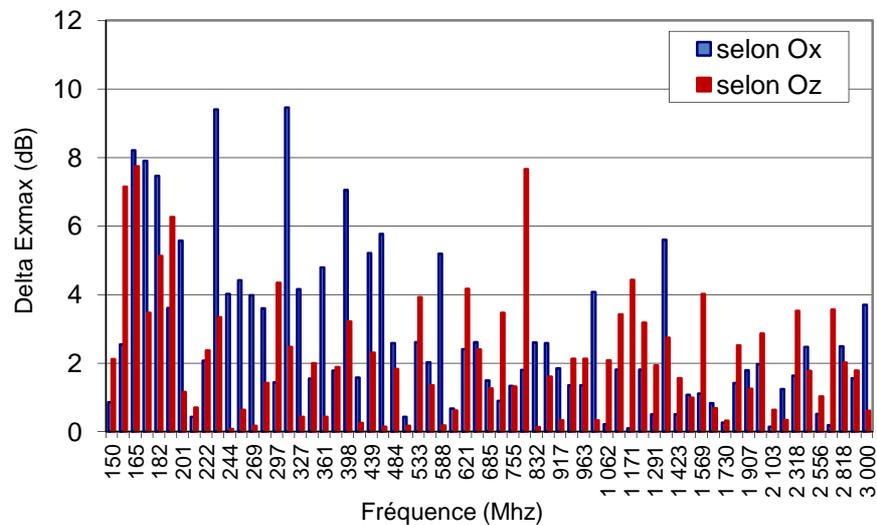


FIG. 5.29. Ecart absolu des niveaux de champ $E_{x\max}$ entre l'intérieur et l'extérieur du prototype N°1

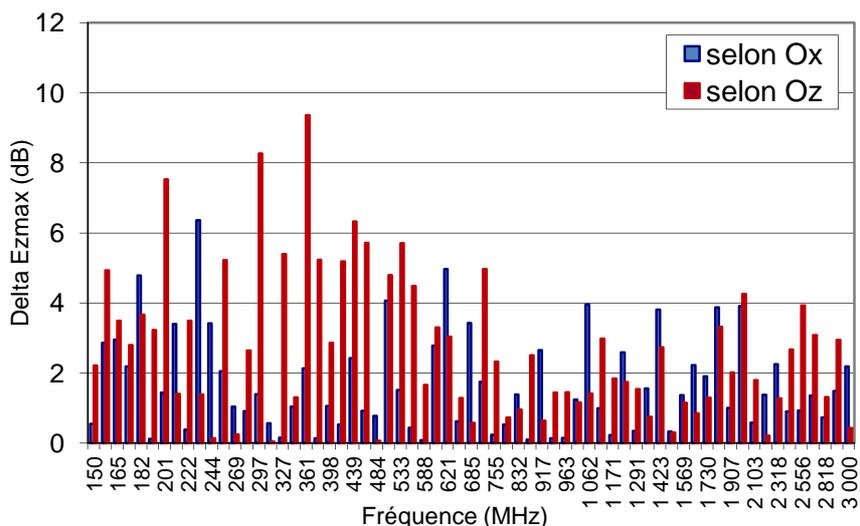


FIG. 5.30. Ecart absolu des niveaux de champ Ez_{max} entre l'intérieur et l'extérieur du prototype N°1

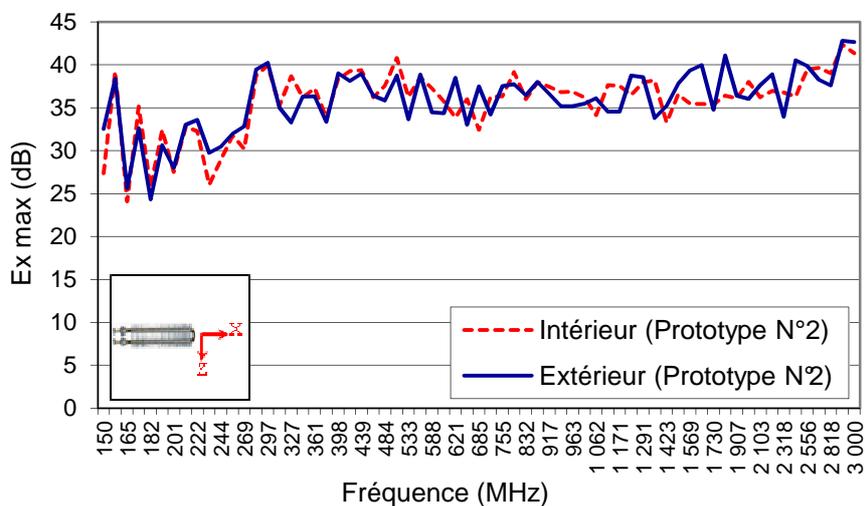


FIG. 5.31. Niveaux de champ Ex_{max} sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°2 (résistance orientée selon Ox)

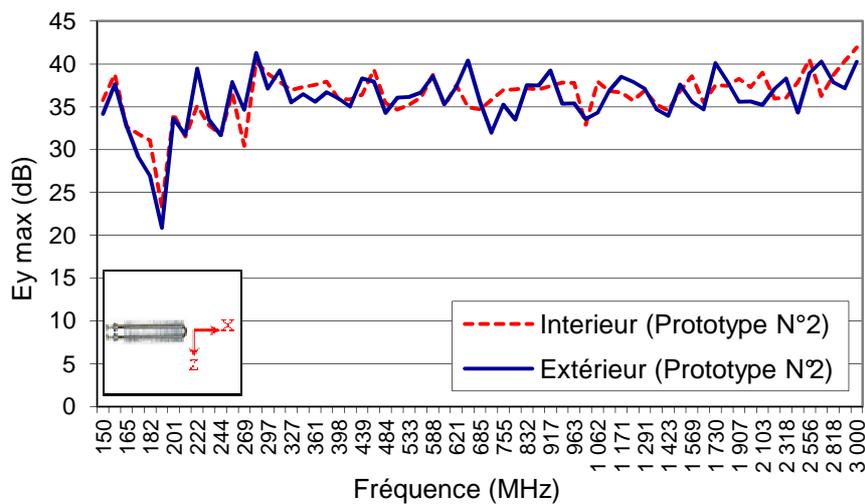


FIG. 5.32. Niveaux de champ Ey_{max} sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°2 (résistance orientée selon Ox)

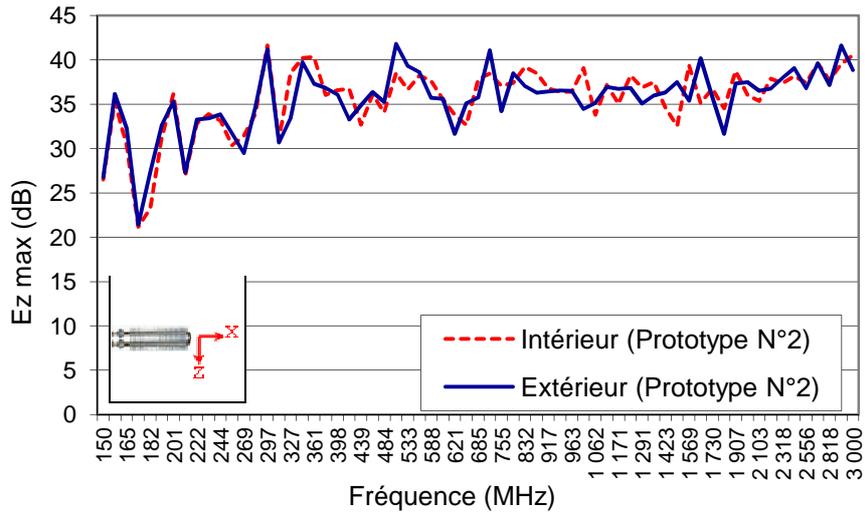


FIG. 5.33. Niveaux de champ E_{zmax} sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°2 (résistance orientée selon Ox)

Les résultats présentés jusqu'ici montrent clairement que la position et la proximité, rapportée à la longueur d'onde, de la résistance chauffante (ou tout objet métallique de dimensions non négligeables par rapport à la longueur d'onde) peuvent induire des écarts importants sur les composantes du champ électrique. Ces écarts dépassent, dans notre cas, les 3 dB dans la gamme de fréquence $150\text{-}600\text{ MHz}$ par rapport à la consigne de champ que l'on voulait appliquer. Nous remarquons aussi que cet écart diminue sensiblement avec l'augmentation de la fréquence (FIG. 5.34). L'explication physique est en relation avec la longueur d'onde. En effet, la règle générale en chambre réverbérante est de respecter une distance minimale équivalente à $\lambda/4$ entre l'EST et tout objet métallique de dimension relativement large. En conséquence, nous devons éloigner l'EST des constituants métalliques de l'enceinte au minimum de 12.5 cm à la plus petite fréquence d'utilisation.

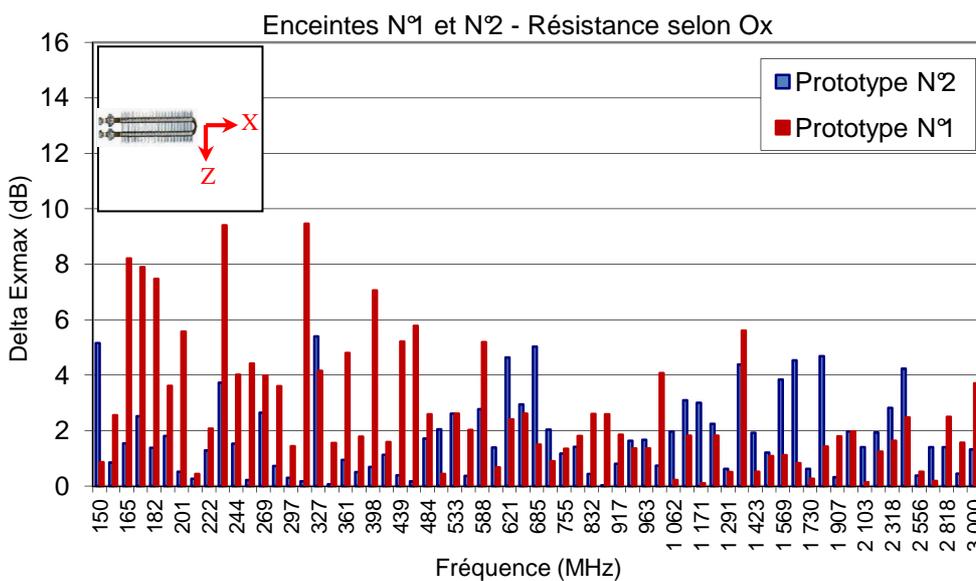


FIG. 5.34. Ecart absolu des niveaux de champ E_{xmax} entre l'intérieur et l'extérieur des prototypes N°1 et 2

Le caractère statistique du champ EM dans la $CRBM$ nous oblige à prendre quelques précautions avant de pouvoir confirmer les résultats présentés précédemment. Dans ce cas, nous avons réitéré plusieurs mesures du champ électrique maximum, à l'intérieur du prototype n°2 de l'enceinte thermo-régulée dans un premier temps, et avec la sonde seule dans un deuxième temps, dans le but d'observer la répétabilité des niveaux de champ mesurés à la même position spatiale. Les figures 5.24 à 5.26 montrent les courbes du champ électrique maximum E_{xmax} , E_{ymax} , et E_{zmax} respectivement issues de trois mesures successives dans chaque direction cartésienne à l'intérieur du prototype n°2. Les niveaux de champ électrique issus des trois mesures restent globalement proches dans une proportion ne dépassant pas les $3dB$ pour les trois composantes quadratiques, hormis un ou deux écarts ponctuels avoisinant les $5dB$ dans les hautes fréquences (FIG. 5.36).

Le même constat est tiré à partir des mesures avec la sonde isotropique seule placée dans le volume de test à la même position spatiale que les mesures précédentes (FIG. 5.38 à FIG. 5.40). Nous pouvons donc affirmer que la répétabilité des mesures est avérée dans une limite de $\pm 3dB$ sur la majorité de la bande fréquentielle choisie.

Les résultats préliminaires présentés dans cette section montrent qu'au bout du deuxième prototype de l'enceinte thermo-régulée nous sommes arrivés à nous affranchir des différentes contraintes citées auparavant, la configuration du second prototype ainsi que les matériaux choisis semblent donc convenir aux exigences de notre application du point de vue conservation du niveau de champ EM ainsi que son isotropie et son uniformité statistiques. Cependant, compte tenu de l'étude présentée dans le chapitre 4 concernant l'influence de la charge sur le comportement de la $CRBM$, nous avons jugé utile de regarder de plus prêt l'effet de l'insertion du banc de test complet (enceinte thermo-régulée n°2 avec ses éléments de régulation de la température et ses composants d'acquisition de données) dans la chambre réverbérante. Cette étude fera l'objet de la prochaine section.

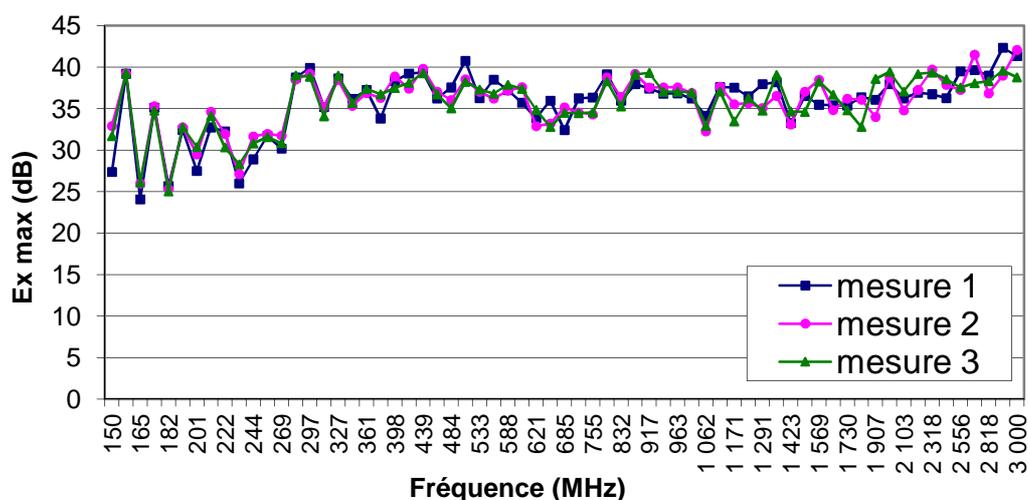


FIG. 5.35. Mesures de répétabilité du champ Ex_{max} dans l'enceinte N°2

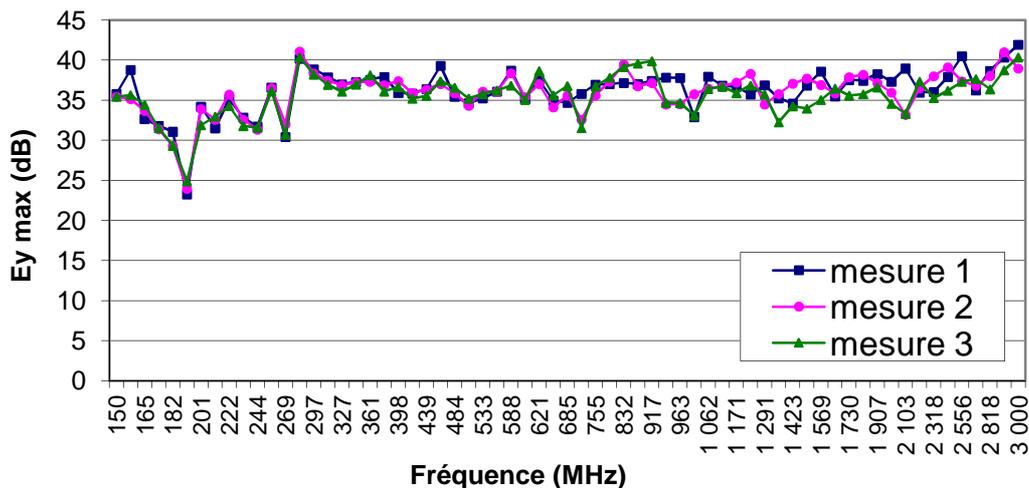


FIG. 5.36. Mesures de répétabilité du champ $E_{y \max}$ dans l'enceinte N°2

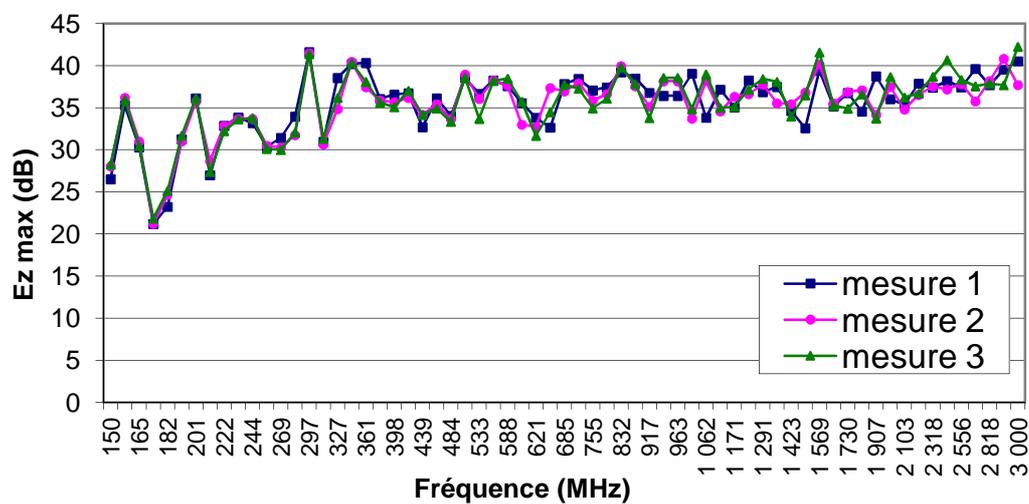


FIG. 5.37. Mesures de répétabilité du champ $E_{z \max}$ dans l'enceinte N°2

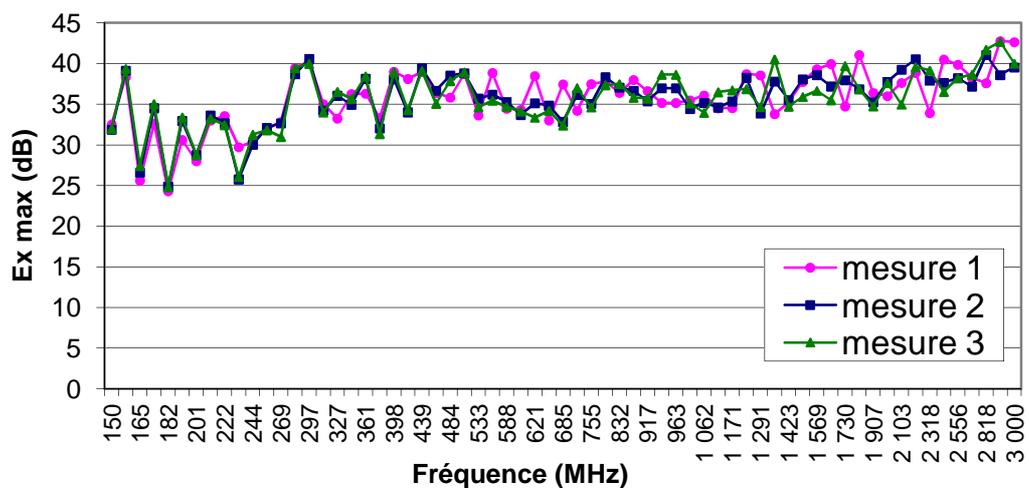


FIG. 5.38. Mesures de répétabilité du champ $E_{x \max}$ (sonde de champ seule)

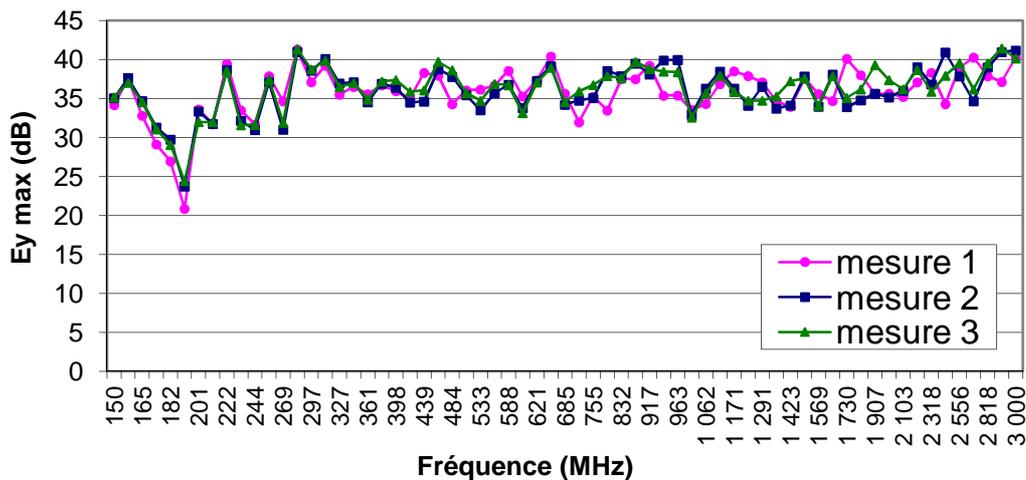


FIG. 5.39. Mesures de répétabilité du champ $E_{y\max}$ (sonde de champ seule)

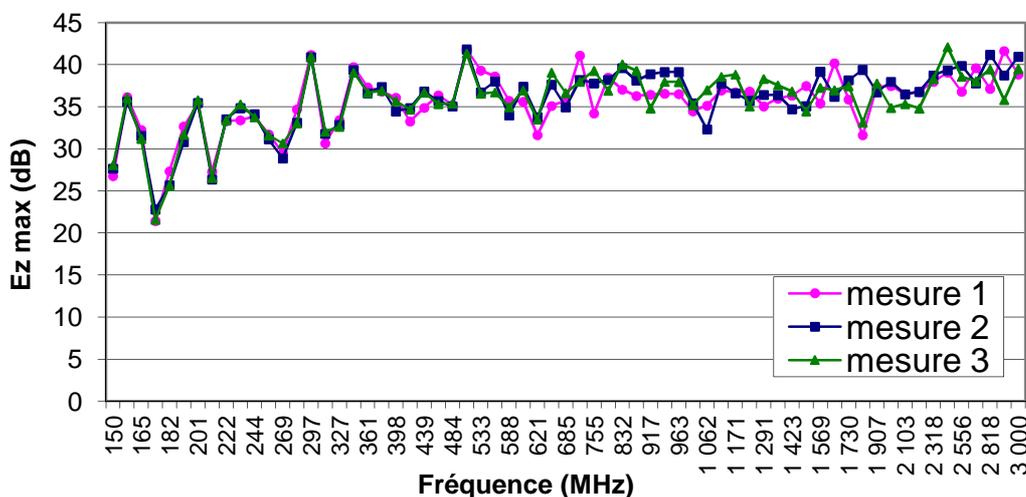


FIG. 5.40. Mesures de répétabilité du champ $E_{z\max}$ (sonde de champ seule)

5.1.4 Effet de l'insertion de l'enceinte thermo-régulée dans la CRBM

L'insertion de l'enceinte thermo-régulée dans la CRBM pourrait la charger de façon à dégrader l'uniformité statistique du champ électrique dans le volume de travail. Pour garantir une sévérité de champ électrique maîtrisée avec une erreur acceptable, un calibrage chambre chargée (CRBM en présence de l'enceinte thermo-régulée n°2) s'impose avant d'entamer les tests d'immunité rayonnée afin de vérifier la quantité de charge et de compenser éventuellement les pertes d'énergie qui en résultent. Les paramètres importants de la CRBM tels que le facteur de charge (CLF), le facteur de qualité (Q), la puissance de test (P_{test}), le facteur de calibrage d'antenne (ACF) et les pertes d'insertion (IL) seront, dans ce cas, évalués et comparés au cas chambre vide. Nous allons nous appuyer sur les résultats et conclusions du chapitre 4 pour vérifier le comportement EM de la CRBM en présence du banc de test composé de l'enceinte thermo-régulée (prototype n°2) et des câbles transportant les différents signaux.

5.1.4.1 Exploitation de l'étude sur l'effet de la charge pour la validation du banc de test

Nous avons vu dans le chapitre 4 que c'est l'*ACS moyenne* (*Absorption Cross Section*) de l'objet inséré dans la *CRBM* plutôt que son volume qui détermine la quantité de charge induite dans la chambre. Nous avons abordé également l'impact que pourrait avoir l'insertion d'un objet sur l'indépendance des échantillons de champ électrique ou de puissance relevés sur un tour de brasseur. Au vu de ces constatations nous avons voulu vérifier la charge induite dans la chambre par le banc de test réalisé dans le but de la validation de nos choix concernant les matériaux constituant l'enceinte thermo-régulée. Dans un premier temps, nous avons évalué les facteurs de qualité du cas chambre vide et du cas chambre en présence du banc de test selon l'équation (4.26, chap. 4) donnée par la norme *CEI61000-4-21*. Nous signalons que les mesures ont été relevées sur trois positions d'antenne pour les fréquences allant de *200MHz* à *2GHz*. La figure 5.41 montre les courbes du facteur de qualité relatives aux deux cas cités. Nous constatons qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux courbes, donc le facteur de qualité n'est pas dégradé, ou très légèrement, par l'insertion du banc de test dans la chambre.

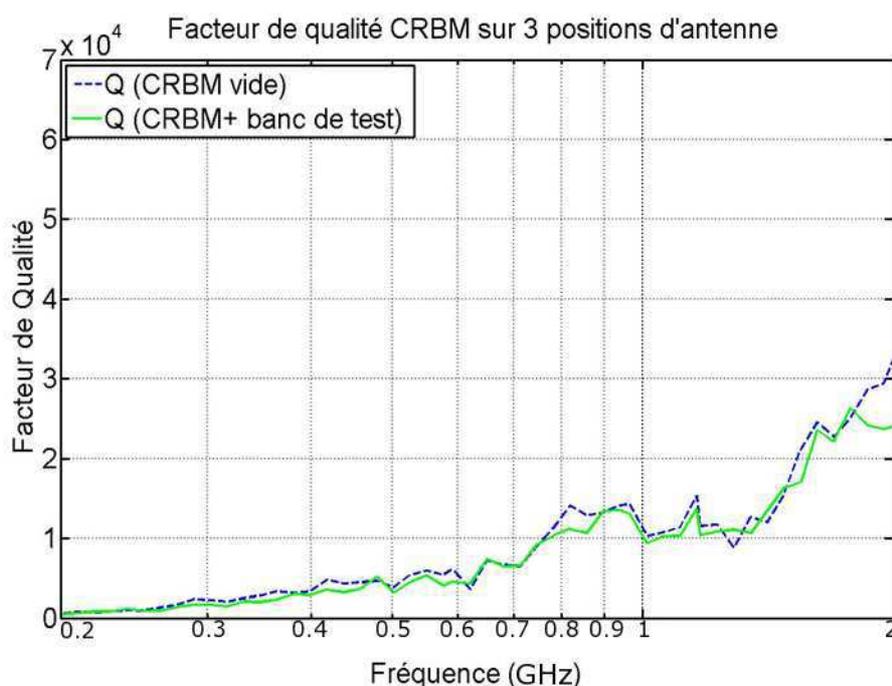


FIG. 5.41. Facteur de qualité de la *CRBM* vide ou en présence du banc de test

Dans un second temps, la section efficace d'absorption moyenne du banc de test a été calculée à l'aide de l'équation (4.37, chap. 4) à partir des facteurs de qualité de la chambre vide et de la chambre en présence du banc de test. Le résultat est donné sous forme de courbe par la figure 5.42. Il est clair, dans ce cas, que l'*ACS moyenne* du banc de test est très faible entre *200* et *600MHz* et quasi nulle dans les fréquences supérieures à *600MHz*. Une comparaison avec la courbe de l'*ACS moyenne* de quatre absorbants chargés en *Carbone*, empilés au centre du volume de test de la *CRBM*, permet de conclure que notre banc de test a une capacité d'absorption de l'énergie *EM* très faible en début de bande fréquentielle et quasi nulle dans les hautes fréquences.

Par ailleurs, l'observation de la fonction d'autocorrélation des échantillons de puissance et de champ électrique relevés sur un tour de brasseur (FIG. 5.43 et FIG. 5.44), pour chacune des huit positions d'antenne de réception et de sonde de champ respectivement, montre une augmentation de la corrélation en début de bande fréquentielle (jusqu'à 300MHz) lorsque le banc de test est inséré dans la chambre, cela pourrait remettre en cause l'indépendance des échantillons dans ces fréquences. En conséquence, l'homogénéité et l'isotropie statistiques du champ *EM* dans le volume utile n'est garantie avec précision, compte tenu du théorème de *la limite centrale*, qu'à partir de 300MHz.

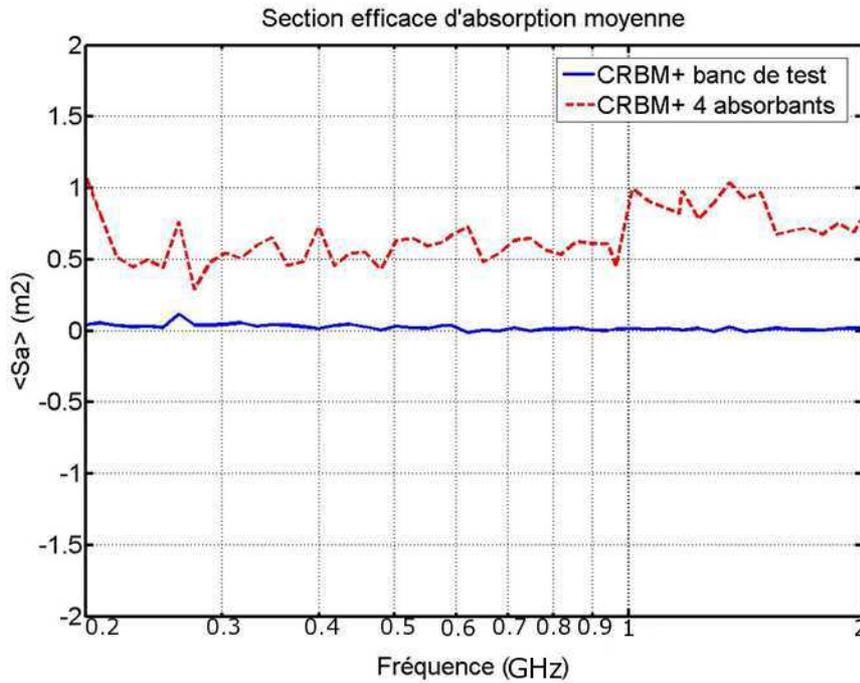


FIG. 5.42. ACS moyenne du banc de test et de quatre absorbants chargés en Carbone

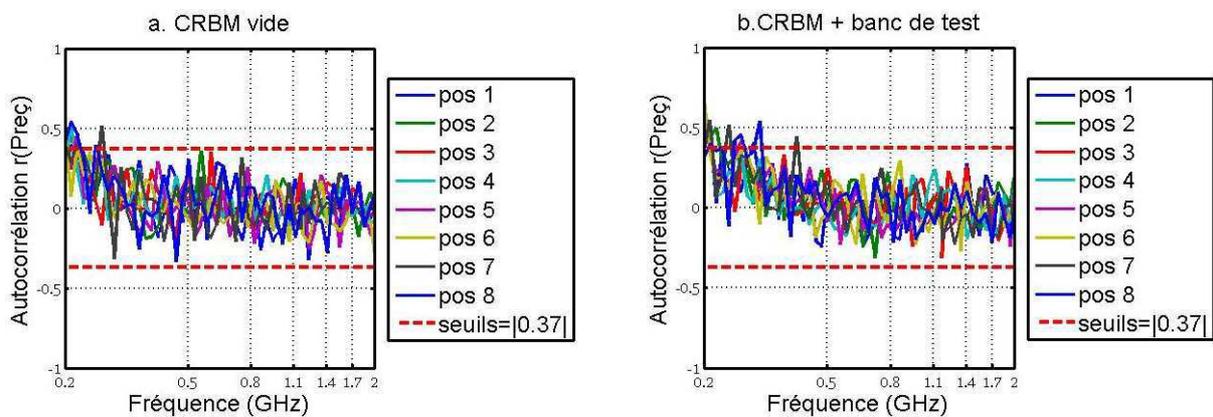


FIG. 5.43. Fonction d'autocorrélation des échantillons de puissance relevés dans la CRBM vide ou en présence du banc de test

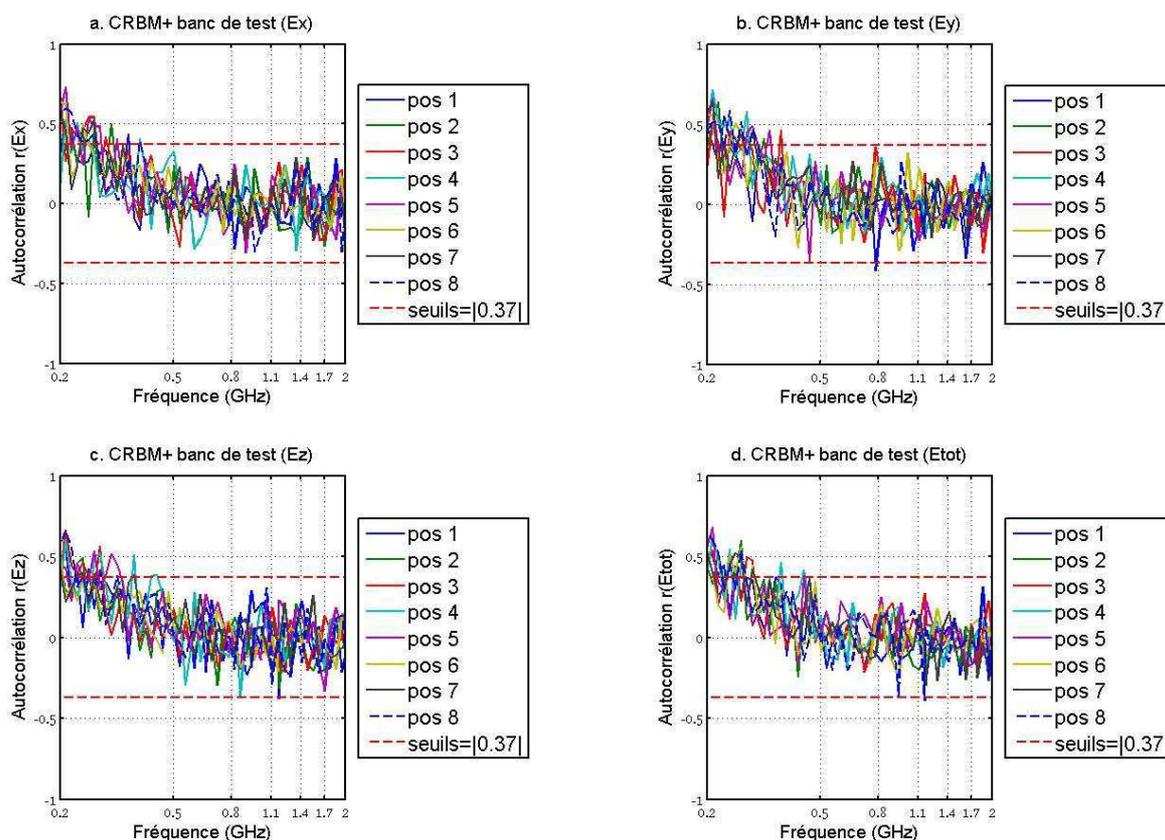


FIG. 5.44. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ E relevés dans la CRBM en présence du banc de test

Les courbes de l'ACF (*Antenna Calibration Factor*) et IL (*Insertion Losses*) pour la CRBM en présence du banc de test (enceinte thermo-régulée n°2) et la CRBM vide, calculés à partir des équations (4.20) et (4.21) respectivement (chap. 4), sont présentées en figure 5.45. Les deux paramètres, dans le cas où le banc de test est inséré dans la chambre, restent très proches du cas chambre vide, les écarts ne dépassant pas 2 dB sur toute la bande de fréquence. Ces 2dB de différence, observés surtout entre 200 et 600MHz, sont en adéquation avec la courbe de l'ACS moyenne (FIG. 5.42).

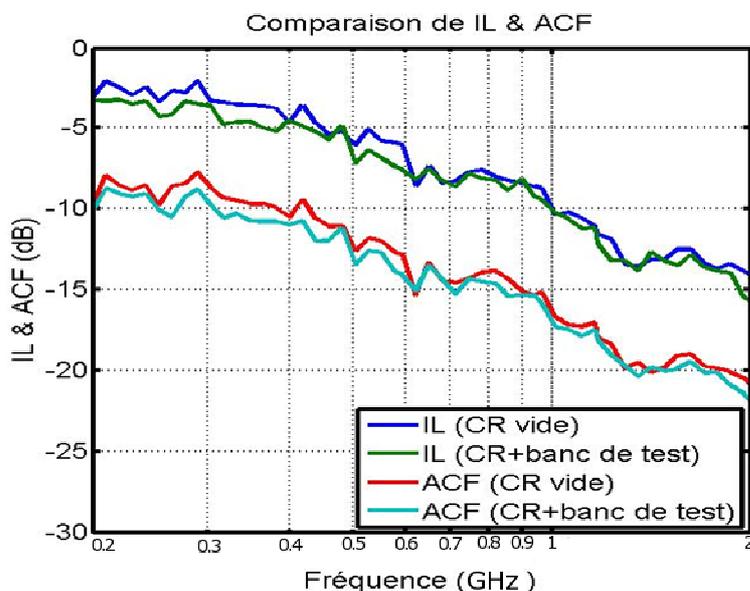


FIG. 5.45. Facteur de calibrage d'antenne et pertes d'insertion de la CRBM vide ou en présence du banc de test

Le facteur de charge de la chambre (CLF) est donné par la relation (4.23) donnée en chapitre 4. Le CLF calculé avec huit positions d'antenne est égal à l'unité dans le cas chambre vide, il varie légèrement autour de cette valeur dans le cas où le nombre de positions d'antenne retenu pour le calcul est inférieur à huit. Les courbes du CLF pour les deux cas chambre vide et chambre en présence du banc de test sont données en figure 5.46. Nous constatons que les deux courbes du CLF , chambre chargée et chambre vide, évaluées sur trois positions d'antenne de réception restent très proches de la valeur unité (FIG. 5.46) qui est la valeur attendue pour ce paramètre. Cependant le CLF chambre chargée enregistre un faible éloignement de la valeur unité dans les fréquences allant de 250 à 600 MHz. Ces résultats indiquent que la chambre est légèrement chargée par l'enceinte thermo-régulée dans les fréquences inférieures à 600 MHz, ce qui nécessitera une légère compensation de la puissance injectée (P_{test}) pour générer 100V/m comme le montre la figure 5.47. Une compensation de 2 à 10 Watts sera nécessaire lorsque le banc de test est inséré dans la chambre. La puissance de test est calculée à partir des mesures de champ électrique et de puissance reçue issues du calibrage selon l'expression (4.25, chap.4).

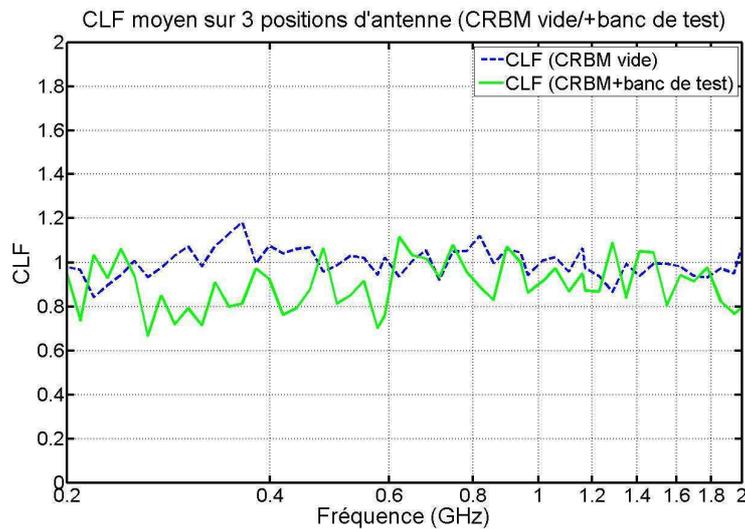


FIG. 5.46. Facteur de charge de la CRBM vide ou en présence du banc de test

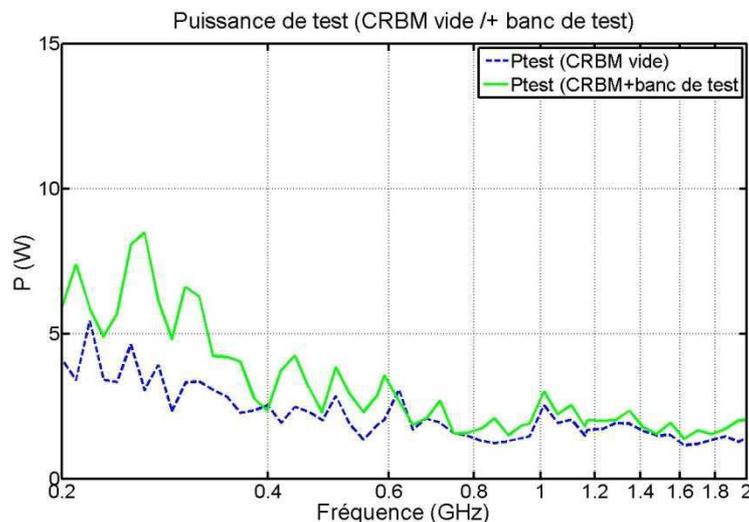


FIG. 5.47. Estimation de la puissance de test nécessaire pour générer 100V/m

La figure 5.48 montre que la charge induite par l'enceinte thermo-régulée, calculée à partir de l'équation (4.22, chap.4), ne dépasse pas $2dB$ entre 200 et $600MHz$ et reste inférieure à $1dB$ au-delà de $600MHz$, ce qui est déjà très faible devant la charge limite imposée par la norme avoisinant $12dB$. Pour rappel nous signalons que pour charger significativement la CRBM de l'IRSEEM il nous faut plus de quatre absorbants chargés en Carbone de dimensions $1,22 \times 0,61 \times 0,15 m^3$ (Chap.4).

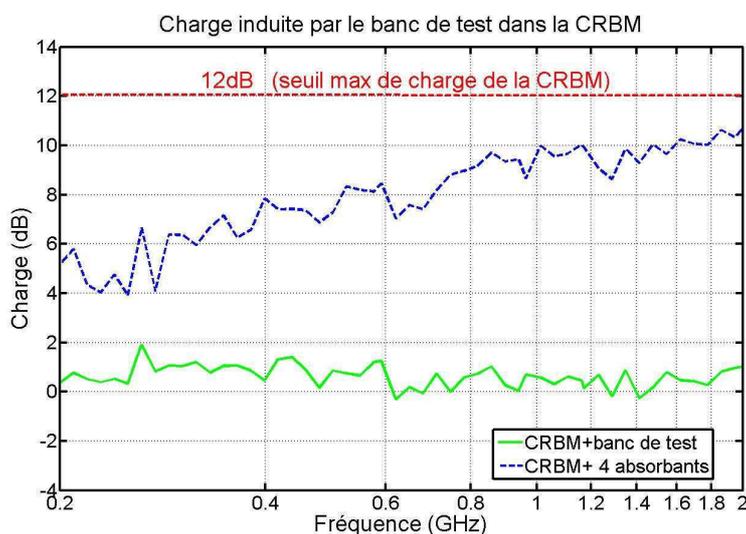


FIG. 5.48. Charge induite dans la CRBM après insertion du banc de test ou d'absorbants

5.1.5 Conclusion

Nous avons suivi un protocole bien déterminé, basé sur des mesures expérimentales et sur des constatations déduites de notre étude ayant fait l'objet du chapitre 4, pour valider le banc de test réalisé vis-à-vis du comportement *EM* de la chambre réverbérante et du champ électrique que l'on souhaite appliquer dans nos tests *CEM*. Une présélection de matériaux, basée sur des mesures pour l'estimation des constantes diélectriques inconnues, nous a permis de réaliser un premier prototype du banc de test. Les limites de ce premier prototype, révélées par des mesures de champ électrique mais aussi par des tests de tenue en température, nous ont conduites à l'élaboration d'un second prototype permettant de réguler et de maintenir la température jusqu'à $135^{\circ}C$ avec une précision de $2^{\circ}C$. Ce second prototype a été validé pour des tests en *CRBM* grâce à des données de calibration de chambre et de mesures de champ électrique ayant permis la vérification de la charge de la chambre ainsi que la conservation de l'homogénéité et l'isotropie statistiques du champ *EM* dans le volume de test et dans l'enceinte thermo-régulée. Nous pouvons conclure à ce stade que le choix des matériaux constituant le banc de test réalisé a été judicieux, ce banc est donc qualifié, à partir de $300MHz$, pour servir aux tests d'immunité rayonnée en association d'un stress thermique d'équipements électroniques en chambre réverbérante. Nous allons aborder dans la section suivante les tests d'immunité rayonnée conjugués à un stress thermique d'un équipement automobile fourni par un équipementier partenaire du programme *O2M*.

5.2 Mesure de l'immunité rayonnée d'un équipement automobile sous stress thermique dans une CRBM

Dans cette section, nous allons montrer la faisabilité des tests d'immunité rayonnée en association avec un stress thermique dans un environnement réverbérant, cette contribution constitue une innovation en matière d'utilisation de la chambre réverbérante. Les tests sont réalisés sur un équipement automobile soumis à une contrainte thermique, dans l'enceinte thermo-régulée, simultanément à une contrainte électromagnétique générée dans la CRBM. Nous présenterons dans la section 5.2.1 les caractéristiques électriques et fonctionnelles de l'EST, ensuite nous expliquerons le protocole expérimental suivi lors des tests en section 5.2.2, les résultats de ces derniers seront présentés en section 5.2.3, enfin une discussion des résultats ainsi que les conclusions tirées feront l'objet des sections 5.2.4 et 5.2.6 respectivement.

5.2.1 Caractéristiques de l'équipement sous test

Le système proposé comme démonstrateur dans le sous projet MCEM (programme O2M) est un équipement pour automobile faisant partie d'un Phare (FIG. 5.49), il s'agit d'un clignotant comportant : un réseau de 13 LEDs CMS de puissance, un circuit électronique (driver) alimenté en 12V DC contenant un convertisseur DC/DC d'une fréquence de commutation de 350kHz, et enfin un faisceau de câbles reliant les LEDs au driver. La puissance dissipée par les LEDs est de 12Watts, celles-ci sont dotées de dissipateurs thermiques en cuivre sur la face arrière et sont montées sur un support souple. Le circuit qui pilote les LEDs est protégé par un capot métallique comme le montre la figure 5.50, il est conçu autour d'un microcontrôleur et de neuf blocs fonctionnels présentés dans le schéma synoptique de la figure 5.51. Pour des raisons de confidentialité nous ne pouvons donner plus de détails sur ce circuit dans ce manuscrit.

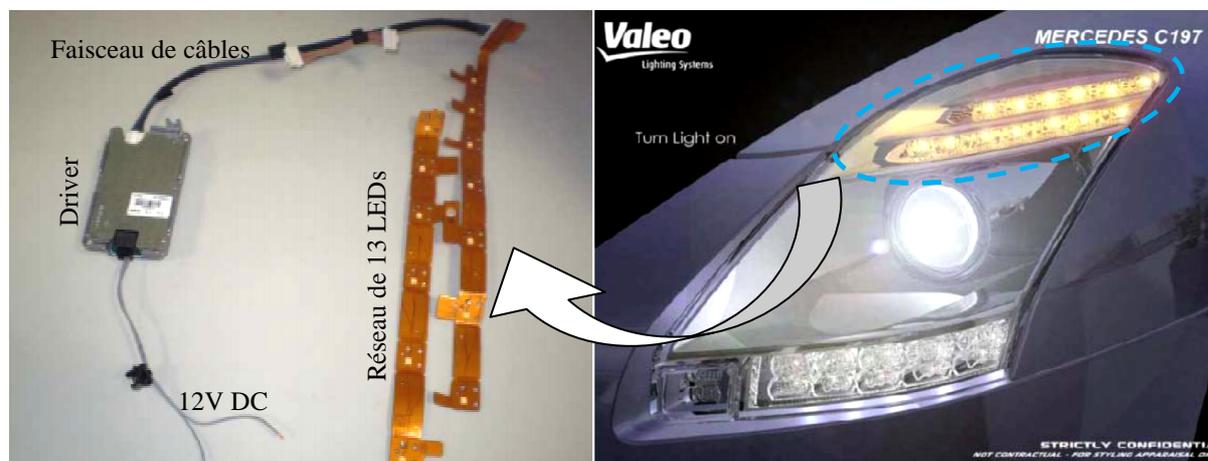


FIG. 5.49. Equipement sous test (Clignotant à LEDs – VALEO)



FIG. 5.50. Circuit Driver des LEDs avec son capot métallique

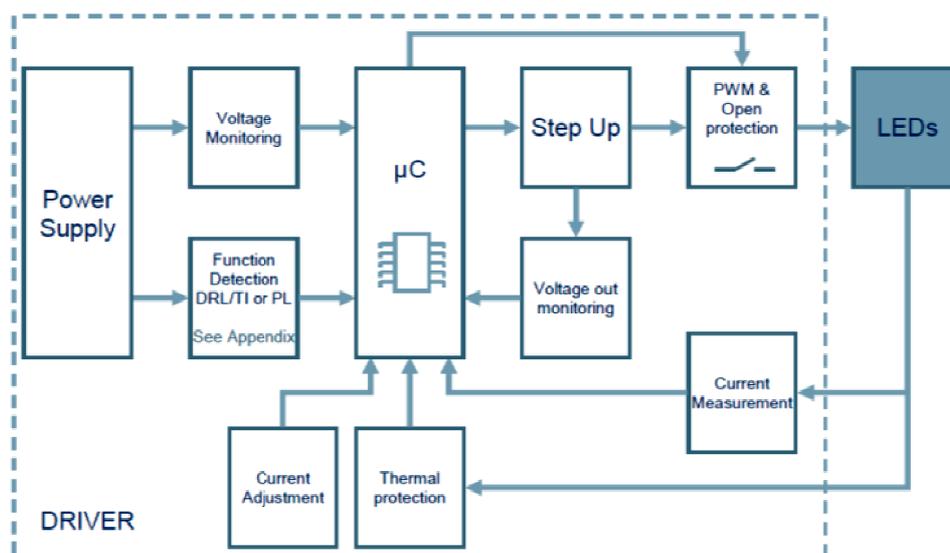


FIG. 5.51. Schéma blocs du circuit Driver

5.2.2 Protocole expérimental

Le banc de test présenté dans les sections précédentes est utilisé avec la *CRBM* pour mesurer l'immunité rayonnée de l'*EST* (FIG. 5.52 et FIG. 5.53) soumis à une contrainte thermique. Les tests consistent à mesurer la variation de l'intensité lumineuse, captée par une fibre optique placée à 1cm de hauteur de la surface émettrice d'une *LED*, lorsqu'on applique à l'*EST* une sévérité de champ électrique de 100V/m à différents degrés de température (80°C et température ambiante). La fibre optique étant isolée des perturbations *EM*, elle est utilisée pour acheminer l'information sur l'état de fonctionnement de l'*EST* à l'extérieur de la chambre, elle permet ainsi de s'affranchir des perturbations engendrées par la *CRBM*. L'autre extrémité de la fibre optique est connectée sur un circuit à base de phototransistor (*SFH 350*) qui donne en sortie une tension électrique image de l'intensité lumineuse, cette dernière est visualisée sur un oscilloscope numérique dont l'acquisition a été synchronisée via *GPIB* avec les pas du brasseur et le balayage fréquentiel (FIG. 5.53 et FIG. 5.54).

L'acquisition en continu de l'information sur la température qui règne dans l'enceinte thermo-régulée est assurée par un thermocouple relié à un circuit d'amplification blindé via des fils de compensation. La tension de sortie de ce circuit, relative à la température, est acheminée vers le circuit de régulation à l'extérieur de la *CRBM* via un câble coaxial blindé et un filtre de traversée. L'utilisation de ce dispositif à thermocouple ne nous permet pas d'effectuer des mesures au-delà de 1GHz , le signal étant fortement perturbé par le champ généré dans la *CRBM* au-delà de cette fréquence. Une solution qui consiste à utiliser une passerelle optique est en train d'être élaborée au moment de l'écriture de ce manuscrit. Les mesures en chambre réverbérante sont réalisées en conformité avec la norme *CEI 61000-4-21*, avec 50 pas de brasseur entre 200 et 600MHz et 18 pas de brasseur entre 600 et 1000MHz , le pas fréquentiel étant de 5% et la durée d'exposition au champ *EM* à chaque position de brasseur étant fixée à 3 secondes.

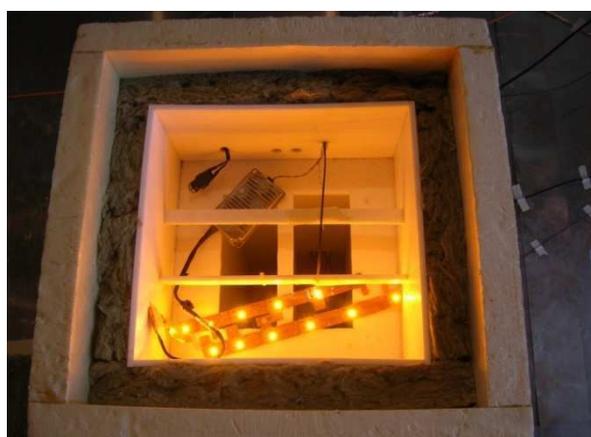


FIG. 5.52. EST à l'intérieur de l'enceinte thermo-régulée

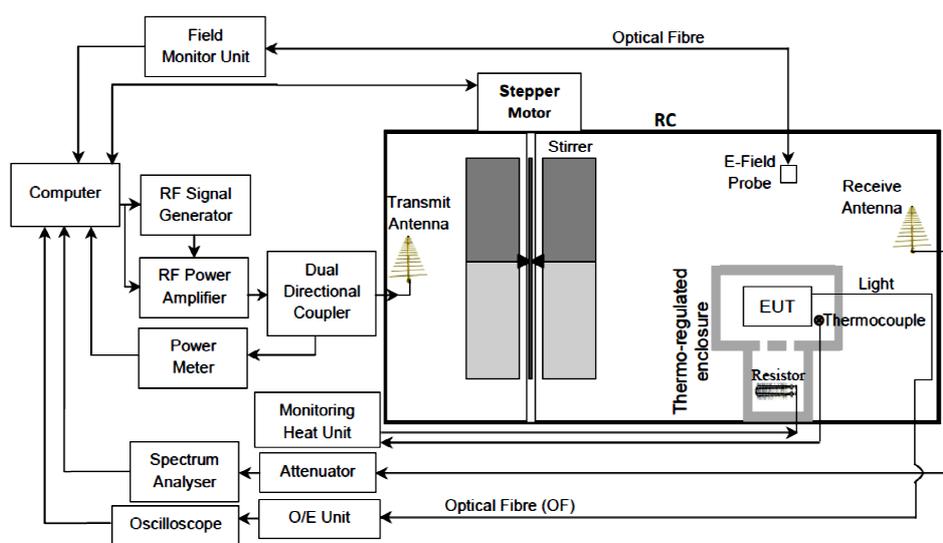


FIG. 5.53. Schéma synoptique du protocole expérimental

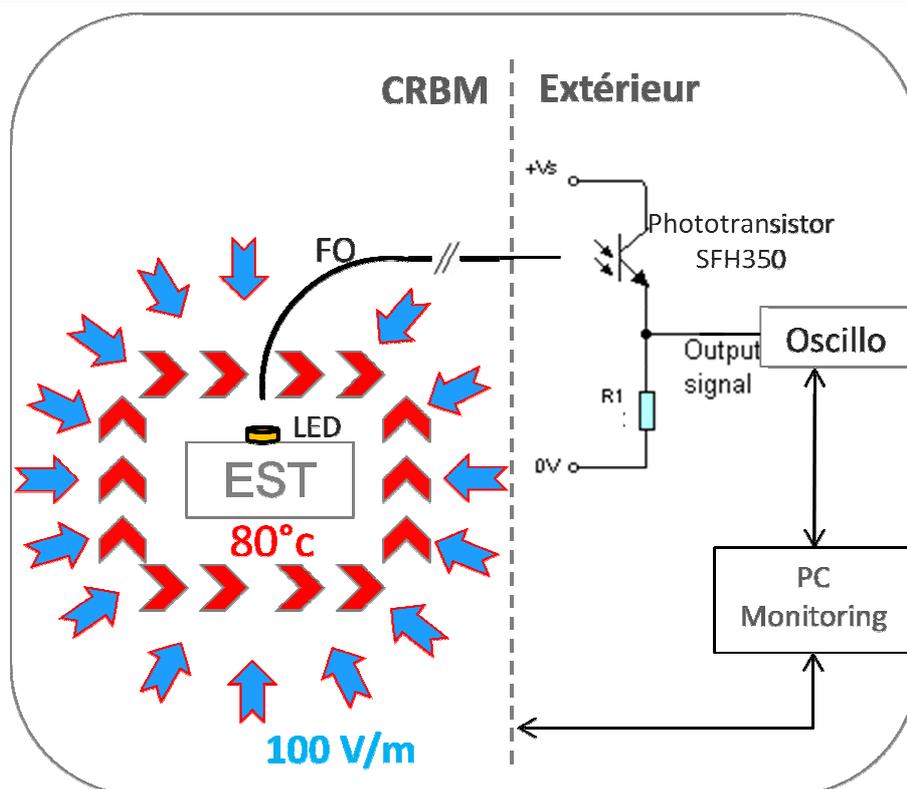


FIG. 5.54. Setup des mesures expérimentales en immunité rayonnée avec stress thermique

L'EST nécessite une réinitialisation manuelle par une remise sous tension à chaque fois qu'il présente un défaut de fonctionnement, cela a rendu les tests encore plus laborieux en raison du temps que doit passer l'opérateur à surveiller les mesures et qui est nécessaire pour couvrir toute la gamme de fréquences. Pour cette raison, les premiers tests présentés dans ce manuscrit ne concernent que les deux niveaux de température 80°C et température ambiante ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) répliqués pour les deux modes de brassage : pas à pas et continu. Les principaux résultats expérimentaux obtenus avec l'équipement automobile présenté précédemment feront l'objet de la section 5.2.3.

5.2.3 Résultats expérimentaux des tests d'immunité rayonnée avec stress thermique

Les figures 5.44 et 5.45 montrent, pour les deux modes de brassage pas à pas et continu, les résultats des tests d'immunité rayonnée, d'une sévérité de 100V/m , sur le phare à LEDs laissé d'abord à température ambiante, ensuite soumis à une température de 80°C . Nous nous sommes contents, dans un premier temps, de détecter les fréquences où le fonctionnement de l'équipement fait défaut. Ce défaut se manifeste par l'extinction des LEDs correspondant à une tension électrique de $2,5\text{V}$ en sortie du phototransistor. Ainsi, une LED allumée correspond à une tension, en sortie du phototransistor, qui varie entre 8V et 11V pour une distance de 10mm entre l'extrémité de la fibre optique et la surface émettrice de la LED. Pour simplifier l'interprétation des résultats nous avons traduit ces derniers en deux états distincts, l'état de fonctionnement normal correspondra donc à la valeur unité, et l'état de dysfonctionnement (ou défaut) correspondra à la valeur nulle sur les graphiques ci-dessous.

Il convient de souligner que les tests effectués sont particulièrement gourmands en temps, vu le nombre de pas de brasseur, le pas fréquentiel et l'intervention manuelle de remise en marche de l'EST après un défaut de fonctionnement.

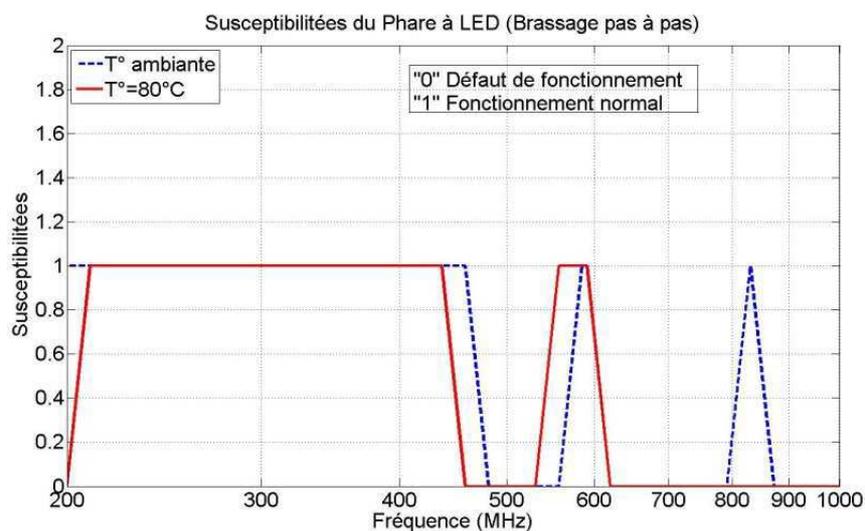


FIG. 5.55. Susceptibilités de l'EST avec un brassage pas à pas

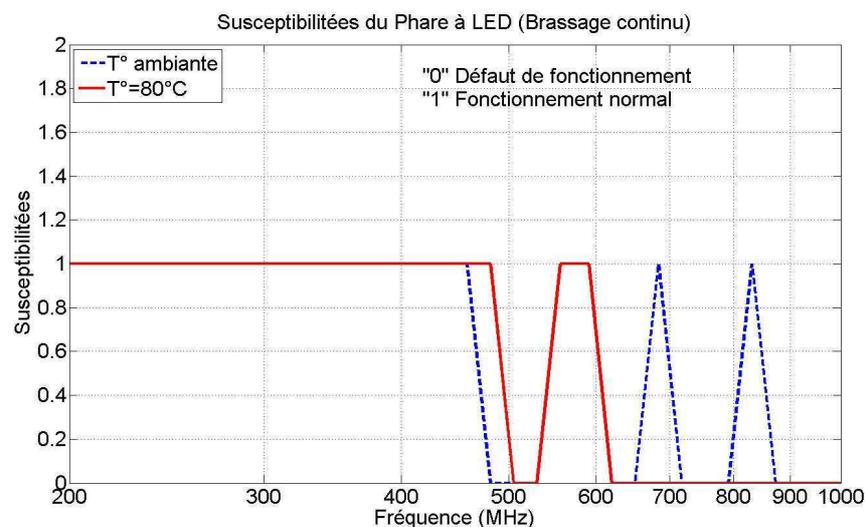


FIG. 5.56. Susceptibilités de l'EST avec un brassage continu

Ces résultats montrent clairement la différence, du point de vue fréquences de susceptibilités (ou points fréquentiels d'apparition de défauts), entre les deux niveaux de température appliqués à l'EST et quel que soit le type de brassage. Notons que les défauts de fonctionnement apparaissent à partir de 450MHz et deviennent plus importants entre 600 et 1000MHz, notamment lorsque l'EST est soumis à une température de 80°C. Pour une meilleure lecture des résultats une comparaison par type de brassage est réalisée, cette dernière fera l'objet de la section suivante.

5.2.3.1 Comparaison entre brassage continu et brassage pas à pas

Il est possible dans les tests en *CRBM* de recourir parfois au type de brassage continu pour diminuer le temps de mesure, seulement ce type de brassage nécessite une attention particulière quant au temps de réponse de l'*EST*, mais aussi il se peut que la sévérité du test soit différente par rapport au brassage pas à pas plus couramment utilisé. Partant de ces constatations, nous avons voulu vérifier cela en comparant nos résultats obtenus selon les deux types de brassage (continu et pas à pas), à une température donnée, et une même consigne de champ électrique ($100V/m$).

La figure 5.57 présente les courbes de susceptibilité de l'*EST*, à température ambiante, issues des tests en brassage pas à pas et brassage continu. La figure 5.58 montre les courbes de susceptibilité relatives aux deux types de brassage avec l'*EST* soumis cette fois à une température de $80^{\circ}C$.

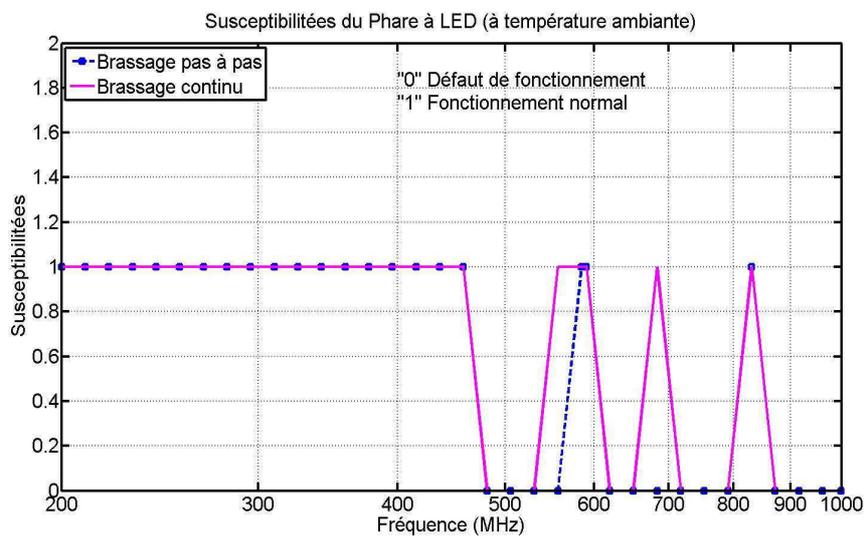


FIG. 5.57. Comparaison des susceptibilités de l'*EST* à température ambiante avec deux types de brassage

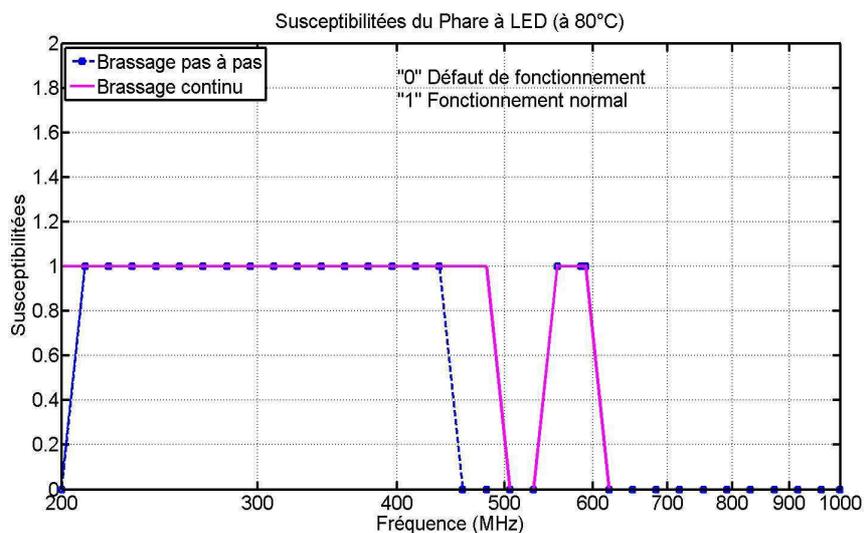


FIG. 5.58. Comparaison des susceptibilités de l'*EST* à $80^{\circ}C$ avec deux types de brassage

Il est clair d'après ces résultats que le brassage pas à pas est plus sévère que le brassage continu, cela se manifeste par l'apparition plus fréquente des défauts de fonctionnement en brassage pas à pas plutôt qu'en brassage continu pour une même gamme de fréquences. Par ailleurs nous soulignons qu'à la température de 80°C les défauts de fonctionnement apparaissent à des fréquences plus basses (ex. 458MHz) que dans le cas de la température ambiante (ex. 481MHz) toujours avec le brassage pas à pas.

5.2.4 Discussion des résultats

Les tests réalisés en *CRBM* avec notre banc de mesures, sur le phare à *LEDs*, montrent la possibilité d'un impact de la température sur les points fréquentiels de susceptibilité et éventuellement sur les niveaux d'immunité de l'*EST*. Cependant, le pas fréquentiel n'étant pas très fin (5%) le nombre de différences d'apparition de défaut pour un même type de brassage et deux températures différentes ne nous semble pas assez suffisant pour statuer rigoureusement sur l'influence de la température. Des tests supplémentaires sont donc nécessaires avec un pas fréquentiel plus fin, ou même une gamme de fréquences plus étendue si l'on s'affranchissait de la limite imposée par le thermocouple en utilisant une passerelle optique. Nous avons constaté par ailleurs que pour un même niveau de température le brassage pas à pas paraît plus sévère que le brassage continu. Il sera également nécessaire d'effectuer d'autres tests à différents niveaux de sévérité de champ *EM* et différents niveaux de température afin de généraliser nos constatations.

5.2.5 Comparaison aux tests en Chambre Semi-Anéchoïque

Les résultats que nous allons présenter dans cette section correspondent aux tests d'immunité au champ rayonné du phare à *LEDs*, dans la chambre semi-anéchoïque (*CA*) de l'*IRSEEM*, selon les critères *EQ/IR01* de la norme *ISO 11452-2* [134], et avec une sévérité de 200V/m. L'objectif étant de mettre en évidence et de souligner la différence entre les résultats obtenus ici et ceux obtenus dans la chambre réverbérante. Notons que les mesures en *CA* sont effectuées à température ambiante et ne tiennent pas compte du paramètre température.

Le protocole expérimental utilisé ici est quasiment le même que celui utilisé pour les mesures en chambre réverbérante à l'exception de la présence d'un plan de masse et d'un *RSIL* entre l'alimentation et l'*EST* reliés par un câble de 1,5m de longueur, et de l'absence de la mesure de température comme le montre la figure 5.59. Le champ électrique est généré en polarisation horizontale ou verticale par une antenne qui sera placée à une distance de 1m de l'*EST* et à deux positions différentes (FIG. 5.59 et FIG. 5.60). Les mesures sont réalisées dans les fréquences allant de 400MHz à 3,2GHz et l'état de fonctionnement de l'*EST* est surveillé comme précédemment à travers la mesure d'une tension électrique image du flux lumineux émis par l'une des *LEDs*.

Les résultats de mesure, pour une sévérité de $200V/m$, sont présentés en figure 5.61. Ici, c'est la tension électrique image du flux lumineux émis par la *LED* qui est représentée en fonction de la fréquence. En état de fonctionnement normal de l'*EST* la valeur de la tension électrique varie entre 9 et 11 Volts. Les défauts de fonctionnement sont enregistrés lorsque cette tension chute en dessous de 4 Volts. Les fréquences où les défauts sont apparus sont signalées en pointillés rouges sur la figure 5.61.

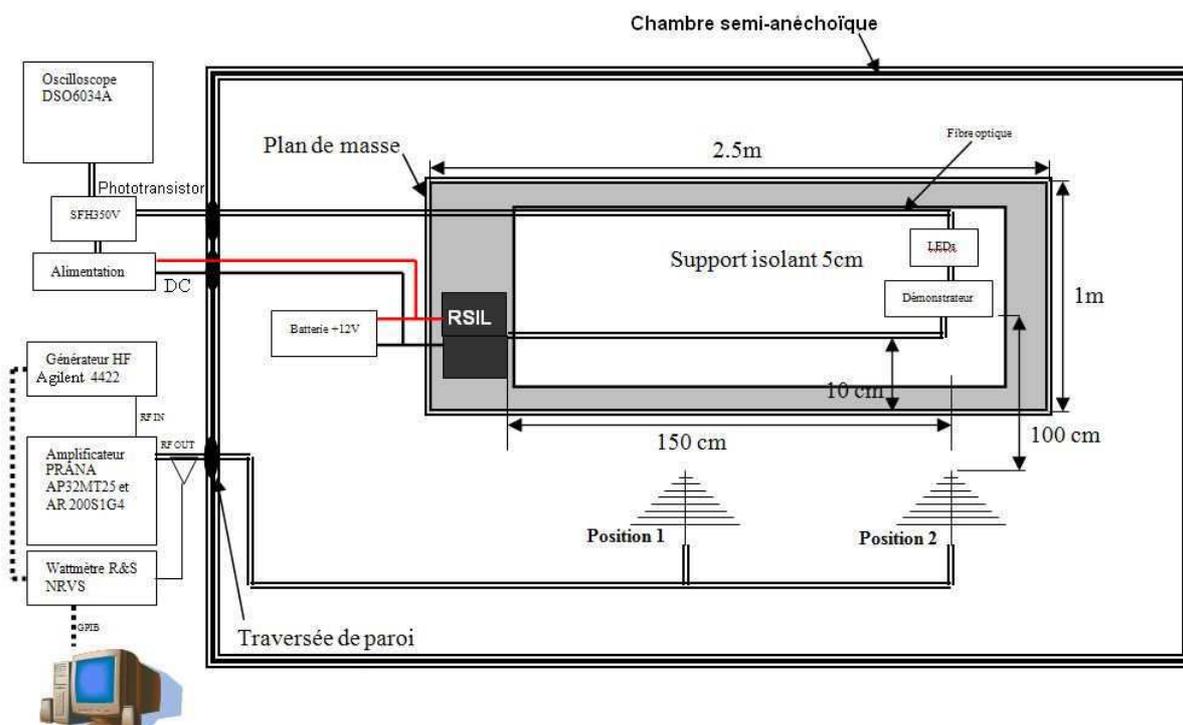


FIG. 5.59. Schéma synoptique du plan de test d'immunité rayonnée en chambre semi-anechoïque



FIG. 5.60. Setup des mesures d'immunité au champ rayonné du phare à LEDs en chambre semi-anechoïque de l'IRSEEM

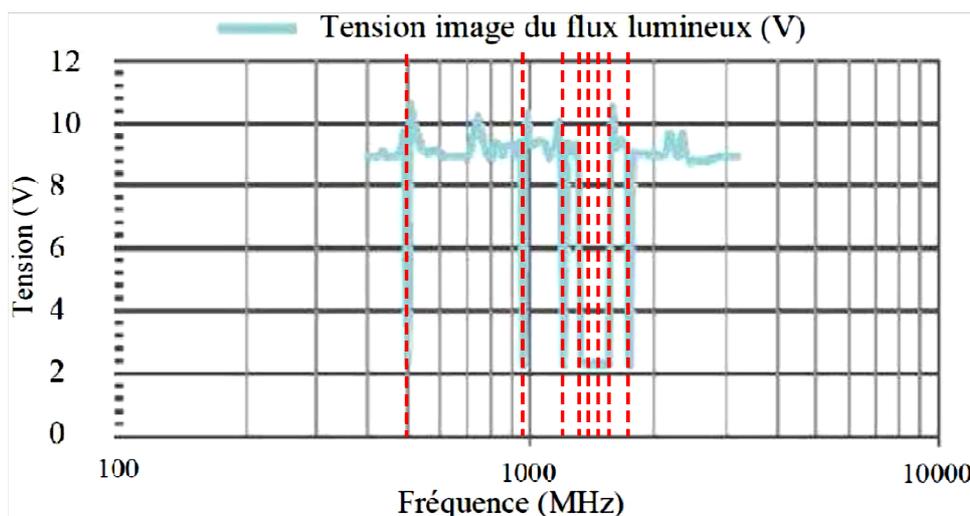


FIG. 5.61. Mesures d'immunité rayonnée en CA du phare à LEDs pour une sévérité de 200V/m à une distance de 1m

Les défauts de fonctionnement de l'EST ne sont pas aussi nombreux cette fois dans la gamme 200 à 1000MHz comme c'était le cas pour les mesures en CRBM et cela malgré une sévérité de champ plus importante (200V/m en CA et 100V/m en CRBM). En effet, les mesures en CA ne garantissent pas de couvrir toutes les directions d'agression susceptibles de mettre en défaut l'EST, ce qui explique la différence dans les résultats en comparaison avec les tests en CRBM. Multiplier les mesures dans toutes les directions possibles en CA s'avère une tâche fastidieuse, c'est dans ce cas particulier que l'on tire tout l'avantage des tests en CRBM puisque l'agression en champs EM est statistiquement homogène et isotrope sur une révolution de brasseur, ce qui assure de couvrir toutes les directions vulnérables de l'EST sans augmentation importante du temps de mesure. Par ailleurs, nous constatons un nombre de défauts plus important dans la gamme de fréquences allant de 1GHz à 2GHz. Une comparaison des résultats entre CA et CRBM pourrait s'avérer utile dans cette gamme de fréquence si nous arrivons à étendre les mesures dans ces fréquences avec notre banc de mesure à enceinte thermo-régulée comme nous l'avons déjà souligné auparavant.

5.2.6 Conclusion et perspectives

Nous avons montré, à travers le développement de notre banc de mesures et à travers les tests effectués sur un équipement réel du domaine de l'automobile, que la température est susceptible d'influencer la réponse d'un équipement face aux agressions électromagnétiques. Il en découle que ces deux paramètres conjugués (stress thermique et agression EM) exigent une attention particulière à intégrer dès la phase de conception des équipements électroniques et dans un degré plus important des équipements mécatroniques. Dans un second temps, ces effets sont à prendre en compte lors des tests normatifs de compatibilité électromagnétique. Les tests que nous avons réalisés en CRBM montrent également la faisabilité des tests d'immunité rayonnée associée à un stress thermique dans un environnement réverbérant, dont l'interprétation des résultats est réputée complexe de par son approche statistique, mais s'avère parfois très avantageux en comparaison avec d'autres moyens de mesures comme la chambre anéchoïque.

5.3 Conclusion

Dans cette partie nous avons exposé notre contribution aux efforts de la communauté scientifique et des industriels afin d'accompagner au mieux l'avènement de la mécatronique qui prend de plus en plus d'ampleur dans les applications automobiles et aéronautiques, mais aussi dans l'effort consenti par la communauté des *CRBM* afin de mieux exploiter et de mieux faire connaître ce moyen d'essais *CEM*. Nous avons pu réaliser un banc de test qui est associé à la *CRBM* pour créer un environnement d'essais permettant de conjuguer des agressions multiphysiques de façons à approcher au mieux l'environnement réel. Ce banc de test a été validé pour fonctionner normalement dans un environnement réverbérant jusqu'à 1GHz sans perturber le principe même de fonctionnement de la *CRBM*. Il nous a permis de réaliser un premier set de tests d'immunité rayonnée à 100V/m d'un équipement automobile réel en *CRBM*, à température ambiante et à 80°C , et avec deux types de brassages de modes (continu et pas à pas). Nous avons démontré à travers ces tests la faisabilité de ce type de mesures en chambre réverbérante, ce qui constitue à nos yeux une nouveauté en termes d'utilisation de la *CRBM*.

Par ailleurs, l'hypothèse de l'influence de la température sur la *CEM* des équipements électroniques semble être confirmée par les résultats que nous avons obtenus, seulement nous nous réservons de généraliser cette affirmation jusqu'à la confirmation rigoureuse par d'autres mesures de répétabilité ou à des niveaux différents d'agressions thermiques et *EM* ou sur d'autres équipements électroniques.

La perspective de ces travaux consiste, dans un premier temps, en la réalisation de mesures de répétabilité avec les mêmes conditions précédentes mais un pas fréquentiel plus fin (2% ou 1%), sachant que l'inconvénient sera un temps de mesures plus important, quoi qu'une automatisation des mesures soit envisageable. Ensuite, il est souhaitable de réaliser d'autres séries de tests d'immunité rayonnée en *CRBM* à différentes sévérités de champ *EM* et différents niveaux de stress thermique. L'objectif étant la détection d'une éventuelle corrélation entre température et niveaux d'immunité et/ou fréquences de susceptibilité.

À termes, nous souhaitons étendre ces tests aux systèmes mécatroniques en élaborant des cahiers des charges adéquats et bien définis afin que nous puissions fournir aux partenaires du projet *O2M-MCEM* la possibilité de valider expérimentalement des modèles multiphysiques d'équipements mécatroniques qui serviront dans la plateforme d'outils de simulation mécatronique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans ce manuscrit s'est concentré sur deux volets intimement liés à l'exploitation des chambres réverbérantes à brassage de modes. Le premier volet concerne l'exploration du comportement des mesures en *CRBM* dans certaines conditions particulières comme la présence d'objets dissipatifs dans le volume de test. Le second volet a été orienté vers la recherche d'une nouvelle application avec la *CRBM* qui répond à un besoin particulier des tests de compatibilité électromagnétique appliqués aux équipements embarqués dans l'automobile. L'objectif de ces recherches expérimentales, dans le contexte actuel où la *CRBM* comme moyen d'essais *CEM* normalisé devient de plus en plus incontournable, est d'améliorer la compréhension du fonctionnement de ce moyen qui reste non sans quelques zones d'ombre encore est toujours sous le collimateur des communautés scientifiques et industrielles. Par ailleurs, nous portons à la connaissance du lecteur que cette thèse est la première dédiée à la thématique *CRBM* au niveau de l'Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués (*IRSEEM-ESIGELEC*).

Dans un premier temps, nous avons focalisé nos investigations sur l'impacte de l'insertion d'un ou de plusieurs objets dissipatifs d'énergie *EM* dans le volume de test de la *CRBM*. L'utilisation très courante d'objets dissipatifs dans certaines applications de la *CRBM* ou dans l'intention d'améliorer ses performances, sans pour autant connaître l'impact réel sur le fonctionnement de base de cette dernière, est devenu problématique et source de mauvaises interprétations. Nous avons donc exploré une quantité très appréciable de données issues d'une multitude de mesures effectuées dans la *CRBM* de l'*IRSEEM* selon différentes configurations de charge de la chambre. Nous nous sommes servis des derniers outils statistiques utilisés par la communauté des *CRBM*, notamment les techniques de tests d'ajustement statistiques adaptés [120], pour évaluer le comportement des distributions statistiques des mesures dans la *CRBM* vide ou chargé par des objets dissipatifs. Nous avons effectué des comparaisons à l'aide des tests statistiques, de Kolmogorov-Smirnov (*KS*) appliqué avec les critères de *Massey* (test *KS-Massey*) et de *Stephens* (test *KS-Stephens*), et de *Anderson-Darling* appliqué avec les critères de *Stephens* (test *AD-Stephens*), basés sur la comparaison des fonctions de répartition empiriques et théoriques. Ces tests, dont la réponse est égale à « 1 » lorsque la loi empirique suit, avec une certaine probabilité, la loi théorique, et égale à « 0 » dans le cas contraire, ont porté sur les trois composantes du champ électrique mesurées sur les huit points du volume utile de la *CRBM*. Pour synthétiser ces réponses, nous avons utilisé une grandeur appelée le taux de réussite au test, qui représente le pourcentage de réponses positives au test d'ajustement sur le nombre total de tests. On obtient ainsi une estimation de l'homogénéité statistique du champ sur le volume utile. Nous avons également tenté de comparer ces résultats à ceux obtenus par des critères normatifs pour apporter plus d'éclaircissements.

Nous avons mis en évidence, grâce à cette étude, que l'augmentation de la charge induite par l'insertion d'objets absorbants accentuait sensiblement la corrélation entre les échantillons observés sur un tour de brasseur. La conséquence directe est la diminution du nombre d'échantillons indépendants fournis par le brasseur augmentant à l'occasion la marge d'erreur dans l'application du théorème de *la limite centrale* pour l'évaluation de l'homogénéité statistique du champ.

Par la suite nous avons voulu comprendre la façon dont un objet dissipatif quelconque peut agir sur la charge de la *CRBM*. À travers la notion de la section efficace d'absorption, nous avons pu montrer comment évolue la charge suivant la section efficace d'absorption des objets dissipatifs (insérés dans le volume de test). La charge elle-même est fortement dépendante non pas du volume de (ou des) l'objet(s) mais plutôt de sa position au sein du volume de test et de leurs distribution spatiale dans le cas de plusieurs objets. La polarisation ainsi que la direction d'incidence du champ sur l'(les) objet(s) sont bizarrement prépondérantes dans ce cas, bien que le champ *EM* est sensé être statistiquement uniforme et isotrope dans le volume de test lorsque la limite de charge maximale préconisée par la norme [5] n'est pas dépassée et que le volume total des objets absorbants ne dépasse pas les 8% du volume (et du volume utile) de la chambre. En effet, la section efficace d'absorption est déterminée par les surfaces de l'objet exposées au champ *EM*. Ainsi, deux objets dissipatifs identiques, placés proches et séparés l'un de l'autre dans le volume de test de la chambre, chargent la *CRBM* de façon plus importante que deux objets disposés de façon à former une seule masse solidaire. Ce phénomène pourrait conduire également à des évaluations différentes de la charge induite par un même objet dans différentes *CRBMs*, bien que la section efficace d'absorption « intrinsèque » d'un objet quelconque est sensé être indépendante de l'outil de mesure.

Par ailleurs, suite à l'évaluation de la distribution du champ par l'application des tests statistiques d'ajustement des distributions empiriques aux lois *de Rayleigh* (pour les mesures de champ électrique) et *Exponentielle* (pour les mesures de puissance), nous avons constaté et mis en évidence l'insuffisance des critères normatifs pour l'évaluation de l'uniformité statistique du champ dans la *CRBM*. L'utilisation de ces seuls critères pourrait conduire à une mauvaise appréciation de l'uniformité statistique du champ, exceptionnellement lorsqu'elle est chargée par des objets absorbants. Cependant, les lois de distributions statistiques proposées dans le modèle de *Hill* pour une *CRBM* idéale ne reflètent pas assez la distribution des mesures observées dans le cas réel où les pertes sont à prendre en compte surtout dans les hautes fréquences où nous avons constaté un fort rejet des lois idéales en présence d'un objet absorbant bien que la décorrélation des échantillons ait été vérifiée. La *loi de Weibull*, proposée dans plusieurs publications [119,120], semble plus convenable pour modéliser la distribution des champs *EM* dans une chambre réelle où des pertes supplémentaires sont à considérer. Nous signalons que cette loi n'a pas été testée dans cette thèse. L'investigation pour trouver d'autres lois de distribution théoriques qui reflètent au mieux une *CRBM* chargée est fortement préconisée et fera certainement l'objet de futures investigations de notre part.

Nous signalons également que l'étude de l'éventuelle variabilité de la mesure de la section efficace d'absorption moyenne d'un objet dissipatif dans plusieurs *CRBMs*, différentes par leurs volumes et tailles de brasseurs, a été proposée aux partenaires du groupe de travail *PICAROS* au cours de la finalisation de ce manuscrit. Nous avons actuellement entamé des investigations dans ce sens pour trouver un éventuel paramètre de correction amené à être appliqué d'une *CRBM* à une autre pour évaluer la section efficace d'absorption moyenne intrinsèque d'un objet dissipatif quelconque. Ces recherches et les travaux réalisés feront l'objet d'une publication scientifique dans un avenir proche.

Dans le deuxième volet de nos travaux, nous nous sommes consacrés au développement d'une nouvelle application pour la *CRBM* de l'*IRSEEM* pour répondre à une demande, formulée dans le cadre du projet *O2M-MCEM*, visant à investiguer l'influence des contraintes thermiques sur l'immunité rayonnée, en particulier, et plus généralement la *CEM* d'équipements embarqués dans les véhicules qui relèvent de plus en plus de la mécatronique. Pour cela, nous avons développé un banc de test qui est associé à la *CRBM* de l'*IRSEEM* dans l'optique de réaliser des tests *CEM* dans un environnement d'agressions multiphysiques qui reflète en quelque sorte l'environnement réel dont le quel fonctionne ces équipements. À savoir que l'habitacle ou l'environnement sous capot d'un véhicule est régi par des contraintes *EM*, thermiques et mécaniques jugées extrêmes pour le fonctionnement normal d'un équipement électronique. Le banc de test réalisé, composé d'une enceinte thermo-régulée et des éléments servant à la régulation de la température et l'acquisition des signaux de l'équipement sous test, a été conçu et validé pour fonctionner normalement dans un environnement réverbérant jusqu'à *1GHz* sans modifier le fonctionnement de base de la *CRBM*. Le processus de mise au point et de validation du banc de test a pris énormément de temps en raison des spécificités de la régulation de la température et de l'environnement réverbérant. Nous avons procédé en premier lieu à la caractérisation des matériaux constituant l'enceinte thermo-régulée, puis nous avons effectué des tests de validation en *CRBM* afin de vérifier l'impact de l'insertion de ce banc de test dans la chambre. Dans un second temps, nous avons validé le fonctionnement du banc de test à travers des tests de tenue en température, et des tests d'acheminement des signaux vers l'extérieur de la chambre sachant que l'environnement de la *CRBM* et par nature fortement perturbé. Une fois ces tests de validation terminés, nous avons pu réaliser un premier set de tests d'immunité rayonnée à *100V/m* d'un équipement automobile réel en *CRBM*, soit conjugués à une contrainte de température de *80°C*, soit à la *température ambiante*. Ces tests ont été réalisés avec deux types de brassages de modes (continu et pas à pas). Ce travail nous a permis de démontrer la faisabilité de ce type de mesures en chambre réverbérante ce qui constitue pour nous une nouvelle manière d'utilisation de la *CRBM*.

Par ailleurs, nous avons essayé d'investiguer l'hypothèse de l'influence de la température sur la *CEM* des équipements électroniques. Les résultats obtenus sont quelque part prometteurs, car nous avons relevé des différences dans l'apparition des défauts de fonctionnement de l'*EST* sur l'échelle fréquentielle quand la contrainte thermique est appliquée. Cependant, une investigation plus fine, par des tests de répétabilité faisant jouer plusieurs niveaux d'agressions *EM* et thermique, appliqués sur plusieurs équipements

différents, est nécessaire avant de pouvoir généraliser cette conclusion. Nous signalons également que ce volet de notre travail a fait l'objet de trois publications scientifiques présentées dans des conférences internationales et nationales [101,102,103].

En perspective à cette partie, le banc de test étant opérationnel, il sera primordial de valider nos résultats par plusieurs séries de tests de répétabilité sous les mêmes conditions précédentes mais aussi en faisant varier le pas fréquentiel (2% ou 1%). Par la suite, des tests à différentes sévérités de champ *EM* et différents niveaux de stress thermique devront nous éclairer sur une éventuelle corrélation entre température et niveaux d'immunité et/ou fréquences de susceptibilité.

Enfin, dans le cadre du projet *O2M-MCEM*, des modèles devront être développés sur des critères multiphysiques afin de simuler le comportement *CEM* de systèmes mécatroniques, la validation de ces modèles par des données empirique issues de notre application sera un maillon indispensable pour l'aboutissement de la plateforme unique d'outils de simulation mécatronique visée par le projet.

Liste des publications de l'auteur

Communications internationales avec actes et à comité de lecture

- [1] Habib Boulzazen, François Fouquet, Alain Reineix, "Mesures de l'Immunité Rayonnée dans une CRBM avec Prise en Compte de la Température", Colloque International TELECOM'2009 & 6ème Journées Franco Maghrébines des Microondes et leur Applications, pp.129-130, Agadir, MAROC, 2009.
- [2] Habib Boulzazen, François Fouquet, Alain Reineix, "Experimental Study and Development of an «EMC-Thermal stress» Test Bench used in Mode Stirred Reverberation Chamber MSRC", 7th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, EMC COMPO 2009, Toulouse, FRANCE Nov 17-20, 2009.

Communication nationale avec acte et à comité de lecture

- [3] Habib Boulzazen, François Fouquet, Alain Reineix, « Influence de la Température sur l'Immunité Rayonnée d'un Equipement Automobile en Environnement Réverbérant » 2EMC Workshop, Rouen, FRANCE. Nov., 2010.

Annexes

Annexe A

Calcul de la section efficace d'absorption moyenne à l'aide des gains en puissance

Nous avons introduit en chapitre 4 (section 4.2.2.6) la notion de la section efficace d'absorption moyenne $\langle S_a \rangle$ (Eq. 4.37), d'un objet absorbant, calculée à partir des facteurs de qualité mesurés en *CRBM* vide et en *CRBM* chargée. L'expression (4.37) utilisée fait intervenir le paramètre du volume de la chambre au numérateur, cette formulation pourrait être interprétée dans le sens où la section efficace d'absorption moyenne (ACS) d'un objet quelconque est fortement dépendante du volume de la chambre. En conséquence, des disparités pourraient survenir dans l'évaluation de l'ACS moyenne d'un même objet dans des *CRBM* de volumes différents.

Une autre formulation de l'ACS moyenne d'un objet dissipatif est donnée par *Hill* [106], cette dernière fait intervenir les gains en puissance mesurés dans les deux cas chambre vide et chambre chargée, mais le volume de la chambre n'y figure pas comme on peut le constater dans l'équation (A.1) :

$$\langle S_a \rangle = \frac{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^2}{8\pi} \left(\frac{1}{\langle G_c \rangle} - \frac{1}{\langle G_v \rangle} \right) \quad (\text{A. 1})$$

Où $\langle G_c \rangle$ et $\langle G_v \rangle$ sont les gains moyens en puissance, sur un tour de brasseur, mesurés dans les cas chambre chargée et chambre vide respectivement comme le montre l'équation (A.2). η_{Tx} et η_{Rx} sont l'efficacité des antennes émettrice (*Tx*) et réceptrice (*Rx*) respectivement, et λ est la longueur d'onde.

$$\begin{aligned} \langle G_c \rangle &= \frac{\langle P_{rc} \rangle}{\langle P_{ic} \rangle} \\ \langle G_v \rangle &= \frac{\langle P_{rv} \rangle}{\langle P_{iv} \rangle} \end{aligned} \quad (\text{A. 2})$$

Où P_{ic} et P_{iv} sont les puissances incidentes mesurées sur un tour de brasseur en chambre chargée et chambre vide respectivement, P_{rc} et P_{rv} sont les puissances reçues mesurés sur un tour de brasseur dans la chambre chargée et la chambre vide respectivement.

À partir de l'équation (A.1), nous avons réévalué l'ACS moyenne des absorbants disposés selon les configurations n°1 à 3 déjà testées en Chapitre 4 (FIG. 4.3 et FIG. 4.5). L'objectif étant de comparer les résultats issus de l'équation (A.1) à ceux trouvés avec l'équation (4.37, Chapitre 4). Nous avons également calculé pour l'ensemble des configurations l'ACS moyenne des absorbants en dB avec l'application d'un lissage à valeur moyenne flottante pour filtrer les fluctuations dues à la gamme dynamique du champ dans la $CRBM$, sachant que l'ACS moyenne varie très lentement par rapport à cette dynamique.

Les résultats du calcul de l'ACS moyenne, des différentes configurations citées, à partir des deux expressions (4.37) et (A.1) sont donnés dans les figures ci-dessous. ACS_Q correspond à l'ACS moyenne calculée à partir des facteurs de qualité et ACS_G correspond à l'ACS moyenne calculée à partir des gains moyens en puissance.

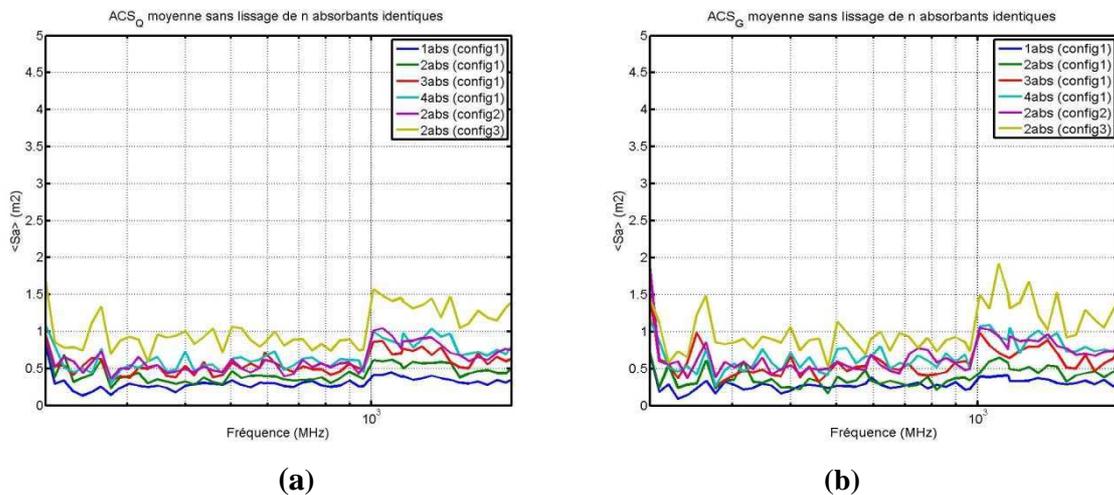


FIG. A.1. ACS moyenne en (m^2) calculée à partir des facteurs de qualité (a) ou des gains en puissance (b)

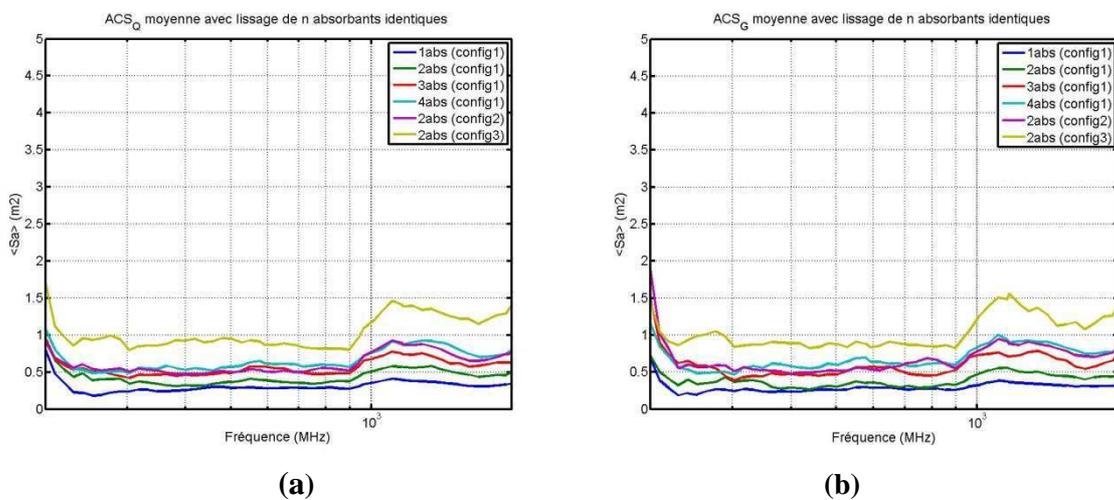


FIG. A.2. ACS moyenne en (m^2) avec lissage calculée à partir des facteurs de qualité (a) ou des gains en puissance (b)

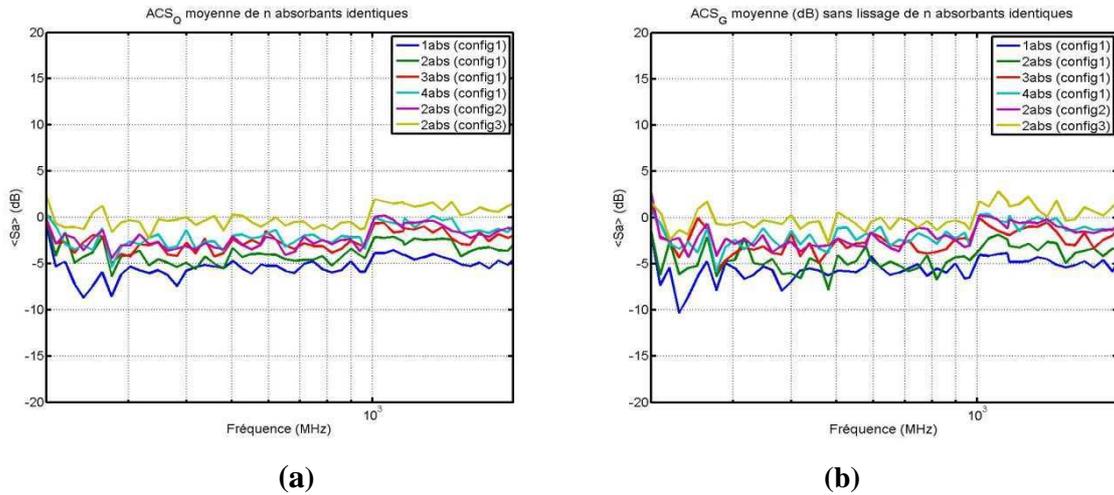


FIG. A.3. ACS moyenne en (dB) calculée à partir des facteurs de qualité (a) ou des gains en puissance (b)

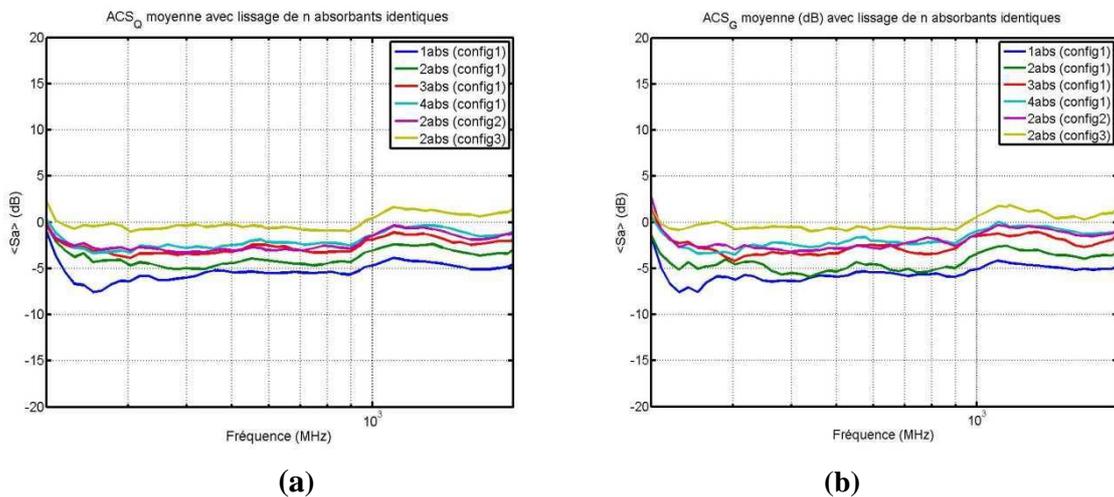


FIG. A.4. ACS moyenne en (dB) avec lissage calculée à partir des facteurs de qualité (a) ou des gains en puissance (b)

Nous pouvons constater que les courbes de l'ACS moyenne calculée à partir des gains en puissance restent, à 0.5dB près, similaires aux courbes de l'ACS moyenne calculée à partir des facteurs de qualité (FIG. A.1, FIG. A.2, FIG. A.3 et FIG. A.4). Le lissage des courbes permet une meilleure lisibilité des résultats sachant que les courbes d'origines sont très bruitées en raison de l'environnement réverbérant. Nous attirons également l'attention du lecteur sur le décalage d'environ 3dB qui survient toujours à la fréquence de 1GHz , nous rappelons qu'à cette fréquence nous procédons à un changement matériel de l'antenne d'émission (une antenne cornet qui remplace une antenne log-périodique) et de l'amplificateur relié à cette antenne. Nous ne voyons pas d'autres causes actuellement pour justifier ce décalage mis à part le changement de matériel, des investigations sont en cours pour essayer de mieux comprendre ce phénomène.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] T. Mori, "Mechatronics," Yasakawa, Japan, Internal Trademark Application Memo 21.131.01, July 12, 1969.
- [2] R. H. Bishop, *The Mechatronics Handbook*.: CRC Press LLC, 2002.
- [3] F., Tomizuka, M., and Fukuda, T. Harshama, "Mechatronics—What is it, why, and how? - an editorial," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 1-4, 1996.
- [4] F. HOËPPE, "Analyse du Comportement Electromagnétique des Chambres Réverbérantes à Brassage de Modes par l'Utilisation de Simulations Numériques," Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Thèse de Doctorat 3052, 2001.
- [5] IEC 61000-4-21, "Reverberation Chamber Test Methods," Int. Electrotech. Commiss., International Standard, 2003.
- [6] DO-160D, "Environmental conditions and test procedures for airborne equipment," RTCA Std. 2000.
- [7] W. M. Hall, "Heating apparatus," U.S. Patent 2,618,735, 1947.
- [8] H.A. Mendes, "A New Approach to Electromagnetic Field Strength Measurements in Shielded Enclosures," in *Western Electronic Show and Convention. Wescon Technical Papers*, Los Angeles, Aug. 20-23, 1968.
- [9] M. L. Crawford, "Electromagnetic field measurements in low Q enclosures," National Bureau of Standards (NBS), Technical Report 1972.
- [10] P. Corona, G. Ferrara, and M. Migliaccio, "Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 18, no. 2, pp. 54-59, May 1976.
- [11] J. L. Bean and R. A. Hal, "Electromagnetic susceptibility measurements using a mode-stirred chamber," in *IEEE International Symposium on EMC*, Atlanta, GA, 1978.
- [12] P. Corona, G. Latmiral, and E. Paolini, "Performance and analysis of a reverberating enclosure with variable geometry," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 22, no. 1, pp. 2-5, Feb. 1980.
- [13] B. H. Liu, D.C. Chang, and M.T. Ma, "Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberation chamber," Nat. Bur. Stand., USA, Technical Note 1066, 1983.

- [14] M.L. Crawford and G.H. Koepke, "Operational Considerations of a Reverberation Chamber for EMC immunity Measurements-Some Experimental Results," in *IEEE Symposium on EMC*, 1984.
- [15] M.L. Crawford and G.H. Koepke, "Design, Evaluation and Use of a Reverberation Chamber for Performing Electromagnetic Susceptibility/Vulnerability Measurements," NBS, Technical Note 1092, April 1986.
- [16] M. L. Crawford and G. H. Koepke, "Electromagnetic radiation test facilities: Evaluation of reverberation chambers located at NSWCDD," National Bureau of Standards (NBS), Tech. Rep., 1986.
- [17] J.M. Dunn, "Local, High-Frequency Analysis of the Fields in a Mode-Stirred Chamber," *IEEE Transactions on EMC*, pp. 53-58, Febr. 1990.
- [18] D. A. Hill, "Electromagnetic Theory of Reverberation Chambers," NIST, Colorado, Technical Note 1506, 1998.
- [19] D.A. Hill et al., "Aperture excitation of electrically large lossy cavities," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 36, no. 3, pp. 169-178, 1994.
- [20] D. A. Hill, "Spatial correlation function for fields in reverberation chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 37, pp. 138-143, 1995.
- [21] D.A. Hill, "A reflection coefficient derivation for the Q of a reverberation chamber," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, no. 4, pp. 591-592, 1996.
- [22] D.A. Hill, "Plane-wave, integral representation for fields in reverberation chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, pp. 209-217, 1998.
- [23] M. O. Hatfield, G. J. Freyer, D. M. Johnson, and C. Farthing, "Demonstration test of the electromagnetic reverberation characteristics of a transport size aircraft," Naval Surface Warfare Center Dahlgren Division (NSWCDD), Tech. Rep. 1994.
- [24] M. O. Hatfield, J. L. Bean, G. J. Freyer, and D. M. Johnson, "Repeatability of mode-stirred chamber measurements," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Piscataway, NJ, 1994, pp. 485-490.
- [25] M. O. Hatfield, G. J. Freyer, and M. B. Slocum, "Reverberation characteristics of a large welded steel shielded enclosure," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Piscataway, NJ USA, 1997, pp. 38-43.

- [26] G. J. Freyer, M. O. Hatfield, D. M. Johnson, and M. B. Slocum, "Comparison of measured and theoretical statistical parameters of complex cavities," in *in Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Piscataway NJ USA, 1996, pp. 250–253.
- [27] G. J. Freyer, T. H. Lehman, J. M. Ladbury, G. H. Koepke, and M. O. Hatfield, "Verification of fields applied to an EUT in a reverberation chamber using statistical theory," in *in Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Piscataway, NJ, USA, 1998, pp. 34-38.
- [28] J. M. Ladbury and K. Goldsmith, "Reverberation chamber verification procedures, or, how to check if your chamber ain't broke and suggestions on how to fix it if it is," in *in Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Washington DC, USA, 2000, pp. 17-22.
- [29] J. M. Ladbury, "Reverberation chamber relationships: corrections and improvements, or three wrongs can (almost) make a right," in *in Proceedings IEEE Int. Sympo. on EMC*, Seattle, WA, 1999, pp. 1-6.
- [30] O. Lundén and M. Bäckström, "Stirrer efficiency in FOA reverberation chambers: Evaluation of correlation coefficients and chi-squared test," in *in Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Washington DC, 2000, pp. 11–16.
- [31] L. R. Arnaut and P. D. West, "Effect of antenna aperture, EUT and stirrer step size on measurements in mode-stirred reverberation chambers," in *in Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, 2000, pp. 29–34.
- [32] L. R. Arnaut, "Effect of local stir and spatial averaging on measurement and testing in mode-tuned and mode-stirred reverberation chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 43, no. 3, pp. 305–325, Aug. 2001.
- [33] IEC. (2011) <http://www.iec.ch>. [Online]. <http://www.iec.ch/cgi-bin/procgi.pl/www/iecwww.p?wwwlang=e&wwwprog=prodet.p&He=IEC&Pu=61000&Pa=4&Se=21&Am=&Fr=&TR=&Ed=2>
- [34] L.R. ARNAUT, "Nonstationary effects in mode-stirred reverberation," in *Proc. 15th Zürich Int. Symp. Techn. Exhib. EMC*, Zürich, Switzerland, Feb. 2003, pp. 245-250.
- [35] L.R. ARNAUT, "Limit distribution for imperfect electromagnetic reverberation," *IEEE Trans. EMC*, vol. 45, no. 2, pp. 357–379, May 2003.
- [36] L.R. ARNAUT, "On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation," *IEEE Trans. EMC*, vol. 47, no. 4, pp. 781-804, Nov 2005.
- [37] L.R. ARNAUT, "Electromagnetic reverberation near a perfectly conducting boundary," *IEEE Trans. EMC*, vol. 48, no. 2, pp. 359–371, May 2006.

- [38] L.R. ARNAUT, "Estimation of maximum field strength and associated confidence intervals for EMC immunity testing in reverberation chambers," in *Safety & EMC*, Beijing, May 2008, pp. 16-19.
- [39] L.R. ARNAUT, "Measurement uncertainty in reverberation chambers," National Physical Laboratory, Teddington, U.K., I. Statistics TQE 2, May 2008, http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf.
- [40] L.R. ARNAUT, "Maximum rates of frequency scanning and mechanical or electronic stirring for distortionless signal generation inside electromagnetic reverberation chambers," in *Proceedings 2008 EMC Europe Symposium*, Hamburg, Germany, Sep. 2008.
- [41] D.A. Hill, "Boundary fields in reverberation chambers," *IEEE Trans EMC*, vol. 47, no. 2, pp. 281-290, May 2005.
- [42] H. G., Winzerling, T., Nitsch, J., Eulig, N., Enders, A. Krauthäuser, "Statistical interpretation of autocorrelation coefficients for fields in mode-stirred chambers ," in *Proceedings IEEE International Symposium on EMC*, Chicago, IL., August 2005, pp. 550–555.
- [43] H.G. Krauthäuser, "On the measurement of total radiated power in uncalibrated reverberation chambers," *IEEE Trans. EMC*, vol. 49, no. 2, pp. 270-279, May 2007.
- [44] H., Batterman, S. Garbe, "Converting total-radiated-power measurements to equivalent E-field data," in *In Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Detroit, MI., August 2008.
- [45] IEC SC 46A, IEC 61726, "Cable assemblies, cables, connectors and passive microwave components – Screening attenuation measurement by the reverberation chamber method," International Electrotechnical Commission (IEC), International standard, Nov. 1999.
- [46] D.A. Hill, "Electronic Mode Stirring for Reverberation Chambers," *IEEE trans. on EMC*, vol. 36, no. 4, pp. 294-299, Nov. 1994.
- [47] M. L. Crawford, T. A. Loughry, M. O. Hatfield, and G. J. Freyer, "Band-limited, White Gaussian Noise Excitation for Reverberation Chambers and Applications to Radiated Susceptibility Testing," National Institute of Standards and Technology, Technical Note 1375, 1996.
- [48] M. Petirsch and A. J. Schwab, "In vestigation of the field uniformity of a mode-stirred chamber using diffusors based on acoustic theory," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 41, pp. 446–451, 1999.

- [49] A.C. Marvin, J.A.S. Angus, J.F. Dawson, and J. Clegg, "Enhancements to Stirred Mode Chambers by the Use of Pseudo-Random Phase reflection Gratings," in *Int. Symposium on EMC*, Rome, Italy, 1994, pp. 218-221.
- [50] J. Clegg, A.C. Marvin, J.A.S. Angus, and J.F. Dawson, "Optimal Phase Reflection gratings and the Effect on Fields in a Mode Stirred Chamber," in *Int. Symposium on EMC*, Rome, Italy, 1996, pp. 86-91.
- [51] J. Perini and L. S. Cohen, "An alternative way to stir the fields in a mode stirred chamber," in *IEEE EMC Symposium*, 2000, pp. 633–637.
- [52] D. Weinzierl, A. Raizer, and A. Kost, "Investigation of exciting fields in an alternative mode stirred chamber," in *in EMC Europe*, Eindhoven, The Netherlands, Sept. 2004, pp. 723-726.
- [53] E.A. Godfrey, "Effects of Corrugated Walls on the Field Uniformity of Reverberation Chambers at low Frequencies," in *IEEE Symposium on EMC*, Seattle, Washington, 1999, pp. 23-28.
- [54] Y. HUANG and D.J. EDWARDS, "An investigation of the electromagnetic field inside a moving wall mode-stirred chamber," in *Proc. EE Conf. on EMC*, Edinburgh, UK., 1992, pp. 115-119.
- [55] F.B.J. Leferink, "High field strength in a large volume: the intrinsic reverberation chamber," in *IEEE Symposium on EMC*, Denver, CO , USA, Aug. 1998, pp. 25-27.
- [56] F.B.J. Leferink, J.C. Boudenot, and W., Etten, "The Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber: an Optimal Use of Geometrical Change in Boundary Conditions," University of Twente, EL-TEL., Techn. Report sept. 1999.
- [57] F., BOUDENOT, J.C., and ETTEN, W. LEFERINK, "Experimental results obtained in the vibrating intrinsic reverberation chamber," in *Proc. IEEE EMC Symp.*, 2000, pp. 639-644.
- [58] F. Leferink and W. Etten, "Generating an EMC test field using a vibrating intrinsic reverberation chamber," *EMC Society Newsletter*, Spring, 2001.
- [59] F.B.J. Leferink, Excellence course: Reverberation chambers for EMC and communication systems evaluation, 7-14 Oct. 2008, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- [60] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. New York, USA.: Academic Press, 1978.
- [61] A.L. Maffett, *Topics for a Statistical Description of Radar Cross Section*, John Wiley & Sons ed., 1989.

- [62] R. Glauber, in *Proceedings of the third international conference on quantum electronics.*, Paris, France.
- [63] R.H. Price, H.T. Davis, and E.P. Wenaas, "Determination of the statistical distribution of electromagnetic-field amplitudes in complex cavities," JAYCOR, New Mexico, Techn. Rep. 88-JAL129, June 1988.
- [64] R.H. Price, H.T. Davis, and E. P. Wenaas, "Determination of the statistical distribution of electromagnetic field amplitudes in complexe cavities," *Physical Review E*, vol. 48, no. 6, pp. 4716-4729, December 1993.
- [65] J.G. Kostas and B. Boverie, "Statistical model for a mode-stirred chamber," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 33, no. 4, pp. 366-370, Nov. 1991.
- [66] T.H. Lehman, "A statistical theory of electromagnetic fields in complex cavities," EMP Interaction Note. 494, May 1993.
- [67] P. Corona, G. Ferrara, and M. Migliaccio, "Generalized stochastic field model for reverberating chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 46, no. 4, pp. 655-660, Nov. 2004.
- [68] P. Corona, "Reverberating chamber electromagnetic field in presence of an unstirred component," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 42, no. 2, pp. 111-115, May 2000.
- [69] C.F. Bunting, "Statistical characterization and the simulation of a reverberation chamber using finite-element techniques," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 44, no. 1, pp. 214-221, Feb. 2002.
- [70] G. Orjubin, E. Richalot, S. Mengué, and O. Picon, "Statistical Model of an Undermoded Reverberation Chamber," *IEEE Trans. on Electromag. Compat.*, vol. 48, pp. 248-251, Fev 2006.
- [71] C. Lemoine, P. Besnier, and M. Drissi, "Investigations of reverberation chamber measurements through high-power goodness-of-fit tests," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 4, pp. 745-755, Nov 2007.
- [72] P. Corona, G. Ferrara, and M. Migliaccio, "Reverberating Chambers and Absorbers," in *14th Intern. Zurich Symp. and Technical Exhibition on Electromag. Compat.*, Zurich, 2001.
- [73] T. M. Lammers, C. L. Holloway, and J. Ladbury, "The effects of loading configurations on the performance of reverberation chambers," in *in EMC Europe*, Eindhoven, The Netherlands, Sept. 2004, pp. 727-732.

- [74] S. Baranowski, L. Kone, and B. Demoulin, "Effect of objects into cavities on the field distribution : experimental analysis," in *6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe'04*, Eindhoven, The Netherlands, Sep. 2004, pp. 739-743.
- [75] F. PETIT, "Modélisation et Simulation d'une Chambre Réverbérante à Brassage de Modes à l'aide de la Méthode des Différences Finies dans le Domaine Temporel," Université de Marne la Vallée, France, Thèse de Doctorat. 2002.
- [76] N. Wellander, O. Lundén, and M. Bäckström, "Parameter estimates for the stirrer efficiency in reverberation chambers," in *in Proc. of 16th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, Feb. 2005, pp. 35-38.
- [77] N. Wellander, O. Lundén, and M. Bäckström, "Experimental investigation and mathematical modeling of design parameters for efficient stirrers in mode-stirred reverberation chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 1, pp. 94-103, Feb. 2007.
- [78] M. Pocai, I. Dotto, G. D'Abreu, and D. Festa, "Experimental definition of the lowest usable frequency (LUF) of an aluminum made reverberation chamber with reference to the IEC 61000-4-21 standard," in *in IEEE International Symposium on EMC*, Portland, Oregon, Aug. 2006, pp. 849-852.
- [79] B. Zhang et al., "Load Effect Investigation of a Reverberation Chamber," in *8th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE.*, 2008, pp. 1115 - 1118.
- [80] S.F. Cantalice, G. Fontgalland, R.C.S. Freire, E. Richalot, and S.E. Barbin, "Influence of an asymmetrically positioned load in a reverberation chamber," in *In Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC '09. IEEE*, Singapore, May 2009, pp. 1616-1619.
- [81] J. B. Coder, J. M. Ladbury, C. L. Holloway, and K. A. Remley, "Examining the true effectiveness of loading a reverberation chamber; how to get your chamber consistently loaded," in *In Proceedings of the IEEE Intern. Symp. on EMC*, Florida, Jul. 2010.
- [82] C. Lemoine, J. Sol, P. Besnier, J.-F. Rosnarho, and C. Dorgan, "Effet de la charge sur la statistique des mesures en chambre réverbérante," in *15ème colloque international sur la compatibilité électromagnétique*, Limoges, France, Avril 2010.
- [83] C. L. Holloway, D. A. Hill, J. Ladbury, G. Galen Koepke, and R. Garzia, "Shielding Effectiveness Measurements of Materials Using Nested Reverberation Chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 45, no. 2, pp. 350-356, May 2003.

- [84] A.R. Coates, A.P. Duffy, K.G. Hodge, and A.J. Willis, "Reverberation chamber for testing cable shielding," in *IEE Seminar on EMC - It's Nearly All About the Cabling*, Jan. 2003, pp. 171 – 175.
- [85] M. O. Hatfield, "Shielding Effectiveness Measurements Using Mode-Stirred Chambers: A Comparison of Two Approaches," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 3, pp. 229–238, Aug. 1988.
- [86] K. D. Masterson, D. R. Novotny, and G. H. Koepke, "Electromagnetic Shielding Characteristics of Optical-Fiber Feedthroughs," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 43, no. 2, pp. 177-186, May 2001.
- [87] R. Hoad, N. J. Nigel J. Carter, D. David Herke, and S. P. Watkins, "Trends in EM Susceptibility of IT Equipment," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 46, no. 3, pp. 390-395, Aug. 2004.
- [88] H. Kim, A. L. White, and K. G. Shin, "Effects of Electromagnetic Interference on Controller-Computer Upsets and System Stability," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 351-357, Mar. 2000.
- [89] S. Silfverskiöld, M. Bäckström, and J. Lorén, "Microwave Field-to-Wire Coupling Measurements in Anechoic and Reverberation Chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 44, no. 1, pp. 222-232, Feb. 2002.
- [90] L. Kone, B. Demoulin, and S. Baranowski, "Application des chambres réverbérantes à brassage de modes à la caractérisation des émissions rayonnées par un équipement ," in *14ème Colloque International sur la Compatibilité Electromagnétique, CEM08*, Paris, France, Mai 2008, pp. 194-196.
- [91] G. Glenn Kuriger, H. Grant, A. Cartwright, and D. Heirman, "Investigation of Spurious Emissions From Cellular Phones and the Possible Effect on Aircraft Navigation Equipment," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 45, no. 2, pp. 281-292, May 2003.
- [92] K. Rosengren, P.-S. Kildal, C. Carlsson, and J. Carlsson, "Characterization of antennas for mobile and wireless terminals in reverberation chambers: Improved accuracy by platform stirring," *Microwave Optical Technol. Lett.*, vol. 30, no. 20, pp. 391–397, Sep. 2001.
- [93] G. A. Conway, W. G. Scanlon, C. Orlenius, and C. Walker, "In Situ Measurement of UHF Wearable Antenna Radiation Efficiency Using a Reverberation Chamber," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 271-274, 2008.

- [94] P.-S. Kildal, K. Rosengren, J. Byun, and J. Lee, "Definition of effective diversity gain and how to measure it in a reverberation chamber," *Microwave Optical Technol. Lett.*, vol. 34, no. 1, pp. 56–59, Jul. 2002.
- [95] C.L. Holloway et al., "On the Use of Reverberation Chambers to Simulate a Rician Radio Environment for the Testing of Wireless Devices," *IEEE Trans on Antenna and Propag.*, vol. 54, no. 11, pp. 3167-3177, Nov. 2006.
- [96] G. D'Ambrosio, F. Di Meglio, and G. Ferrara, "Multimode time-varying enclosures for exposure and dosimetry in bioelectromagnetic experiments," *Alta Frequenza*, vol. 49, no. 2, pp. 89-94, Mar-Apr 1980.
- [97] D. Roux et al., "Electromagnetic fields (900 MHz) evoke consistent molecular responses in tomato plants," *Physiologia Plantarum*, vol. 128, no. 2, pp. 283–288, Oct. 2006.
- [98] J.M. Dienot and G. Lourdel, "Experimental study of thermal influence on EMC emission of digital circuit on PCB," in *EMC*, Zurich, Suisse, Feb. 2005.
- [99] S. Ben Dhia, E. Sicard, Y. Mequignon, A. Boyer, and JM. Dienot, "Thermal Influence on 16-bits microcontroller Emission," in *IEEE Symposium on EMC*, Hawaii, 2007.
- [100] S. Baffreau and S. Akue-Boulingui, "Temperature impact on microcontroller immunity," in *2EMC Conference*, Rouen, France, 2007.
- [101] H Boulzazen, F. Fouquet, and A. Reineix, "Mesures de l'Immunité Rayonnée dans une CRBM avec Prise en Compte de la Température," in *Colloque International TELECOM'2009 & 6ème Journées Franco Maghrébines des Microondes et leur Applications*, Agadir, Maroc, 2009, pp. 129-130.
- [102] H Boulzazen, F. Fouquet, and A. Reineix, "Experimental Study and Development of an « EMC-Thermal stress » Test Bench used in Mode Stirred Reverberation Chamber MSRC," in *7th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, EMC Compo'09*, Toulouse, France, Nov. 2009.
- [103] H Boulzazen, F. Fouquet, and A. Reineix, "Influence de la Température sur l'Immunité Rayonnée d'un Equipement Automobile en Environnement Réverbérant," in *2EMC Workshop*, Rouen, FRANCE, Nov. 2010.
- [104] P. F. Combes, *Micro-ondes : Lignes, guides et cavités*. Paris, France: Dunod, 1996.
- [105] L. CAPPETTA, M. FEO, V. FIUMARA, V. PIERRO, and I. PINTO, "Electromagnetic Chaos in Mode-Stirred Reverberation Enclosures," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 40, no. 3, pp. 185-192, Aug. 1998.

- [106] D. A. Hill, *Electromagnetic Fields in Cavities : Deterministic and Statistical Theories*, The IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [107] M.O. Hatfield and M. B. Slocum, "Frequency characterization of reverberation chambers," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Piscataway, NJ., 1996, pp. 190-193.
- [108] F.E. Borgnis and C.H. Pappas, *Electromagnetic waveguides and resonators.*, Encyclopedia of Physics, Volume XVI, Electromagnetic Fields and Waves (ed., S. Flügge) ed. Berlin: Springer-Verlag, 1958.
- [109] E. Argence and T. Kahan, *Theory of Waveguides and Cavity Resonators*. New York, USA: Hart Publishing Co., 1968.
- [110] C. L. Holloway, D. A. Hill, J. M. Ladbury, and T. M. Lammers, "Assessing Loaded Reverberation Chambers: Calculating Threshold Metrics," *IEEE Intern. Symp. on Electromag. Compat.*, vol. 2, pp. 834 - 837, 2003.
- [111] C.L. Holloway, T. M. Lammers, and J. Ladbury, "The Effects of Loading Configurations on the Performance of Reverberation Chambers," in *Intern. Symp. on Electromag. Compat., EMC Europe*, Eindhoven, NL, 2004, pp. 727 - 732.
- [112] P. Corona, G. Ferrara, and M. Migliaccio, "Reverberation chambers as sources of stochastic electromagnetic fields," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 38, pp. 348-356, 1996.
- [113] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes.*, 3rd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1991.
- [114] P. Tassi and S. Legait, *Théorie des probabilités en vue des applications statistiques*, TECHNIP ed., 1990.
- [115] J. M. Ladbury, G. H. Koepke, and D. Camell, "Evaluation of the NASA Langley Research Center Mode-Stirred Chamber Facility," NIST, Colorado, Technical Note 1508, 1999.
- [116] F. Moglie, "Convergence of the Reverberation Chambers to the Equilibrium Analyzed With the Finite-Difference Time-Domain Algorithm," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 46, no. 3, 2004.
- [117] S. P. Yu and C. Bunting, "Statistical investigation of frequency-stirred reverberation chambers," *IEEE International Symposium on EMC, Boston, USA*, vol. 1, pp. 155-159, Aug. 2003.

- [118] L. R. Arnaut and P. D. West, "Evaluation of the untuned stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques," Center for Electromagnetic Metrology, Nat. Phys. Laboratory, United Kingdom, NPL Report CEM. 11, Aug. 1998.
- [119] G. Orjubin, "Modélisation modale d'une chambre réverbérante par la méthode des éléments finis : caractérisation de la perturbation induite par la rotation du brasseur, application à l'analyse paramétrique des tests statistiques," Université de Marne La Vallée, France, Thèse de doctorat. 2005.
- [120] C. Lemoine, "Contribution à l'Analyse Statistique des Mesures en Chambre Réverbérante à Brassage de Modes, applications à la détermination de l'efficacité de brassage et de l'incertitude de mesure dans un contexte CEM et radiofréquences," INSA de Rennes, France, Thèse de doctorat. 2008.
- [121] J. H. Pollard, *A Handbook of Numerical and Statistical Techniques*. New York: Cambridge University Press, 1977.
- [122] A. H. Bowker and G. J. Lieberman, *Méthodes Statistiques de l'Ingénieur*. France: Dunod, 1965.
- [123] M. A. Stephens, "EDF statistics for goodness of fit and some comparisons," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 69, no. 347, pp. 730-737, Sept. 1974.
- [124] M. A. Stephens, "Asymptotic Results for Goodness-of-Fit Statistics with Unknown Parameters," *Annals of Statistics*, vol. 4, pp. 357-369, 1976.
- [125] M. A. Stephens, "Goodness of Fit for the Extreme Value Distribution," *Biometrika*, vol. 64, pp. 583-588, 1977.
- [126] M. A. Stephens, "Goodness of Fit with Special Reference to Tests for Exponentiality," Department of Statistics, Stanford University, Stanford, CA, Technical Report. 262, 1977.
- [127] M. A. Stephens, "Tests of Fit for the Logistic Distribution Based on the Empirical Distribution Function," *Biometrika*, vol. 66, pp. 591-595, 1979.
- [128] H. W. Lilliefors, "On the Kolmogorov-Smirnov test for the exponential distribution with mean unknown," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 64, pp. 387-389, Mar 1969.
- [129] J. Durbin, "Kolmogorov-Smirnov tests when parameters are estimated with applications to tests of exponentiality and tests on spacings," *Biometrika*, vol. 62, no. 1, pp. 5-22, 1975.

- [130] B. H. Margolin and W. Maurer, "Tests of the Kolmogorov-Smirnov type for exponential data with unknown scale, and related problems," *Biometrika*, vol. 63, no. 1, pp. 149-160, 1976.
- [131] M.O. Hatfield, "A calibration procedure for reverberation chambers," *IEEE Intern. Symp. on. Electromagn. Compat.*, vol. 2, pp. 621 - 626, 2000.
- [132] C. L. Holloway, D.A. Hill, J. M. Ladbury, and G. Koepke, "Requirements for an Effective Reverberation Chamber: Unloaded or Loaded," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 1, pp. 187-194, Feb. 2006.
- [133] P. Hallbjörner, "A model for the number of independant samples in reverberation chambers," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 33, no. 1, pp. 25-28, Apr 2002.
- [134] "Véhicules routiers - Méthodes d'essai d'un équipement soumis à des perturbations électriques par rayonnement d'énergie électromagnétique en bande étroite - Partie 2: Chambre anéchoïque," Organisation internationale de normalisation, Norme ISO 11452-2, 2004.

Liste des figures

Chapitre 1

| | |
|---|--|
| FIG.1.1. Prothèse gérée électroniquement faisant fonction d'un cœur artificiel (Invention 2010 de CARMAT. SAS, France) 3 | |
| FIG. 1.2. La mécatronique à la croisée des techniques de l'ingénieur (source : http://www.abmecatronique.com)..... 6 | |

Chapitre 2

| | |
|--|--|
| FIG. 2.1. Brasseur de modes mécanique (CRBM de l'IRSEEM)..... 14 | |
| FIG. 2.2. Brassage de modes par diffuseurs de Schroeder [49,50] 14 | |
| FIG. 2.3. Chambre réverbérante intrinsèque [55] 14 | |
| FIG. 2.4. Chambre réverbérante intrinsèque à parois vibrantes (VIRC) [59] 15 | |
| FIG. 2.5. Simulation d'environnements de propagation spécifiques en CRBM (<i>Holloway, NIST</i>)..... 17 | |
| FIG. 2.6. CRBM du LASMEA (a) utilisée pour l'exposition de cultures de cellules biologiques vivantes (b, c) au champ EM 20 | |

Chapitre 3

| | |
|--|--|
| FIG. 3.1. Tests CEM sur véhicule en chambre semi-anéchoïque de l'IRSEEM..... 23 | |
| FIG. 3.2. Chambre réverbérante de l'IRSEEM 24 | |
| FIG. 3.3. Cavité métallique parallélépipédique 27 | |
| FIG. 3.4. Premières résonances de la CRBM de l'IRSEEM (3,62 m × 3,06 m × 4,80 m)..... 29 | |
| FIG. 3.5. Représentation polaire d'une onde plane 31 | |

Chapitre 4

| | |
|---|--|
| FIG. 4.1 Distribution des absorbants pour l'essai relatif aux effets de charge [5]..... 48 | |
| FIG. 4.2 Ecart type des données pour les composantes du champ E de 8 sondes (chambre chargée) [5]..... 49 | |
| FIG. 4.3. Positionnement des absorbants empilés dans le volume de test de la CRBM (config. 1)..... 51 | |
| FIG. 4.4. Différents cas de charge et positionnement des absorbants dans la CRBM (config. 1)..... 51 | |
| FIG. 4.5. Positions des deux absorbants debout : (a) joints (config. 2) et (b) séparés (config. 3)..... 52 | |
| FIG. 4.6. Positions des 2 absorbants debout : (a) joints (config. 4) et (b) séparés (config. 5) 52 | |
| FIG. 4.7. Synoptique de calibrage de la CRBM 54 | |
| FIG. 4.8. Configuration matérielle utilisée pour le calibrage de la CRBM 54 | |
| FIG. 4.9. Sonde de champ isotropique (RadiSense RSS1004A) 54 | |
| FIG. 4. 10. Puissance reçue (en Watt) sur les huit positions d'antenne de réception (config.1) 56 | |
| FIG. 4.11. Puissance reçue (en dBm) sur les positions d'antenne 1, 2 et 3 (CRBM vide et config.1)..... 57 | |
| FIG. 4.12. Facteur d'étalonnage d'antenne et pertes d'insertions selon la charge de la chambre (config.1) 58 | |
| FIG. 4.13. Variation de la charge de la CRBM selon le nombre d'absorbants insérés (config.1) 59 | |
| FIG. 4.14. CLF moyen et maximum selon le nombre d'absorbants et de positions d'antenne (config.1) 60 | |
| FIG. 4.15. CLF moyen et maximum (dB) selon le nombre d'absorbants et de positions d'antenne (config.1)..... 61 | |
| FIG. 4.16. CLF moyen et maximum estimé à partir de l'ACF chambre chargée (config.1)..... 62 | |
| FIG. 4.17. Ecart type du CLF moyen et maximum selon la charge et le nombre de positions d'antenne (config.1)..... 62 | |
| FIG. 4.18. Variation de la puissance de test selon la charge et le CLF (config.1) 63 | |
| FIG. 4.19. Seuil minimal du Facteur de qualité de la CRBM vide de l'IRSEEM 65 | |
| FIG. 4.20. Facteur de qualité de la CRBM selon la charge et le nombre de positions de R_x (config.1) 66 | |
| FIG. 4.21. ACS moyenne de 1 à 4 absorbants empilés (config.1) 68 | |
| FIG. 4.22. Rapport en pourcent de l'ACS de n absorbants à celle d'un absorbant dans la même configuration n°1 68 | |
| FIG. 4.23. Section efficace d'absorption moyenne de n absorbants identiques (configs. 1 à 5)..... 69 | |
| FIG. 4.24. Fonction d'autocorrélation pour la CRBM vide..... 71 | |
| FIG. 4.25. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 1 absorbant (config.1)..... 72 | |
| FIG. 4.26. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config.1) 73 | |
| FIG. 4.27. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 3 absorbants (config.1) 73 | |
| FIG. 4.28. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 4 absorbants (config.1) 74 | |
| FIG. 4.29. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config. 2) 74 | |
| FIG. 4.30. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config.3) 75 | |

| | |
|--|----|
| FIG. 4.31. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config.4) | 75 |
| FIG. 4.32. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ pour la CRBM chargée avec 2 absorbants (config.5) | 76 |
| FIG. 4.33. Fonction d'autocorrélation des échantillons de la puissance reçue (CRBM vide et configs. 1 à 3) | 76 |
| FIG. 4.34. Ecart type (en dB) du champ électrique maximal selon l'état de charge de la CRBM (config. 1) | 81 |
| FIG. 4.35. Comparaison de l'Ecart type du champ électrique maximum (CRBM vide ou chargée avec 1 ou 4 absorbants)... | 81 |
| FIG. 4.36. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM vide)..... | 82 |
| FIG. 4.37. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 1 absorbant – config.1)..... | 83 |
| FIG. 4.38. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 2 absorbants – config.1) | 83 |
| FIG. 4.39. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 3 absorbants – config.1) | 83 |
| FIG. 4.40. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 4 absorbants - config.1)..... | 84 |
| FIG. 4.41. Test d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM vide)..... | 85 |
| FIG. 4.42. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 1 absorbant - config.1) | 85 |
| FIG. 4.43. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 2 absorbants - config.1)..... | 85 |
| FIG. 4.44. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 3 absorbants - config.1)..... | 86 |
| FIG. 4.45. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle (CRBM chargée avec 4 absorbants - config.1)..... | 86 |
| FIG. 4.46. Variation de la distribution et l'orientation de la charge avec deux absorbants ((a) config.2 et (b) config.3)..... | 87 |
| FIG. 4.47. Comparaison de l'Ecart type du champ électrique maximum des configurations n°1 et n°2 (2 absorbants)..... | 88 |
| FIG. 4.48. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 2 absorbants debout joints – config.2)..... | 88 |
| FIG. 4.49. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle | 89 |
| FIG. 4.50. Comparaison de l'Ecart type du champ électrique maximal des configurations n°1 et n°3 (avec 2 absorbants).... | 90 |
| FIG. 4.51. Test d'ajustement de E_R à la loi de Rayleigh (CRBM chargée avec 2 absorbants debout séparés – config.3)..... | 91 |
| FIG. 4.52. Tests d'ajustement de la puissance reçue à la loi exponentielle | 91 |
| FIG. 4.53. CLF moyen sur 3 positions d'antenne selon différentes configurations de la charge..... | 92 |
| FIG. 4.54. Ecart type du CLF selon le nombre de positions d'antenne pour la CRBM chargée avec 2 absorbants..... | 93 |
| FIG. 4.55. Facteur de qualité de la CRBM selon la configuration de la charge..... | 93 |
| FIG. 4.56. ACS moyenne de n absorbants (configs. 1, 2 et 3) | 94 |
| FIG. 4.57. Rapport en pourcentage de l'ACS moyenne de 2 absorbants en configurations n° 2 à 5 à l'ACS moyenne de 2 absorbants en configuration n°1 | 95 |
| FIG. 4.58. Variation de la puissance de test pour générer 100 V/m pour les configurations n° 2 et 3 et CRBM vide..... | 95 |
| FIG. 4.59. Différence entre charge de 2 absorbants (configs. 2 et 3) et charge de 2 absorbants (config. 1)..... | 96 |
| FIG. 4.60. Différence entre charge de 2 absorbants (configs. 2 et 3) et charge de 4 absorbants (config. 1)..... | 96 |
| FIG. 4.61. Charge de 2 absorbants positionnés selon les configurations n° 2, 3, 4 et 5..... | 97 |
| FIG. 4.62. Différence entre la charge de 2 absorbants debout (config 4 et 5) et la charge de 2 absorbants empilés (config 1) 97 | 97 |
| FIG. 4.63. Test AD-Stephens d'ajustement de la loi de Rayleigh aux mesures de champ E de la CRBM chargée avec 2 absorbants debout (joints ou séparés) dans différentes orientations (config 2,3,4 et 5)..... | 98 |
| FIG. 4.64. Section efficace d'absorption moyenne de n absorbants identiques (configs. 1 à 5)..... | 98 |
| FIG. 4.65. Test AD-Stephens d'ajustement de la loi de Rayleigh aux mesures de champ E de la CRBM chargée avec 2 absorbants joints dans différentes orientations (config. 1, 2 et 4)..... | 99 |

Chapitre 5

| | |
|--|-----|
| FIG. 5.1. Schéma synoptique de la maquette expérimentale de mesure du ε_r | 108 |
| FIG. 5.2. Variation de la phase du paramètre S_{21} avec un échantillon de <i>Fibres de Silice</i> | 109 |
| FIG. 5.3. Simulation de la ligne à air..... | 111 |
| FIG. 5.4. Module du coefficient de réflexion de la ligne à air seul..... | 111 |
| FIG. 5.5. Module du coefficient de transmission de la ligne à air seul..... | 111 |
| FIG. 5.6. Phase du coefficient de transmission de la ligne à air seul..... | 112 |
| FIG. 5.7. Simulation de la ligne à tronçons à air et diélectrique..... | 112 |
| FIG. 5.8. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 30 cm de Téflon..... | 113 |
| FIG. 5.9. Simulation de la ligne à tronçon de Polystyrène extrudé de 25cm..... | 113 |
| FIG. 5.10. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 25cm de polystyrène extrudé..... | 114 |
| FIG. 5.11. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 47cm de polystyrène extrudé..... | 114 |
| FIG. 5.12. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 62cm de fibres de Silice..... | 115 |
| FIG. 5.13. Phase du coefficient de transmission de la ligne avec 30cm de laine de Roche..... | 115 |
| FIG. 5.14. Etapes de réalisation du banc de test thermo-régulé associé à la CRBM | 117 |
| FIG. 5.15. Enceinte thermo-régulée (prototype n°1) avec sonde de champ et support..... | 118 |
| FIG. 5.16. Enceinte thermo-régulée (prototype n°2) en phase de réalisation | 118 |
| FIG. 5.17. Schéma synoptique du circuit de régulation de la température | 118 |

| | |
|---|-----|
| FIG. 5.18. Schéma synoptique de l'enceinte thermo-régulée (prototype n°2)..... | 118 |
| FIG. 5.19. Ecart-type du champ E_{max} mesuré dans les trois directions (Ox,Oy,Oz) | 120 |
| FIG. 5.20. Ecart-type du champ $E_{x_{max}}$ | 120 |
| FIG. 5.21. Ecart-type du champ $E_{y_{max}}$ | 120 |
| FIG. 5.22. Ecart-type du champ $E_{z_{max}}$ | 121 |
| FIG. 5.23. Niveaux de champ $E_{x_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Oz) | 122 |
| FIG. 5.24. Niveaux de champ $E_{y_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Oz) | 122 |
| FIG. 5.25. Niveaux de champ $E_{z_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Oz) | 122 |
| FIG. 5.26. Niveaux de champ $E_{x_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Ox) | 123 |
| FIG. 5.27. Niveaux de champ $E_{y_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Ox) | 124 |
| FIG. 5.28. Niveaux de champ $E_{z_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°1 (résistance orientée selon Ox) | 124 |
| FIG. 5.29. Ecart absolu des niveaux de champ $E_{x_{max}}$ entre l'intérieur et l'extérieur du prototype N°1..... | 124 |
| FIG. 5.30. Ecart absolu des niveaux de champ $E_{z_{max}}$ entre l'intérieur et l'extérieur du prototype N°1..... | 125 |
| FIG. 5.31. Niveaux de champ $E_{x_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°2 (résistance orientée selon Ox) | 125 |
| FIG. 5.32. Niveaux de champ $E_{y_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°2 (résistance orientée selon Ox) | 125 |
| FIG. 5.33. Niveaux de champ $E_{z_{max}}$ sur un tour de brasseur dans l'enceinte N°2 (résistance orientée selon Ox) | 126 |
| FIG. 5.34. Ecart absolu des niveaux de champ $E_{x_{max}}$ entre l'intérieur et l'extérieur des prototypes N°1 et 2..... | 126 |
| FIG. 5.35. Mesures de répétabilité du champ $E_{x_{max}}$ dans l'enceinte N°2 | 127 |
| FIG. 5.36. Mesures de répétabilité du champ $E_{y_{max}}$ dans l'enceinte N°2 | 128 |
| FIG. 5.37. Mesures de répétabilité du champ $E_{z_{max}}$ dans l'enceinte N°2 | 128 |
| FIG. 5.38. Mesures de répétabilité du champ $E_{x_{max}}$ (sonde de champ seule) | 128 |
| FIG. 5.39. Mesures de répétabilité du champ $E_{y_{max}}$ (sonde de champ seule) | 129 |
| FIG. 5.40. Mesures de répétabilité du champ $E_{z_{max}}$ (sonde de champ seule) | 129 |
| FIG. 5.41. Facteur de qualité de la <i>CRBM</i> vide ou en présence du banc de test..... | 130 |
| FIG. 5.42. ACS moyenne du banc de test et de quatre absorbants chargés en Carbone | 131 |
| FIG. 5.43. Fonction d'autocorrélation des échantillons de puissance relevés dans la <i>CRBM</i> vide ou en présence du banc de test | 131 |
| FIG. 5.44. Fonction d'autocorrélation des échantillons de champ E relevés dans la <i>CRBM</i> en présence du banc de test | 132 |
| FIG. 5.45. Facteur de calibrage d'antenne et pertes d'insertion de la <i>CRBM</i> vide ou en présence du banc de test | 132 |
| FIG. 5.46. Facteur de charge de la <i>CRBM</i> vide ou en présence du banc de test | 133 |
| FIG. 5.47. Estimation de la puissance de test nécessaire pour générer $100V/m$ | 133 |
| FIG. 5.48. Charge induite dans la <i>CRBM</i> après insertion du banc de test ou d'absorbants..... | 134 |
| FIG. 5.49. Equipement sous test (Clignotant à LEDs – <i>VALEO</i>) | 135 |
| FIG. 5.50. Circuit Driver des <i>LEDs</i> avec son capot métallique | 136 |
| FIG. 5.51. Schéma blocs du circuit Driver | 136 |
| FIG. 5.52. <i>EST</i> à l'intérieur de l'enceinte thermo-régulée | 137 |
| FIG. 5.53. Schéma synoptique du protocole expérimental | 137 |
| FIG. 5.54. Setup des mesures expérimentales en immunité rayonnée avec stress thermique..... | 138 |
| FIG. 5.55. Susceptibilités de l' <i>EST</i> avec un brassage pas à pas..... | 139 |
| FIG. 5.56. Susceptibilités de l' <i>EST</i> avec un brassage continu | 139 |
| FIG. 5.57. Comparaison des susceptibilités de l' <i>EST</i> à température ambiante avec deux types de brassage | 140 |
| FIG. 5.58. Comparaison des susceptibilités de l' <i>EST</i> à 80°C avec deux types de brassage..... | 140 |
| FIG. 5.59. Schéma synoptique du plan de test d'immunité rayonnée en chambre semi-anechoïque..... | 142 |
| FIG. 5.60. Setup des mesures d'immunité au champ rayonné du phare à <i>LEDs</i> en chambre semi-anechoïque de l' <i>IRSEEM</i> 142 | 142 |
| FIG. 5.61. Mesures d'immunité rayonnée en <i>CA</i> du phare à <i>LEDs</i> pour une sévérité de $200V/m$ à une distance de $1m$ | 143 |

Annexe A

| | |
|--|-----|
| FIG. A.1. ACS moyenne en (m^2) calculée à partir des facteurs de qualité (a) ou des gains en puissance (b)..... | 151 |
| FIG. A.2. ACS moyenne en (m^2) avec lissage calculée à partir des facteurs de qualité (a) ou des gains en puissance (b)..... | 151 |
| FIG. A.3. ACS moyenne en (dB) calculée à partir des facteurs de qualité (a) ou des gains en puissance (b) | 152 |
| FIG. A.4. ACS moyenne en (dB) avec lissage calculée à partir des facteurs de qualité (a) ou des gains en puissance (b)..... | 152 |

Liste des tableaux

Chapitre 4

| | |
|---|----|
| Tab. 4.1. Table des valeurs critiques de Stephens pour le test de Kolmogorov-Smirnov d'une loi exponentielle..... | 47 |
| Tab. 4.2. Table des valeurs critiques de Stephens pour le test de Anderson-Darling d'une loi exponentielle..... | 47 |
| Tab. 4.3. Valeurs de la fonction d'autocorrélation au 1 ^{er} ordre des mesures de la composante rectangulaire de champ E_R | 77 |
| Tab. 4.4. Prescriptions de tolérance pour l'uniformité de champ | 80 |

Chapitre 5

| | |
|--|-----|
| Tab. 5.1. Valeurs approximées de la constante diélectrique des matériaux | 110 |
| Tab. 5.2. Valeurs approximées corrigées de la constante diélectrique des matériaux | 116 |