



**HAL**  
open science

**Contribution à l'analyse et à l'optimisation des performances des chambres réverbérantes électromagnétiques en régime de recouvrement modal faible ou modéré**

Ludivine Le Bars

► **To cite this version:**

Ludivine Le Bars. Contribution à l'analyse et à l'optimisation des performances des chambres réverbérantes électromagnétiques en régime de recouvrement modal faible ou modéré. Acoustique [physics.class-ph]. Université Gustave Eiffel, 2022. Français. NNT : 2022UEFL2084 . tel-04274776

**HAL Id: tel-04274776**

**<https://theses.hal.science/tel-04274776>**

Submitted on 8 Nov 2023

**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.

Contribution à l'analyse et à l'optimisation des  
performances des chambres réverbérantes  
électromagnétiques en régime de recouvrement modal  
faible ou modéré

Ludivine LE BARS COMPOINT

21 Juin 2022

# UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

ÉCOLE DOCTORALE : MATHÉMATIQUES, SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

THÈSE DE DOCTORAT SPÉCIALITÉ ELECTRONIQUE, OPTRONIQUE ET  
SYSTÈMES

**Contribution à l'analyse et à l'optimisation des performances  
des chambres réverbérantes électromagnétiques en régime de  
recouvrement modal faible ou modéré**

SOUTENUE AU LABORATOIRE ESYCOM DE L'UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL LE  
DATE PAR LUDIVINE LE BARS COMPOINT

## JURY

Ulrich KUHL	Professeur, Université Côte d'Azur - INPHYNI	<i>Rapporteur</i>
Françoise PALADIAN	Professeure, Université Clermont Auvergne - Institut Pascal	<i>Rapporteur</i>
Marco KLINGLER	Expert CEM, Stellantis	<i>Examineur</i>
Cécile DORGAN	Cheffe du département EMC/HIRF, DGA	<i>Examineur</i>
Elodie RICHALOT	Professeure, Université Gustave Eiffel - ESYCOM	<i>Directrice de thèse</i>
Philippe BESNIER	Directeur de Recherche, CNRS - IETR	<i>Co-directeur de thèse</i>
Jean-François ROSNARHO	Directeur R&D, SIEPEL	<i>Encadrant de thèse</i>
François SARRAZIN	Maître de Conférences, Université Gustave Eiffel	<i>Encadrant de thèse</i>

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs et encadrants de thèse, Elodie Richalot professeure des Universités au laboratoire ESYCOM à l'Université Gustave Eiffel, François Sarrazin professeur associé au laboratoire ESYCOM, Philippe Besnier directeur de recherche CNRS à l'IETR et bien sûr Jean-François Rosnarho directeur R&D au sein de la SIEPEL qui m'a accueilli au cours de ce doctorat. Je souhaite les remercier pour leur disponibilité, leurs conseils et leurs brillantes idées qui ont permis l'aboutissement de ce doctorat. Je souhaite les remercier également pour la prévenance et la gentillesse dont ils ont fait preuve tout au long de ce travail de recherche.

Je remercie également chaque personne de l'entreprise SIEPEL et des laboratoires de l'ESYCOM et de l'IETR pour leur soutien, leur aide et leur accueil au cours de ce travail.

Je tiens également à remercier tout particulièrement mon mari Sébastien qui m'a épaulée et soutenue tout au long de cette aventure. Enfin, pendant mon doctorat, j'ai eu la chance de donner naissance à ma fille, Athénaïs, pour laquelle je veux que cette thèse soit une avancée.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	<b>4</b>
<b>1 Etat de l'art sur l'amélioration des performances des CRBM</b>	<b>10</b>
1.1 Introduction sur les CRBM . . . . .	10
1.2 Etat de l'art . . . . .	12
1.2.1 Chaoticité en CRBM . . . . .	14
1.2.2 Variation de charge en CRBM . . . . .	16
1.2.3 Systèmes de brassage en CRBM . . . . .	18
1.3 Positionnement de ce travail . . . . .	20
<b>2 Indicateurs de fonctionnement et environnements de test</b>	<b>22</b>
2.1 Présentation des indicateurs . . . . .	23
2.1.1 Indicateurs normatifs . . . . .	23
2.1.2 Lois de probabilité du champ électromagnétique . . . . .	34
2.2 Examen du comportement des lois support au moyen de simulations de Monte-Carlo . . . . .	39
2.2.1 Construction des lois de distribution . . . . .	39
2.2.2 Test d'ajustement à une loi de Rayleigh . . . . .	39
2.2.3 Rapport écart-type sur moyenne . . . . .	41
2.2.4 Uniformité du champ selon les normes . . . . .	43
2.2.5 Critères d'anisotropie et d'inhomogénéité . . . . .	45
2.3 Présentation des environnements de test . . . . .	51
2.3.1 Trois exemples de CRBM basées sur une configuration normative du fournisseur SIEPEL . . . . .	53
2.3.2 CRBM des laboratoires ESYCOM et IETR . . . . .	55
2.3.3 Récapitulatif . . . . .	56
<b>3 Questionnements sur l'impact de la chaoticité</b>	<b>58</b>
3.1 Introduction . . . . .	58
3.2 Description des protocoles de test . . . . .	59
3.2.1 CRBM de l'entreprise SIEPEL . . . . .	60
3.2.2 CRBM du laboratoire ESYCOM . . . . .	62
3.2.3 CRBM du laboratoire IETR . . . . .	63
3.2.4 Récapitulatif des protocoles de test . . . . .	64
3.3 Analyse de l'apport des modifications géométriques . . . . .	65

3.3.1	Comparaison entre la CRBM vide et celle rendue chaotique . . . . .	65
3.3.2	Distinction entre effet des pertes et effet de la géométrie . . . . .	75
3.4	Compensation de l'absorption des calottes avec un absorbant dans une CRBM conventionnelle . . . . .	80
3.5	Discussion sur l'impact de la chaotité en CRBM . . . . .	83
<b>4</b>	<b>Impact de la variation de charge en CRBM</b>	<b>85</b>
4.1	Présentation des environnements étudiés . . . . .	86
4.2	Impact de la variation de charge sur les propriétés de la CRBM . . . . .	89
4.2.1	Niveau de pertes . . . . .	90
4.2.2	Impact de la charge sur les propriétés d'homogénéité et d'isotropie des champs . . . . .	96
4.3	Conclusion . . . . .	104
<b>5</b>	<b>Brassage par commutation de plaques</b>	<b>105</b>
5.1	Concept du brassage par commutation . . . . .	105
5.2	Etude de l'effet du brassage par commutation par simulations électroma- gnétiques . . . . .	108
5.3	Environnement de test dans le cadre de notre étude . . . . .	113
5.3.1	Choix des paramètres de connexion des plaques métalliques . . . . .	114
5.3.2	Configuration choisie pour notre étude . . . . .	118
5.4	Apport du brassage par commutation . . . . .	119
5.4.1	Types de brassage étudiés . . . . .	119
5.4.2	Comparaison des systèmes de brassage . . . . .	122
5.5	Conclusion sur les systèmes de brassage par commutation . . . . .	128
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>129</b>
	<b>Annexes</b>	<b>135</b>
	<b>Annexe A</b>	<b>135</b>
	<b>Annexe B</b>	<b>138</b>
	<b>Annexe C</b>	<b>140</b>

# Introduction générale

## Contexte

Les appareils électroniques et électriques font partie de notre quotidien. Quelle que soit leur utilisation, ces équipements génèrent des champs électromagnétiques pouvant perturber leur environnement, de façon intentionnelle ou non. La compatibilité électromagnétique (CEM) est définie par :

« L'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique, ou électronique, à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques gênantes pour tout ce qui se trouve dans cet environnement. »

La CEM touche l'ensemble des produits électriques et électroniques mais elle intervient de manière cruciale pour toutes les fonctions critiques se rapportant à la sûreté de fonctionnement d'où les enjeux dans les domaines des transports civils et des engins militaires (aéronautique, spatial, automobile, ferroviaire). Le domaine des télécommunications [1] est également très concerné par le contexte CEM y compris, en marge de cette discipline, dans le cadre des interactions électromagnétiques (EM) avec le vivant [2]. Pour s'assurer d'une bonne compatibilité entre équipements, il est indispensable de vérifier qu'ils ne perturbent pas leur environnement (tests d'émission) et ne sont pas perturbés par d'autres systèmes électroniques ou électriques (tests de susceptibilité/d'immunité). Ces essais peuvent être réalisés dans une chambre anéchoïque (CA) [3]. Le rôle de cette dernière est d'assurer, grâce à la présence d'absorbants placés dans l'enceinte, des conditions de rayonnement en espace libre dans lesquelles les ondes électromagnétiques peuvent être générées et mesurées. L'avantage de cet environnement de mesure réside dans la facilité de contrôle de la direction et de la polarisation du champ. Cependant, ces méthodes de tests définies par les normes de la profession, posent des difficultés techniques en engendrant des coûts financiers importants. Notamment, les essais d'immunité aux champs forts, pour lesquels le niveau de champ électrique généré peut atteindre plusieurs milliers de V/m, nécessitent l'emploi d'amplificateurs de puissance à très fort gain et à large bande, de coût très élevé. Par ailleurs, les protocoles de mesure doivent couvrir, séquentiellement, la diversité d'angles d'incidence et de polarisations, sans pouvoir prétendre à l'exhaustivité.

Dans le but de répondre aux besoins croissants d'obtention de ces hauts niveaux de champ, une alternative aux CA existe, il s'agit des chambres réverbérantes à brassage de modes (CRBM) [4, 5]. Une CRBM est une enceinte blindée permettant de réfléchir les

ondes sur ses parois contrairement aux CA. L'objectif des CRBM en CEM est la réalisation de tests de perturbations rayonnées afin de contrôler l'immunité électromagnétique et les émissions électromagnétiques d'équipements électriques et électroniques. Ces systèmes sont aujourd'hui très utilisés en s'appuyant sur des normes largement répandues dans le domaine de la CEM [6, 7]. La chambre réverbérante possède plusieurs avantages qui la distinguent. Tout d'abord, les tests de CEM y sont beaucoup plus exhaustifs (faible influence de la position des câbles, six faces d'un équipement soumis aux champs électromagnétiques dans toutes les polarisations). Par ailleurs, une cavité nue (sans matériaux absorbants) et close permet la réalisation de tests en champs forts (secteurs automobile, aéronautique...), ce qui rend la CRBM incontournable d'un point de vue économique. Les CRBM permettent la réalisation des tests sur des temps plus courts avec des investissements bien plus faibles que pour d'autres moyens d'essais. De plus, certains niveaux exigés par les normes aéronautiques (RTCA DO 160 [8]) ou par les spécifications constructeurs sont atteignables uniquement en CRBM car les amplificateurs larges bandes de très fortes puissances n'existent pas sur le marché. Ces enceintes permettent d'atteindre facilement de hauts niveaux de champ grâce aux multiples réflexions sur ses parois. Dans ce type de structure, un brasseur de modes (objet métallique rotatif inséré dans la cavité) permet d'obtenir un champ considéré comme statistiquement uniforme. La figure 1 extraite du livre de J.-F. Rosnarho et S. Leberre [9] résume les différences entre chambre anéchoïque et CRBM. Nous allons voir que les puissances nécessaires pour générer ce niveau de champ sont très largement supérieures en CA.

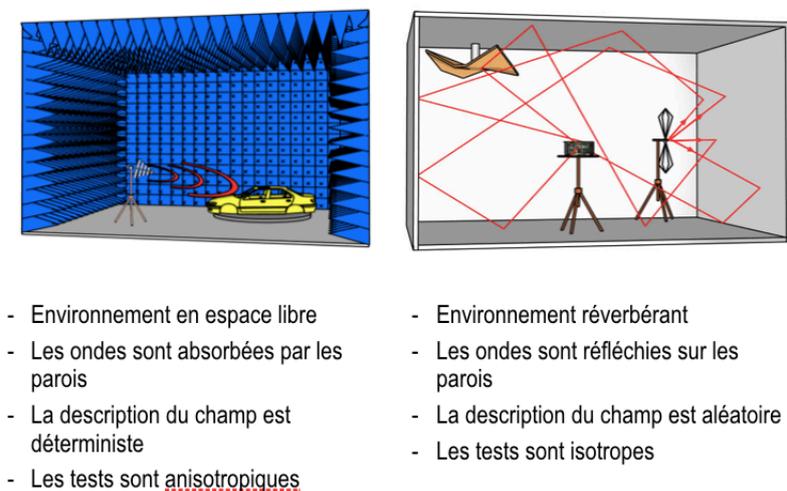


FIGURE 1 – Comparaison des chambres anéchoïque et réverbérante [9].

D'après l'expérience de l'entreprise SIEPEL, en CRBM vide type EOLE 1000, un niveau de champ de 7200 V/m peut être atteint en injectant une puissance de 1296 W entre 6 et 16 GHz. Il faut cependant rajouter 1 dB pour les pertes des câbles et coupleur, puis 4 à 5 dB pour la charge de l'équipement dans la chambre. On arrive à une puissance

à injecter dans la CRBM chargée de 5184 W pour atteindre ce même niveau de champ. Si on ne prend pas en compte les pertes dans les câbles coaxiaux mais uniquement la charge générée par l'équipement dans la chambre, 200 V/m peuvent être obtenus avec une puissance injectée de 15 W, soit 51,6 V/m pour 1 Watt [10]. L'entreprise Schwarzbek [11] met en avant le fait d'atteindre 600 V/m avec moins de 250 W en espace libre (chambre anéchoïque) entre 1,2 et 1,4 GHz. Pour une CRBM, par exemple une EOLE 400 chargée par l'équipement sous test, on obtient 600 V/m avec une puissance d'injection de 150 W entre 1 et 2 GHz, ce qui montre que cet environnement de test permet de réduire fortement la puissance à injecter par rapport à la chambre anéchoïque.

Les CRBM présentent tout de même quelques limitations. Il a été confirmé au moyen de tests d'ajustements statistiques, que dans une chambre parallélépipédique les propriétés du champ électromagnétiques au voisinage de la fréquence basse d'utilisation (Lowest Usable Frequency LUF) d'une CRBM diffèrent des propriétés idéales [12]. Il est donc difficile de caractériser et de prédire leur comportement dans des conditions non idéales suivant les critères présentés ci-après. Les normes internationales [7] (2011) et [8] (2010) définissent les procédés et caractéristiques que doivent vérifier les CRBM pour procéder à des tests CEM, en termes d'uniformité et d'isotropie du champ, ainsi que le nombre de configurations de mesure décorrélées; ces différentes notions seront définies et examinées au cours de ce travail. En particulier, il est généralement admis que l'écart-type du champ maximum dans le volume de travail d'une CRBM (i.e. le volume contenant l'équipement sous test) sur une rotation complète du brasseur ne doit pas excéder le gabarit normatif [13] tout en respectant un nombre minimum de positions de brasseur décorrélées pour obtenir des mesures conformes. Il est cependant difficile d'atteindre cette uniformité de champ en basses fréquences. Si nous prenons par exemple une CRBM de dimensions 2,48 x 2,86 x 3,41 m<sup>3</sup>, sa LUF, à partir de laquelle les critères de bon fonctionnement sont respectés, est estimée à 400 MHz selon les normes, or certaines normes débutent les procédures d'essais dès 80 MHz. Pour commencer à cette fréquence, il faudrait une CRBM de dimensions type 9,30 x 6,10 x 4,96 m<sup>3</sup>. Ainsi, pour un même fonctionnement entre deux CRBM de tailles différentes, il serait nécessaire d'agrandir le volume de l'enceinte et d'injecter une puissance très élevée.

## Objectifs

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une recherche de solutions visant à améliorer les performances des CRBM, notamment proche de la LUF, où les propriétés statistiques s'éloignent fortement des conditions idéales. Ces cavités doivent idéalement générer une distribution de champ électromagnétique homogène et isotrope, ce qui est considéré comme respecté de façon satisfaisante au-dessus de la LUF. L'objectif est donc de diminuer la LUF d'une CRBM donnée (et ainsi élargir son domaine d'utilisation) et d'améliorer les performances de cette chambre autour de la LUF. Sachant que la LUF diminue lorsque le volume de la chambre augmente (pour une géométrie parallélépipédique classique), la diminution de cette fréquence pour une géométrie donnée présente plusieurs avantages : cela permet, d'une part, d'élargir le domaine d'utilisation d'une CRBM existante, d'autre

part, pour une fréquence visée, d'utiliser une cavité de plus petite taille. Ce dernier point présente un double avantage : tout d'abord un encombrement moindre, mais surtout une contrainte moins forte sur l'amplificateur de puissance à utiliser (le volume étant moindre, la puissance à injecter pour atteindre un même niveau de champ en est dès lors réduite). Ceci est d'autant plus critique que l'amplificateur de puissance représente une part très importante du coût des systèmes de mesure en CRBM. Cette thèse a pour objet l'étude et l'amélioration des propriétés des CRBM pour des fréquences proches de leur LUF mais également la diminution de cette fréquence dans un contexte à la fois académique et industriel. SIEPEL, acteur majeur dans le domaine de la fourniture de moyens de mesure dans le domaine de la CEM et l'un des premiers fabricants de cages de Faraday à l'échelle internationale, est à l'origine de la demande de travaux dans ce domaine pour se donner un avantage décisif dans la maîtrise des propriétés des CRBM.

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs méthodes ont été envisagées. La première concerne l'exploitation des propriétés du chaos ondulatoire. Cette approche s'appuyant sur les travaux relatifs aux cavités chaotiques<sup>1</sup> [14, 15, 16] a été proposée dans le cadre d'un travail conjoint entre les laboratoires ESYCOM et INPHYNI<sup>2</sup>. C'est dans la continuité de ces recherches que le projet s'inscrit. Les travaux portant sur les chambres réverbérantes chaotiques ont montré, tout d'abord à l'aide de simulations numériques puis par des mesures, une diminution de la LUF d'une CRBM lorsque la géométrie de celle-ci est modifiée pour être rendue chaotique. Cependant, ces travaux n'ont pas permis la fabrication de CRBM chaotiques conformes aux exigences d'utilisation. L'objet de cette thèse est de proposer une CRBM chaotique respectant les critères de bon fonctionnement selon la normalisation en vigueur puis d'évaluer ses performances ainsi que le gain apporté par cette nouvelle solution. Nous avons donc étudié l'intérêt d'une cavité chaotique pour améliorer les performances d'une CRBM en contexte industriel. A travers nos recherches, nous avons constaté un effet de charge dans l'enceinte induite par les modifications géométriques effectuées, et mis en évidence l'amélioration des propriétés de la CRBM qui en découlait. C'est pourquoi, cette deuxième piste relative à la charge de la chambre a été explorée pour améliorer son fonctionnement. Toutefois, si la présence d'absorbants dans la cavité induit une amélioration de l'uniformité du champ, elle entraîne en contrepartie une baisse du facteur de qualité. Un compromis a donc été recherché afin de baisser la LUF de la CRBM tout en maintenant un haut niveau de champ dans l'enceinte. Enfin, une troisième voie a été envisagée pour améliorer les propriétés des CRBM, en proposant un nouveau type de brassage. Nous avons mis en œuvre une nouvelle technique de brassage avec un volume résultant plus pratique et qui s'est avéré particulièrement adapté aux basses fréquences ; ce dispositif pourrait être utilisé comme une solution de brassage complémentaire au brasseur mécanique traditionnel.

---

1. Une cavité électromagnétique chaotique est une cavité dans laquelle la dynamique de modes (représentée en termes de rayons) est chaotique et dont les modes de résonance suivent les prédictions de la théorie du chaos ondulatoire

2. L'Institut de Physique de Nice est une unité mixte de recherche (INPHYNI - UMR 7010) associée à l'Université Côte d'Azur (UCA) et au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

## Organisation de la thèse

Le chapitre 1 commence par une présentation générale des CRBM, de leur fonctionnement et de leur utilisation, puis propose un état de l'art des différentes solutions qui ont été proposées afin d'améliorer leurs propriétés statistiques, notamment proche de la LUF. Les solutions présentées portent sur la chaoticité, la variation de charge en CRBM et les systèmes de brassage.

De nombreux critères, normatifs ou non, existent pour caractériser le fonctionnement d'une CRBM. Dans le cadre de ce travail, nous avons pris en compte une grande variété d'indicateurs afin d'évaluer leur pertinence et complémentarité en fonction des scénarios. Le chapitre 2 se concentre sur la présentation de ces indicateurs de fonctionnement ainsi que sur les environnements de test employés dans le cadre de cette thèse. Plusieurs indicateurs ont été considérés pour étudier l'impact des modifications proposées sous plusieurs angles. La pertinence de ces indicateurs a également été éprouvée. L'analyse des résultats obtenus concerne tout d'abord les critères normatifs, mais d'autres paramètres permettant une analyse plus fine des propriétés de la cavité ont été étudiés, notamment les propriétés du champ électrique dans le volume (homogénéité, isotropie, distribution des différentes composantes). En particulier, nous avons effectué une analyse couplée de ces différents indicateurs afin d'une part de caractériser de façon extensive les propriétés des différentes CRBM, et d'autre part d'en extraire les paramètres les plus pertinents et les plus fiables pour caractériser le bon fonctionnement d'une CRBM. A partir des paramètres sélectionnés, nous avons établi des critères facilement exploitables dans un contexte industriel, en tenant compte notamment des contraintes liées au temps de mesure et aux manipulations requises. Dans une dernière section, nous présentons les environnements de test.

Le chapitre 3 est dédié à l'étude de l'intérêt des cavités chaotiques dans le but d'améliorer les propriétés statistiques de la chambre. Les cavités parallélépipédiques « classiques » sont modifiées et rendues « chaotiques » via l'ajout d'hémisphères métalliques sur leurs parois. L'ensemble de ces travaux de thèse s'est appuyé sur une CRBM de SIEPEL qui a servi de référence et a été progressivement modifiée selon les méthodes présentées. Ces optimisations ont pris en compte les critères normatifs liés à la LUF et aux propriétés d'homogénéité et d'isotropie des champs à l'intérieur du volume de travail. Une fois la géométrie optimale trouvée, des mesures identiques ont été effectuées dans la CRBM de référence et ses configurations modifiées. Après avoir décrit les protocoles de test, nous analysons l'apport des modifications géométriques. En premier lieu, nous avons examiné l'impact de ces modifications géométriques sur les critères statistiques mais également sur d'autres indicateurs tel que le facteur de qualité.

Dans le chapitre 4, nous proposons de considérer l'impact de la variation de charge sur les propriétés d'une CRBM. L'ajout de charge a un impact évident sur le facteur de qualité mais modifie également les propriétés statistiques de la CRBM. Il est donc important de bien comprendre les phénomènes en jeu et d'éventuellement trouver un compromis

dans le cas d'une utilisation particulière. Nous avons examiné conjointement l'effet des charges insérées sur le niveau de pertes et les différents indicateurs des propriétés statistiques du champ.

Enfin, un nouveau type de brassage est présenté dans le chapitre 5. Ce système est constitué de plaques métalliques, placées dans l'enceinte à proximité des parois, permettant à l'aide d'un interrupteur d'établir une connexion ou non à la masse de la cage. Grâce à ce système, le volume de travail est préservé et l'introduction de plaques n'induit pas une baisse du facteur de qualité. Le concept est d'abord introduit ainsi que l'environnement de test choisi pour réaliser cette étude. L'apport de ce nouveau type de brassage est ensuite démontré et comparé au système de brassage normatif.

L'apport des méthodes employées afin de répondre aux objectifs de la thèse sera résumé en conclusion.

# Chapitre 1

## Etat de l'art sur l'amélioration des performances des CRBM

### 1.1 Introduction sur les CRBM

Les chambres réverbérantes à brassage de modes sont des cavités parallélépipédique blindées équipées d'un dispositif de brassage qui modifie les conditions de résonance de la cavité pour obtenir un champ aléatoire. Ces cavités sont surdimensionnées, i.e., de dimensions très supérieures à la longueur d'onde considérée. Elles ont la capacité de produire des champs forts (plusieurs milliers de V/m) qui sont statistiquement isotropes et uniformes avec une puissance d'entrée optimisée. Ces cavités sont constituées de parois métalliques permettant de minimiser les fuites électromagnétiques vers l'extérieur mais aussi d'empêcher les ondes électromagnétiques d'y pénétrer. Ainsi, ce type de structure est un environnement hermétique aux ondes électromagnétiques. Le mot *réverbérant* désigne le fait que les ondes électromagnétiques émises par une source se réfléchissent sur les parois de la cavité. L'architecture externe type d'une CRBM est présentée en figure 1.1.



FIGURE 1.1 – Architecture extérieure type d'une CRBM.

Un générateur de signaux radio-fréquences (RF), généralement relié à un amplificateur de puissance, envoie un signal à une antenne placée dans la cavité qui transforme

## CHAPITRE 1. ETAT DE L'ART SUR L'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DES CRBM

---

ce signal en ondes électromagnétiques qui se réfléchissent sur les parois. Un dispositif de brassage permet l'obtention d'un champ aléatoire uniforme dans l'enceinte. Les procédures de test décrites dans les normes internationales relatives aux CRBM se basent sur un brassage de type mécanique. Celui-ci consiste à insérer un objet métallique dans l'enceinte, appelé brasseur de modes. Pour être efficace à toutes les fréquences (surtout en basses fréquences), le brasseur doit être suffisamment large par rapport aux dimensions de la cage. En effet, étant donné que la fréquence la plus basse d'utilisation d'une chambre est liée à ses dimensions, le processus de brassage ne sera efficace que si les dimensions du brasseur sont suffisamment larges en regard de la longueur d'onde donc de la fréquence. L'expérience de SIEPEL [9] montre qu'en moyenne le volume du brasseur doit représenter approximativement 8% du volume complet de la cavité. Par ailleurs, pour obtenir de meilleures performances, il est préférable de donner la priorité au diamètre du brasseur plutôt qu'à sa hauteur. C'est pourquoi plusieurs types de brasseur existent en fonction de la taille de la CRBM dans laquelle il est présent (figure 1.2).



FIGURE 1.2 – Différents types de brasseurs mécaniques.

Ce brasseur est ensuite mis en rotation pour obtenir sur un tour complet un champ statistiquement isotrope et uniforme dans l'enceinte. En raison des propriétés d'uniformité, il n'y a pas de contraintes sur la position de l'objet sous test (OST) au sein du volume

utile et il n'est pas nécessaire de le faire tourner au cours du test. Les données sont ensuite collectées à l'aide d'un dispositif de réception : une antenne pour collecter les données de puissance et une sonde de champ isotropique pour les composantes de champ. La figure 1.3 présente un schéma de l'installation type d'une CRBM pour réaliser son calibrage.

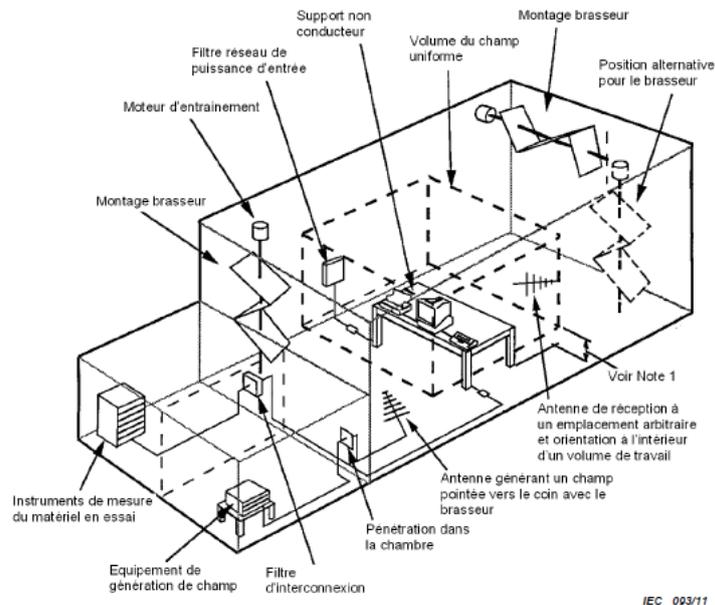


FIGURE 1.3 – Schéma de l'installation type d'une CRBM tiré de la norme EN 61000-4-21 [7].

Le champ dans une chambre réverbérante est engendré par la superposition d'un ensemble de modes de la cavité. Si la densité de modes et le recouvrement modal sont suffisants (sous-section 2.1.2), alors la modification des conditions aux limites (lors de la rotation du brasseur de modes) modifie significativement la cartographie du champ EM. Le modèle de référence est celui proposé par D. Hill [17, 18]. Son hypothèse est que le champ à l'intérieur d'une CRBM peut être décomposé en un grand nombre d'ondes planes qui se réfléchissent sur les parois de la cavité, la rotation du brasseur permettant de rediffuser ces ondes dans des directions aléatoires. Cette hypothèse n'est valable que pour un régime où le recouvrement entre modes de résonance est élevé c'est-à-dire lorsque les dimensions de la cavité sont grandes devant la longueur d'onde (pour avoir une densité de modes élevée) et pour un facteur de qualité fini. En-dessous d'un certain recouvrement modal, ce modèle n'est plus pertinent. L'objet de notre étude est de comprendre et d'améliorer le fonctionnement des CRBM lorsque le recouvrement modal est modéré.

## 1.2 Etat de l'art

De nombreuses études ont été menées sur l'amélioration des propriétés du champ en CRBM. Nous présentons dans cette section une liste non exhaustive des références.

Plusieurs études ont porté sur les paramètres influant sur les propriétés des CRBM. L'impact du recouvrement modal en CRBM a été mis en lumière par A. Cozza [19] à travers la modélisation de la propagation d'ondes dans les grandes cavités dont les CRBM. M.I. Andriés [20] a travaillé quant à lui à la recherche de méthodes expérimentales dans le but de mesurer et contrôler les paramètres influants sur les propriétés des signaux générés à l'intérieur d'une CRBM, comme l'indépendance entre échantillons ou le facteur de qualité dans l'enceinte. D'autres travaux ont porté sur l'impact de l'équipement sur les propriétés des CRBM. F. Hoëppe [21] a analysé le comportement électromagnétique des CRBM via deux méthodes : un outil analytique basé sur le fonctionnement modal d'une cavité et des simulations numériques. Il a ainsi appréhendé les limites de fonctionnement des CRBM en termes de volume utile et de fréquence notamment liées à la forme du brasseur, et l'influence de l'équipement sous test sur ces limites. En s'appuyant sur des techniques de modélisation par éléments finis pour déterminer les modes, G. Orjubin [22] a proposé une nouvelle modélisation des CRBM en basses fréquences basée sur une décomposition modale. Son travail de recherche a montré l'effet qu'apporte la rotation du brasseur sur chacun des modes présents dans une bande de fréquence.

Ces nombreux travaux ont mis en lumière une des problématiques des CRBM en CEM : leur limite de fonctionnement en basses fréquences. En effet, les modèles classiques sont relatifs à des fonctionnements idéaux correspondant à un fonctionnement asymptotique à très hautes fréquences, et ne sont pas adaptés à la prédiction du comportement d'une CRBM réelle en dehors de cette zone de fonctionnement. Dans les bandes fréquentielles pour lesquelles le fonctionnement d'une CRBM ne peut être considéré comme idéal, l'objectif est double : d'une part, il est important d'être capable de prédire le fonctionnement de la CRBM dans ces conditions, d'autre part, il peut être recherché de faire tendre son fonctionnement vers celui attendu idéalement. Les propriétés recherchées sont l'obtention d'un champ homogène et d'un haut niveau de champ dans l'enceinte tout en abaissant la LUF de la CRBM considérée. Cette partie présente les recherches permettant cette amélioration. Cet état de l'art concerne l'examen du comportement du champ dans le spectre de fréquences où le recouvrement modal est modéré et les solutions envisagées dans le but de diminuer la LUF d'une CRBM.

Avant de poursuivre l'état de l'art, précisons qu'il existe différentes façons de déterminer la LUF d'une CRBM. Comme nous en avons fait mention, le critère normatif définit la LUF d'une CRBM comme la fréquence à partir de laquelle elle respecte le gabarit normatif d'uniformité statistique du champ tout en effectuant un nombre minimal de positions de brasseur de modes. D'autres méthodes existent telle que la détermination de la fréquence minimale à partir de laquelle une CRBM fonctionne statistiquement de façon quasi-idéale [23, 24]. Cette méthode est basée d'une part sur l'évaluation du taux de rejet des lois de distribution du champ électromagnétique obtenu au sein du volume utile de la CRBM en comparaison des lois prévues par le modèle idéal d'une CRBM défini par Hill [17, 18] mais également sur le nombre de réalisations non corrélées obtenues sur une rotation du brasseur de modes. La fréquence minimale du régime « quasi-idéal » de la CRBM est alors obtenue en choisissant des valeurs seuils judicieuses pour chacun

de ces deux critères. Une autre méthode détermine la LUF d'une CRBM à l'aide d'une approche théorique basée sur le recouvrement modal [25]. En prenant en compte le facteur de qualité composite, le nombre de modes excitables est calculé comme une fonction de la fréquence centrale de chaque bande de brassage. Une relation a également été établie entre l'erreur relative sur la variance normalisée de la densité d'énergie électrique dans une CRBM et le nombre de modes excités. Afin d'atteindre la condition de surmode, un seuil acceptable de l'erreur relative sur la variance standardisée est proposé par le test d'ajustement ou *Goodness-of-fit test* (GOF test) d'Anderson Darling (AD). Une approche géométrique basée sur le spectre d'onde plane dans l'espace  $k$  est dans ce cas utilisé pour corréler les tests statistiques.

### 1.2.1 Chaoticité en CRBM

Les CRBM sont originellement de forme parallélépipédique afin de faciliter la mise en œuvre des tests. Les recherches de H.-J. Stöckmann à propos du chaos dans les résonateurs micro-onde [26] ainsi que sur la théorie des matrices aléatoires (TMA) ont permis, à partir des concepts développés dans le domaine du chaos quantique, l'émergence de l'idée d'ajouter des objets métalliques diffusants à l'intérieur d'une CRBM dans le but de la rendre chaotique [27, 28]. Contrairement au cas des systèmes parallélépipédiques pour lesquels il existe une solution analytique représentant l'évolution spatiale du champ, il n'existe plus de solution analytique dans une cavité chaotique. Avant d'évoquer le travail sur la chaoticité, l'ajout d'éléments diffusants a été envisagé par d'autres auteurs dont L. Arnaut [29, 30] qui a étudié l'influence de la géométrie de la chambre sur la densité modale en basses fréquences. Par la suite, les connaissances théoriques sur le fonctionnement des cavités chaotiques ont permis de caractériser le comportement statistique de plusieurs grandeurs physiques dans les CRBM chaotiques (distributions des intensités des composantes du champ électrique, des écarts entre fréquences de résonance et des largeurs de résonance) [31, 32]; ainsi, le fonctionnement statistique des CRBM chaotiques est décrit par des lois analytiques associées aux distributions de plusieurs paramètres, ce qui conduit à une meilleure maîtrise de leur fonctionnement que de celui de CRBM non chaotiques (en particulier pour des fréquences proches de la LUF, puisque le comportement asymptotique pour un recouvrement modal important, obtenu aux hautes fréquences, est prédit par le modèle de Hill précédemment cité [17, 18]).

La question se pose de transformer une cavité parallélépipédique en cavité chaotique. Des modifications simples à intégrer dans une CRBM industrielle ont été proposées afin de rendre cette solution attractive aussi bien pour les utilisateurs que pour les concepteurs de CRBM. Le travail de J.-B. Gros [33] ainsi que le travail antérieur de K. Selemani [34] expliquent comment rendre une CRBM chaotique par l'ajout de calottes dans l'enceinte munie de son brasseur. Leurs recherches ont abouti à l'amélioration des propriétés statistiques du champ dans une cavité chaotique par rapport à une cavité parallélépipédique pour des fréquences proches de la LUF. Un effet de localisation énergétique est par ailleurs observé autour du brasseur dans une CRBM classique, cet effet a été éliminé en remplaçant le brasseur de modes par une structure hémisphérique en translation contre

une paroi de la chambre [35].

La mise en évidence expérimentale des apports de ces modifications géométriques est moins évidente mais plusieurs études [36, 37] ont montré une plus grande fiabilité des mesures en CRBM chaotique en raison de la sensibilité réduite des résultats aux erreurs de positionnement de l'antenne de mesure. Cependant, quelques travaux ont montré un apport potentiellement faible. M. Magdowski et al. [38] et G. Andrieu [39] ont cherché à déterminer l'influence de l'ajout de petits objets sphériques ou rugueux dans la CRBM. M. Magdowski a observé la possible amélioration des critères d'homogénéité et d'isotropie normatifs du champ dans l'enceinte, G. Andrieu quant à lui s'est basé sur la méthode de « condition de bon brassage » (« well-stirred condition »). Cependant, les résultats expérimentaux obtenus ont montré une faible influence de ces modifications. Notre but est de clarifier l'apport de la chaotité en CRBM, spécialement pour des fréquences proches de la LUF. D'après l'article de M. Magdowski, l'absence d'effets observés pourrait être liée à la taille trop petite des calottes par rapport aux dimensions de la CRBM. C'est pourquoi pour notre étude, nous nous sommes appuyés sur les articles [40, 41] pour établir un cahier des charges quant à la géométrie à envisager. L'article [41] montre que les exigences statistiques de bon fonctionnement d'une CRBM sont davantage satisfaites avec l'augmentation de la complexité géométrique de la cavité sans brasseur mécanique. Ces cavités présentent un comportement spatial et spectral très proche du comportement prédit par la théorie des matrices aléatoires. En réduisant les surfaces parallèles dans la CRBM, on peut supprimer les premiers modes non-génériques et baisser la LUF d'une CRBM.

Dans l'article [40], une cavité classique et la même rendue chaotique par l'ajout d'un ou plusieurs diffuseurs sont comparées (figure 1.4). On peut par ailleurs observer sur cette figure les points d'évaluation du champ électrique dans le volume de travail ; nous nous appuyerons sur les conclusions de cette étude pour mettre en œuvre des modifications géométriques dans une CRBM industrielle. Il a été montré dans cet article une meilleure concordance avec les lois statistiques attendues dans le cas des cavités chaotiques par rapport aux cavités classiques. De meilleurs résultats ont également été obtenus avec les cavités chaotiques dans le cadre de l'étude du critère normatif d'uniformité du champ. Enfin, les cavités chaotiques montrent une amélioration des propriétés statistiques du champ et une réduction significative de l'impact des modes réguliers sur les fluctuations spectrales puisque les surfaces en parallèle sont réduites.

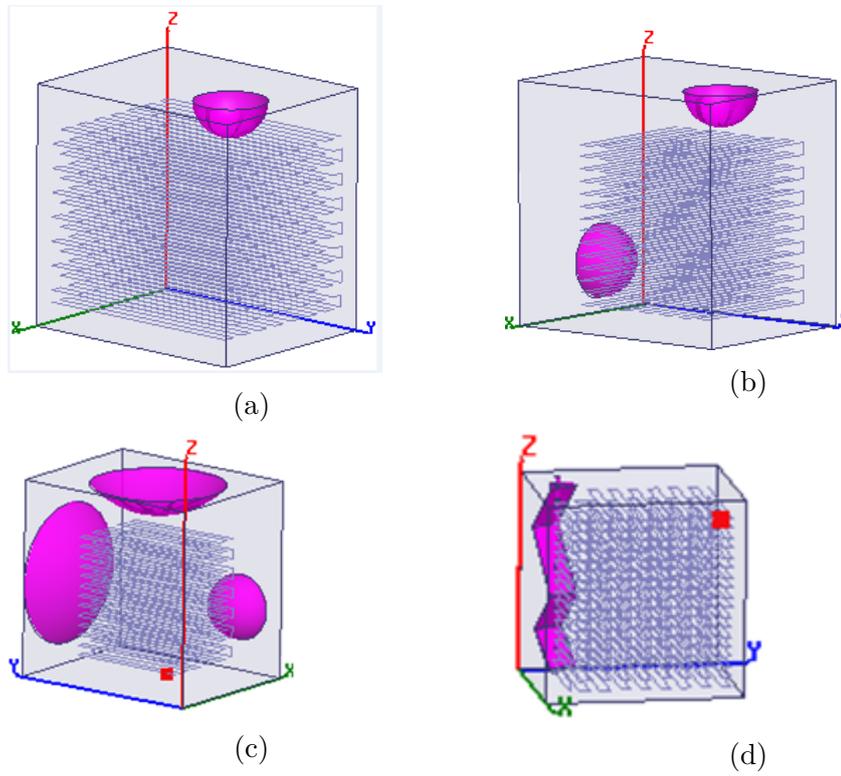


FIGURE 1.4 – Cavité parallélépipédique rendue chaotique par l'ajout d'un hémisphère (a), de deux hémisphères (b), d'un hémisphère et de deux calottes (c) et la cavité parallélépipédique avec brasseur (d) - Figure issue de [40].

Dans [41], différentes géométries chaotiques sont comparées selon les critères d'uniformité du champ notamment. Il est montré que de meilleures performances sont obtenues avec une géométrie de CRBM plus complexe, i.e. contenant davantage de calottes. Au cours de notre étude de l'effet induit par les modifications géométriques de la CRBM, plusieurs indicateurs seront analysés conjointement ; cette analyse ayant révélé une modification du facteur de qualité, celle-ci sera dans un second temps compensée afin de mettre en évidence l'effet lié à la seule variation de la géométrie.

## 1.2.2 Variation de charge en CRBM

Si certains auteurs se sont intéressés à la géométrie de la CRBM, d'autres ont cherché à modifier et optimiser ses propriétés en modifiant son niveau de pertes. Les normes internationales relatives aux CRBM [6, 7] mentionnent le fait qu'en ajoutant des pertes dans l'enceinte il est possible de diminuer la LUF. Cependant, cet ajout induit également une baisse du facteur de qualité et du champ normalisé dans l'enceinte.

De nombreux projets présentent des études sur des CRBM chargées à travers l'estimation de différents indicateurs. Dans le cadre d'une collaboration entre partenaires du groupe de travail PICAROS [42], l'impact de la charge sur l'uniformité statistique

du champ a été éprouvé. Dans sa thèse, H. Boulzazen [43] a également analysé l'effet de la charge sur les propriétés statistiques du champ en CRBM que ce soit l'homogénéité statistique du champ dans le volume utile ou les critères normatifs pour apporter plus d'éclaircissements à son travail. Il a mis en évidence 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. A travers des comparaisons entre simulations et mesures, les auteurs de l'article [44] ont développé un modèle approximatif pour calculer la section efficace absorbante moyenne de différents matériaux absorbants. Dans l'article [45] les pertes en CRBM sont examinées à la fois d'un point de vue général mais aussi pour déterminer la sensibilité de la technique de mesure. En effet, les propriétés d'isotropie et d'uniformité du champ sont propres à une enceinte réverbérante de géométrie variable et permettent de l'utiliser comme un outil de test utile pour mesurer la puissance rayonnée moyenne à partir de la densité d'énergie à l'intérieur de l'enceinte. Enfin, on peut mentionner l'article [46] dans lequel les auteurs développent un modèle d'absorption dans une CRBM utilisant des mesures de constantes de temps pour caractériser les absorbants à travers leurs sections efficaces absorbantes ; cette analyse permet ainsi un contrôle fin du chargement de l'enceinte. Une méthode basée sur la section transversale d'absorption d'un matériau absorbant est présentée dans l'article [47] afin de prédire notamment la bande de cohérence et la fonction de transfert de puissance d'une CRBM. En mesurant les paramètres  $S$  dans une CRBM vide et dans une CRBM chargée, il est possible de prédire leurs caractéristiques pour d'autres conditions de charge. Enfin, l'article [23] présente une méthode capable de déterminer la fréquence minimale où une CRBM fonctionne de façon quasi-idéale pour réaliser des tests d'immunité et d'émission. Ce travail montre qu'en insérant une petite quantité de charge dans l'enceinte, on peut réduire significativement cette fréquence. Cette étude montre également que l'insertion d'une charge optimale dans une CRBM améliore le critère d'uniformité du champ. La figure 1.5 tirée de l'article [23] présente une CRBM contenant des absorbants pyramidaux en mousse polyuréthane chargée de carbone.

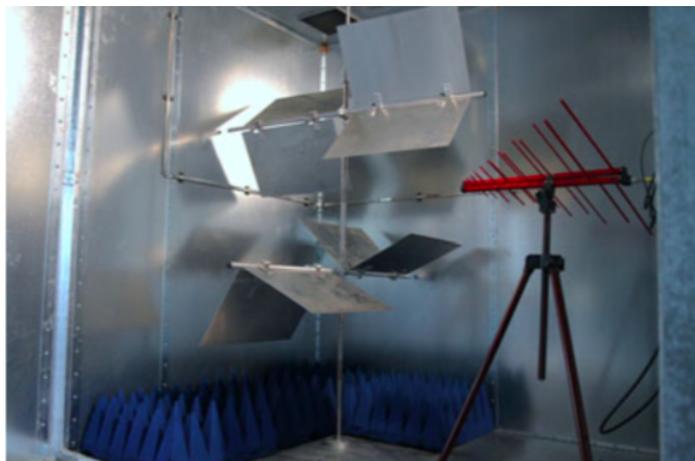


FIGURE 1.5 – CRBM contenant des absorbants mousse - Tirée de l'article [23].

Les auteurs montrent qu'en chargeant une CRBM, on peut optimiser son fonctionnement en basses fréquences et diminuer la fréquence à partir de laquelle la chambre fonctionne quasi-idéalement. Pour définir cette fréquence, une méthode originale basée sur l'évaluation des distributions de champ électromagnétique et du nombre de réalisations non corrélés est proposée dans cet article.

En nous appuyant sur ces travaux, nous avons recherché une charge optimale à introduire en CRBM afin d'en améliorer les propriétés. En premier lieu, nous nous sommes inspirés de ces recherches pour choisir le matériau absorbant et la quantité de charge à insérer dans l'enceinte. Ensuite, nous avons ajusté nos essais pour trouver une solution performante dans le but de décroître la LUF d'une CRBM tout en conservant un champ normalisé élevé et des propriétés satisfaisant aux exigences d'utilisation.

### 1.2.3 Systèmes de brassage en CRBM

La forme parallélépipédique de la cavité étant la plus simple à mettre en œuvre pour réaliser des tests, l'axe le plus développé a été l'optimisation du brasseur de modes en gardant une cavité parallélépipédique [48, 49, 50, 51]. Plusieurs techniques de brassage existent, nous en présentons une liste non exhaustive ici.

- Les normes internationales relatives aux CRBM ne considèrent que le brassage mécanique [52]. Ainsi, c'est principalement celui qui nous intéresse dans le cadre de ces travaux. Ce type de brassage consiste à insérer un objet métallique dans la cavité qui par rotation modifie les conditions aux limites au sein de la CRBM. La rotation d'un brasseur mécanique constitué de pales électriquement conductrices de forme complexe permet une variation virtuelle des dimensions de la chambre (figure 1.2). Ce brasseur assure ainsi le changement des conditions aux limites localement, dans le volume de rotation. Les configurations de champ sont ainsi modifiées au cours de la rotation du brasseur. Le nombre de configurations décorréélées réalisées au cours de la rotation dépend de plusieurs paramètres dont la géométrie du brasseur et le rapport entre le volume de la CRBM et la fréquence. Sur un tour complet, le champ obtenu dans une chambre convenablement brassée est considéré comme homogène et isotrope à l'intérieur de la cavité (figure 1.6 tirée de la fiche technique des CRBM de SIEPEL [10]). On peut mentionner que l'on peut parfois considérer plusieurs brasseurs.
- Le brassage de source [53, 54] consiste à déplacer la source d'émission dans l'enceinte. Ce procédé joue sur la variabilité du niveau d'excitation modale associée à la position relative de la source par rapport aux noeuds et aux ventres des champs modaux constituant l'onde stationnaire. On peut également modifier l'orientation de l'antenne source, on parle alors parfois de brassage de polarisation.

- Il existe également le brassage électronique de modes [55, 17] qui consiste à sélectionner des groupes de  $N$  fréquences au voisinage d'une fréquence choisie  $f_0$  et de collecter les données de champ à ces fréquences. Les données obtenues s'apparentent alors à des variables aléatoires.
- Le concept de VIRC (Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber) et son implémentation sont introduits et développés dans les articles [56, 57]. Les VIRC sont des systèmes de chambre réverbérante en matériau flexible de type toile métallique où l'utilisation d'un brasseur mécanique interne n'est pas nécessaire, le brassage est réalisé par la vibration des parois au moyen d'un dispositif externe exerçant une force imprimant le mouvement de cette toile [58, 59]. Les avantages de ces systèmes sont leur portabilité et leur bas coût. Cependant, cette technique pose encore quelques difficultés comme la mise en œuvre, la maintenance et la gestion des temps d'exposition des appareils. Il est également difficile de calculer un facteur de qualité équivalent puisque le volume de travail de la structure n'est pas fixe [60]. Cependant, la technique est intéressante pour les essais in situ. Nous n'avons pas employé cette technique ici car nous nous sommes basés sur une CRBM existante modulaire en panneaux sandwich, spécialité de SIEPEL.

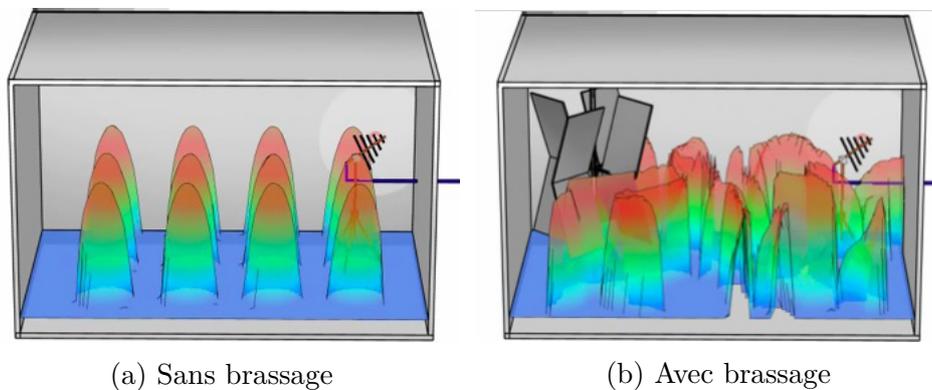


FIGURE 1.6 – Configuration du champ dans l'enceinte sans et avec dispositif de brassage [10].

Plusieurs techniques de brassage ont été étudiées via la modification des propriétés des parois. L'article [61] propose un modèle analytique qui caractérise la structure modale d'une cavité présentant des métamatériaux pour améliorer le fonctionnement des CRBM. L'article [62] montre à travers un modèle analytique et des simulations une augmentation de la densité modale en basses fréquences d'une chambre présentant des métamatériaux comme murs par rapport à une CRBM conventionnelle. Enfin, l'article [63] montre qu'il est possible de baisser la LUF d'une CRBM de 500 MHz à 153 MHz à l'aide de murs couverts de cellules unitaires en aluminium soutenues au moyen d'éléments en plastique. Les travaux menés jusqu'ici concernent à notre connaissance des bandes étroites. Les

articles mentionnés ne considèrent pas de système de brassage mais positionnent des plaques de manière à créer une surface équivalente de type FSS (Frequency Selective Surface) [64] qui permette d'agrandir artificiellement la cavité en imposant une condition de phase différente de celle que l'on aurait sur la paroi. Par exemple avec un déphasage de  $\pi/4$ , la cavité apparaît plus grande d'une demi longueur d'onde. On peut également mentionner les travaux de J.-B. Gros et al. [65] avec des panneaux composés de cellules dont la phase est commutée électriquement. Enfin, un brevet a été déposé par Marco Klingler [66] où la répartition du courant dans la structure de la CRBM est modifiée grâce à la présence d'éléments conducteurs dans l'enceinte, mais, à notre connaissance, cette solution n'a jamais été mise en œuvre.

### 1.3 Positionnement de ce travail

Nos recherches ont débuté dans la continuité des travaux sur les CRBM chaotiques. Nous nous sommes focalisés sur les changements géométriques à opérer afin de rendre chaotique une CRBM commerciale dans le but d'améliorer ses performances spécialement en basses fréquences, c'est-à-dire pour un régime où le recouvrement modal est modéré voire faible. Nous avons effectué d'importants changements (insertion de calottes de grandes dimensions) pour ne pas avoir de modifications trop légères comme mentionné dans l'article [38]. Pour rendre compte de l'impact des modifications géométriques réalisées, de nombreux indicateurs ont été étudiés en s'inspirant des normes et des précédents travaux, y compris le facteur de qualité afin de valider l'apport de cette solution. Ces critères, à la fois statistiques et normatifs, sont présentés et justifiés en détail dans nos travaux. Notre analyse a révélé une modification du facteur de qualité due à l'introduction des calottes dans l'enceinte. Pour compléter notre étude, nous avons poursuivi nos investigations par la compensation du facteur de qualité par une variation de la charge en CRBM afin de mettre en évidence l'effet lié à la seule variation de la géométrie.

En se basant sur un grand nombre d'indicateurs (en plus du nombre de réalisations non corrélées et du facteur de qualité), ce travail nous a menés à la recherche d'un compromis entre baisse du facteur de qualité et amélioration des performances en CRBM pour en diminuer la LUF. Le type de charge à insérer a également été étudié en nous appuyant sur les normes et les travaux précédemment réalisés (absorbants de type mousse polyuréthane ou en ferrite).

Un troisième axe de recherche a été analysé dans le but d'optimiser les propriétés des CRBM. Il s'agit d'un nouveau système de brassage basé sur la modification des conditions aux limites en CRBM à l'aide d'un changement d'état dans l'enceinte. Cette solution permet de ne pas avoir à faire de compromis sur le volume de travail. En nous basant sur les résultats prometteurs de l'utilisation des méta-matériaux sur les murs ainsi que le principe de commutation, nous allons chercher à développer un nouveau principe de brassage, potentiellement complémentaire à ceux existants, notamment performant proche de la LUF. Pour ce faire, plusieurs plaques métalliques de grandes dimensions sont connectées à la cage et, à l'aide d'interrupteurs, nous choisissons quelles plaques sont actives ou non.

## CHAPITRE 1. ETAT DE L'ART SUR L'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DES CRBM

---

Ce travail supplémentaire a été réalisé et validé sur les critères précédemment sélectionnés.

Une précision est à apporter quant au positionnement de ce travail. Les phases de test se sont déroulées à la fois dans la CRBM de référence de SIEPEL et dans les CRBM des laboratoires ESYCOM et IETR, mais également chez des clients de SIEPEL, ceci afin d'obtenir l'étude la plus riche possible grâce aux différentes instrumentations utilisées (ARV, amplificateurs, sondes de champ et de puissance...) et aux différentes dimensions de CRBM.

# Chapitre 2

## Indicateurs de fonctionnement et environnements de test

### Introduction

Nous avons vu dans l'introduction générale de ce document que l'objectif d'une CRBM est d'évaluer la compatibilité électromagnétique d'équipements électroniques, sous la forme de tests standardisés d'immunité rayonnée [7] ou d'émissivité rayonnée. Cet équipement joue un rôle crucial notamment pour le test d'équipements soumis à de fortes contraintes d'environnement électromagnétique, dans des domaines tels que l'aéronautique et l'automobile. La qualification de telles enceintes est une étape importante et préalable à toute utilisation en phase d'essais, en particulier pour cerner les limites de fonctionnement, notamment en fréquence.

Ce chapitre présente les indicateurs, relatifs aux CRBM, étudiés dans le cadre de notre travail de recherche. Ces paramètres permettent de décrire le comportement du champ dans une CRBM et de comparer les configurations d'intérêt. L'objectif de ces critères est d'évaluer les propriétés et les performances de la CRBM. Au cours de ce travail, nous allons chercher à valider l'intérêt ou non de différentes modifications de la chambre et pour cela, l'évolution des différents indicateurs sera attentivement examinée. Nous regroupons ces critères en deux catégories. Le premier groupe comporte les critères basés sur les normes internationales relatives aux CRBM. Le deuxième groupe concerne l'étude de deux modèles (la loi de Rayleigh et la loi de Pnini-Shapiro) permettant à la fois de décrire le comportement du champ en CRBM mais aussi de confronter les prédictions théoriques au comportement expérimental observé.

Ce chapitre est organisé de la façon suivante. Dans un premier temps, nous introduisons les critères évaluant le fonctionnement d'une CRBM i.e. les méthodes de calcul et rôles des indicateurs observés dans le cadre des CRBM. Ensuite, nous analysons ces critères suivant deux lois supports relatives à la distribution des champs électromagnétiques, la loi de Rayleigh et la loi de Pnini-Shapiro. Dans la dernière partie, nous décrivons de façon générale les environnements de test étudiés ainsi que le matériel requis lors des

nombreuses campagnes de mesures menées au cours de cette thèse.

## 2.1 Présentation des indicateurs

Durant ce travail de thèse, plusieurs indicateurs ont été analysés afin d'évaluer la qualité de fonctionnement d'une CRBM. Les propriétés de champ incluent l'amplitude, l'uniformité, l'isotropie et les observations portent sur les valeurs moyennes et les valeurs maximales des champs, l'efficacité de brassage et le facteur de qualité. Toutes ces grandeurs ne peuvent être examinées au moyen d'un critère unique. Dans une première section, nous étudions les critères définis selon les normes internationales. Les documents relatifs à ces standards servent de référence quant à l'utilisation et à la qualification des performances des CRBM. Bien que l'objectif principal des normes soit de vérifier l'uniformité spatiale du maximum de champ  $E$  et d'estimer le champ normalisé (à la puissance délivrée à l'entrée de l'antenne d'émission) dans l'enceinte, cela donne une indication pauvre sur les statistiques du champ lui-même. C'est pourquoi des recherches ont été menées afin d'enrichir la caractérisation du fonctionnement des CRBM. Dans [67], une redéfinition de l'intervalle de confiance du critère d'uniformité du champ défini selon les normes relatives aux CRBM a été proposée ; et l'article [24] propose une nouvelle méthode de détermination de la LUF d'une CRBM afin qu'elle puisse être considérée comme fonctionnant en régime « quasi-idéal ». Cette méthode est basée à la fois sur l'évaluation du taux de rejet des lois de distribution du champ électromagnétique obtenu au sein du volume utile de la CRBM en comparaison des lois prévues par le modèle idéal d'une CRBM défini par Hill mais également sur le nombre de réalisations non corrélées obtenues sur une rotation du brasseur de modes. La fréquence minimale du régime « quasi-idéal » de la CRBM est alors obtenue en choisissant des valeurs seuils judicieuses pour chacun de ces deux critères. L'article [25] présente également une nouvelle méthode de détermination de la LUF d'une CRBM basée sur le recouvrement modal. Pour affiner l'analyse d'une CRBM, des critères supplémentaires à ceux proposés dans les normes sont ainsi nécessaires. Ceux-ci couplés aux critères normatifs permettent d'analyser les propriétés spectrales et spatiales du champ dans l'enceinte de la CRBM à partir d'une étude statistique approfondie des données collectées. L'examen de ces critères permet également de confronter les lois communément admises quant à la description du champ en CRBM avec les données expérimentales.

### 2.1.1 Indicateurs normatifs

Les indicateurs normatifs sont basés sur les normes internationales. Les domaines d'application et les sections de ces documents relatives aux CRBM sont exposés dans le tableau 2.1.

CHAPITRE 2. INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT ET ENVIRONNEMENTS DE TEST

---

Norme	Section relative aux CRBM	Domaine	Fréquence	Test	Champ électrique
ISO 11452-11 Version 2010	Partie 11	Automobile	80 MHz à 18 GHz	Susceptibilité rayonnée (RS)	25 à 100 V/m CW
RTCA DO 160 Version G	20	Aéronautique	100 MHz à 18 GHz	Emission rayonnée (RE)	Jusqu'à 490 V/m CW Jusqu'à 7200 V/m PM
MIL STD 461 (RS103) Version 2015	5-21-4	Militaire	200 MHz à 40 GHz	RS	5 à 200 V/m CW
IEC/EN 61000-4-21 Version 2011	Intégralité du document	Automobile et industrie civile	80/200 MHz à 6/18 GHz	RE/RS	Civile 10 V/m Automobile 200 V/m

TABLE 2.1 – Tableau récapitulatif des principales normes internationales relatives aux CRBM.

Pour la norme EN 61000, nous nous appuyons sur la partie 4-21 relative à la CEM et plus particulièrement aux CRBM ayant pour intitulé « *Techniques d'essai et de mesure - Méthodes d'essai en chambre réverbérante* ». Elle concerne les domaines de l'automobile et de l'industrie civile. La norme MIL-STD 461 relative aux équipements militaires [68], la norme ISO 11452-11 dédiée au domaine automobile [6] et la norme RTCA DO 160G section 20 *Radio Frequency Susceptibility (Radiated and Conducted)* du document *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment* relatif au domaine aéronautique [8] ne seront pas approfondies dans ce manuscrit. En effet, l'ensemble des normes abordées sont proches concernant les critères utilisés. Le principal changement réside dans le nombre de déplacements nécessaires de la sonde en phase de calibrage. Par ailleurs, la norme EN 61000-4-21 est suffisante pour présenter ces critères et les procédés sont bien décrits et complets dans cette norme.

Pour qualifier le bon fonctionnement d'une CRBM, un protocole de mesure est décrit dans les normes. Ce protocole, en plus de définir les domaines d'application, fréquences, types de test (RS/RE Electromagnetic Interference *EMI*/Electromagnetic Susceptibility *EMS*), décrit également le matériel requis pour les essais, le nombre de positions du dispositif de mesure pour collecter les données ainsi que ses emplacements et les valeurs à atteindre pour un bon fonctionnement du système. Une fois la chaîne de mesure installée, les données de champ et/ou de puissance sont collectées dans l'enceinte pour chaque fréquence aux 8 emplacements du volume utile aussi appelé volume de travail (4

positions basses et 4 positions hautes) prévus par la norme EN 61000-4-21. Ces points de mesure doivent être distants d'au moins  $\lambda/4$  des parois afin d'éviter les effets de bord,  $\lambda$  représentant la longueur d'onde définie selon la fréquence  $f$  et la célérité  $c$  de l'onde dans l'air par l'équation  $\lambda = \frac{c}{f}$ . D'après [5] pages 178-179, les propriétés d'un champ désordonné se manifestent à une distance au moins égale à  $\lambda/4$  de toute paroi imposant un champ électrique tangentiel nul. En effet, pour un mode donné (ou un groupe de modes donnés), dans l'hypothèse d'une distribution spatiale sinusoïdale du champ, l'amplitude maximale des modes ne peut être retrouvée en deçà de cette distance.

Selon la norme EN 61000-4-21, il est recommandé de collecter les composantes cartésiennes de champ à l'aide d'une sonde de champ triaxiale et les données de puissance à l'aide d'une antenne de réception. Il est cependant possible d'utiliser d'autres types d'instrumentation. Dans le cadre de nos travaux, nous avons testé différentes CRBM avec divers instruments de mesure. Pour certaines, les recommandations normatives ont été suivies, pour d'autres un analyseur de réseau vectoriel (ARV) a été utilisé afin de collecter les paramètres de diffusion  $S$  des antennes présentes dans la cavité (l'utilisation de différents types d'instrumentation sera justifiée dans la section 2.3). Dans le but de rester cohérents dans nos analyses, les résultats présentés dans ce manuscrit sont calculés sur la base des données de champ et non des données de puissance reçue. Par ailleurs, une sonde de champ se veut locale et non invasive contrairement à une antenne log-périodique ; les résultats obtenus sont ainsi plus précis pour effectuer une étude des propriétés statistiques des champs. C'est pourquoi nous nous appuyons pour nos analyses sur les données de champ et non de puissance.

### Facteur de qualité

Dans une CRBM, l'énergie électromagnétique est confinée dans l'enceinte. Cependant, les parois, antennes et autres éléments présents dans la cavité contribuent à la dissipation de cette énergie. Le facteur de qualité  $Q$  permet une estimation (indirecte) du niveau d'énergie dans la cavité. Il peut être défini comme le ratio entre l'énergie électromagnétique emmagasinée dans la cavité et l'énergie transmise dans la cavité :

$$Q = \frac{\omega \epsilon_0 E^2 V}{P_t} \quad (2.1)$$

où

- $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda}$  représente la pulsation,
- $\epsilon_0$  est la permittivité du vide ici soit  $8,854187 \cdot 10^{-12}$  F.m<sup>-1</sup>,
- $E$  est l'amplitude de la valeur efficace moyenne de l'intensité du champ électrique dans la chambre,
- $V$  correspond au volume de la cage,
- $P_t$  est la puissance transmise dans la chambre.

Nous estimons de deux façons différentes le facteur de qualité en CRBM en fonction des données collectées.

La première approche adoptée se base sur [69, 70] qui traitent de la mesure du facteur de qualité à partir d'un ARV avec la possibilité de collecter les données à l'aide d'une ou deux antennes en utilisant des méthodes équivalentes.

La puissance transmise dans la chambre équivaut à :

$$P_t = (1 - |\langle S_{11} \rangle_\tau|^2) \eta_1 P_{inj} \quad (2.2)$$

Avec

- $S_{11}$  le coefficient de réflexion complexe de l'antenne d'émission aussi nommée antenne 1,
- $P_{inj}$  la puissance injectée au connecteur de l'antenne d'émission,
- $\eta_1$  l'efficacité de rayonnement de l'antenne considérée. Si les données des fabricants ne sont pas disponibles, on peut estimer le rendement à 0,75 pour les antennes log-périodiques (il a été montré que cette valeur est sous-évaluée [71]) et 0,9 pour les antennes cornets [52],
- $\langle \cdot \rangle_\tau$  correspond au moyennage sur les  $\tau$  positions de brasseur.

Au port 2 connecté à l'antenne de réception aussi appelée antenne 2, la puissance reçue au connecteur de l'antenne  $P_{rec}$ , peut s'écrire comme :

$$P_{rec} = (1 - |\langle S_{22} \rangle_\tau|^2) \eta_2 P_{rec,I} \quad (2.3)$$

où  $S_{22}$  correspond aux coefficients de réflexion complexes de l'antenne de réception ici notée antenne 2,  $\eta_2$  est l'efficacité de rayonnement de l'antenne de réception et  $P_{rec,I}$  correspond à la puissance reçue sur l'antenne dans le cas où elle est parfaitement efficace et adaptée. Dans l'hypothèse d'un champ aléatoire idéal, la puissance moyenne reçue par l'antenne  $\langle P_{rec,I} \rangle$  s'écrit :

$$\langle P_{rec,I} \rangle_\tau = \frac{\lambda^2 E^2}{8\pi Z_0} = \frac{\langle P_{rec} \rangle_\tau}{(1 - |\langle S_{22} \rangle_\tau|^2) \eta_2} \quad (2.4)$$

où  $Z_0$  peut être considéré comme l'impédance en espace libre associée à chaque onde plane individuelle composant le spectre complet avec  $Z_0 = 120\pi$ . Le terme  $\frac{\lambda^2}{8\pi}$  correspond à la surface équivalente de l'antenne d'émission dans la chambre.

On peut relier le coefficient de transmission complexe entre les deux antennes  $S_{21}$  et la puissance reçue au niveau de l'antenne de réception comme suit :

$$\langle |S_{21}| \rangle_\tau^2 = \frac{\langle P_{rec} \rangle_\tau}{P_{inj}} \quad (2.5)$$

Au moyen d'une antenne d'émission et d'une antenne de réception, il est ainsi possible d'évaluer le coefficient de qualité à partir de la matrice de diffusion :

$$Q_{2ant} = \langle |S_{21}|^2 \rangle_\tau \frac{Z_0 \omega \epsilon_0 V}{\frac{\lambda^2}{8\pi} (1 - |\langle S_{11} \rangle_\tau|^2) (1 - |\langle S_{22} \rangle_\tau|^2) \eta_1 \eta_2} \quad (2.6)$$

Pour mesurer  $S_{11}$  et  $S_{22}$ , les deux antennes sont en émission/réception.

Dans le cas où une seule antenne est présente, seul le coefficient de réflexion de cette antenne est nécessaire. La mesure de la variance de la variable  $S_{11}$  est proportionnelle à l'énergie emmagasinée dans la chambre pourvue d'une unique antenne. Le facteur de qualité est calculé comme suit :

$$Q_{1ant} = \left\langle |S_{11} - \langle S_{11} \rangle_{\tau}|^2 \right\rangle_{\tau} \frac{Z_0 \omega \epsilon_0 V}{\frac{\lambda^2}{4\pi} (1 - |\langle S_{11} \rangle_{\tau}|^2)^2 \eta_1^2} \quad (2.7)$$

L'intérêt de n'utiliser qu'une seule antenne pour mesurer le facteur de qualité d'une cavité est de limiter l'installation afin d'éviter des câbles de passage pour les antennes. Par ailleurs, d'après l'étude de l'article [70], les résultats de mesure obtenus avec une seule antenne sont très similaires à ceux obtenus à l'aide de deux antennes. C'est pourquoi, pour l'ensemble de nos mesures réalisées à l'aide d'un ARV, nous estimerons le facteur de qualité à l'aide d'une seule antenne via l'équation (2.7).

La deuxième approche consiste à estimer le facteur de qualité directement via les données de puissance :

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{\langle P_{recue} \rangle_{\tau}}{\langle P_{entree} \rangle_{\tau}} \right\rangle_n \quad (2.8)$$

Où

- $V$  est le volume de la chambre en  $\text{m}^3$ ,
- $\lambda$  est la longueur d'onde en m,
- $\frac{\langle P_{recue} \rangle_{\tau}}{\langle P_{entree} \rangle_{\tau}}$  est le rapport de la puissance reçue sur la puissance d'entrée, chacune d'elles étant moyennée sur une séquence complète du brasseur,
- $\langle \cdot \rangle_n$  indique la moyenne sur les  $n$  positions de sonde de champ,
- $\eta_{Tx}$  et  $\eta_{Rx}$  sont les efficacités de rayonnement (adimensionnelles) de l'antenne d'émission (Tx) et de la sonde de champ (Rx).

Le facteur de qualité est d'ailleurs défini de cette manière dans les normes. Comme nous en avons fait mention au début de cette section, les données manipulées sont les composantes cartésiennes de champ, c'est pourquoi, lors du traitement, nous utilisons l'équation (2.4) dans l'équation (2.8) pour calculer le facteur de qualité. Ces calculs sont considérés pour chaque position de mesure puis ces résultats sont moyennés sur l'ensemble des positions. Ainsi, l'équation (2.7) sera utilisée dans le cadre de l'utilisation d'un ARV et l'équation (2.8) pour les autres cas.

On peut également estimer l'énergie stockée dans la cavité par une approche temporelle [72, 73]. Cette approche nécessite de connaître le coefficient de réflexion ou de transmission complexe, or, dans la plupart des mesures réalisées au cours de ce travail de recherche, ce n'est pas le cas ; c'est pourquoi une approche fréquentielle a été employée.

### Détermination du nombre d'états non corrélés

Les CRBM sont des enceintes blindées ayant la capacité de produire des champs statistiquement isotropes et uniformes. Les fréquences d'apparition des premiers modes de résonance dépendent des dimensions de la cavité. Ainsi, une modification des dimensions d'une CRBM induit un changement des fréquences de résonance. Pour modifier les modes ou leur pondération sans modifier la taille de la cavité, on utilise des dispositifs permettant de modifier les conditions de résonance de la cavité pour obtenir un champ aléatoire, c'est le *brassage*. Les différents types de brassage sont explicités au chapitre introductif de ce document.

Tout processus de brassage conduit à l'observation d'un certain nombre d'états supposés aléatoires de la chambre. Au cours d'un test ou d'un calibrage, on collecte ainsi un échantillon de taille  $N_{ech}$ . Ce nombre peut correspondre par exemple à  $N_{ech}$  positions de brasseur, plus généralement à  $N_{ech}$  changements de conditions aux limites. Quel que soit le type de brassage, il est impératif de calculer le nombre équivalent d'états non corrélés pour une fréquence donnée afin de pouvoir appliquer des statistiques aux données obtenues. En effet, si ce nombre est trop faible, les données sont alors corrélés et la statistique de la mesure n'est observée que sur un nombre réduit d'observations. Ces états sont appelés états *décorrélés*. Pour les évaluer, on se base sur le calcul du coefficient de corrélation entre états. Son estimation conduit à la vérification de l'efficacité de brassage dans l'enceinte i.e. sa faculté à produire un champ statistiquement uniforme à la fréquence considérée de la mesure.

Le coefficient de corrélation s'obtient de diverses manières en fonction de la technique de brassage utilisée. Nous exposons dans ce manuscrit les techniques que nous avons employées.

Plusieurs articles, bien que n'utilisant pas exactement ces méthodes, ont servi pour créer les algorithmes des méthodes citées ci-dessous [74, 75, 76].

#### Méthode normative

La méthode normative consiste à calculer le coefficient de corrélation entre états adjacents. D'après les normes, ce sont les positions de brasseur successives. Le coefficient de corrélation  $r$  peut alors être calculé en utilisant la fonction d'autocorrélation à partir des données de champ :

$$r = \frac{\frac{1}{N_{ech}-1} \sum_i^{N_{ech}} (x_i - u_x)(y_i - u_y)}{\sqrt{\left(\frac{\sum_i^{N_{ech}} (x_i - u_x)^2}{N_{ech}-1}\right) \left(\frac{\sum_i^{N_{ech}} (y_i - u_y)^2}{N_{ech}-1}\right)}} \quad (2.9)$$

dans laquelle  $y_i$  est la même distribution que  $x_i$ , mais décalée d'une réalisation (donc d'une position du brasseur de sorte que  $y_i = x_{i+1}$ ) et  $N_{ech}$  est le nombre de réalisations pris sur l'ensemble des états de la CRBM (i.e. sur une rotation complète du brasseur dans le cas normatif).  $u_x$  et  $u_y$  sont des moyennes des données collectées aux différentes positions du brasseur.

Par convention de la norme EN 61000-4-21 [52] section A.3, les données sont

considérées comme non corrélées lorsque la valeur de l'amplitude du coefficient de corrélation est inférieure à la valeur seuil  $r_{s_{norme}}$  [77] obtenue à partir de l'ajustement aux données numériques pour  $N_{ech}$  non inférieur à 100 :

$$r_{s_{norme}} = \frac{1}{e} \times \left( 1 - \frac{7,22}{N_{ech}^{0,64}} \right) \quad (2.10)$$

Pour un nombre infini  $N_{ech}$ ,  $r_{s_{norme}} \approx \frac{1}{e}$ . Précisons que selon cette approche normative, le coefficient de corrélation est examiné en un point spatial ou en plusieurs points successivement.

Pour obtenir une estimation du nombre de réalisations non corrélées que le brasseur peut fournir à une fréquence particulière, on divise le nombre total de réalisations sur une rotation complète par le nombre de pas nécessaires pour réduire le coefficient de corrélation à moins de  $r_{s_{norme}} \approx 0,37$ .

#### Méthode de la taille effective de l'échantillon

La méthode de la taille effective de l'échantillon basée sur l'article [78] et la thèse de C. Lemoine [79], consiste à calculer le coefficient de corrélation entre états adjacents du brasseur de la même manière que la méthode normative.

Une fois le coefficient de corrélation obtenu, deux situations peuvent se présenter. Dans le cas où le coefficient de corrélation  $r$  est inférieur à  $r_{s_{decimation}} = 0,55$ , on suppose que l'échantillon est assimilable à un processus autorégressif d'ordre 1 et on en déduit directement une approximation de la taille effective de l'échantillon. Dans le cas contraire, on procède alors à une décimation de l'échantillon de départ pour retomber dans la première situation. En synthèse, cette estimation est réalisée comme suit :

1. Hypothèse 1 :  $|r| < r_{s_{decimation}}$  (autocorrélation d'ordre 1) :

$$N_{eff} \approx N_{ech} \times \frac{(1 - |r|)}{(1 + |r|)} \quad (2.11)$$

2. Hypothèse 2 :  $|r| \geq r_{s_{decimation}}$ , on décime :

$$N_{ech} = \frac{N_{ech}}{2} \quad (2.12)$$

Et on revient à l'hypothèse 1 avec  $N_{ech} = \frac{N_{ech}}{2}$ .

Grâce à cette technique, nous pouvons estimer le nombre équivalent de positions de brasseur non corrélées dans l'enceinte à chaque fréquence.

#### Méthode de la matrice de corrélation

La méthode de la matrice de corrélation est basée sur le calcul du coefficient d'intercorrélation entre deux états de CRBM. On ne considère plus ici l'autocorrélation entre les seuls états obtenus consécutivement mais la corrélation est désormais analysée pour tous les couples de positions de brasseur sur la base de relevés de mesure en différents points

de l'espace. Un élément  $(i, j)$  de la matrice de corrélation est ainsi constitué du calcul de la fonction de corrélation entre la série de mesures relevée en position  $i$  du brasseur et celle relevée en position  $j$  du brasseur.

Une fois le coefficient de corrélation entre états obtenu, nous pouvons évaluer le nombre d'états de CRBM non corrélés en nous basant sur l'article de G. Gradoni et al. [80] où le nombre d'états non corrélés est évalué en divisant le nombre d'éléments de la matrice de corrélation  $N_{ech}^2$  par le nombre d'éléments supérieurs à la valeur seuil  $r_{sGradoni}$ , avec  $r_{sGradoni} = \frac{1}{e}$ . Cette méthode est notamment reprise dans la thèse de C. Lemoine [79].

#### Méthode basée sur la théorie de l'information

Enfin, la dernière méthode appliquée dans ce manuscrit est celle de R. J. Pirkl et al. [81] basée sur le calcul des valeurs propres de la matrice de corrélation :

$$N_{eff} = \frac{(\sum_{i=1}^{N_{ech}} \lambda_n)^2}{\sum_{i=1}^{N_{ech}} \lambda_n^2} \quad (2.13)$$

Avec  $\lambda_n$  les valeurs propres de la matrice de corrélation. Au sens de la théorie de l'information, si les valeurs propres de la matrice de corrélation (covariance) sont toutes significatives (non nulles) et identiques alors il n'y a pas redondance d'information et  $N_{eff} = N_{ech}$ . Au contraire, si l'on trouve par exemple une seule valeur propre non nulle, alors les informations apportées par tous les états sont redondantes et  $N_{eff} = 1$ .

Il est également possible d'utiliser une approximation de cette méthode :

$$N_{eff} = \frac{N_{ech}^2}{\sum |r_{ij}|^2} \quad (2.14)$$

Il est plus pratique d'utiliser l'approximation de la méthode basée sur la théorie de l'information car elle ne nécessite pas le calcul des valeurs propres de la matrice de corrélation.

Comparons ces différentes méthodes pour une CRBM classique de dimensions 2,48 x 2,48 x 2,86 m<sup>3</sup> pour 60 positions de brasseur et 8 positions de sonde de champ. Nous présentons les résultats de ces méthodes entre 200 et 900 MHz pour un pas fréquentiel de 2 MHz.

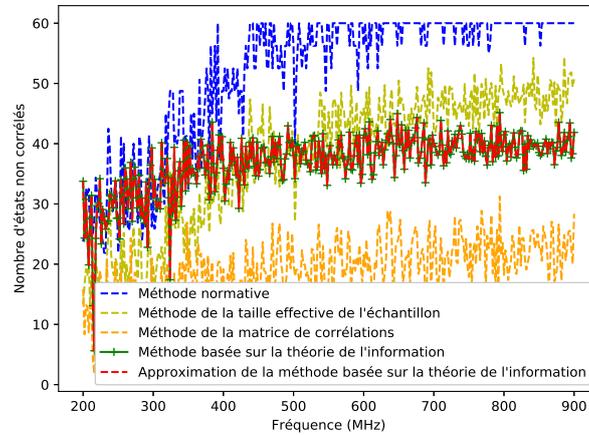


FIGURE 2.1 – Comparaison des méthodes de calcul du nombre d'états non corrélés dans l'enceinte d'une CRBM de SIEPEL (EOLE 400) en collectant l'amplitude du champ électrique.

D'après la figure 2.1, on constate que, selon la méthode employée, le nombre d'états non corrélés estimé dans une CRBM est très différent. A partir de 400 MHz, on constate des écarts allant du simple au double entre la méthode de la matrice de corrélation et les méthodes basées sur la théorie de l'information et de la taille effective de l'échantillon, et du simple au triple en considérant la méthode de la matrice de corrélation et la méthode normative. L'approximation de la méthode basée sur la théorie de l'information donne des résultats identiques à la méthode originale. En effet, d'après l'article de R.J. Pirkl et al., en reliant les sommations de l'équation (2.13) à la trace de la matrice de corrélation et à son carré, le nombre effectif de mesures non corrélées peut également être exprimé comme (2.14). Il y a des points différenciant entre les méthodes, les méthodes de la matrice de corrélation et celle basée sur la théorie de l'information peuvent être appliquées pour n'importe quel type de brassage. Ce n'est pas le cas des méthodes normatives et de la taille effective de l'échantillon puisqu'il s'agit de calculer le coefficient de corrélation entre états adjacents. Par la suite, la méthode employée sera l'approximation de la méthode basée sur la théorie de l'information, et ce pour deux raisons. Tout d'abord, la formule basée sur cette méthode ne nécessite la considération d'aucun seuil, ainsi l'estimation du nombre d'états non corrélés ne dépend que de l'information collectée. Par ailleurs, on peut l'utiliser dans le cas du brassage mécanique mais également dans le cas du brassage par commutation (mis en œuvre au chapitre 5 de cette thèse) où les états ne sont pas contigus. Enfin, au vu des articles cités dans la partie 2.1.1, utiliser une méthode basée sur la matrice de corrélation entre états est plus précis que la méthode traditionnelle qui surestime le nombre d'états décorrélés.

### Uniformité du champ

Pour conclure quant à une bonne uniformité de champ dans l'enceinte d'une CRBM selon la norme EN 61000-4-21, un gabarit de l'écart-type des valeurs maximales de champ enregistrées en différentes positions de sonde est défini selon le procédé suivant.

## CHAPITRE 2. INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT ET ENVIRONNEMENTS DE TEST

---

On calcule dans un premier temps les composantes cartésiennes de champ normalisées par rapport à la puissance incidente :

$$E_{norm\ n,\alpha} = \frac{E_{max\ n,\alpha}}{\sqrt{P_{entree}}} \quad (2.15)$$

où  $E_{max\ n,\alpha}$  est la mesure maximale (en V/m) en chaque position de sonde  $n$  et pour chacun de ses axes  $\alpha = \{x\ y\ z\}$  (i.e. 24 mesures ou 8 mesures pour le champ total dans le cas de la norme EN 61000-4-21) au cours de la rotation du brasseur, et  $P_{entree}$  est la puissance moyenne d'entrée sur les positions de brasseur (en W) dans la chambre.

Puis, on définit l'écart-type  $\sigma$  :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (E_{norm\ n,\alpha} - \langle E_{norm\ n,\alpha} \rangle_n)^2}{N - 1}} \quad (2.16)$$

où

- $N$  est le nombre de mesures,
- $E_{norm\ n,\alpha}$  est une composante cartésienne de champ normalisée par rapport à la puissance incidente (équation (3.8)),
- $\langle \cdot \rangle_n$  indique la moyenne arithmétique pour 8 positions de sonde, excepté si l'on considère les 3 composantes, dans ce cas,  $8 \times 3 = 24$  valeurs sont utilisées.

Enfin, on peut en déduire l'écart-type de champ en dB :

$$\sigma_{dB} = 20 \times \log_{10} \left( \frac{\sigma + \langle E_{\alpha} \rangle_n}{\langle E_{\alpha} \rangle_n} \right) \quad (2.17)$$

Dans le cas de l'utilisation d'un ARV, le paramètre  $|S_{21}|$  est utilisé pour définir l'écart-type de champ.

Les recommandations de conformité de la norme EN 61000-4-21 sont indiquées par le biais des gabarits des écarts-types de champ sur le tableau suivant.

Fréquences	80 à 100 MHz	100 à 400 MHz	400 MHz et plus
Ecart-type EN 61000-4-21 (dB)	4 dB	4 dB avec réduction linéaire jusqu'à 3 dB à 400 MHz	3 dB
Spécificités	$E_x, E_y, E_z$ et $E_{total}$ ne doivent pas dépasser l'écart-type spécifié pour plus de 3 fréquences par octave dans une proportion ne dépassant pas 1 dB de la tolérance exigée		

TABLE 2.2 – Ecarts-types de champ selon la norme EN 61000-4-21.

La chambre est considérée comme satisfaisant aux exigences d'uniformité de champ sous réserve que l'écart-type à la fois pour les trois composantes individuelles de champ ( $E_x, E_y$  et  $E_z$ ) et l'amplitude totale du champ ( $E_{total}$ ) se situe dans les limites de tolérance spécifiées.

### Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité

Les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité ne sont pas obligatoirement calculés pour conclure quant à une bonne uniformité du champ dans une CRBM, cependant, ils délivrent une indication sur le degré d'isotropie et d'homogénéité du champ dans l'enceinte en fonction de la fréquence.

Le coefficient d'anisotropie est défini comme suit pour chaque composante de champ :

$$\langle A_{\alpha\beta} \rangle_{\tau} = \left\langle \frac{\left( \frac{|E_{\alpha}|^2}{P_{entree}} \right) - \left( \frac{|E_{\beta}|^2}{P_{entree}} \right)}{\left( \frac{|E_{\alpha}|^2}{P_{entree}} \right) + \left( \frac{|E_{\beta}|^2}{P_{entree}} \right)} \right\rangle_{\tau} \quad (2.18)$$

Où

- $|E_{\alpha,\beta}|$  représente le champ mesuré pour la composante rectangulaire arbitraire  $\alpha$  ou  $\beta = x, y, z$  pour un état donné du brasseur et une position de sonde de champ,
- $P_{entree}$  est la puissance d'entrée résultante (i.e. incidente moins réfléchi) injectée dans la chambre à la position du brasseur et à l'emplacement de sonde considérés pour la mesure des composantes de champ suivant  $\alpha$  ou  $\beta$ ,
- $\langle \cdot \rangle_{\tau}$  indique la moyenne de brassage (i.e. d'ensemble) sur toutes les positions de brasseur parcourues.

Le coefficient d'anisotropie total correspond à :

$$\langle A_{tot} \rangle_{\tau} = \left\langle \sqrt{(A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2) / 3} \right\rangle_{\tau} \quad (2.19)$$

Le coefficient d'inhomogénéité est déterminé par l'équation :

$$\langle I_{\alpha}(p_1, p_2) \rangle_{\tau} = \left\langle \frac{\left( \frac{|E_{\alpha}(p_1)|^2}{P_{entree}} \right) - \left( \frac{|E_{\alpha}(p_2)|^2}{P_{entree}} \right)}{\left( \frac{|E_{\alpha}(p_1)|^2}{P_{entree}} \right) + \left( \frac{|E_{\alpha}(p_2)|^2}{P_{entree}} \right)} \right\rangle_{\tau} \quad (2.20)$$

Où  $p_1$  et  $p_2$  représentent deux emplacements dans le volume utile de la cavité.

$$\langle I_{tot} \rangle_{\tau} = \left\langle \sqrt{(I_x^2 + I_y^2 + I_z^2) / 3} \right\rangle_{\tau} \quad (2.21)$$

Le tableau 2.3 recense les valeurs types des coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité totaux du champ pour conclure quant à une « bonne » ou une « moyenne » qualité de brassage selon les normes.

	<b>N=10</b>	<b>N=30</b>	<b>N=100</b>	<b>N=300</b>
Qualité de brassage « moyenne »	-2,5 dB	-5 dB	-7,5 dB	-10 dB
Qualité de brassage « bonne »	-5 dB	-10 dB	-12,5 dB	-15 dB

TABLE 2.3 – Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité selon la norme EN 61000-4-21.

### 2.1.2 Lois de probabilité du champ électromagnétique

Le modèle statistique couramment admis pour décrire la distribution du champ dans le volume utile d'une CRBM est le modèle idéal décrit par Hill [18, 82]. La théorie de Hill décrit les propriétés du champ dans une cavité où le recouvrement modal est très élevé ( $\gg 1$ ). Le recouvrement modal peut être quantifié en fonction du volume de la cage  $V$ , du facteur de qualité  $Q$  et de la fréquence  $f$  suivant la formule :

$$d = \frac{8\pi V f^3}{Q c^3} \quad (2.22)$$

$c$  étant la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide  $c = 3 \times 10^8$  m/s. En pratique, le facteur de qualité des chambres réverbérantes n'est pas très élevé (de l'ordre de quelques milliers) et cette condition imposée par le modèle idéal est respectée lorsque la cavité est surdimensionnée, c'est-à-dire lorsque ses dimensions sont grandes devant la longueur d'onde, i.e. dans un régime hautes fréquences.

Pour un état de CRBM et une fréquence donnés, plusieurs modes peuvent être excités, ainsi ils se recouvrent. Le recouvrement modal contribue ainsi à l'homogénéité du champ dans l'enceinte car il permet une variation spatiale et spectrale faible du niveau d'énergie. La figure 2.2, tirée de la thèse de J.-B. Gros [33], décrit les différents régimes de recouvre-

ment modal avec  $d \ll 1$  pour un recouvrement modal considéré comme faible, modéré si  $d \sim 1$  et fort dans le cas où  $d \gg 1$ .

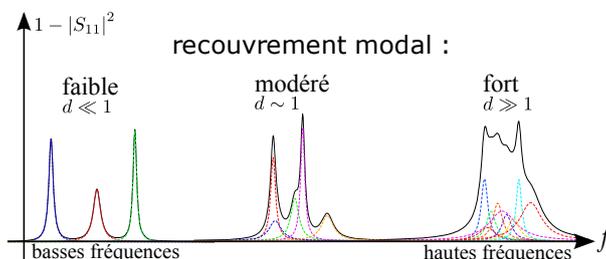


FIGURE 2.2 – Différents régimes de recouvrement modal - Figure tirée de [33].

La théorie de Hill est basée sur l’ajustement des données de champ à une loi de Rayleigh. La théorie de Hill prévoit que le champ est de nature gaussienne (ce qui aboutit à une loi de Rayleigh pour une composante cartésienne du champ électrique). La loi de Rayleigh relative au modèle de Hill est utilisée afin de représenter la distribution d’une composante cartésienne de champ dans le cas d’une cavité idéale. Dans ce cas de figure, on suppose que le champ peut être décomposé en ondes planes. Cette théorie est asymptotique au sens où elle correspond à un spectre continu d’ondes planes ( $d \rightarrow \infty$ ), elle ne tient donc pas compte du niveau réel des pertes. Les ondes qui se réfléchissent sur les parois de la cavité ont des polarisations équiprobables et les directions d’ondes sont également équiprobables. Cette théorie n’étant valide qu’en régime asymptotique alors que nous nous intéressons, dans le cadre de ce travail, au fonctionnement des CRBM autour de la LUF, il est important d’approfondir le cas de cavités à recouvrement modal modéré (régime non asymptotique). Nous allons montrer en utilisant une loi qui tient compte du recouvrement modal, que la loi de Rayleigh n’est pas suivie, et ce même pour des recouvrements modaux importants. En effet, même si la tendance est suivie, des écarts sont constatés. Pour des régimes basses fréquences, plusieurs études (notamment celle de J.-B. Gros [33] et l’article [83]) ont démontré que les statistiques étaient mieux décrites par la loi de Pnini-Shapiro. Cette loi sera donc mieux adaptée au travail présenté ici, puisque nous travaillons à des fréquences proches et en-dessous de la LUF d’une CRBM.

### Loi de Rayleigh

Selon les hypothèses de Hill, les parties réelle  $E_{\alpha_r}$  et imaginaire  $E_{\alpha_i}$  d’une composante cartésienne de champ  $E_{\alpha}$ , avec  $E_{\alpha} = \sqrt{E_{\alpha_r}^2 + E_{\alpha_i}^2}$ , sont distribuées selon une loi normale. Les parties réelle et imaginaire sont deux variables aléatoires gaussiennes centrées, indépendantes et identiquement distribuées i.e. de même variance. Connaissant ces lois, on peut en déduire la loi des mesures d’une composante rectangulaire de champ  $E_{\alpha}$ . Sa distribution suit une loi de Rayleigh.

La densité de probabilité d’une composante cartésienne de champ suivant la loi

de Rayleigh s'écrit sous la forme :

$$f(E_\alpha) = \frac{E_\alpha}{\sigma^2} e^{-\frac{E_\alpha^2}{2\sigma^2}} \quad (2.23)$$

Avec  $\sigma$  l'écart-type. Sa fonction de répartition est donnée par :

$$F(E_\alpha) = 1 - e^{-\frac{E_\alpha^2}{2\sigma^2}} \quad (2.24)$$

On peut caractériser cette loi de distribution par l'expression de la moyenne et de l'écart-type de la variable aléatoire  $E_\alpha$  :

$$\langle E_\alpha \rangle = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (2.25)$$

$$\sqrt{Var_{E_\alpha}} = \sigma \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}} \quad (2.26)$$

Le rapport écart-type sur moyenne, aussi appelé coefficient de variation (CV), vaut 0,523 pour une loi de Rayleigh. Cette valeur caractéristique nous permet de comparer cette loi de distribution théorique aux mesures expérimentales d'une composante cartésienne de champ électrique. On lance plusieurs simulations numériques i.e. des tirages selon la méthode de Monte-Carlo pour connaître la distribution du rapport  $\frac{\sigma}{\mu}$  autour de la valeur vraie (espérance) en fonction de  $N_{ech}$ .

Dans le but de vérifier l'ajustement d'une distribution empirique à une loi, nous réalisons un test d'ajustement ou *Goodness-of-fit test* (GOF test). Le principe d'un tel test est de déterminer la valeur d'une statistique et de la comparer à une valeur critique fonction de la taille de l'échantillon et d'un niveau de confiance  $1 - \alpha$  (ou seuil de risque  $\alpha$ ). Les différents tests d'ajustement existants permettent de déterminer si la loi choisie peut être retenue ou au contraire rejetée selon le niveau de confiance sélectionné. Le paramètre  $\alpha$  correspond au niveau de risque de rejeter l'hypothèse d'ajustement de la loi théorique à la distribution expérimentale, le risque  $\beta$  est celui d'accepter cette hypothèse alors qu'elle est fautive. L'un des critères de choix est généralement la puissance du test. La puissance d'un test est définie comme  $P = 1 - \beta$ . Les caractéristiques de la population étudiée sont également un critère de choix d'un test d'ajustement. D'après la thèse de C. Lemoine [79], du fait de la puissance du test et des distributions en CRBM considérées comme continues, le test à privilégier est le test d'ajustement selon Anderson-Darling (AD). Son utilisation repose sur le calcul d'une statistique nommée  $A^2$  :

$$A^2 = -\frac{\sum_{i=1}^N (2i - 1) [\ln F_0(x_i) + \ln(1 - F_0(x_{N+1-i}))]}{N} - N \quad (2.27)$$

où  $F_0(x_i)$  est la fonction de distribution cumulée théorique de la loi testée, et  $x_i$  correspond à la  $i^{\text{ème}}$  valeur expérimentale ordonnée dans l'ordre croissant. Si la loi de distribution testée est celle de Rayleigh, alors pour estimer  $F_0$ , il faut estimer son paramètre caractéristique  $\theta$  au sens du maximum de vraisemblance. Si on pose  $\theta = 2\sigma^2$ , alors on a de

manière équivalente  $F(x_i) = 1 - e^{-\frac{x_i^2}{\hat{\theta}}}$  (se reporter à l'expression simplifiée de la loi de Rayleigh (1.31) de la thèse de C. Lemoine [79]). Il est montré plus loin dans la thèse de C. Lemoine (page 63, expression (2.16)) que l'estimateur ayant le maximum de vraisemblance est donné par  $\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2)$  (autrement dit la moyenne quadratique des valeurs « mesurées »). On utilise ainsi l'estimateur de la loi de Rayleigh  $\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$ . Une fois  $\hat{\theta}$  estimé à partir de l'échantillon, on peut alors calculer  $F(x_i)$  dans l'expression d'AD (2.27) comme  $F(x_i) = 1 - e^{-\frac{x_i^2}{\hat{\theta}}}$  après avoir ordonné les  $x_i$ . Et ceci nous donne la valeur de  $A^2$ .  $A^2$  est ensuite comparée à une valeur critique dépendant de la taille de l'échantillon. Les valeurs critiques utilisées sont résumées dans le tableau 2.6 de la thèse de C. Lemoine.

Si

$$A^2 \left(1 + \frac{0,6}{N_{ech}}\right) > Valeur\ critique \quad (2.28)$$

on rejette l'hypothèse d'ajustement de la distribution à la loi testée. Ici, la loi testée sera toujours la loi de Rayleigh. D'après le tableau tiré de la thèse de C. Lemoine,  $Valeur\ critique = 1,341$  pour un seuil de risque  $\alpha = 0,05$ . Les valeurs critiques sont adaptées aux tests d'ajustement des lois de distribution. Par la suite, cette valeur critique va être utilisée dans nos tests.

### Loi de Pnini-Shapiro

Comme nous l'avons exposé plus haut, lorsque le recouvrement modal est suffisant, les propriétés statistiques du champ sont bien décrites par les hypothèses de Hill. Cependant, à basses fréquences, le recouvrement modal est plus faible (équation (2.22)) et dans ce cas, une CRBM ne vérifie plus ces hypothèses. Contrairement aux hypothèses de Hill, lorsque le recouvrement modal n'est pas suffisant, les parties réelle et imaginaire des composantes cartésiennes de champ ne sont pas identiquement distribuées. Elles sont distribuées selon des lois normales indépendantes et de variances différentes. Ainsi, la distribution du module du carré de chaque composante  $I_\alpha = \frac{|E_\alpha|^2}{\langle |E_\alpha|^2 \rangle_{n,\tau}}$ , avec  $\langle \cdot \rangle_{n,\tau}$  la moyenne sur l'ensemble des positions de brasseur  $\tau$  et de sonde de champ  $n$ , et  $\alpha = x, y, z$ , n'est plus exponentielle mais dépend d'un unique paramètre  $\rho$  appelé *phase rigidity* :

$$\rho = \frac{\int_V \vec{E} \cdot \vec{E} \, d\vec{r}}{\int_V ||\vec{E}||^2 \, d\vec{r}} \quad (2.29)$$

Ainsi, la distribution de probabilité de l'intensité normalisée de l'ensemble des composantes cartésiennes de champ est :

$$P(I_\alpha; \rho) = \frac{1}{\sqrt{1 - |\rho|^2}} I_0 \left[ \frac{|\rho| I_\alpha}{1 - |\rho|^2} \right] \quad (2.30)$$

où  $I_0$  est la fonction de Bessel modifiée du premier ordre. Pour les systèmes sans pertes  $|\rho|$  tend vers 1, et la distribution suivie est alors celle de Porter-Thomas. Pour les systèmes complètement ouverts  $|\rho| = 0$ , et la distribution devient une loi exponentielle, ce qui correspond à la limite où les hypothèses de Hill sont valides.

Etant donné que la *phase rigidity* est elle-même une quantité distribuée, la distribution de l'intensité normalisée d'un ensemble de réponses s'écrit :

$$P_{I_\alpha}(I_\alpha) = \int_0^1 P_\rho(\rho) P(I_\alpha; \rho) d\rho \quad (2.31)$$

où  $P_\rho$  est la distribution de la *phase rigidity* des réponses.

La théorie des matrices aléatoire (TMA) [84] prédit les statistiques de la réponse électromagnétique dans les cavités chaotiques (chapitre 3 du livre de H.-J. Stöckmann [26] et chapitre 1 de la thèse de J.-B. Gros [33]). Ces études basées sur ce modèle ont montré que  $P_\rho$  ne dépend que du recouvrement modal moyen. Un Ansatz a été proposé pour déterminer  $P_\rho$  à partir de la seule connaissance de  $d$ . Cet Ansatz s'écrit :

$$P_\rho(\rho) = \frac{2Be^{-2B\rho/(1-\rho)}}{(1-\rho)^2} \quad (2.32)$$

Où  $B$  est un paramètre qui dépend de  $d$ . Cette dépendance a été numériquement déduite du modèle TMA.

Une estimation empirique de  $B(d)$  est donnée par [65] :

$$B(d) = \frac{ad^2}{1 + bd + cd^2} \quad (2.33)$$

Avec  $a = 0,5032$ ,  $b = 1,3543$  et  $c = 0,303$ .

## Conclusion

Nous avons vu dans la première partie de ce chapitre que l'examen de plusieurs indicateurs est nécessaire pour décrire le comportement du champ dans l'enceinte d'une CRBM. Deux catégories d'indicateurs sont à considérer. Le premier groupe concerne les indicateurs normatifs que sont le facteur de qualité, le nombre d'états de CRBM non corrélés, l'uniformité du champ via le calcul de l'écart-type et enfin les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ. La deuxième catégorie est portée sur l'observation de deux lois supports, la loi de Rayleigh relative au modèle idéal de cavité surdimensionnée de Hill et la loi de Pnini-Shapiro décrivant l'allure du champ y compris dans le cas de cavités sous-dimensionnées.

Cette section clôt la première partie de ce chapitre. Nous poursuivons notre étude par l'examen du comportement des lois support au moyen de simulations de Monte-Carlo, avant l'application ultérieure des critères présentés à des résultats de simulation.

## 2.2 Examen du comportement des lois support au moyen de simulations de Monte-Carlo

Cette section est dédiée à l'étude des indicateurs présentés à la section 2.1 à partir des lois de Rayleigh et de Pnini-Shapiro ainsi qu'à la comparaison de ces modèles afin de justifier l'utilisation d'une loi de Pnini-Shapiro en basses fréquences. Ceci nous permettra de mieux appréhender le comportement de certains critères.

### 2.2.1 Construction des lois de distribution

On reconstruit une distribution du champ suivant une loi de Pnini-Shapiro à partir de  $1000 \times 8$  échantillons (car nous avons 8 positions de dispositif de réception) de taille  $N_{ech}$  obtenus à partir de simulations de Monte-Carlo. Ce traitement est réalisé en fixant différentes valeurs de recouvrements modaux  $d = \{0, 1; 0, 15; 0, 2; 0, 5; 1; 2; 5; 10; 20\}$  et différentes tailles d'échantillons  $N_{ech} = \{3; 6; 12; 24; 48; 60; 100; 300\}$  choisis pour correspondre à une large gamme de valeurs qu'on peut qualifier de « petit » jusqu'à un nombre qu'on peut qualifier de « grand ».

Le principe de reconstruction d'une loi de Rayleigh est le même que pour une loi de Pnini-Shapiro. Cependant, la loi de Rayleigh ne dépend que du nombre de réalisations non corrélées et non du recouvrement modal. Pour la loi de Rayleigh, les valeurs de champ obtenues sont normalisées par leur moyenne sur le nombre de réalisations non corrélées. Une fois les lois de Pnini-Shapiro et de Rayleigh reconstruites à l'aide de simulations de Monte-Carlo, les indicateurs sont calculés sur la base des valeurs de champ tirées afin de comparer les deux modèles statistiques. Les moyennes, minima et maxima des indicateurs sont observés sur l'ensemble des tirages aléatoires. En effet, les valeurs extrêmes permettront d'obtenir des limites vraisemblables dans la suite de l'étude lorsque nous comparerons les données expérimentales aux prédictions théoriques.

### 2.2.2 Test d'ajustement à une loi de Rayleigh

Après avoir calculé l'expression de la statistique de Anderson-Darling à l'aide de l'équation (2.27) d'après les données générées, nous vérifions l'hypothèse d'ajustement à une loi de Rayleigh par rapport à la valeur critique choisie (section 2.1.2).

Dans un premier temps, nous traçons les taux de rejets du GOF test selon AD pour une loi de Rayleigh en fonction du nombre d'états non corrélés (figure 2.3). Une limite arbitraire à 50 % a été fixée.

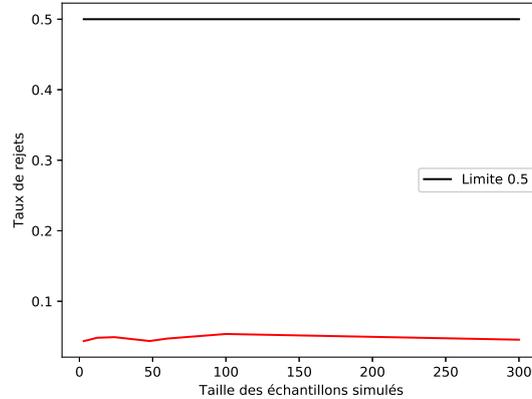


FIGURE 2.3 – Taux de rejets du test d’ajustement selon AD en fonction de la taille des échantillons simulés selon la loi de Rayleigh.

Comme attendu, les taux de rejets observés sont très bas quelle que soit la taille de l’échantillon. Ils correspondent au seuil de risque  $\alpha=0,05$ .

Le même traitement est réalisé en fonction du recouvrement modal et de la taille d’échantillons générés selon la loi de Pnini-Shapiro (figure 2.4). En effet, la loi de Pnini-Shapiro se rapproche d’une loi de Rayleigh pour des recouvrements modaux importants, même si ces deux lois restent différentes.

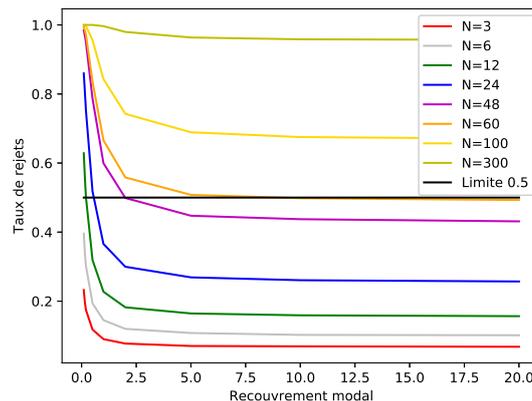


FIGURE 2.4 – Taux de rejets du test d’ajustement selon AD en fonction du recouvrement modal et de la taille d’échantillons simulés générés selon la loi de Pnini-Shapiro.

Pour une taille d’échantillon fixée, les taux de rejet diminuent avec l’augmentation du recouvrement modal. On note par ailleurs une augmentation du taux de rejet avec celle du nombre de réalisations non corrélées. Pour un recouvrement modal supérieur à

5 et un nombre d'états non corrélés inférieur à 60, le taux de rejet de la loi de Rayleigh reste inférieur à la limite arbitraire de 50%. Le test d'ajustement est très discriminant pour une taille d'échantillon élevée. Nous formons l'hypothèse que l'approximation du terme B pourrait être à l'origine de ce résultat. L'hypothèse est toujours rejetée pour plus de 60 réalisations non corrélées. Quand le nombre de réalisations non corrélées est faible, le résultat de ce test n'est plus considéré comme significatif. Pour que les résultats soient significatifs, il faudrait respecter la loi des grands nombres, soit un nombre d'états non corrélés aux alentours de 20. Au-delà d'un recouvrement modal de 5, à nombre d'échantillons non corrélés constant, une stagnation des valeurs du taux de rejets apparaît.

### 2.2.3 Rapport écart-type sur moyenne

Intéressons-nous maintenant au rapport écart-type sur moyenne de champ. On rappelle que dans le cas de la loi de Rayleigh ce rapport vaut théoriquement 0,523, de sorte que ce rapport peut être utilisé comme un indicateur de suivi de cette loi. Pour cette loi, les rapports moyens, minima et maxima sur l'ensemble des tirages sont tracés en fonction du nombre de réalisations non corrélées. Pour la loi de Pnini-Shapiro, nous présentons d'une part les rapports moyens en fonction du recouvrement modal pour chaque nombre de réalisations non corrélées mais également les moyennes et valeurs extrêmes sur les tirages sur une figure supplémentaire pour plus de clarté. Un zoom est ajouté pour des valeurs de  $d \leq 2$  pour une meilleure lisibilité.

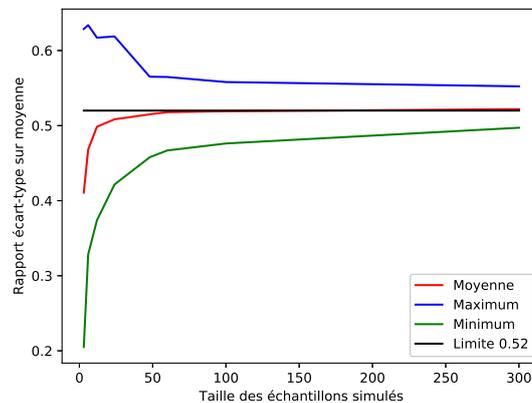


FIGURE 2.5 – Rapport écart-type sur moyenne de champ selon la loi de Rayleigh.

Pour la loi de Rayleigh (figure 2.5), le coefficient de variation se rapproche en moyenne de 0,52 (ce qui correspond à la valeur attendue) à partir d'environ 12 réalisations et au-delà de 60 réalisations non corrélées ce coefficient vaut 0,52 en moyenne. On constate que l'écart entre maxima et minima sur l'ensemble des tirages diminue avec l'augmentation du nombre de simulations non corrélées. En effet, pour des valeurs faibles, il est difficile de converger vers un CV de 0,52 car l'échantillon n'est pas de taille suffisante. La bonne représentation de la loi statistique nécessite un échantillon de taille suffisante. D'après

## CHAPITRE 2. INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT ET ENVIRONNEMENTS DE TEST

la figure 2.5, posséder un échantillon de 10 réalisations non corrélées semble trop peu au regard de l'incertitude élevée observée. C'est pourquoi dans la suite de notre étude, pour de nombreux paramètres que nous préciserons, nous sommes amenés à manipuler des moyennes fréquentielles glissantes lors de l'analyse des résultats de mesure dans le but de tenir compte d'un plus grand nombre d'échantillons de taille faible et ainsi obtenir des résultats cohérents.

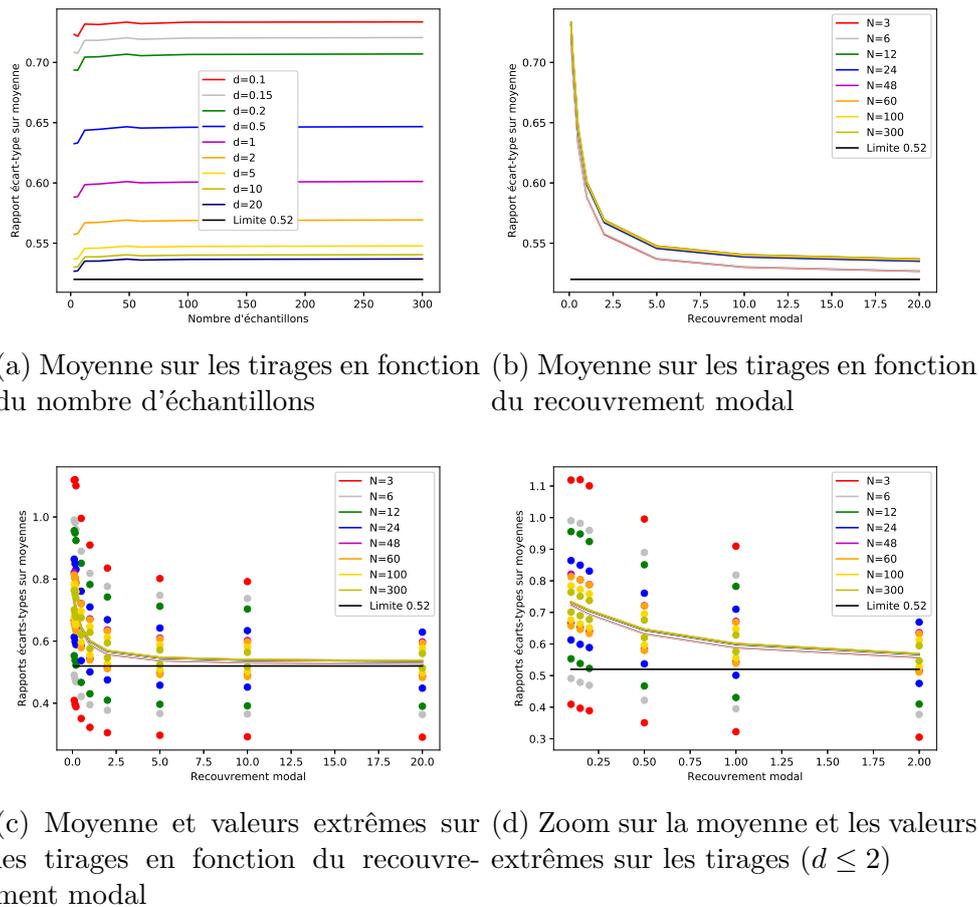


FIGURE 2.6 – Rapport écart-type sur moyenne de champ selon la loi de Pnini-Shapiro.

Pour une loi de Pnini-Shapiro, on observe tout d'abord (figure 2.6a) une convergence rapide de CV avec le nombre d'échantillons, et ce quelque soit le recouvrement modal, la variation étant très faible à partir de 6 échantillons. Ceci est confirmé par la figure 2.6b où les courbes sont presque confondues à partir de  $N = 12$ . Par ailleurs, la figure 2.6b montre que le CV diminue fortement avec l'augmentation de  $d$ . Cette diminution est moins significative avec l'augmentation de  $N_{ech}$ . Cette forte diminution du rapport écart-type sur moyenne est constatée peu importe le nombre de réalisations non corrélées jusqu'à environ  $d = 2$ , un plateau est ensuite observé à partir d'un recouvrement modal d'environ 5. Les valeurs extrêmes (figures 2.6c et d) se resserrent également avec

l'augmentation du nombre de réalisations non corrélées, mais le recouvrement modal n'a plus d'impact sur ces écarts dès lors que le plateau est atteint.

Ainsi, les valeurs du CV sont fortement influencées par le recouvrement modal et la précision de la mesure varie en fonction du nombre d'états non corrélés.

## 2.2.4 Uniformité du champ selon les normes

Cette section concerne l'étude de l'uniformité statistique du maximum de champ électrique collecté sur l'ensemble des états de la chambre basée sur la norme EN 61000-4-21 à travers l'utilisation des lois de Rayleigh et de Pnini-Shapiro. Il faut souligner que la simulation Monte Carlo, contrairement à ce qui précède, consiste à regrouper 24 tirages élémentaires pour calculer les écarts-types sur le maximum de champ associé à chaque tirage. Cela correspond à 8 positions virtuelles et 3 axes de sonde de champ. On procède 1000 fois à cette opération pour faire une estimation de la statistique de l'écart-type de champ (minima, maxima et moyennes). Pour le traitement de ces 24 valeurs, on extrait la valeur du maximum de champ sur les 8 positions virtuelles et pour chacune des orientations virtuelles de la sonde. On peut ensuite en déduire l'écart-type d'après l'équation (2.17).

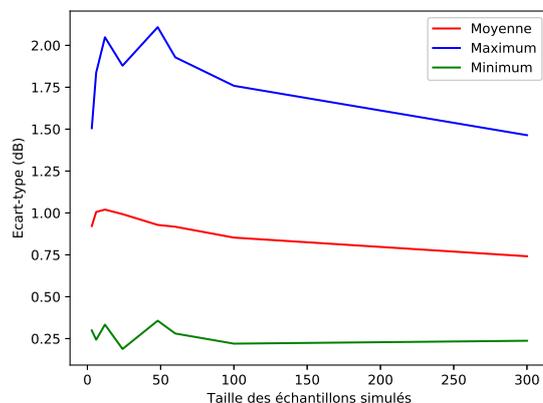


FIGURE 2.7 – Uniformité du champ selon la loi de Rayleigh.

Pour une loi de Rayleigh (figure 2.7), les écarts-types de champ diminuent légèrement avec l'augmentation du nombre de réalisations non corrélées à partir de 12 réalisations. En effet, pour un échantillon de taille faible, les écarts-types sont bas. Il en va de même pour les valeurs extrêmes sur les tirages, qui se rapprochent de la moyenne avec l'augmentation du nombre d'échantillons non corrélés. En moyenne, les écarts-types de champ se situent en-dessous de 1 dB. On atteint 1 dB max pour  $N_{ech} = 12$ , puis on est en-dessous. Concernant les valeurs maximales des tirages, elles sont sous un seuil de 2 dB quel que soit le nombre de mesures non corrélées.

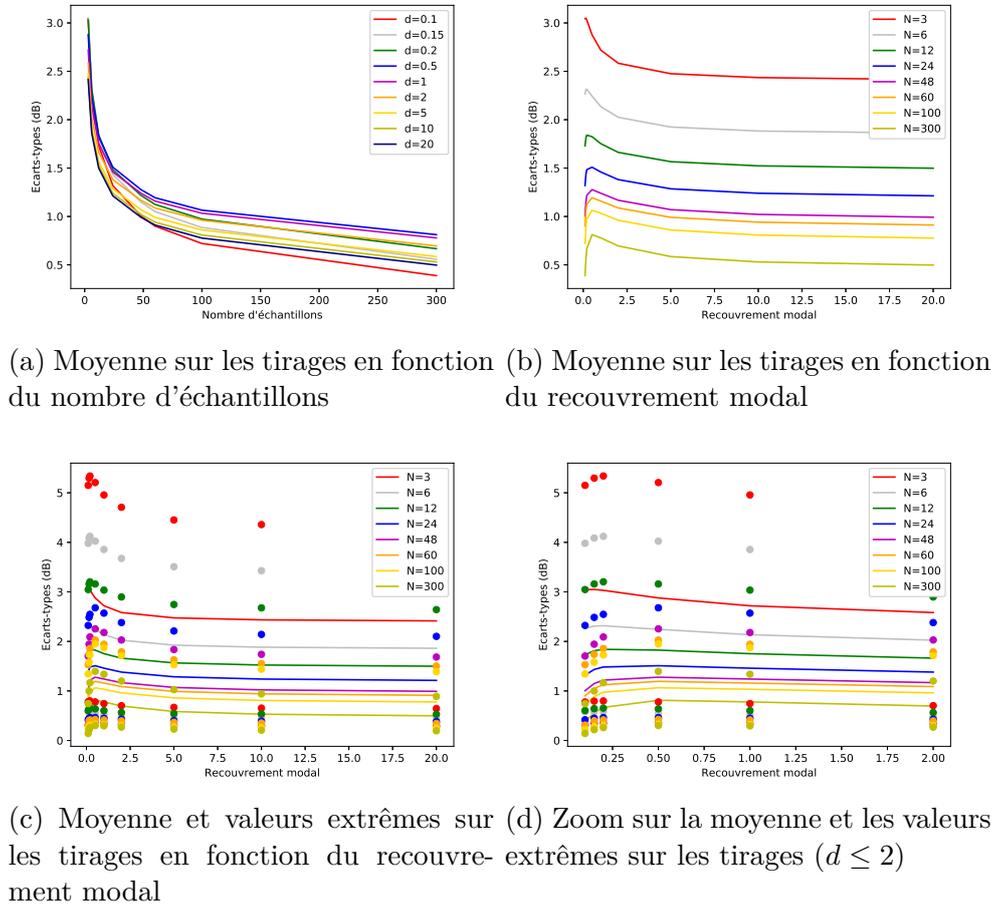


FIGURE 2.8 – Uniformité du champ selon la loi de Pnini-Shapiro.

Pour une loi de Pnini-Shapiro (figure 2.8), on observe une décroissance tout d'abord très rapide puis plus lente de l'écart-type en fonction du nombre d'échantillons (figure 2.8a). Concernant l'évolution de l'écart-type en fonction du recouvrement modal (figure 2.8b), la courbe subit une évolution non monotone. Nous avons un écart-type de champ faible dans le cas où  $d$  est inférieur à 1 et  $N_{ech}$  élevé. Cet état n'a pas de sens en pratique, on se rapproche du cas où un seul mode est excité. Au-delà de  $d = 1$ , les écarts-types des champs diminuent et les valeurs extrêmes se rapprochent de la moyenne en augmentant le recouvrement modal et le nombre de mesures non corrélées (figures 2.8c et d). De la même manière que pour le rapport écart-type sur moyenne de champ, cette diminution est importante jusqu'à environ  $d = 2$  et un plateau apparaît à partir d'un recouvrement modal d'environ 5. Le nombre de réalisations non corrélées a également un impact sur ce paramètre, le champ maximum observé devient plus uniforme avec l'augmentation du nombre d'états non corrélés.

Ainsi, l'étude du critère normatif ne fournit pas d'indication précise sur la statistique de la distribution et l'isotropie du champ dans la cavité. En effet, cet indicateur

n'est pas très discriminant surtout pour des recouvrements modaux faibles. Par conséquent, il faut être vigilant avec l'utilisation de ce critère et ne pas l'observer seul. Quand le recouvrement modal est très faible, l'écart-type de champ n'est pas un bon indicateur car il est trop dépendant de la fréquence qui est plus ou moins proche du mode excité. On peut noter que l'écart-type de champ est particulièrement sensible au nombre de points car il s'appuie sur l'estimation des valeurs maximales alors que le CV s'appuie sur des valeurs moyennes dont l'estimation converge plus rapidement.

### 2.2.5 Critères d'anisotropie et d'inhomogénéité

Bien qu'ils soient mentionnés dans la norme EN 61000-4-21, il n'est pas obligatoire de calculer les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ pour conclure quant à une bonne uniformité du champ dans une CRBM. Ils nous délivrent cependant une indication sur la qualité de brassage dans l'enceinte (section 2.1.1).

Nous présentons ces indicateurs en fonction des lois de Rayleigh et de Pnini-Shapiro (figures 2.9, 2.10 et 2.11).

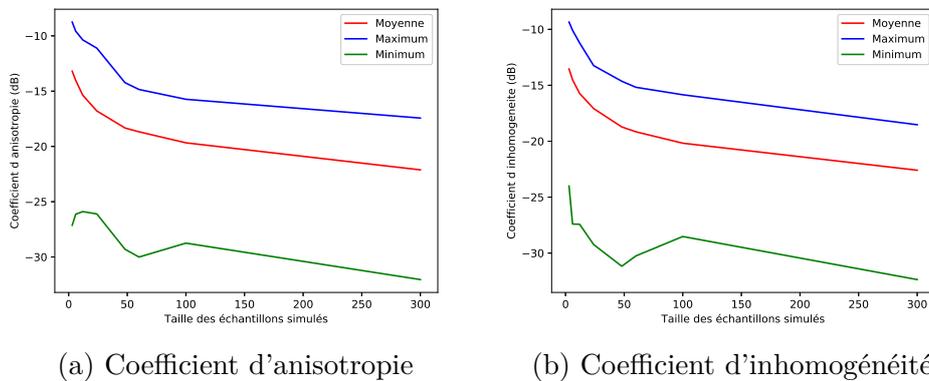
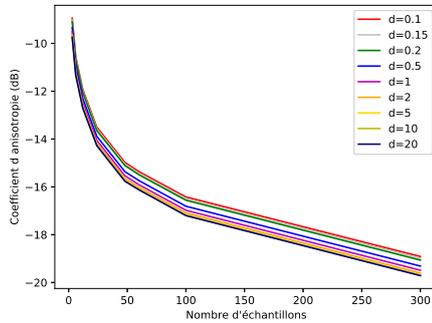


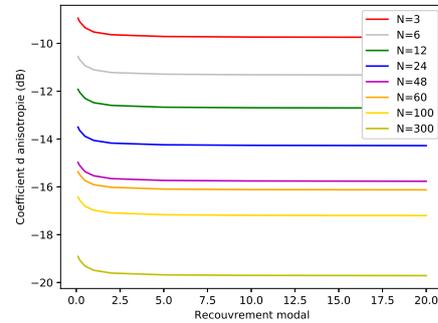
FIGURE 2.9 – Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ en fonction de la taille des échantillons simulés selon la loi de Rayleigh.

Pour une loi de Rayleigh (figure 2.9), les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité diminuent avec l'augmentation du nombre de réalisations non corrélées et se situent en moyenne entre -13 et -22 dB pour osciller entre -8 et -33 dB en fonction des tirages.

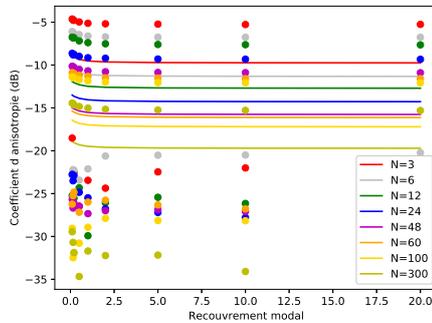
## CHAPITRE 2. INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT ET ENVIRONNEMENTS DE TEST



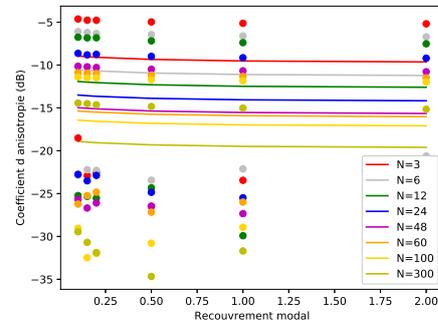
(a) Moyenne sur les tirages en fonction du nombre d'échantillons



(b) Moyenne sur les tirages en fonction du recouvrement modal



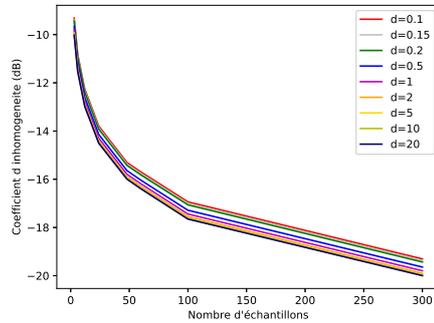
(c) Moyenne et valeurs extrêmes sur les tirages en fonction du recouvrement modal



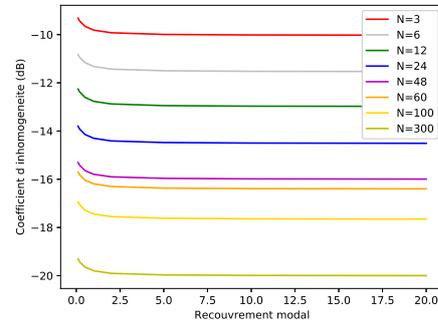
(d) Zoom sur la moyenne et les valeurs extrêmes sur les tirages ( $d \leq 2$ )

FIGURE 2.10 – Coefficients d'anisotropie du champ en fonction du recouvrement modal et de la taille d'échantillons simulés selon la loi de Pnini-Shapiro.

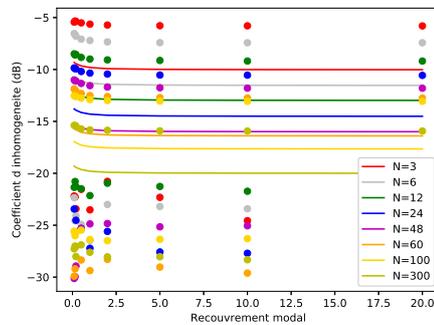
## CHAPITRE 2. INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT ET ENVIRONNEMENTS DE TEST



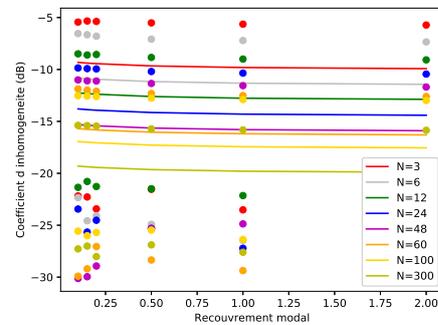
(a) Moyenne sur les tirages en fonction du nombre d'échantillons



(b) Moyenne sur les tirages en fonction du recouvrement modal



(c) Moyenne et valeurs extrêmes sur les tirages en fonction du recouvrement modal



(d) Zoom sur la moyenne et les valeurs extrêmes sur les tirages ( $d \leq 2$ )

FIGURE 2.11 – Coefficients d'inhomogénéité du champ en fonction du recouvrement modal et de la taille d'échantillons simulés selon la loi de Pnini-Shapiro.

Pour une loi de Pnini-Shapiro (figures 2.10 et 2.11), les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité diminuent avec l'augmentation du nombre de réalisations non corrélées et se situent en moyenne entre -10 et -20 dB pour osciller entre -5 et -35 dB en fonction des tirages, comme une loi de Rayleigh. Si les recouvrements modaux sont inférieurs à environ 2, les coefficients diminuent, au-delà ils sont quasiment constants. Enfin, les valeurs extrêmes se rapprochent de la moyenne avec l'augmentation de  $N_{ech}$  mais semblent constantes avec l'augmentation de  $d$ .

D'après le tableau 2.3, les valeurs obtenues correspondent à une « bonne qualité de brassage » que ce soit pour une loi de Rayleigh ou une loi de Pnini-Shapiro, quel que soit le recouvrement modal.

L'écart maximum entre deux fonctions de répartition ou Cumulative Density Function (CDF) est couramment utilisé pour comparer deux distributions, et permet notamment de vérifier si une distribution expérimentale suit une loi statistique attendue. Cette différence est notamment utilisée lors des tests d'ajustement, et nous l'avons utilisé

lorsqu'une loi théorique était connue et considérée comme référence. Mais nous avons par ailleurs dérivé des CDF obtenus un critère d'homogénéité supplémentaire exposé ici. Nous présentons un cas arbitraire pour comprendre ce qui a été fait. Pour un tirage choisi au hasard à un échantillon de données non corrélées de taille 300, nous traçons pour trois positions de sonde différentes les CDF de champ dans le cadre d'une loi de Rayleigh (figure 2.12).

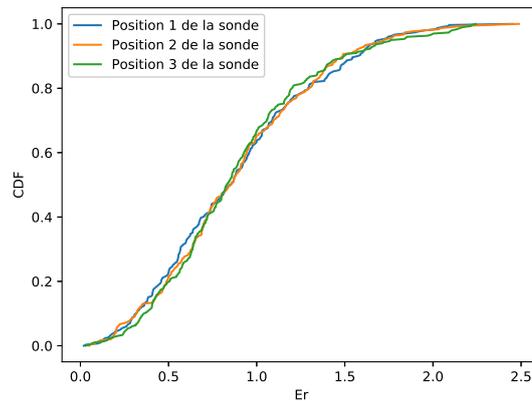


FIGURE 2.12 – CDF de champ selon la loi de Rayleigh pour trois positions de sonde, 300 échantillons simulés et un tirage arbitraire.

Lorsque la CDF atteint la valeur de 0,5 on calcule l'écart entre le CDF maximum et le CDF minimum sur l'ensemble des positions de sonde :

$$Ecart = 2 \times \frac{CDF^{-1}(0, 5)_{max_n} - CDF^{-1}(0, 5)_{min_n}}{CDF^{-1}(0, 5)_{max_n} + CDF^{-1}(0, 5)_{min_n}} \quad (2.34)$$

avec  $n$  les positions de sonde ( $n=8$  dans notre cas) et  $CDF^{-1}(0, 5)$  la fonction inverse d'une CDF qui renvoie  $x$  le quantile (valeur de champ) qui correspond ici à  $CDF(x) = 0, 5$ . Ce traitement nous fournit une indication sur l'homogénéité du champ dans la CRBM ainsi que sur l'isotropie en utilisant directement les données. Nous appellerons par la suite ce paramètre « écart relatif entre CDF à 50% ».

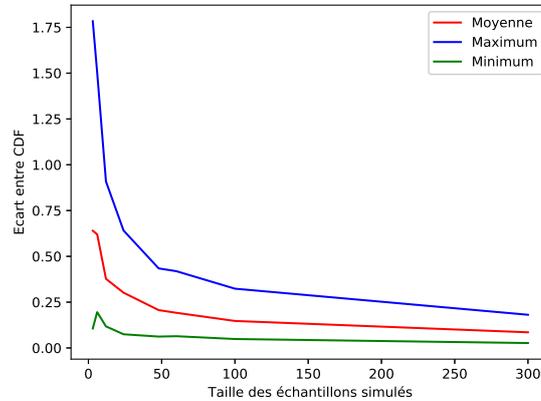


FIGURE 2.13 – Ecart entre CDF à 50% minima et maxima selon la loi de Rayleigh.

Pour une loi de Rayleigh (figure 2.13), les écarts relatifs entre CDF à 50% minima et maxima diminuent quand la taille de l'échantillon de données non corrélées augmente. Les valeurs extrêmes sur les tirages se rapprochent de la moyenne. Globalement, les écarts diminuent et les valeurs extrêmes se resserrent autour de la moyenne avec l'augmentation de  $N_{ech}$ .

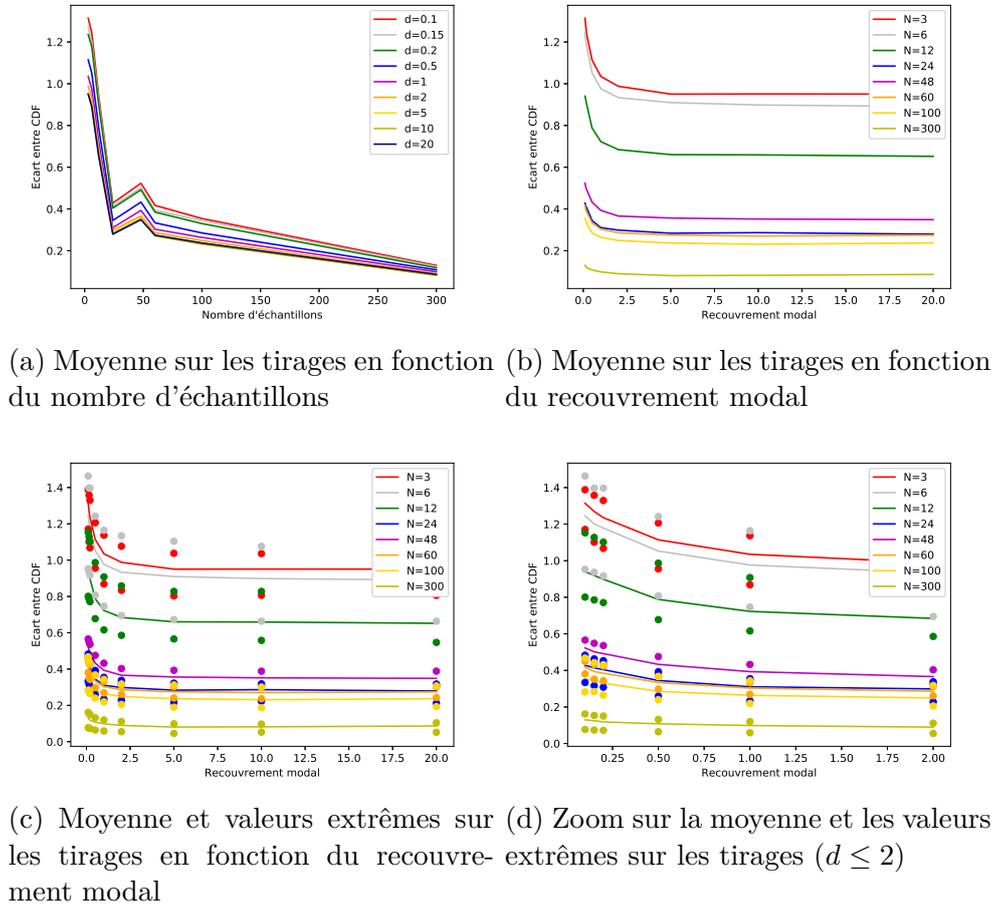


FIGURE 2.14 – Ecart entre CDF à 50% minima et maxima selon la loi de Pnini-Shapiro.

Pour une loi de Pnini-Shapiro (figure 2.14), les écarts relatifs entre CDF à 50% minima et maxima diminuent en fonction du nombre d'échantillons, le comportement non monotone en  $N = 48$  n'étant pas expliqué (figure 2.14a). Concernant leur évolution en fonction du recouvrement modal (figure 2.14b), ils diminuent fortement jusqu'à environ  $d = 2$ , à partir de  $d = 5$ , on constate un palier. Les valeurs extrêmes sur les tirages (figures 2.14c et d) demeurent constantes avec l'augmentation de  $d$ .

Ce critère semble donc plus sensible i.e. plus discriminant que le critère normatif lié aux coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité.

## Conclusion sur l'examen du comportement des lois supports

Après avoir reconstruit une distribution du champ à partir d'une loi de Pnini-Shapiro et d'une loi de Rayleigh à partir de simulations de Monte-Carlo, nous avons pu étudier les indicateurs présentés à la section 2.1 et comparer ces modèles afin de justifier l'utilisation d'une loi de Pnini-Shapiro en basses fréquences et de comparer le caractère

discriminant des différents indicateurs proposés.

L'impact de l'augmentation du nombre d'états non corrélés est constaté sur les critères d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ ainsi que sur l'uniformité du champ établis selon la norme EN 61000-4-21 et sur les écarts entre CDF à 50% établis aux différentes positions de mesure. La modification du nombre d'états non corrélés s'observe peu sur le rapport écart-type sur moyenne de champ. On constate également une nette amélioration des critères étudiés pour un recouvrement modal d'environ 2 et une stagnation des indicateurs à partir d'un recouvrement modal de 5. Par ailleurs, d'après le GOF test selon AD pour une loi de Pnini-Shapiro, nous pouvons estimer suivre une loi de Rayleigh pour un recouvrement modal aux alentours de 5 et selon un critère de rejet à 50% ; ceci serait valable pour une taille d'échantillon inférieure à 60 mais n'est pas recevable pour de plus grandes tailles. Grâce à cette étude, il nous sera possible de comparer les données expérimentales aux prédictions théoriques.

La dernière section de ce chapitre introduit la présentation des environnements de test.

### 2.3 Présentation des environnements de test

Dans le cadre de notre travail de recherche, plusieurs CRBM de différentes dimensions ont été étudiées dans le but de confronter les résultats obtenus. Nous présentons dans cette section l'ensemble des environnements testés pour les différentes évaluations réalisées dans cette thèse. Un tableau récapitulatif est présenté en conclusion de cette partie. Par ailleurs, l'annexe B résume les caractéristiques des différents bancs de mesure utilisés au cours de ce travail.

Dans le cas de mesures normatives CEM, nous utilisons le système suivant afin de générer de fortes puissances. Un générateur, généralement relié à un amplificateur, envoie des signaux radio-fréquences (RF) à une antenne de transmission fixe dans l'enceinte. Le signal reçu est converti en onde électromagnétique grâce à cette antenne. Le générateur est généralement relié à un coupleur bidirectionnel qui permet à la fois de transmettre les signaux RF mais aussi de collecter les données de puissance grâce à des sondes. Nous avons ainsi connaissance de la puissance incidente au niveau du connecteur de l'antenne et de la puissance réfléchie dans la cavité. L'ensemble constitue la chaîne d'émission. Pour la chaîne de réception, une antenne (supplémentaire à l'antenne d'émission) est placée dans l'enceinte pour collecter les données de puissance et une sonde de champ triaxiale permet d'obtenir les données des composantes cartésiennes de champ. Comme nous l'avons mentionné dans la section 2.1.1, les données de puissance ne sont pas utilisées pour le calcul des indicateurs. Un amplificateur de puissance et des atténuateurs peuvent être placés dans la chaîne de mesure afin de répondre aux besoins et protéger les instruments. La configuration matérielle des essais est présentée sur la figure 2.15 avec un exemple de placement d'atténuateurs présents dans la chaîne de mesure.

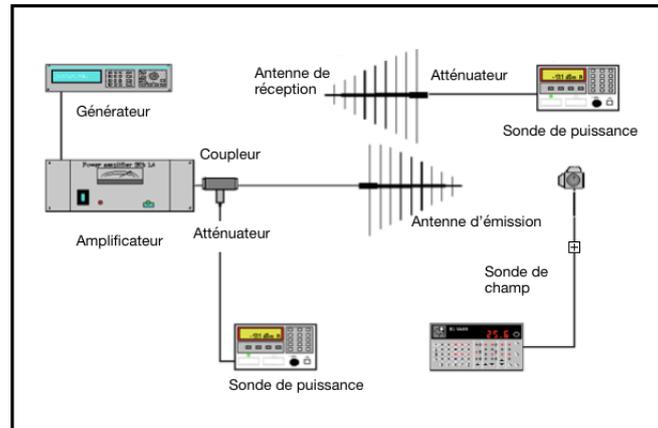


FIGURE 2.15 – Configuration matérielle d'une chaîne de mesure en CRBM.

Pour effectuer des études sur les propriétés statistiques des champs, nous n'avons pas besoin de générer des champs forts. Ainsi, il est préférable d'utiliser un ARV, plus facile à maîtriser et plus précis et donnant par ailleurs une information sur la phase du signal. Dans ce cas, les chaînes d'émission et de réception mentionnées dans les cas normatifs sont remplacées par un ARV relié aux antennes et/ou à la sonde de champ afin de collecter les paramètres  $S$  dans l'enceinte.

Le choix du matériel dépendra de la gamme de fréquence désirée, du niveau de champ requis dans l'enceinte mais aussi des indicateurs à observer. En fonction de l'instrumentation, la nature des données est modifiée et avec elle le calcul des indicateurs. Les paramètres  $S$  sont extraits à l'aide d'un ARV, les composantes cartésiennes de champ le sont grâce à une sonde de champ. Une fois ces données extraites, nous sommes en mesure de définir les indicateurs qualifiant le fonctionnement d'une CRBM (section 2.1).

D'après la norme EN 61000-4-21, les données sont collectées en 8 points du volume de travail de la CRBM (4 positions basses et 4 positions hautes). Comme le montre la figure 2.16, les positions 1, 2, 3, 4 représentent les positions basses et 5, 6, 7, 8 les positions hautes.

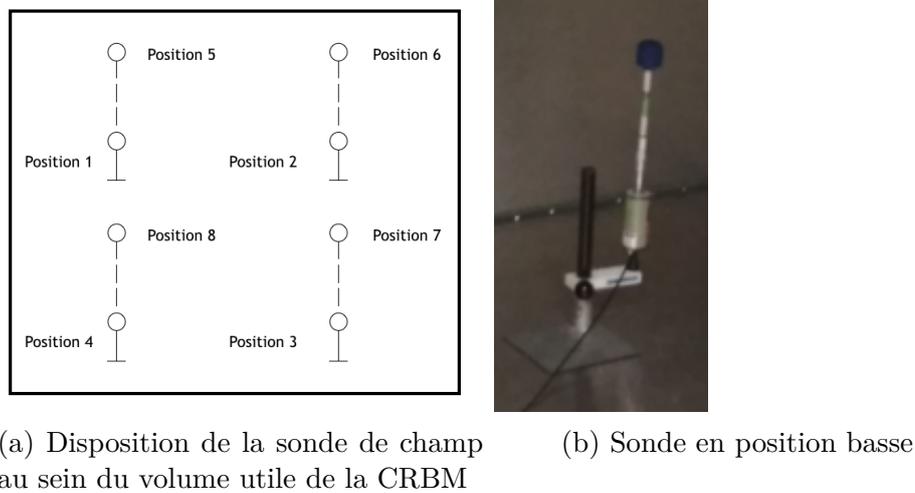


FIGURE 2.16 – Disposition de la sonde de champ au sein du volume utile de la CRBM.

Les instruments de réception des données doivent être placés à au moins  $\lambda/4$  des parois (section 2.1.1). Ainsi, pour des mesures commençant à 200 MHz, nous plaçons l'antenne ou la sonde à 37,5 cm des parois et à 58 cm du sol en position basse et 162 cm en position haute pour un CRBM de dimensions 2,48 x 2,48 x 2,86 m<sup>3</sup>.

Un certain nombre d'étapes techniques ont dû être réalisées pour s'assurer de la répétabilité et de la fiabilité des mesures. Dans un premier temps, plusieurs ajustements ont été effectués (resserrage de la courroie du brasseur, ajustement de la puissance incidente et choix des appareils de mesure pour se placer dans la bonne dynamique des appareils en utilisant l'instrumentation la plus adaptée aux essais, diminution des temps d'attente des instruments afin de réduire les temps de mesure).

Un travail préliminaire a été réalisé dans le but d'observer l'influence du setup de mesure sur les propriétés des CRBM à travers l'étude du côté invasif des mesures avec une sonde de champ. Une étude sur les supports de sonde de champ en CRBM a conduit à la présentation d'un papier lors de la conférence EMC Europe 2018 à Amsterdam [85]. Il est apparu une sensibilité des résultats quant au type de mât utilisé ainsi qu'à la distance entre le mât et la sonde. Pour s'affranchir de la perturbation liée au mât, nos mesures ont été par la suite effectuées en plaçant la sonde dans le prolongement du mât (figure 2.16b). L'utilisation d'un petit support est nécessaire pour les positions basses tandis qu'un plus grand est requis pour les positions hautes.

Grâce à ces essais, nous avons établi les précautions à prendre en CRBM pour la suite des mesures.

### 2.3.1 Trois exemples de CRBM basées sur une configuration normative du fournisseur SIEPEL

Trois CRBM sont présentées dans cette section. Pour chaque entité, une configuration normative a été employée, des essais de calibrage selon la norme EN 61000-4-21 ont

été lancés en parallèle des mesures relatives à nos travaux de recherche. La configuration matérielle des essais est donc celle présentée sur la figure 2.15.

La première CRBM analysée est celle de l'entreprise SIEPEL dont la fréquence basse d'utilisation est estimée à 400 MHz et dont les dimensions sont  $2,48 \times 2,48 \times 2,86 \text{ m}^3$  (longueur x largeur x hauteur). Les LUF des CRBM sont définies à partir des critères de la norme EN 61000-4-21. Pour répondre aux besoins normatifs, SIEPEL a créé une gamme de CRBM nommée EOLE. Un numéro est attribué à l'EOLE en fonction de sa LUF. Par exemple, une CRBM dont la LUF est estimée à 80 MHz sera nommée EOLE 80. Ce modèle couvrant la bande de fréquences 80 MHz à 40 GHz s'adresse aux essais sur véhicules militaires et aéronautiques. Etant donné que la LUF de cette CRBM est de 400 MHz, c'est une EOLE 400.

Deux cavités supplémentaires sont testées chez des clients de SIEPEL. L'une d'entre elles est une EOLE 400 dont les dimensions sont  $2,48 \times 2,86 \times 3,41 \text{ m}^3$  (projet 3055), l'autre une EOLE 200 (LUF de 200 MHz) de dimensions  $4,9 \times 3,7 \times 3,1 \text{ m}^3$  basée dans l'entreprise EMITECH [86].

Pour l'ensemble de ces CRBM, nous plaçons une antenne d'émission fixe, une antenne de réception mobile et une sonde de champ isotropique également mobile dans l'enceinte. Les antennes sont choisies pour correspondre à la gamme fréquentielle requise des tests. Ainsi, pour chaque entité, les données de champ sont acquises selon les 3 axes de sonde et les données de puissance incidente sont collectées.

Une photo de l'intérieur de chaque CRBM est présentée en figure 2.17.



(a) EOLE 400 SIEPEL



(b) EOLE 400 Projet 3055



(c) EOLE 200 EMITECH

FIGURE 2.17 – CRBM basées sur une configuration normative.

Nous allons maintenant présenter les CRBM de deux laboratoires, le laboratoire ESYCOM<sup>1</sup> et le laboratoire de l'IETR<sup>2</sup> ainsi que l'instrumentation utilisée pour ces structures.

### 2.3.2 CRBM des laboratoires ESYCOM et IETR

La CRBM du laboratoire ESYCOM est de dimensions  $2,95 \times 2,75 \times 2,35 \text{ m}^3$ . La LUF de la cavité, définie selon les normes, est estimée à environ 400 MHz. Nous disposons de deux antennes monopôles positionnées dans la cage et les paramètres  $S$  sont extraits à l'aide d'un ARV. Pour chaque configuration testée, l'antenne de réception (monopôle 1) est déplacée et l'antenne d'émission est fixe (monopôle 2).

---

1. l'ESYCOM est une unité mixte de recherche du CNRS (UMR CNRS 9007), de l'université Gustave Eiffel et du CNAM.

2. l'IETR est une unité mixte de recherche du CNRS (UMR CNRS 6164) sous tutelle du CNRS, de l'université de Rennes 1, de l'INSA Rennes, de Centrale Supélec et de Nantes Université.

La dernière CRBM étudiée se situe au sein du laboratoire IETR. Ses dimensions sont  $8,7 \times 2,9 \times 3,7 \text{ m}^3$  et sa LUF est de 200 MHz. Pour les mesures de l'IETR, une antenne d'émission log-périodique fixe est insérée à l'intérieur de la cavité et une sonde de champ monoaxiale mobile est reliée à un ARV afin d'extraire les paramètres  $S$  dans l'enceinte.

### 2.3.3 Récapitulatif

Le tableau suivant récapitule les données collectées ainsi que les références des indicateurs employés pour le calcul du facteur de qualité.

Structure	Données collectées	Références des indicateurs employés pour le calcul du facteur de qualité
<b>SIEPEL</b>	Composantes cartésiennes de champ	(2.8)
<b>Projet 3055</b>	Composantes cartésiennes de champ	(2.8)
<b>EMITECH</b>	Composantes cartésiennes de champ	(2.8)
<b>ESYCOM</b>	Paramètres $S$	(2.7)
<b>IETR</b>	Paramètres $S$	(2.7)

TABLE 2.4 – Tableau récapitulatif des données collectées ainsi que les références des indicateurs employés pour le calcul du facteur de qualité pour chaque structure de CRBM de l'étude.

## Conclusion

Ce deuxième chapitre de thèse a introduit les indicateurs étudiés dans le cadre de notre travail de recherche. Ces critères permettront de définir le bon fonctionnement d'une CRBM mais également de comparer l'apport de solutions quant à l'amélioration des performances d'une CRBM, notamment pour des fréquences proches de la LUF. La deuxième partie de ce premier volet de thèse a démontré, via des tirages de Monte-Carlo, l'intérêt de l'utilisation du modèle de Pnini et Shapiro dans la prédiction du comportement du champ non prévu par une loi de Rayleigh dans le cas de CRBM non idéales i.e. présentant des pertes, ainsi que la justification de l'utilisation de certains critères pour l'évaluation du bon fonctionnement d'une CRBM. Au cours de ces travaux, plusieurs environnements ont été testés, ceux-ci ont également été présentés dans ce deuxième chapitre.

## CHAPITRE 2. INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT ET ENVIRONNEMENTS DE TEST

---

Lors des prochains chapitres, et sur la base des résultats obtenus, nous pourrons vérifier la cohérence de ces modèles avec les données expérimentales et justifier leur utilisation dans le cadre de la description du champ au sein d'une cavité électromagnétique. Le chapitre suivant concerne l'examen de l'apport de la chaoticité en CRBM spécialement pour des fréquences proches de la LUF. Il portera sur l'impact de la géométrie chaotique par l'ajout de calottes dans l'enceinte sur les performances d'une CRBM.

# Chapitre 3

## Questionnements sur l'impact de la chaotité

### 3.1 Introduction

L'objectif principal de ce doctorat est de comprendre les mécanismes en jeu dans une CRBM afin d'obtenir une meilleure caractérisation du comportement statistique de plusieurs grandeurs physiques et une meilleure maîtrise du fonctionnement des CRBM. Les normes définissent divers paramètres permettant l'étude du comportement d'une CRBM afin de vérifier son bon fonctionnement. Il est communément admis que l'écart-type du champ  $E$  maximal dans le volume de travail d'une CRBM et sur une rotation complète du brasseur ne doit pas dépasser le gabarit normatif tout en respectant un nombre minimum de positions de brasseur non corrélées. Il est cependant difficile d'atteindre cette uniformité en basses fréquences i.e. autour de la LUF.

Des études, fondées sur les cavités chaotiques, ont été explorées afin d'améliorer le fonctionnement des CRBM [38, 87, 88, 9, 36, 89, 90, 32]. Les travaux de thèse de J.-B. Gros [33] et de K. Selemani [34] ont abouti à l'amélioration des propriétés statistiques du champ dans une cavité rendue chaotique par l'ajout de calottes dans l'enceinte par rapport à une cavité classique pour des fréquences proches de la LUF. Pour comprendre les mécanismes en jeu au sein d'une CRBM, un deuxième paramètre a été examiné, celui des pertes. En effet, il est mentionné dans les normes que l'ajout de charge en CRBM modifie le comportement de celle-ci ; ainsi, nous examinerons la variation des pertes dans la chambre liée à l'insertion de calottes sur les parois de la cavité.

Afin de distinguer les impacts respectifs de la géométrie chaotique (ajout de diffuseurs de type calottes sphériques) et celui de la variation des pertes liée à cette modification géométrique, des charges absorbantes induisant des pertes équivalentes à celles liées aux calottes seront insérées dans la cavité parallélépipédique : nous pourrons ainsi comparer les performances des cavités classique et chaotique à niveau de pertes équivalent. Ces travaux ont conduit à la publication d'un article de conférence lors de EMC Europe 2019 [91] et ont également eu un écho dans les articles [39, 38] qui remettent en question l'apport

de la chaoticité.

Dans un premier temps, nous présentons les différents environnements de mesure, puis nous analysons l'apport des modifications géométriques ainsi que la compensation de l'absorption des calottes avec un absorbant. Enfin, nous discuterons de l'impact de la chaoticité en CRBM.

### 3.2 Description des protocoles de test

Dans le but d'appréhender l'apport de la chaoticité à l'intérieur d'une CRBM sur les statistiques de champ et sur les critères normatifs, une modification géométrique est réalisée grâce à l'introduction de plusieurs calottes métalliques sur les parois d'une cavité afin d'atteindre la chaoticité [92]. La chaoticité nécessite de rendre le volume non-intégrable. Ceci se fait par l'ajout de surfaces courbes, comme par exemple dans le billard de Sinai 2D avec des conditions aux limites de Dirichlet. La figure 3.1 extraite de l'article [40] présente la distribution de champs pour deux modes différents dans un billard de Sinai : un mode ergodique (gauche) et un mode « bouncing ball » (droite). L'introduction de surfaces courbes permet notamment de dévier les directions de propagation du champ dans la cavité (schématisées par des rayons dans l'approximation haute fréquence de l'optique géométrique), puisque sur ces surfaces, l'angle d'incidence varie en fonction du point de réflexion, contrairement au cas d'une surface plane.

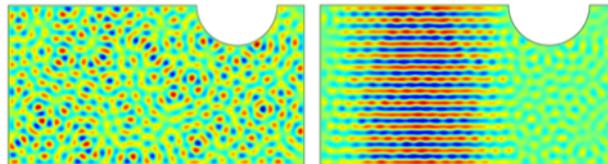


FIGURE 3.1 – Deux modes d'un billard de Sinai 2D avec des conditions aux limites de Dirichlet : un mode ergodique (gauche) et un mode bouncing-ball (droite) - Figure tirée de l'article [40].

La distribution des champs étant très sensible à la géométrie de la cavité, ou à l'environnement de mesure (comme le matériel présent dans la CRBM, l'antenne de réception par exemple) nous réalisons nos essais dans trois CRBM différentes. La CRBM de l'entreprise SIEPEL, celle du laboratoire ESYCOM à l'Université Gustave Eiffel et enfin celle du laboratoire IETR. Deux configurations pour une même CRBM sont étudiées : une « classique » et une « chaotique » que nous obtenons par l'ajout de diffuseurs. Un protocole de mesure a été mis en place pour définir le nombre et l'emplacement les plus adaptés des calottes dans les enceintes. Nous nous sommes appuyés sur l'article [40] pour justifier ce choix. D'après cet article, éviter l'existence des surfaces en parallèle permet de réduire l'apparition des modes réguliers qui nuisent à l'homogénéité et l'isotropie du champ. C'est pourquoi nous avons débuté les essais en positionnant trois calottes dans chaque enceinte sur trois murs orthogonaux. Les dimensions des calottes ont été choisies

dans le but de couvrir la plus grande surface possible sur les parois pour éviter les surfaces planes en regard. A partir de la LUF annoncée, nous avons fixé les bandes fréquentielles d'intérêt de notre protocole de test. Comme cette étude vise à décroître la LUF des CRBM, nos bandes débutent autour ou en-dessous des LUF annoncées au sens du critère normatif portant sur l'écart-type du maximum de champ électrique. La profondeur des calottes a été estimée pour être efficace à la fréquence basse d'utilisation des essais. Les calottes doivent avoir une profondeur minimale de  $\lambda/4$  pour rendre la cavité chaotique à une fréquence donnée (chapitre 2), par exemple de 25 cm à 300 MHz. Les dimensions des calottes sont également soumises à leur faisabilité lors du processus de fabrication. Dans un deuxième temps, les modifications de charge sont réalisées en introduisant des absorbants en mousse au sol dans chaque CRBM dans le but d'effectuer des comparaisons entre des CRBM de facteurs de qualité équivalents.

### 3.2.1 CRBM de l'entreprise SIEPEL

Une CRBM de l'entreprise SIEPEL va servir de référence à notre étude et nous allons la modifier afin de rendre son comportement chaotique en vue d'industrialiser le produit.

D'après les critères normatifs, la fréquence basse d'utilisation de la CRBM vide est estimée à environ 400 MHz. Trois calottes sont placées sur les parois pour la configuration chaotique et ont un diamètre de 1,80 m et une profondeur de 30 cm (figure 3.2). Ainsi, le volume en CRBM chaotique devient  $16,4 \text{ m}^3$  à partir d'un volume de cavité vide de  $17 \text{ m}^3$ . Nous débutons les essais à 200 MHz et montons jusqu'à 900 MHz afin d'estimer l'apport de la chaoticité dans une cavité supposée idéale i.e. dans le régime de Hill.

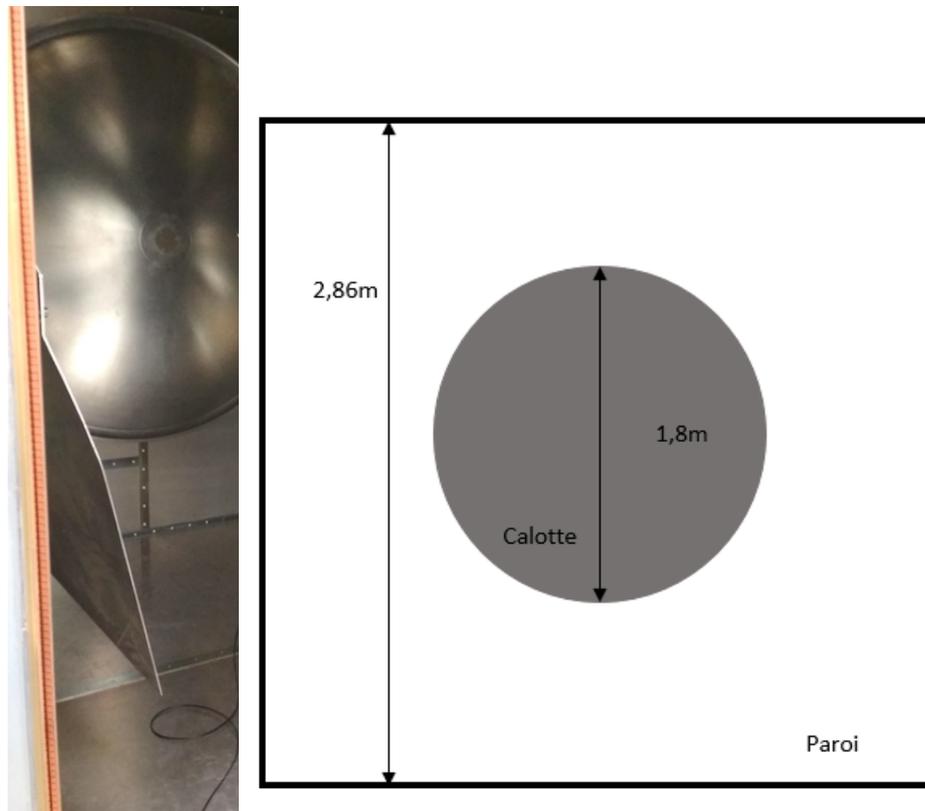


FIGURE 3.2 – Configuration chaotique de la CRBM de SIEPEL.

Pour l'étude réalisée sur la CRBM de SIEPEL, nous utilisons un générateur de signaux radio-fréquences relié à un amplificateur, lui-même connecté à un coupleur qui, à l'aide d'une sonde de puissance, collecte les données de puissance incidente et envoie le signal à l'antenne d'émission log-périodique positionnée derrière le brasseur (i.e. entre le brasseur et la paroi). En réception, une sonde de champ triaxiale permet de collecter les données de champ aux 8 extrémités du volume utile, à  $\lambda/4$  soit 37,5 cm des parois à 200 MHz. En raison de la présence des calottes de profondeur 30 cm, la distance aux parois de la chambre (en dessous des calottes) est alors de 67,5 cm. Ainsi, pour l'ensemble des essais, cette distance sera conservée. La figure 2.15 représente la configuration matérielle utilisée pour les essais normatifs. Ici, la même configuration est employée mais nous ne plaçons pas d'antenne de réception dans la chaîne de mesure afin de limiter les objets diffusants supplémentaires en dehors de ceux qui vont être apportés par les éléments « chaotiques ».

Pour effectuer une étude fine de l'impact de la chaotité en CRBM, le pas fréquentiel choisi est plus fin que celui défini dans les normes (tableau 3.1), nous avons choisi un pas de 2 MHz. Les normes préconisent de collecter les données sur 12 positions de brasseur au minimum, cependant, à basses fréquences (ici  $f_s$  représente la fréquence de départ i.e. la fréquence utilisable la plus faible définie par la norme), il est difficile d'atteindre un nombre de positions de brasseur non corrélées pour lequel les mesures sont effectuées

## CHAPITRE 3. QUESTIONNEMENTS SUR L'IMPACT DE LA CHAOTICITÉ

---

(chapitre 2). 60 positions de brasseur sont utilisées car ce nombre est bien supérieur au nombre de positions non corrélées dans la bande de fréquence principalement ciblée dans cette analyse.

Gamme de fréquences	Nombre minimal d'échantillons exigés pour la validation et l'essai	Nombre de fréquences exigées pour la validation
$f_s$ (fréquence de départ) à $3f_s$	12	20
$3f_s$ à $6f_s$	12	15
$6f_s$ à $10f_s$	12	10
Supérieur à $10f_s$	12	20/décade

TABLE 3.1 – Exigences d'échantillonnage selon la norme EN 61000-4-21.

### 3.2.2 CRBM du laboratoire ESYCOM

La CRBM du laboratoire ESYCOM est de dimension 2,95 x 2,75 x 2,35 m<sup>3</sup>. Les trois calottes placées sur trois murs orthogonaux ont un diamètre de 1,586 m et une profondeur de 28 cm (figure 3.3), ce qui réduit le volume de la cavité de 2,7%. La LUF de la cavité vide (sans calottes), définie selon les normes, est estimée à environ 400 MHz. La bande d'intérêt est de 300 à 600 MHz avec un pas fréquentiel de 1 MHz. De la même manière que pour la CRBM de SIEPEL, les données sont collectées pour 60 positions de brasseur.



FIGURE 3.3 – Configuration chaotique de la CRBM de l'ESYCOM.

Pour la CRBM du laboratoire ESYCOM, nous utilisons un ARV connecté à deux antennes monopôles, afin de collecter les paramètres  $S$  dans l'enceinte. L'antenne d'émission est fixe tandis que l'antenne de réception est déplacée sur les 8 extrémités du volume utile.

### 3.2.3 CRBM du laboratoire IETR

La troisième CRBM étudiée se situe au laboratoire IETR. Ses dimensions sont  $8,7 \times 2,9 \times 3,7 \text{ m}^3$ . La LUF de la CRBM vide (figure 3.4) est de 200 MHz et la bande d'intérêt choisie se situe entre 200 MHz et 1 GHz avec un pas fréquentiel de 1 MHz.



FIGURE 3.4 – Configuration classique de la CRBM de l'IETR.

Les tests en CRBM chaotique ont été effectués en plaçant là aussi 3 calottes dans l'enceinte de l'IETR. Cependant, étant donné la taille de la cavité et les calottes (celles de SIEPEL), nous avons lancé des essais avec d'autres calottes et hémisphères à notre disposition dans le but d'éviter au maximum les surfaces planes en regard. Pour cela, nous avons ajouté cinq hémisphères de diamètre 50 cm et trois calottes de diamètre 50 cm et de profondeur 25 cm (figure 3.5), le volume de la cavité classique est donc réduite de 1,5%.



FIGURE 3.5 – Configuration chaotique de la CRBM de l'IETR.

Pour les essais à l'IETR, une antenne log-périodique (VULPB9118D de Schwarzbeck) est utilisée en émission et une sonde de champ monoaxiale collecte les paramètres  $S$  dans l'enceinte à l'aide d'un ARV. L'antenne d'excitation est fixe, et, comme il s'agit d'une antenne directive, elle est orientée de façon à rayonner de façon prépondérante en direction du brasseur de modes. Nous déplaçons la sonde de champ sur 8 positions au sein du volume utile de la CRBM pour deux positions basses (66 cm) et deux positions hautes (195 cm). Une rotation azimutale motorisée permet la rotation de la sonde en 4 positions pour chacune des deux hauteurs et les données sont collectées pour 60 positions de brasseur.

### 3.2.4 Récapitulatif des protocoles de test

Les paramètres de mesure choisis pour cette campagne sont présentés dans le tableau 3.2.

	<b>SIEPEL</b>	<b>ESYCOM</b>	<b>IETR</b>
<b>Matériel de collecte des données aux 8 points du volume utile</b>	Sonde de champ isotropique	Antenne de réception monopôle reliée à un ARV	Sonde de champ monoaxiale reliée à un ARV
<b>Bande et pas fréquentiels</b>	200 à 900 MHz 2 MHz de pas fréquentiel	300 à 600 MHz 1 MHz de pas fréquentiel	200 à 1000 MHz 1 MHz de pas fréquentiel
<b>Nombre de positions de brasseur</b>	60	60	60
<b>Antenne d'excitation</b>	Log-périodique	Monopôle	Log-périodique

TABLE 3.2 – Tableau récapitulatif des protocoles de test.

Un récapitulatif des bancs de mesure utilisés est par ailleurs présenté dans l'annexe B.

### 3.3 Analyse de l'apport des modifications géométriques

Les mesures ont été reproduites dans les trois environnements de test mais l'ensemble des résultats n'a pas été restitué afin d'éviter les redondances ; nous nous focalisons ici sur une série limitée de résultats les plus significatifs. Nous présentons un travail d'analyse approfondi i.e. avant de pouvoir conclure sur l'impact de la chaotité. Les résultats conduisent à des conclusions similaires pour l'ensemble des CRBM.

#### 3.3.1 Comparaison entre la CRBM vide et celle rendue chaotique

Dans cette section, on examine la contribution de la chaotité en CRBM en comparant la CRBM classique (aussi appelée vide i.e. sans calottes) du laboratoire IETR avec la même CRBM rendue chaotique par l'ajout de calottes métalliques sur les murs de la cavité.

#### Présentation des indicateurs

Pour comprendre l'impact de la modification géométrique en CRBM, nous analysons les critères exposés dans le chapitre 2. Compte tenu de la nature stochastique des grandeurs considérées, de fortes variations fréquentielles ont été observées sur les indicateurs étudiés, c'est pourquoi nous appliquons une moyenne glissante sur 10 MHz avec un

pas de 1 MHz pour l'ensemble des indicateurs considérés :

$$indicateur_{liss}(f) = \langle indicator(f) \rangle_{[f-x/2, f+x/2]} \quad (3.1)$$

Avec  $x = 10$  MHz et  $\langle \cdot \rangle_{[A,B]}$  la moyenne sur l'intervalle fréquentiel  $[A,B]$ .

On estime tout d'abord l'effet de charge introduit par les calottes en calculant le facteur de qualité à partir de la seule antenne d'émission pour les mesures de l'IETR à partir de l'expression introduite au chapitre 2 et que nous restituons ici :

$$Q_{1ant} = \left\langle |S_{11} - \langle S_{11} \rangle|^2 \right\rangle_{\tau} \frac{Z_0 \omega \epsilon_0 V}{\frac{\lambda^2}{4\pi} (1 - |\langle S_{11} \rangle_{\tau}|^2)^2 \eta^2} \quad (3.2)$$

- $\langle \cdot \rangle_{\tau}$  correspond au moyennage sur toutes les  $\tau$  positions de brasseur,
- $S_{11}$  est le coefficient de réflexion complexe de l'antenne de transmission,
- $Z_0$  peut être considéré comme l'impédance en espace libre associée à chaque onde plane individuelle composant le spectre complet avec  $Z_0 = 120\pi$ ,
- $\omega = 2\pi f$  représente la pulsation,
- $\epsilon_0$  est la permittivité du vide ici soit  $8,854187 \cdot 10^{-12}$  F m<sup>-1</sup>,
- $V$  correspond au volume de la cage. Pour une cavité parallélépipédique  $V_{classique} = L \times l \times h$ . Nous tiendrons compte de la réduction du volume lors de l'ajout des calottes sphériques dans la cavité,
- $\frac{\lambda^2}{4\pi}$  est la surface équivalente de l'antenne d'émission dans la chambre,
- $\eta$  est le facteur d'efficacité de l'antenne considérée. Pour les laboratoires, le rendement est estimé à 0,9.

Ce calcul est réalisé pour chaque position de mesure d'antenne de réception ou de sonde de champ, puis ces résultats sont moyennés sur l'ensemble des positions de mesure.

Avec les mesures faites chez SIEPEL, le calcul est différent puisque nous ne collectons pas les paramètres  $S$  à l'aide d'un ARV mais les données de champ à l'aide d'une sonde de champ triaxiale :

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{\langle P_{recue} \rangle_{\tau}}{\langle P_{entree} \rangle_{\tau}} \right\rangle_n \quad (3.3)$$

Où

- $V$  est le volume de la chambre en m<sup>3</sup>,
- $\lambda$  est la longueur d'onde en m,
- $\frac{\langle P_{recue} \rangle_{\tau}}{\langle P_{entree} \rangle_{\tau}}$  est le rapport de la puissance reçue sur la puissance d'entrée, chacune d'elles étant moyennée sur une séquence complète du brasseur,
- $\langle \cdot \rangle_n$  indique la moyenne sur les  $n$  positions de sonde de champ,
- $\eta_{Tx}$  et  $\eta_{Rx}$  sont les facteurs de rendement (adimensionnels) de l'antenne d'émission (Tx) et de la sonde de champ (Rx).

Comme nous en avons fait mention au chapitre 2, les données manipulées sont les com-

posantes cartésiennes de champ et non son module. C'est pourquoi, lors du traitement, nous posons :

$$P_{recue} = \frac{\lambda^2}{8\pi} \frac{3E_\alpha^2}{Z_0} P_{entree} \quad (3.4)$$

avec  $\alpha = x, y$  ou  $z$  les données des composantes cartésiennes de champ collectées à l'aide d'une sonde de champ triaxiale. L'utilisation du terme  $3E_\alpha^2$  nous permet de retrouver l'ordre de grandeur de la puissance que nous aurions à partir du module du champ total à partir de la connaissance d'une seule composante du champ.

Il convient également d'évaluer approximativement le recouvrement modal  $d$ , défini comme le rapport entre l'écart fréquentiel entre deux fréquences de résonance et la largeur moyenne (supposée localement constante) des modes. Celui-ci peut s'exprimer en fonction de la densité modale  $D(f_0) \approx \frac{8\pi V f_0^2}{c^3}$ , tirée de la formule de Weyl [93]  $N(f_0) = \frac{8\pi V f_0^3}{Qc^3}$ , et du facteur de qualité  $Q$  :

$$d \approx \frac{8\pi V f^3}{Qc^3} \quad (3.5)$$

On estime ensuite le rapport écart-type sur moyenne de champ aussi appelé coefficient de variation CV :

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{\tau \times N} \sum (E_{\alpha i} - \langle E_\alpha \rangle_{\tau, n})^2}}{\langle E_\alpha \rangle_{\tau, n}} \quad (3.6)$$

où  $\langle E_\alpha \rangle_{\tau, n}$  correspond à la moyenne des composantes de champ  $\alpha = x, y, z$  sur les  $\tau$  positions de brasseur et sur les  $N$  positions d'antenne ou de sonde de champ. Chez SIEPEL, le calcul s'effectue pour chacune des composantes de champ. Pour les données de l'IETR, on ne mesure qu'une composante rectangulaire de champ (sonde monoaxiale) et sans référence à un repère général  $Oxyz$ . Ainsi,  $\alpha$  correspond aux données d'une composante rectangulaire de champ. Au laboratoire ESYCOM, les paramètres  $|S_{21}|$  sont collectées sur une antenne monopôle via un ARV, ce qui revient également à ne considérer qu'une composante de champ. Pour une distribution de Rayleigh, la valeur du CV est théoriquement égale à 0,52 (section 2.1.2).

Nous étudions également le critère normatif d'uniformité du champ selon la norme EN 61000-4-21 et le nombre d'états non corrélés selon la fréquence dans la CRBM. Pour évaluer le nombre d'états non corrélés, nous utilisons la formule approchée de la méthode basée sur la théorie de l'information présentée dans la section 2.1.1 :

$$N_{eff} = \frac{N_{ech}^2}{\sum |r_{ij}|^2} \quad (3.7)$$

avec  $N_{ech}$  la taille de l'échantillon collecté, c'est-à-dire le nombre de réalisations prises sur l'ensemble des états de CRBM et  $r_{ij}$  les coefficients d'intercorrélations entre deux états de

CRBM  $(i, j)$ .

Pour l'indicateur d'uniformité du champ selon la norme EN 61000-4-21, nous nous basons sur le protocole suivant. Nous calculons dans un premier temps les composantes cartésiennes de champ normalisées par rapport à la puissance incidente :

$$E_{norm\ n,\alpha} = \frac{E_{max\ n,\alpha}}{\sqrt{\langle P_{entree} \rangle_\tau}} \quad (3.8)$$

où  $E_{max\ n,\alpha}$  est la mesure maximale (en V/m) en chaque position de sonde  $n$  et pour chacun de ses axes  $\alpha = x$  ou  $y$  ou  $z$  (i.e. 24 mesures ou 8 mesures dans le cas de la norme EN 61000-4-21) au cours de la rotation du brasseur, et  $P_{entree}$  est la puissance moyenne d'entrée sur les positions de brasseur (en W) dans la chambre.

Puis, nous calculons l'écart-type  $\sigma$  :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (E_{norm\ n,\alpha} - \langle E_{norm\ n,\alpha} \rangle_n)^2}{N - 1}} \quad (3.9)$$

où

- $N$  est le nombre de mesures,
- $E_{norm\ n,\alpha}$  est une composante cartésienne de champ normalisée par rapport à la puissance incidente (équation (3.8)),
- $\langle \cdot \rangle_n$  indique la moyenne arithmétique pour 8 positions de sonde. Dans le cas où les 3 composantes de champs sont mesurées,  $8 \times 3 = 24$  valeurs sont considérées.

Enfin, nous en déduisons l'écart-type de champ en dB :

$$\sigma_{dB} = 20 \times \log_{10} \left( \frac{\sigma + \langle E_\alpha \rangle_n}{\langle E_\alpha \rangle_n} \right) \quad (3.10)$$

Ce calcul est réalisé tel quel pour les données de la CRBM de SIEPEL. Pour les données de l'IETR et de l'ESYCOM, nous utilisons les coefficients de transmission à la place des composantes de champ. Pour le critère d'uniformité du champ, les résultats sont présentés moyennés sur une fenêtre glissante mais aussi sous forme brute puisqu'il s'agit d'observer l'impact de la chaotité sur les critères normatifs. Les courbes expérimentales sont comparées au gabarit de la norme EN 61000-4-21.

## Résultats

La figure 3.6 représente la variation fréquentielle du facteur de qualité (figure 3.6 a), du recouvrement modal (figure 3.6 b), du rapport écart-type sur moyenne de champ (figure 3.6 c), de l'uniformité du champ moyennée sur une fenêtre glissante (figure 3.6 d), de l'uniformité du champ comparé à la norme EN 61000-4-21 (figure 3.6 e) et du nombre d'états non corrélés (figure 3.6 f) en CRBM classique (orange) et en CRBM chaotique (bleue) pour les données de l'IETR.

### CHAPITRE 3. QUESTIONNEMENTS SUR L'IMPACT DE LA CHAOTICITÉ

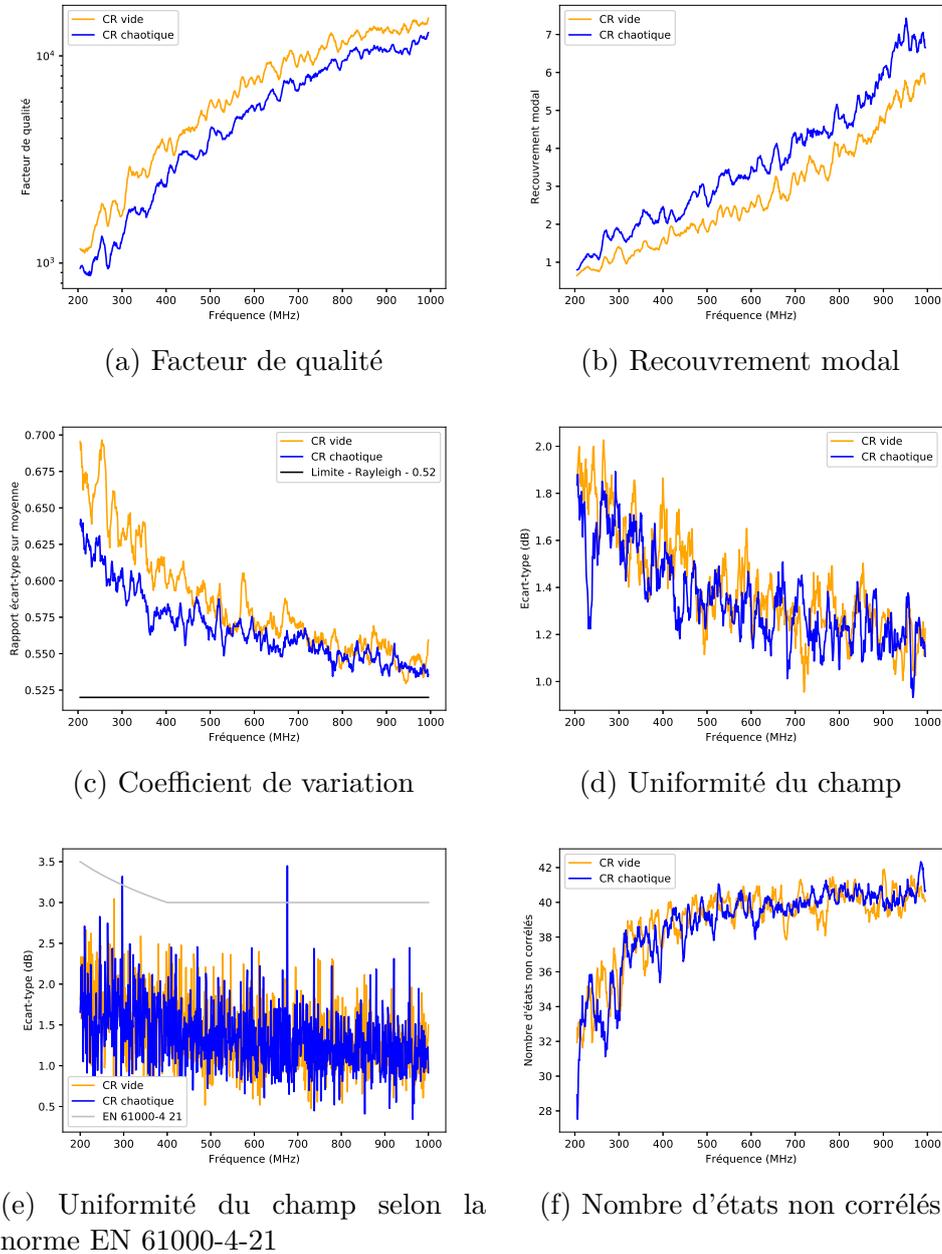


FIGURE 3.6 – Variation fréquentielle des paramètres statistiques et normatifs en CRBM classique (orange) et en CRBM chaotique (bleue) pour les données de l'IETR.

Les courbes des facteurs de qualité sont représentées en échelle logarithmique pour une meilleure lisibilité. Celui-ci est plus faible dans la configuration chaotique que dans le cas classique, ce qui implique un recouvrement modal plus élevé. En effet, le facteur de qualité est lié d'une part au dispositif de mesure introduit dans la chambre, en particulier les antennes (non modifié entre les deux configurations de la chambre), et d'autre part à l'effet Joule sur les murs de la cavité. Le facteur de qualité relatif à l'effet

Joule sur les parois est inversement proportionnel à  $V/S$  où  $V$  est le volume de la cavité et  $S$  représente la surface des parois, impliquant alors une diminution du facteur de qualité. Or, l'insertion des calottes sphériques décroît le volume de la cavité et accroît les surfaces des parois. Les résultats du CV sont également moins élevés et plus proches de la valeur idéale pour la configuration chaotique, spécialement en basses fréquences. Bien que ces courbes soient affectées par des fluctuations statistiques, les résultats pour l'uniformité du champ semblent stables; les écarts sont beaucoup moins apparents que dans le cas des paramètres étudiés précédemment. Le paramètre CV diminue fortement pour chaque configuration à partir d'environ 600 MHz. A partir de cette fréquence, pour laquelle le recouvrement modal est de 2 en cavité classique et 3 en cavité chaotique, la loi de Pnini-Shapiro prédite pour une cavité chaotique semble suivie par les composantes cartésiennes du champ. Il en va de même pour l'écart-type de champ. Un plateau est constaté pour les paramètres CV et écart-type de champ avec des courbes chaotiques et classiques proches à partir d'environ 800 MHz, ce qui correspond à un recouvrement modal autour de 4 pour une configuration vide et de 5 pour une configuration chaotique. Ces résultats confirment les conclusions obtenues au chapitre 2 quant au recouvrement modal à atteindre pour suivre une loi de Rayleigh avec un impact des paramètres CV et écart-type de champ à partir de  $d = 2$  et un plateau à  $d = 5$ . Le nombre de réalisations non corrélées en CRBM est proche en CRBM chaotique et classique pour atteindre un palier d'environ 40 états non corrélés aux environs de 600 MHz.

Dans ce chapitre, nous ne calculons pas les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité car les données ne sont pas collectées par une sonde triaxiale dans les CRBM des laboratoires universitaires.

### Confrontation avec une loi de Rayleigh et une loi de Pnini-Shapiro

Pour affiner l'étude sur l'impact de la chaoticité, il est important d'examiner les distributions du champ électrique à partir des intensités normalisées du champ électrique  $I_\alpha$  selon la loi de Pnini et Shapiro puisqu'elle décrit les propriétés universelles des cavités chaotiques pour un recouvrement modal  $d$  et en fonction de la rigidité de phase  $\rho$  (section 2.1.2). Dans un premier temps, ces valeurs sont extraites à partir des données expérimentales. Pour la CRBM de SIEPEL, nous utilisons les valeurs des composantes cartésiennes de champ  $E_r$ . Pour l'IETR et l'ESYCOM, nous utilisons les données  $S_{21}$  complexes  $I_{\alpha_{experimental}} = \frac{|S_{21_{cpx}}|^2}{\langle \langle |S_{21_{cpx}}|^2 \rangle_{position\ antenna} \rangle_{position\ brasqueur}}$ . Puis, 1000 tirages aléatoires selon la loi de Pnini-Shapiro sont lancés avec comme données d'entrée les valeurs expérimentales du recouvrement modal tous les 10 MHz.

Nous traçons dans un premier temps les CDF expérimentales et analytiques des distributions du champ électrique, notées  $CDF(E_r)$ , dans le cas d'une CRBM vide (figure 3.7), puis dans celle rendue chaotique (figure 3.8) pour différentes fréquences choisies (400 et 900 MHz).

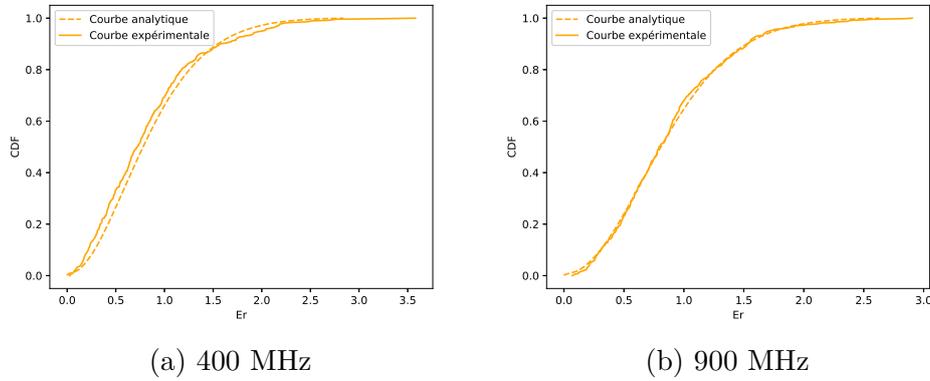


FIGURE 3.7 – CDF de champ expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM vide à l'IETR.

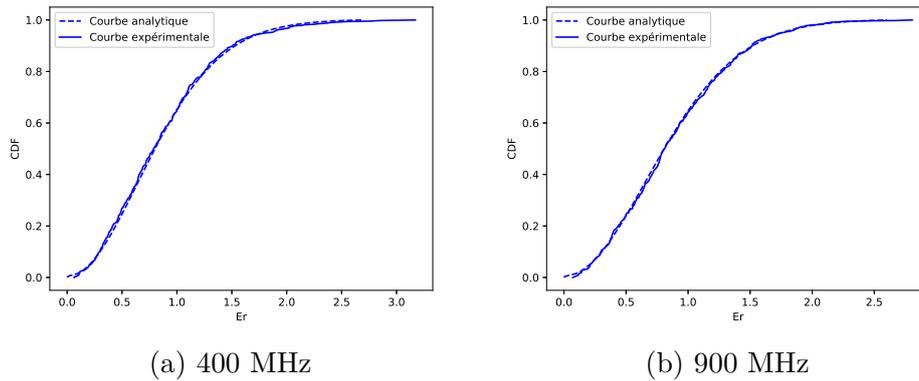


FIGURE 3.8 – CDF de champ expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM chaotique à l'IETR.

Les courbes des CDF expérimentales et analytiques se rapprochent en augmentant la fréquence et c'est au niveau des queues de distribution que la différence se fait.

Pour plus de clarté dans nos figures, nous calculons les écarts maximum, sur l'ensemble de la plage des valeurs du champ considérées, entre les CDF expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro tracées pour des fréquences variant de 200 à 1000 MHz. Ainsi, nous pourrions comparer une distribution empirique et sa loi associée si le processus est une loi de Pnini-Shapiro. La figure 3.9 présente la variation fréquentielle des écarts entre CDF expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM chaotique (bleue) et classique (orange), après un lissage par une moyenne glissante de 10 MHz. La CDF de Pnini-Shapiro théorique est reconstituée avec un échantillon de même taille que la CDF expérimentale, soit 60 pour les données de l'IETR.

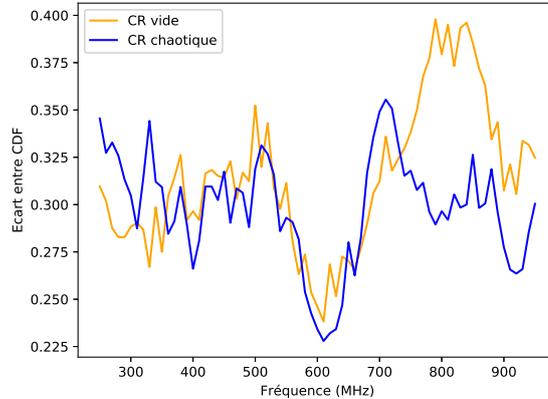


FIGURE 3.9 – Ecarts maximaux entre CDF expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM chaotique (bleue) et en CRBM classique (orange) à l'IETR.

Nous observons un effet de géométrie de la cavité avec un meilleur accord entre les distributions expérimentales et théoriques du champ dans la cavité chaotique à partir de 720 MHz. En-dessous de cette fréquence, les courbes sont proches et ne montrent pas de meilleures propriétés pour une des deux configurations de la cavité.

Un dernier point reste à aborder pour achever l'étude de l'apport de la chaoticité en CRBM par l'ajout de calottes. Afin de confronter nos résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par simulations de Monte-Carlo, nous lançons 1000 tirages selon la loi de Rayleigh et une loi de Pnini-Shapiro dont les données d'entrée correspondent aux valeurs expérimentales du recouvrement modal et au nombre de positions de brasseur choisis (60 pour l'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre). Les rapports écarts-types sur moyennes sont étudiés pour voir si on observe une diminution plus rapide de l'écart entre courbes empiriques et théoriques en CRBM chaotique plutôt qu'en CRBM classique. Les écarts-types de champ calculés selon la norme EN 61000-4-21 sont également tracés. Les résultats des coefficients de variation expérimentaux et selon les lois de Rayleigh et de Pnini-Shapiro moyennés sur l'ensemble des tirages sont présentés sur la figure 3.10 dans la configuration classique d'une part (a) et chaotique d'autre part (b) avec leurs intervalles de confiance correspondant aux valeurs minimales et maximales obtenues lors des 1000 tirages.

### CHAPITRE 3. QUESTIONNEMENTS SUR L'IMPACT DE LA CHAOTICITÉ

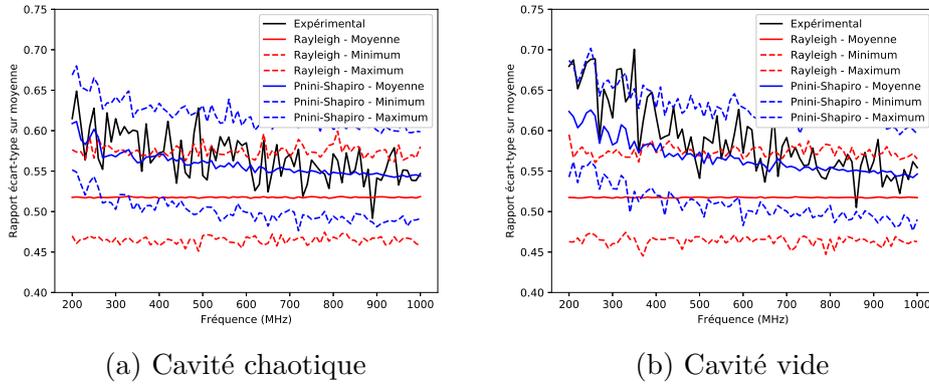


FIGURE 3.10 – Coefficients de variation en fonction de la fréquence pour les données expérimentales de l'IETR (noire), selon la loi de Rayleigh (rouge) et la loi de Pnini-Shapiro (bleue).

On voit nettement que l'utilisation de la loi de distribution de Pnini-Shapiro permet une meilleure représentation des données expérimentales pour l'estimation du paramètre CV, et ce en particulier en basses fréquences puisque le CV selon la loi de Rayleigh est globalement constant sur l'ensemble de la bande fréquentielle, tandis qu'une décroissance fréquentielle est observée avec la loi de Pnini-Shapiro comme en mesure lorsque la fréquence augmente ; les courbes obtenues avec les lois de Rayleigh et de Pnini-Shapiro se rapprochent. Par ailleurs, la courbe expérimentale en cavité chaotique présente un meilleur accord avec la courbe obtenue par le tirage suivant la loi de Pnini-Shapiro qu'en CRBM classique, là aussi surtout en basses fréquences.

Nous traçons les mêmes courbes pour l'uniformité du maximum de champ selon la norme EN 61000-4-21 (figures 3.11).

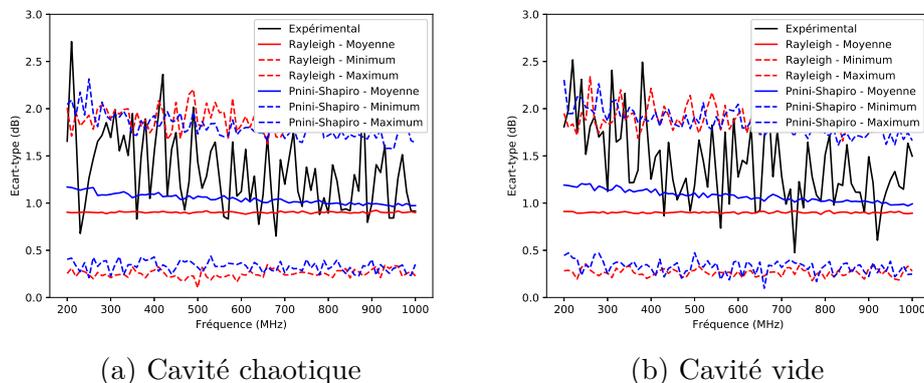


FIGURE 3.11 – Ecart-types du maximum de champ en fonction de la fréquence pour les données expérimentales de l'IETR (noire), selon la loi de Rayleigh (rouge) et la loi de Pnini-Shapiro (bleue).

Les courbes expérimentales de l'uniformité du champ sont légèrement plus proches des courbes obtenues par tirage à partir de la loi de Pnini-Shapiro par rapport à la loi de Rayleigh. On note toutefois peu de dépassements des intervalles de confiance associés aux lois de Pnini-Shapiro et de Rayleigh, et ce dans les deux cavités. Pour ce paramètre d'uniformité du champ également, sa valeur étant globalement invariante avec la fréquence dans le cas de la loi de Rayleigh, l'utilisation de la loi de Pnini-Shapiro permet de mieux rendre compte du comportement observé.

La loi de Pnini-Shapiro permet de mieux prédire le comportement du champ dans l'enceinte que la loi de Rayleigh, spécialement en basses fréquences. On peut donc conclure que l'utilisation d'une loi de Pnini-Shapiro est préférable à une loi de Rayleigh. L'écart toutefois existant entre les résultats de mesure et ceux prédits par Pnini-Shapiro peut s'expliquer par la présence de pertes localisées au niveau des antennes, alors que cette loi est adaptée au cas de pertes uniformément réparties. Par ailleurs, les conclusions tirées des variations fréquentielles du rapport écart-type sur moyenne et de l'écart-type du maximum de champ confirment nos résultats antérieurs sur la moins grande sensibilité de l'indicateur d'uniformité du champ (chapitre 2). Ainsi, sur la base d'une loi support de Pnini-Shapiro, nous avons démontré par simulation de Monte-Carlo que le rapport écart-type sur moyenne est discriminant tandis que le critère normatif d'uniformité du champ ne l'est pas que ce soit en CRBM vide ou chaotique. En effet, à taille d'échantillon identique, on observe un impact de la configuration sur le CV mais pas sur l'écart-type de champ. L'ajout de calottes conduit donc à une amélioration du rapport écart-type sur moyenne de champ (plus proche d'une distribution de Rayleigh) et à un meilleur accord des distributions du champ selon Pnini-Shapiro. Les écarts sont cependant beaucoup moins marqués sur le critère normatif d'uniformité du champ.

L'introduction des calottes dans la CRBM pour rendre sa géométrie chaotique a un impact positif sur certains critères de performance mais implique également une

diminution notable du facteur de qualité. Pour comprendre si les effets observés sont dus aux modifications géométriques ou à la diminution du facteur de qualité, nous comparons une CRBM vide avec une CRBM chargée par un absorbant.

### 3.3.2 Distinction entre effet des pertes et effet de la géométrie

Cette section concerne l'effet de la charge / absorption dans une CRBM sur les critères observés précédemment. Les résultats de cette section correspondent aux tests effectués au sein de la CRBM classique de SIEPEL et en la chargeant au sol avec un absorbant plat de type mousse polyuréthane chargée en carbone de dimensions 100 x 630 x 6 mm<sup>3</sup>. Les données sont collectées à l'aide d'une sonde de champ triaxiale. Les indicateurs présentés ont été obtenus à partir de la composante  $x$  du champ électrique, mais des résultats similaires sont obtenus sur les axes  $y$  et  $z$ . La figure 3.12 présente les indicateurs précédemment étudiés.

### CHAPITRE 3. QUESTIONNEMENTS SUR L'IMPACT DE LA CHAOTICITÉ

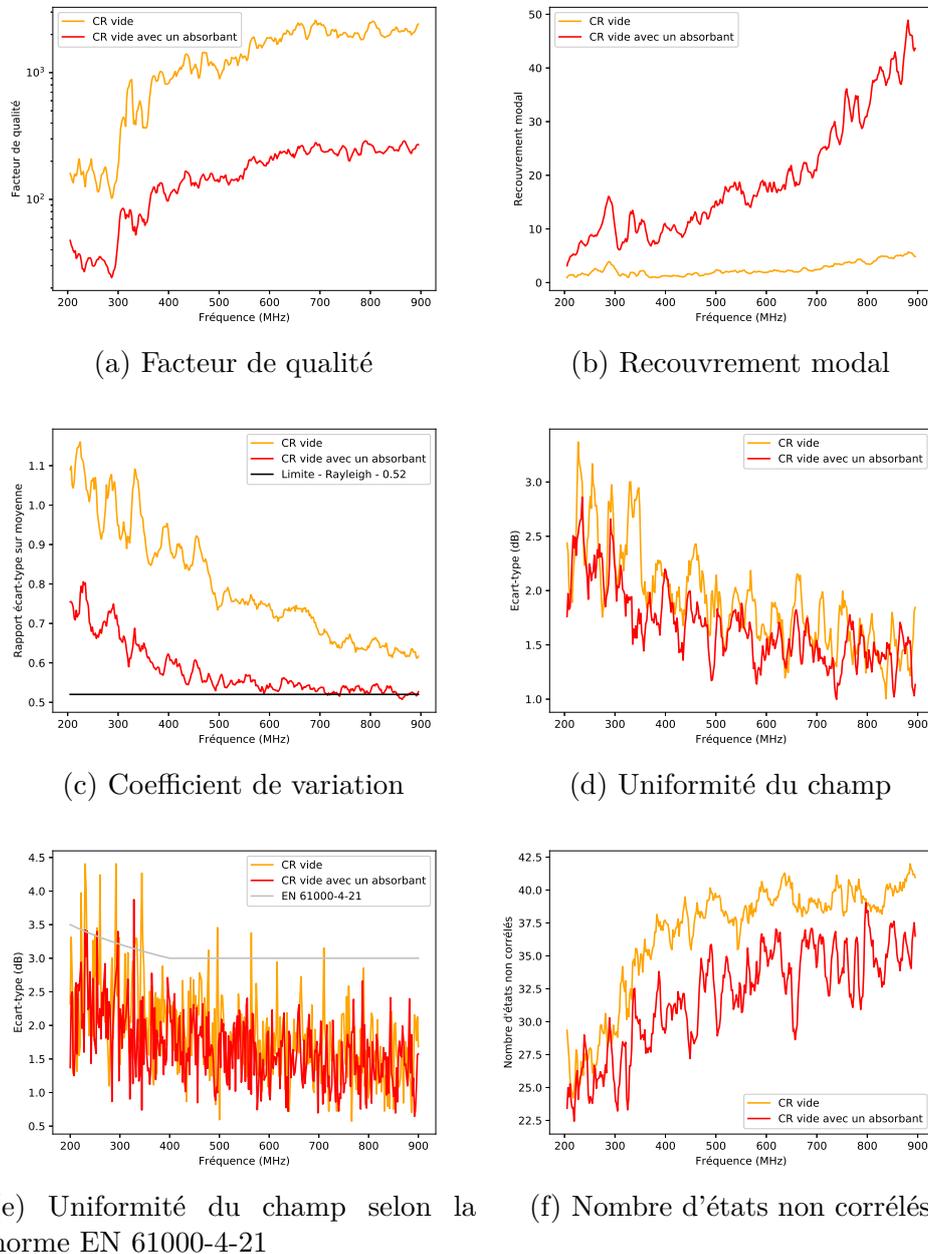


FIGURE 3.12 – Variation fréquentielle des paramètres statistiques et normatifs en CRBM classique (orange) et en CRBM classique avec un absorbant (rouge) pour les données de SIEPEL.

La figure 3.12 met en évidence la forte diminution du facteur de qualité qui est corrélée à la forte augmentation du recouvrement modal lors de l'ajout de l'absorbant dans la CRBM de SIEPEL. Cela a également un impact conséquent sur le CV. En effet, la limite idéale de l'hypothèse de Hill, à savoir un rapport de 0,52, n'est jamais atteinte dans le cas de la configuration non chargée. Dans ce cas, le recouvrement modal atteint un maximum

de 5,5 sur la bande fréquentielle étudiée. Or, nous avons vu au cours du chapitre 2 et dans la partie 3.3.1 qu'un fonctionnement idéal est atteint lorsque le recouvrement modal atteint une valeur d'environ 5. D'après la figure 3.12 f, la présence de matériau absorbant entraîne une forte diminution du nombre de positions de brasseur non corrélées liées à la plus forte corrélation entre modes lorsque l'absorption augmente. La décorrélacion entre les états de la chambre nécessite donc une variation angulaire de la position du brasseur plus importante. En outre, le champ maximum est plus uniforme lorsque les pertes augmentent (figure 3.12 d et e). Nous observons une amélioration significative de l'uniformité statistique du champ que ce soit en moyenne ou avec les données brutes. Lorsque le matériau absorbant est présent, seuls 5 dépassements de la limite normative sont observés sur l'axe  $x$  dans la bande de fréquence choisie tandis que 18 dépassements sont dénombrés pour la configuration vide.

Nous traçons également les écarts entre fonctions de répartition du champ issues des données expérimentales et celles issues de la loi de Pnini-Shapiro de paramètres équivalents (figure 3.13). Les CDF expérimentale et théorique sont générées avec les mêmes tailles d'échantillons, soit 60 ici.

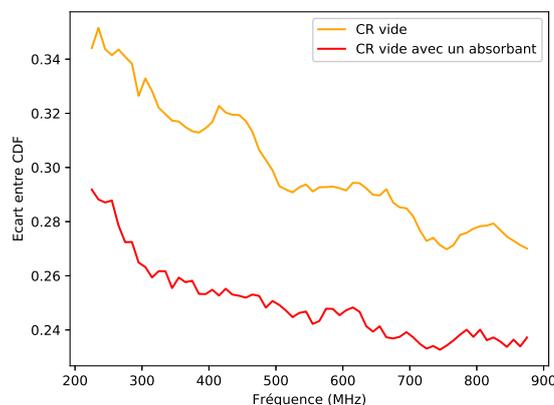


FIGURE 3.13 – Écarts maximums entre CDF expérimentale et CDF obtenus par tirage suivant la loi de Pnini-Shapiro en CRBM classique (orange) et contenant un absorbant (rouge) chez SIEPEL.

Un bien meilleur accord est observé entre les distributions expérimentales et théoriques du champ dans la cavité chargée. À partir de la figure 3.9 nous avons conclu que le rapprochement de la CDF de Pnini-Shapiro est l'indice d'une cavité dont les modifications géométriques la rapproche d'une cavité chaotique. Ici cependant, ce rapprochement est constaté mais sans changement réel de géométrie. Cela signifie donc que l'écart entre CDF de Pnini-Shapiro et toute CDF empirique même non chaotique devient faible si  $d$  est suffisant. Cela rejoint l'hypothèse que si nous ne disposons pas d'une cavité chaotique alors augmenter  $d$  de telle sorte que  $d > 5$  est suffisant pour se rapprocher d'une loi de Pnini-Shapiro qui elle-même se rapproche d'une loi de Rayleigh (au moins pour une

### CHAPITRE 3. QUESTIONNEMENTS SUR L'IMPACT DE LA CHAOTICITÉ

---

taille d'échantillon limitée à quelques dizaines). Donc encore une fois, il est difficile de discriminer l'effet des pertes de l'effet de la géométrie. Le matériau absorbant participe à l'augmentation du nombre moyen de modes excités à chaque fréquence et à chaque position de brasseur. Ceci réduit le nombre d'états de brasseur non corrélés de la chambre à une limite apparemment encore acceptable (supérieure à 10 réalisations non corrélées comme vu au chapitre 2 ou respectant la loi des grands nombres i.e. une valeur supérieure à environ 20) puisque ce nombre reste toujours supérieur à 22 (figure 3.12 f).

Pour confirmer les conclusions précédemment établies, nous tirons 1000 échantillons aléatoires selon une loi de Pnini-Shapiro et une loi de Rayleigh dont les données d'entrée correspondent aux valeurs expérimentales du recouvrement modal pour un échantillon de taille 60. De la même manière que précédemment, nous observons les rapports écart-type sur moyenne de champ et l'indicateur d'uniformité du champ selon les normes (figures 3.14 et 3.15).

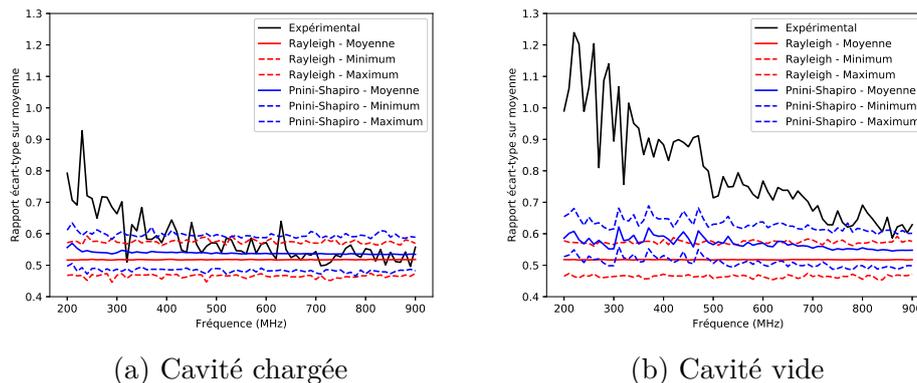


FIGURE 3.14 – Coefficients de variation en fonction de la fréquence pour les données expérimentales à SIEPEL (noire), selon la loi de Rayleigh (rouge) et la loi de Pnini-Shapiro (bleue) en cavités classique et chargée.

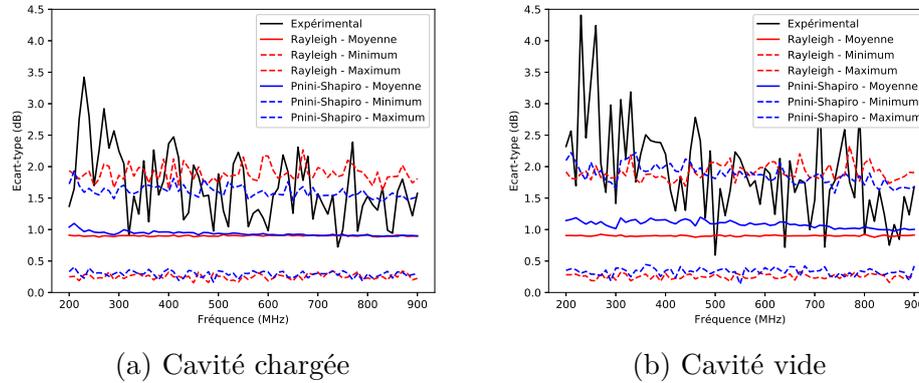


FIGURE 3.15 – Ecart-types de champ en fonction de la fréquence pour les données expérimentales à SIEPEL (noire), selon la loi de Rayleigh (rouge) et la loi de Pnini-Shapiro (bleue) en cavités classique et chargée.

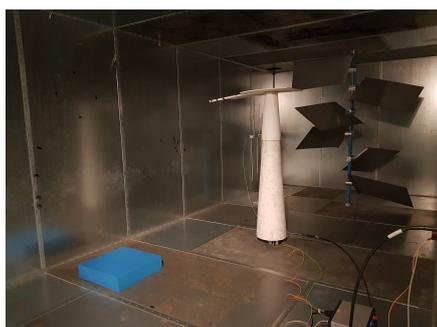
L'analyse des courbes des CV montrent que, dans le cas de la cavité chargée, la courbe expérimentale reste globalement dans les intervalles de confiance relatifs aux lois de Pnini-Shapiro et de Rayleigh au-dessus de 300 MHz, alors que dans le cas de la cavité vide, la courbe expérimentale reste totalement en dehors de ces intervalles. Concernant les écarts-types de champs, un meilleur respect des intervalles de confiance est obtenu dans le cas de la cavité chargée jusqu'à environ 300 MHz. Les lois de distribution sont proches même si la loi de Pnini-Shapiro est plus proche de la courbe expérimentale que la loi de Rayleigh.

Pour conclure cette partie, nous pouvons confirmer que la valeur du CV se rapproche de celle obtenue avec une distribution de Rayleigh lorsque l'on charge la CRBM. Sans que l'accord soit parfait, la loi de Pnini-Shapiro constitue un meilleur prédicteur de ce comportement que la loi de Rayleigh. Cependant, si l'on souhaite réduire significativement l'écart-type de champ, il est nécessaire en retour d'accroître de façon importante la charge au détriment du nombre de réalisations non corrélées. Il semble raisonnable de rechercher un compromis entre l'amélioration des performances et la préservation du facteur de qualité.

D'après nos observations, il existe une diminution notable du facteur de qualité en présence des calottes. La chaotité a un impact mais nous modifions deux paramètres en même temps : la géométrie et l'absorption. Si nous voulons distinguer les effets de l'absorption et de la géométrie, nous devons travailler à facteur de qualité constant. Pour ce faire, nous chargeons une CRBM avec différents types, formes et concentration d'absorbants. Le but est d'obtenir un facteur de qualité équivalent entre la CRBM chaotique et la CRBM classique chargée d'absorbants. Nous présentons les résultats de cette étude dans la section suivante.

### 3.4 Compensation de l'absorption des calottes avec un absorbant dans une CRBM conventionnelle

Pour que seul l'effet de la chaotité puisse être mis en relief, nous effectuons une compensation de l'absorption induite par les calottes avec un absorbant dans une CRBM conventionnelle. Nous encadrons le facteur de qualité de la CRBM chaotique du laboratoire de l'IETR par deux configurations de CRBM classique chargée par des absorbants mous. En effet, il est difficile d'obtenir précisément la même condition de charge, cela dépend de la fréquence choisie, c'est pourquoi deux configurations proches ont été sélectionnées pour encadrer le facteur de qualité de la configuration chaotique. Dans la première configuration, nous chargeons la chambre classique i.e. sans calotte avec un absorbant noté absorbant 1 (figure 3.16 a). Pour la deuxième configuration, nous chargeons la chambre avec un absorbant moins volumineux, nommé absorbant 2 (figure 3.16 b).



(a) Absorbant 1



(b) Absorbant 2

FIGURE 3.16 – Photos des absorbants 1 et 2 présents dans la CRBM classique de l'IETR.

La figure 3.17 montre la variation en fréquence du facteur de qualité, du recouvrement modal, du coefficient de variation, de l'uniformité du champ en moyenne glissante, de l'uniformité du champ selon la norme EN 61000-4-21 et du nombre d'états non corrélés dans la CRBM contenant l'absorbant 1 (rouge), l'absorbant 2 (violet) et dans la CRBM chaotique (bleue). En dehors de la figure 3.17e, ces quantités sont moyennées sur une fenêtre glissante de 10 MHz.

### CHAPITRE 3. QUESTIONNEMENTS SUR L'IMPACT DE LA CHAOTICITÉ

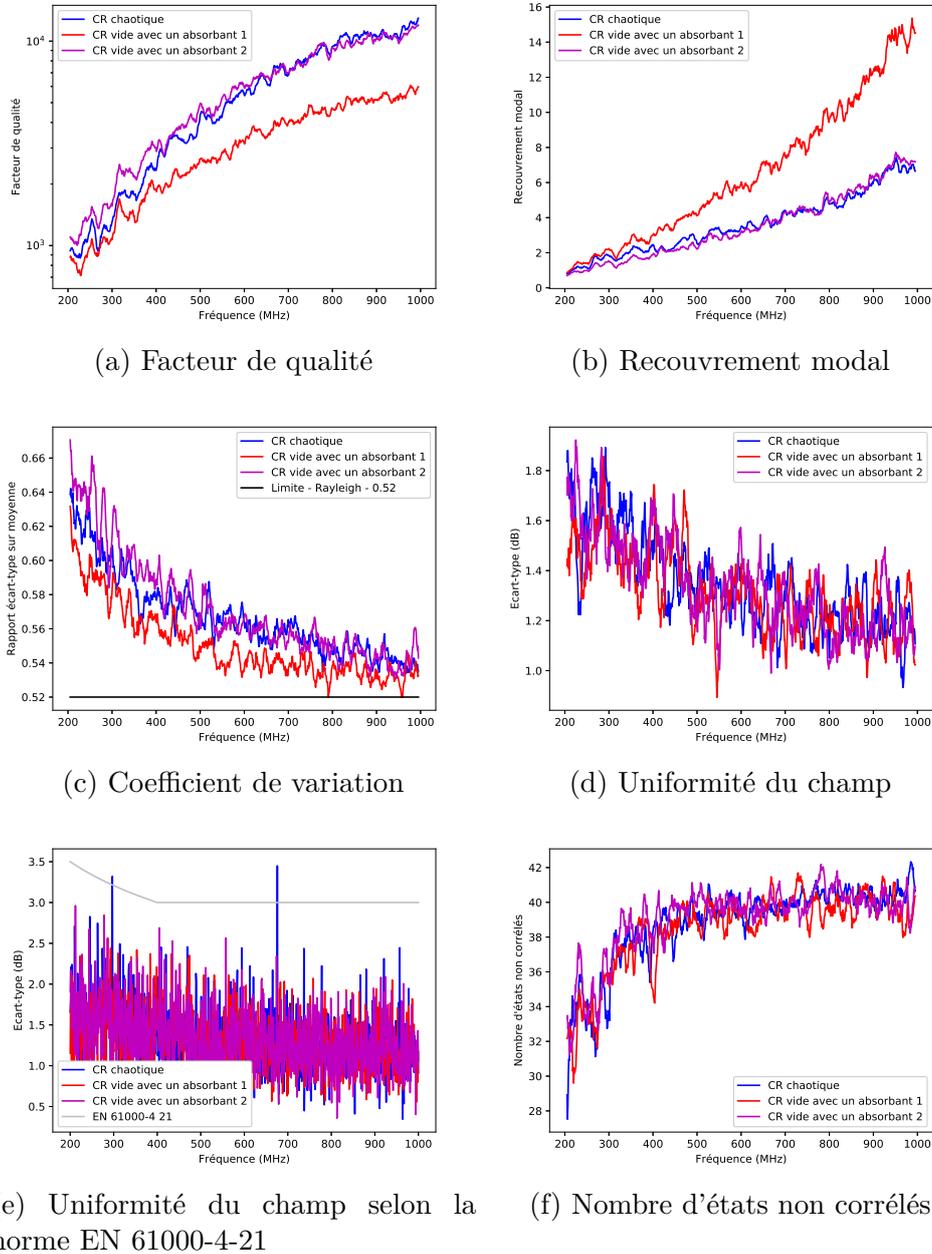


FIGURE 3.17 – Variation fréquentielle des paramètres statistiques et normatifs en CRBM chargée avec l'absorbant 1 (rouge), chargée avec l'absorbant 2 (violet) et en CRBM chaotique (bleue) pour les données de l'IETR.

Entre 200 et 600 MHz, le facteur de qualité en CRBM chaotique est bien compris entre celui des CRBM chargées, ce qui implique une conclusion identique quant au recouvrement modal. Il en va de même pour le CV. Une fois la variation du facteur de qualité prise en compte, la présence des calottes ne modifie pas le critère d'uniformité du champ. Il en va de même pour le nombre de positions de brasseur non corrélées. On confirme

les conclusions précédentes sur l'observation d'un plateau à partir d'environ 600 MHz sur le critère d'uniformité du champ et le CV, ce qui correspond à un recouvrement modal aux alentours de 3 pour les configurations chargées avec l'absorbant 2 et la configuration chaotique et un recouvrement modal d'environ 5 en cavité chargée avec l'absorbant 1.

Considérons à présent les écarts des distributions de champ expérimentales et celles établies par une loi de Pnini et Shapiro pour la configuration chaotique et les configurations chargées afin d'étudier la contribution de la géométrie par l'introduction de calottes dans une CRBM (figure 3.18).

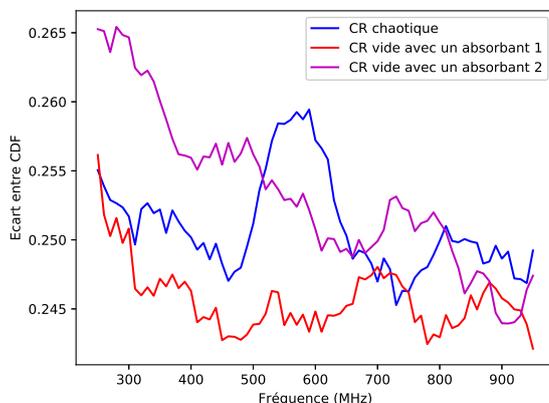


FIGURE 3.18 – Ecart entre CDF expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM chaotique (bleue) et en CRBM chargée avec l'absorbant 1 (rouge) et 2 (violet) à l'IETR.

Les écarts entre distributions expérimentales et théoriques du champ dans la cavité chaotique sont globalement compris entre les courbes des configurations chargées dans la bande fréquentielle d'intérêt soit 200 à 600 MHz.

En résumé, les courbes du rapport écart-type sur moyenne de champ et les écarts entre CDF expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini et Shapiro suivent la tendance du facteur de qualité. Ainsi, l'absorption joue un rôle important. En effet, l'absorption augmente le recouvrement modal et explique l'amélioration de plusieurs paramètres. Concernant l'écart-type du maximum de champ au sens de la norme, il apparaît que les courbes de chaque configuration sont proches puisque ce paramètre est moins discriminant que le CV.

Nous pouvons conclure qu'à facteur de qualité constant, les résultats sont proches. Par conséquent, l'ajout des calottes semble se résumer à un effet de charge / absorption. Cela tend à montrer qu'une cavité parallélépipédique, équipée de son brasseur de modes, serait déjà une cavité chaotique et que l'apport supplémentaire de la géométrie chaotique n'est pas prépondérant.

### 3.5 Discussion sur l'impact de la chaotité en CRBM

A travers ce chapitre, nous avons analysé l'impact des modifications géométriques, inspirées du concept de cavité chaotique, sur les statistiques de champ au sein d'une CRBM. Nous avons montré que l'ajout de calottes sphériques métalliques sur les parois d'une CRBM améliore l'uniformité du champ et le CV (plus proche de sa valeur idéale). Cependant, cela diminue également le facteur de qualité en raison de l'effet de charge. C'est pourquoi, afin de distinguer l'effet de la géométrie de celui des pertes, nous avons comparé la CRBM dans sa configuration chaotique (avec les calottes) avec deux configurations de CRBM comprenant des absorbants afin que leurs facteurs de qualité encadrent celui de la CRBM chaotique. Nous avons montré que les cavités chaotique et chargées présentent le même comportement quant aux statistiques de champ et aux critères normatifs. La distribution de Pnini-Shapiro confirme ces résultats. Ce résultat s'explique probablement par le fait qu'en pratique, la CRBM n'est plus assimilable à une cavité parallélépipédique intégrable à partir du moment où il y a un brasseur dans l'enceinte, une grande antenne ou des équipements de mesures (câbles, table...), i.e. des éléments diffusants. Dans ce cas, la CRBM a alors un comportement proche de celui d'une CRBM chaotique. Il est toutefois important de noter que, conformément aux recommandations issues des normes de CEM, les mesures dans la CRBM de l'IETR ont été effectuées en utilisant pour antenne d'excitation une antenne directive orientée vers le brasseur de modes. Cette configuration permet d'éviter l'excitation de modes réguliers relatifs par exemple à une réflexion sur deux parois parallèles. Ceci explique pourquoi l'effet des modes réguliers pouvant apparaître dans la cavité non chaotique a peu été observé.

On peut conclure des résultats présentés que, dans les configurations étudiées, l'ajout de calottes n'affecte pas les critères normatifs d'uniformité statistique du champ ni le nombre d'états de brasseur non corrélés. L'apport des calottes n'est pas suffisant pour être considéré comme significatif au regard des incertitudes de mesure. D'après les confrontations des données expérimentales avec des tirages de Monte-Carlo selon les lois de Pnini-Shapiro et de Rayleigh, nous avons vu que l'écart-type du champ défini selon les normes est beaucoup moins discriminant que le CV. L'impact de la chaotité n'est pas significatif sur ces paramètres. Le critère normatif étant peu discriminant, une étude du CV est nécessaire pour faire apparaître l'effet des modifications de la cavité. Cette étude nous permet également de confirmer qu'une absorption élevée dans une CRBM conduit à une amélioration de l'écart-type de champ et du recouvrement modal et ainsi diminue le nombre de positions de brasseur non corrélés. La pertinence de la loi de Pnini-Shapiro a également été montrée pour décrire le comportement du champ une fois son facteur de qualité connu (ceci dans toutes les situations testées), alors que la distribution de Rayleigh n'est valide qu'à très hautes fréquences. Il est alors possible de prédire les résultats de différents indicateurs en se basant sur une loi de Pnini-Shapiro plutôt qu'une loi de Rayleigh avec la seule connaissance du recouvrement modal, i.e. en ne mesurant que le facteur de qualité.

Un compromis peut être recherché en ce qui concerne la quantité de matériau

### CHAPITRE 3. QUESTIONNEMENTS SUR L'IMPACT DE LA CHAOTICITÉ

---

absorbant à ajouter dans une cavité déjà chaotique pour atteindre une bonne uniformité de champ tout en réduisant le moins possible le niveau de champ et en maintenant un nombre de positions de brasseur non corrélées suffisant.

L'apport des CRBM chaotiques n'a pas été jugé assez probant pour être mis en œuvre dans un contexte industriel. Une étude sur l'impact de la charge dans deux CRBM de LUF différentes est présentée dans la partie suivante, dans une recherche d'optimisation de la charge introduite dans l'enceinte.

# Chapitre 4

## Impact de la variation de charge en CRBM

### Introduction

Au cours du chapitre précédent, l'impact de modifications géométriques, inspirées du concept de cavité chaotique, ainsi que l'effet de la charge sur les statistiques de champ au sein d'une CRBM ont été évalués. Nous en avons conclu que l'influence d'une modification géométrique de la CRBM est similaire à celle apportée par une charge abaissant le facteur de qualité de manière équivalente. Ce constat a été dressé par rapport aux statistiques de champ et aux critères normatifs. Ce travail a également permis la confirmation qu'une absorption élevée dans une CRBM conduit à une amélioration des critères de performance mais implique une dégradation du nombre de positions de brasseur non corrélées. On connaît l'impact des pertes sur le fonctionnement des CRBM [23] : on constate une diminution du niveau de champ à puissance délivrée constante et une amélioration de l'homogénéité du champ dans l'enceinte. De plus, nos études des différents indicateurs via une loi de Pnini-Shapiro montrent que les critères visés sont mieux respectés quand le recouvrement modal augmente, donc quand les pertes sont plus importantes pour une géométrie fixée.

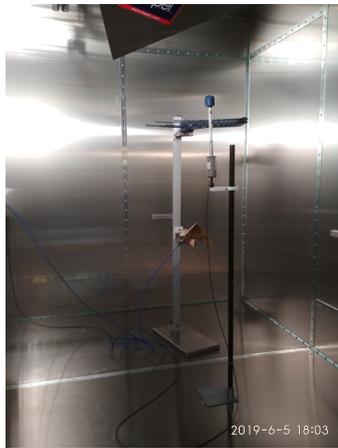
L'objectif de ce chapitre est de comprendre les effets de variation de charge à travers l'ajustement de différentes quantités d'absorbants et de dégager un compromis acceptable sur le plan de la puissance requise pour atteindre le niveau de champ souhaité. Une étude préliminaire a été réalisée sur des absorbants mousses ainsi que des tuiles de ferrite pour différentes concentrations. A l'issue de cette phase, notre choix s'est porté sur les tuiles de ferrite car elles sont plus absorbantes dans les gammes de fréquences de notre travail de recherche et elles sont résistantes au feu lorsque la puissance injectée est élevée. Enfin, les tuiles de ferrite présentent un facteur de forme intéressant en étant plates et de faible épaisseur.

## 4.1 Présentation des environnements étudiés

A travers cette étude, nous cherchons à montrer l'impact de la variation de charge en CRBM sur les indicateurs présentés dans le chapitre 2 grâce aux mesures réalisées dans deux enceintes. Les gammes fréquentielles choisies sont proches des LUF des CRBM choisies pour cette thèse. En effet, notre objectif est d'abaisser ces LUF au prix d'une réduction limitée du niveau de champ à puissance transmise constante. La procédure consiste à collecter les données de champ pour différentes configurations : en CRBM vide ou en CRBM chargée avec différentes quantités de tuiles de ferrite. Les tuiles placées dans les entités sont de dimensions  $100 \text{ cm}^2$  et d'épaisseur 6,7 mm.

La première CRBM est une EOLE 400 (LUF estimée à 400 MHz d'après les normes RTCA DO 160G et EN 61000-4-21) de dimensions  $2,48 \times 2,86 \times 3,41 \text{ m}^3$ . Trois configurations d'intérêt sont comparées : la CRBM vide i.e. ne contenant aucun absorbant, la même CRBM contenant 36 tuiles de ferrite et la CRBM contenant 72 tuiles de ferrite (figure 4.1). Comme nous l'avons souligné, nous travaillons à des fréquences proches et en-dessous de la LUF estimée de la CRBM, ainsi la bande fréquentielle choisie pour cette EOLE se situe entre 100 et 400 MHz.

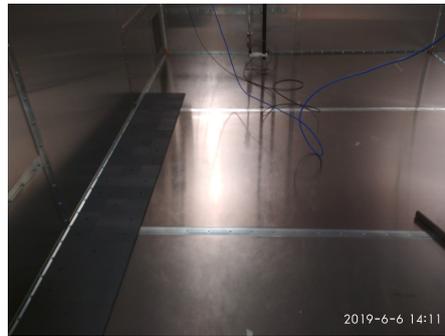
## CHAPITRE 4. IMPACT DE LA VARIATION DE CHARGE EN CRBM



(a) CRBM vide i.e. sans ferrite



(b) CRBM contenant 36 tuiles de ferrite



(c) CRBM contenant 72 tuiles de ferrite

FIGURE 4.1 – Photos des configurations de l'EOLE 400.

Sur la figure 4.1 on note que les tuiles de ferrite sont placées le long d'une arête de la cavité, ceci pour qu'elles restent en dehors du volume utile de la CRBM afin de laisser celui-ci libre pour y placer l'instrumentation nécessaire aux essais.

La deuxième CRBM est une EOLE 200 (LUF estimée autour de 200 MHz d'après les normes RTCA DO 160G et EN 61000-4-21) d'EMITECH de dimensions 4,9 x 3,7 x 3,1 m<sup>3</sup>. La bande fréquentielle est définie entre 80 et 220 MHz. Pour cette cavité, quatre configurations sont comparées. Nous étudions la CRBM vide (figure 4.2 a), la CRBM contenant 72 tuiles de ferrite (figure 4.2 b), 288 tuiles de ferrite (figure 4.3) et enfin, 576 tuiles de ferrite (figure 4.4).

## CHAPITRE 4. IMPACT DE LA VARIATION DE CHARGE EN CRBM



(a) CRBM vide i.e. sans ferrite



(b) CRBM contenant 72 tuiles de ferrite

FIGURE 4.2 – Photos de l'EOLE 200 vide et contenant 72 tuiles de ferrite.

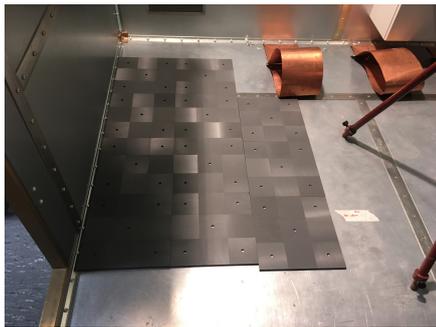


FIGURE 4.3 – Photos de l'EOLE 200 contenant 288 tuiles de ferrite.

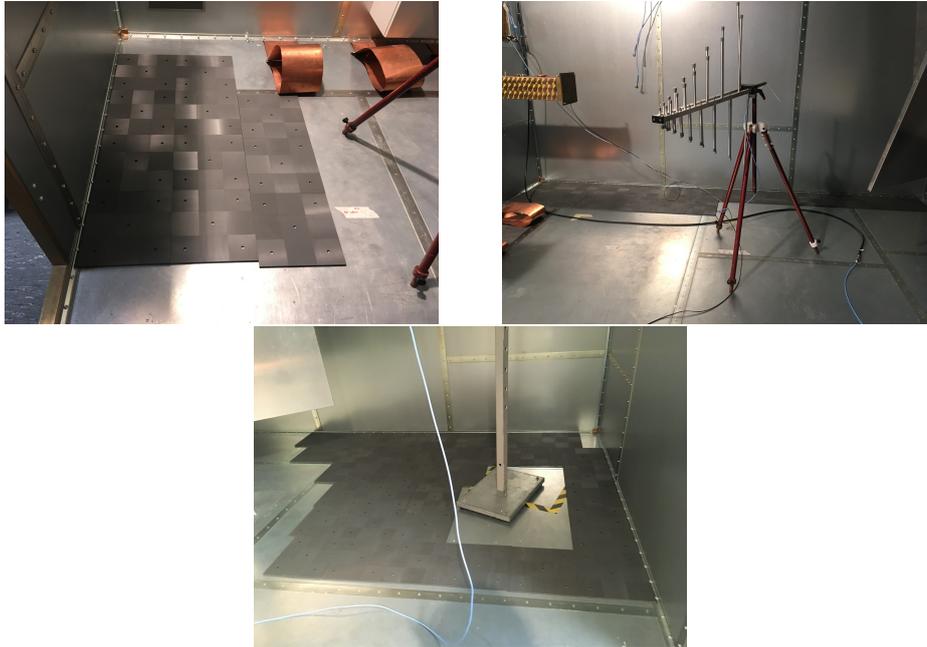


FIGURE 4.4 – Photos de l'EOLE 200 contenant 576 tuiles de ferrite.

Le matériel requis pour tester ces environnements est exposé en section 2.3.1. Nous utilisons en émission un générateur de signaux radio-fréquences, un amplificateur de puissance, un coupleur ayant pour vocation d'injecter la puissance désirée à l'antenne d'émission fixe présente dans la CRBM (antenne log-périodique pointant vers le brasseur de modes) mais aussi de collecter les données de puissance incidente à l'aide d'une sonde. En réception, une antenne et une sonde de champ isotropique sont placées successivement en 8 positions aux bords du volume utile i.e. à  $\lambda/4$  des parois à la fréquence la plus basse choisie. La configuration matérielle est celle de la figure 2.15. Un récapitulatif des bancs de mesure utilisés est par ailleurs présenté dans l'annexe B.

## 4.2 Impact de la variation de charge sur les propriétés de la CRBM

Cette section a pour but de montrer l'effet de variation de charge à travers l'ajustement de différentes quantités d'absorbants en ferrite. Notre analyse repose sur l'étude des statistiques de champ et des critères définis dans la norme EN 61000-4-21. L'ensemble de ces critères est décrit au chapitre 2. Comme nous l'avons évoqué au cours du chapitre 3, en raison des fortes variations fréquentielles observées sur les indicateurs, nous appliquons sur la plupart des critères une moyenne glissante sur 10 MHz par pas de 2 MHz. La moyenne glissante est définie comme :

$$indicateur_{liss}(f) = \langle indicateur(f) \rangle_{[f-x/2, f+x/2]} \quad (4.1)$$

Avec  $x = 10 \text{ MHz} \langle \cdot \rangle_{[A,B]}$  la moyenne sur l'intervalle fréquentiel  $[A,B]$ .

Une synthèse des résultats est présentée ici en ne considérant que les résultats obtenus à partir d'une composante de champ mesurée pour plus de clarté mais des conclusions similaires sont observées pour les deux cavités et l'ensemble des axes de sonde de champ.

### 4.2.1 Niveau de pertes

Pour définir le niveau des pertes, nous calculons le facteur de qualité et le recouvrement modal déterminés à partir des mesures de champ (2.8) et (2.22).  $Q$  et  $d$  sont présentés en fonction de la fréquence pour chaque configuration de l'EOLE 200 pour l'axe  $x$  de la sonde de champ isotropique (figure 4.5).

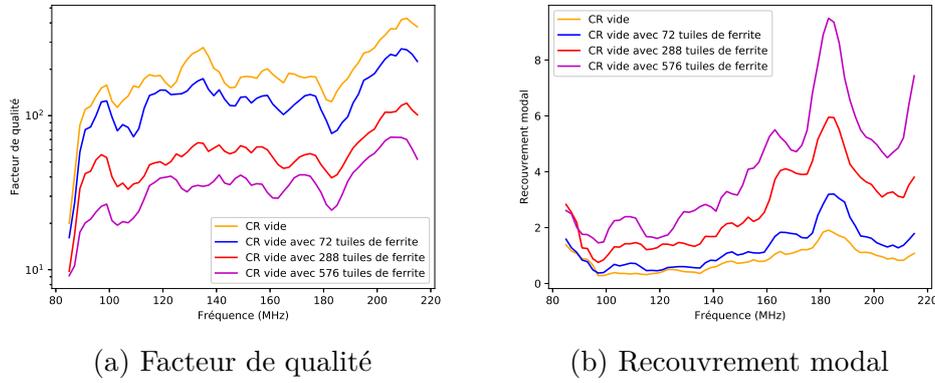


FIGURE 4.5 – Facteur de qualité et recouvrement modal en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et 576 tuiles de ferrite (violet) dans l'EOLE 200.

Sur la bande fréquentielle 80 à 220 MHz,  $Q$  diminue nettement avec l'augmentation de la charge. Le rapport moyen entre les facteurs de qualité de la CRBM à vide et avec 576 tuiles de ferrite est de 5. D'après les résultats obtenus dans la section 2.1.2, on s'attend à un fonctionnement de CRBM idéal pour  $d > 5$ . Lorsque la CRBM est vide, le recouvrement modal se situe autour de 1 sur la bande 80 - 220 MHz et ne dépasse jamais  $d = 2$ . Pour obtenir un recouvrement modal d'au moins 5, il faut placer 576 tuiles de ferrite dans l'enceinte et atteindre une fréquence d'environ 180 MHz.

Dans le but de vérifier la cohérence des résultats avec la théorie, regardons également les résultats obtenus pour une tuile. On a le facteur de qualité total  $Q_{tot}$  tel que :

$$\frac{1}{Q_{tot}} = \frac{1}{Q_{CR}} + \frac{1}{Q_{ant}} + \frac{1}{Q_{abs}} = \frac{1}{Q_{vide}} + \frac{1}{Q_{abs}} = \frac{1}{Q_{vide}} + \frac{N}{Q_{tuile}} \quad (4.2)$$

avec  $Q_{CR}$  le facteur de qualité de la CRBM,  $Q_{ant}$  les pertes liées aux antennes,  $Q_{abs}$  celles liées aux tuiles de ferrite,  $Q_{vide}$  le facteur de qualité de la cavité sans ferrite donné par  $\frac{1}{Q_{vide}} = \frac{1}{Q_{CR}} + \frac{1}{Q_{ant}}$ ,  $Q_{tuile}$  associé à une tuile de ferrite, et  $N$  le nombre de tuiles. Nous

définissons  $Q_{tuile}$ , le facteur de qualité pour une tuile pour chaque configuration de CRBM en fonction de la fréquence, tel que

$$Q_{tuile} = \frac{N}{\frac{1}{Q_{tot}} - \frac{1}{Q_{vide}}} \quad (4.3)$$

qui nous permettra de vérifier la conformité des résultats par rapport à nos attentes i.e. la proportionnalité des pertes liées aux tuiles avec le nombre de tuiles.

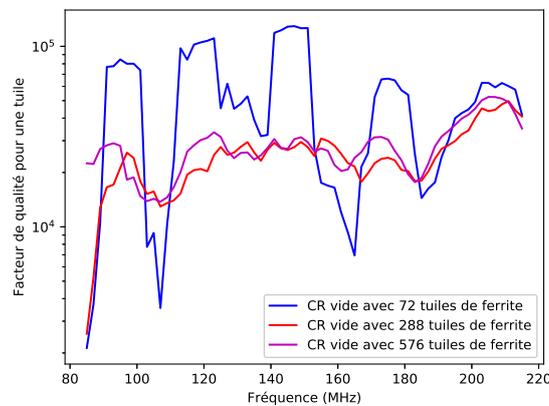


FIGURE 4.6 – Facteur de qualité estimé pour une tuile de ferrite extrait des mesures pour différentes configurations de l’EOLE 200 CRBM chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et 576 tuiles (violette).

On constate sur la figure 4.6 que le facteur de qualité estimé pour une tuile de ferrite placée dans l’enceinte est proche dans les configurations avec 288 et 576 tuiles de ferrite en EOLE 200. Les valeurs pour la configuration 72 tuiles de ferrite oscillent davantage. Ceci est dû à l’erreur d’estimation des pertes plus grande dans le cas de 72 tuiles de ferrite, en raison de pertes liées aux ferrites plus faibles dans ce cas. En effet, on voit bien que les courbes à vide et avec 72 tuiles de ferrite sont proches (figure 4.5). Ces résultats sont cohérents avec à nos résultats précédents.

Les résultats des mesures conduites dans la CRBM EOLE 400 sont présentés sur les figures 4.7 et 4.8.

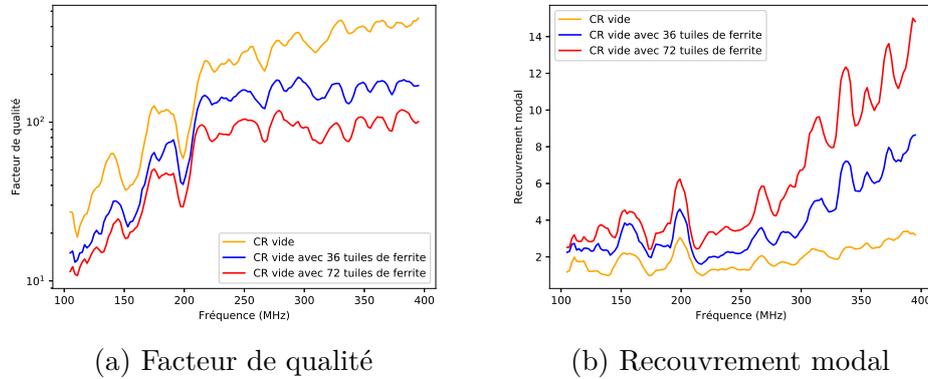


FIGURE 4.7 – Facteur de qualité et recouvrement modal en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et avec 72 tuiles de ferrite (rouge) dans la CRBM EOLE 400.

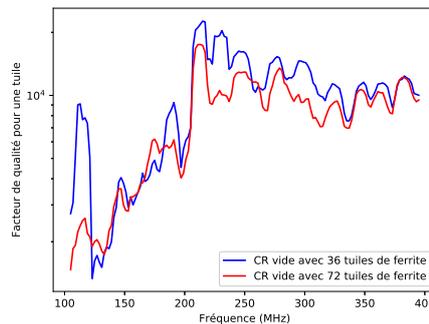
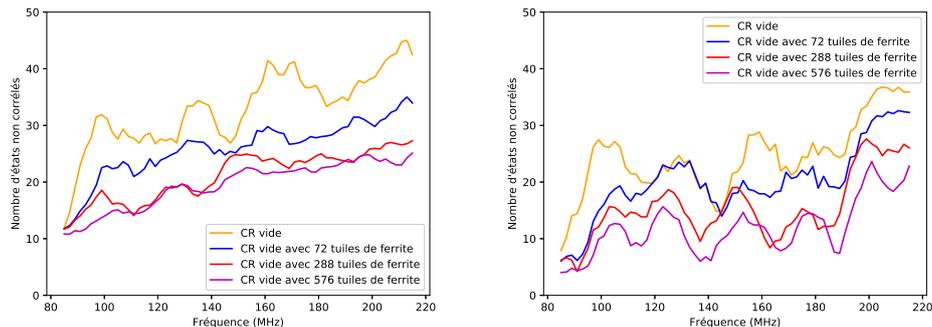


FIGURE 4.8 – Facteur de qualité estimé pour une tuile de ferrite extrait de mesures des différentes configurations de l’EOLE 400 CRBM chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge).

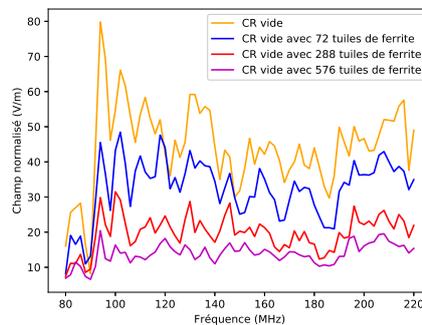
Dans le cas de l’EOLE 400, le recouvrement modal atteint une valeur de 5 à partir d’un peu moins de 300 MHz lorsque la CRBM est chargée avec 72 tuiles de ferrite, il faut atteindre une fréquence d’environ 350 MHz pour parvenir à un recouvrement modal de 5 avec 36 tuiles de ferrite (figure 4.7). Pour cette cavité de plus petites dimensions, le niveau de charge est dans les deux cas suffisant pour permettre une estimation relativement fiable des pertes relatives à une plaque de ferrite : ainsi, en dehors des basses fréquences pour lesquels un écart très important est observé, l’estimation du facteur de qualité associé à une unique tuile est similaire pour 36 et 72 tuiles (figure 4.8).

On s’intéresse maintenant à deux autres indicateurs, le champ normalisé par rapport à la puissance incidente et le nombre d’états de brasseur non corrélés dans l’enceinte. Le champ normalisé par rapport à la puissance incidente correspond au champ collecté

pour une puissance incidente de 1 W au connecteur de l'antenne d'émission. Il est défini selon l'équation (3.8). Le nombre d'états de brasseur non corrélés dans l'enceinte est calculé à l'aide de l'approximation de la méthode basée sur la théorie de l'information (2.14) et suivant la méthode normative (section 2.1.1).



(a) Nombre de positions de brasseur non corrélées selon la méthode normative  
 (b) Nombre de positions de brasseur non corrélées selon l'approximation de la méthode basée sur la théorie de l'information



(c) Champ normalisé

FIGURE 4.9 – Nombre de positions de brasseur non corrélées et champ normalisé dans l'EOLE 200 en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et 576 tuiles de ferrite (violet).

D'après la figure 4.9, le nombre d'états de brasseur non corrélés augmente avec la fréquence sur la bande 80 - 220 MHz et diminue avec l'augmentation de la charge que ce soit en utilisant la méthode normative ou l'approximation de la méthode basée sur la théorie de l'information. A la LUF de la CRBM, i.e. 200 MHz, nous dénombrons environ 40 positions de brasseur non corrélées dans l'enceinte vide. Ce nombre décroît pour passer de 30 lorsque la CRBM contient 72 tuiles de ferrite à environ 20 - 25 pour davantage de tuiles. Le facteur de charge lié à la présence des matériaux absorbants induit une diminution importante de la densité de puissance générée dans la chambre. En augmentant les pertes, l'énergie stockée dans la chambre est alors réduite et en conséquence le niveau de

champ dans la cavité diminue. La puissance reçue (normalisée ou non) est proportionnelle au coefficient de qualité. Comme prévu, il en découle qu'à puissance d'entrée constante, le rapport entre les champs normalisés est égal à la racine du rapport des coefficients de qualité. Un exemple est présenté en figure 4.10 pour un rapport entre la cavité vide et celle contenant 72 tuiles de ferrite.

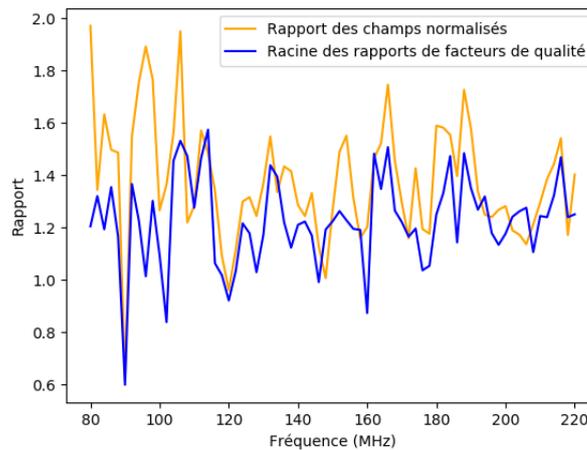
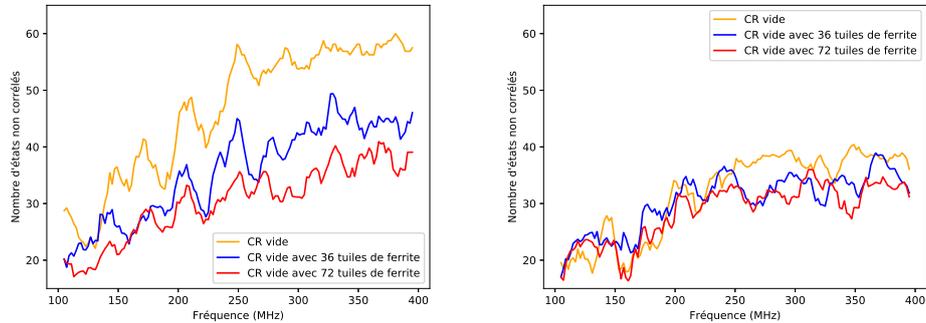
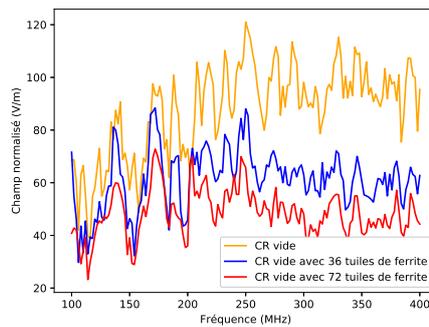


FIGURE 4.10 – Rapport des champs normalisés (orange) et racine des rapports des facteurs de qualité (bleu) entre les mesures effectuées dans l'EOLE 200 à vide et chargée par 72 tuiles de ferrite.

Le champ normalisé est autour de 50 V/m en CRBM vide et diminue progressivement en chargeant la CRBM (40 V/m lorsque la CRBM contient 72 tuiles de ferrite et environ 20 V/m lorsqu'elle en contient davantage). Il en va de même pour l'EOLE 400 (figure 4.11).



(a) Nombre de positions de brasseur non corrélées selon la méthode normative  
 (b) Nombre de positions de brasseur non corrélées selon l'approximation de la méthode basée sur la théorie de l'information



(c) Champ normalisé

FIGURE 4.11 – Nombre de positions de brasseur non corrélées et champ normalisé dans l'EOLE 400 en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge).

D'après le critère normatif, à la LUF de la CRBM soit 400 MHz, 60 positions sont non corrélées dans l'enceinte puis 50 et 35 sont dénombrées lorsque la CRBM est chargée avec 36 et 72 tuiles de ferrite respectivement. Pour le critère basé sur la théorie de l'information, les différences sont moins nettes et la taille de l'échantillon est plus limitée (ceci confirme le caractère très permissif de la norme). En effet, à 400 MHz, un peu moins de 40 réalisations non corrélées sont atteintes, pour environ 35 et 33 pour respectivement 36 et 72 tuiles de ferrites.

Le champ normalisé augmente entre 100 et 200 MHz et est proche pour l'ensemble des configurations puis se situe autour de 100 V/m en CRBM vide et diminue à 60 puis 50 V/m lorsque la CRBM contient respectivement 36 et 72 tuiles de ferrite.

### 4.2.2 Impact de la charge sur les propriétés d'homogénéité et d'isotropie des champs

Il est à noter que nous n'avons pas ici effectué d'étude des phénomènes physiques induits par la présence des ferrites et de leur implication sur les lois de distribution des champs attendues ; ceci nécessiterait des recherches complémentaires dépassant le cadre de ce travail. Nous nous sommes simplement limités à comparer les indicateurs examinés jusqu'ici à ceux requis par les normes. En conséquence, aucune comparaison avec les prédictions de la loi de Pnini-Shapiro n'est ici présentée puisque nous ne sommes plus assurés que cette loi soit celle théoriquement suivie par la distribution de champ. Pour vérifier la conformité de la CRBM par rapport à la norme EN 61000-4-21 dans la bande fréquentielle choisie, nous étudions l'uniformité du champ à l'aide du calcul de l'écart-type des valeurs maximales de champ enregistrées en différentes positions de sonde. La méthode employée est décrite en section 2.1.1. Seuls les résultats selon la norme EN 61000-4-21 sont présentés dans ce manuscrit car celle-ci est plus critique que la norme RTCA DO 160G. Cependant, les résultats des écarts-types de champ selon les deux normes sont présentées en annexe (Annexe A).

On trace dans un premier temps les écarts-types de champ (équation (2.17)) pour chaque configuration de CRBM et axe de sonde de champ moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz (figure 4.12).

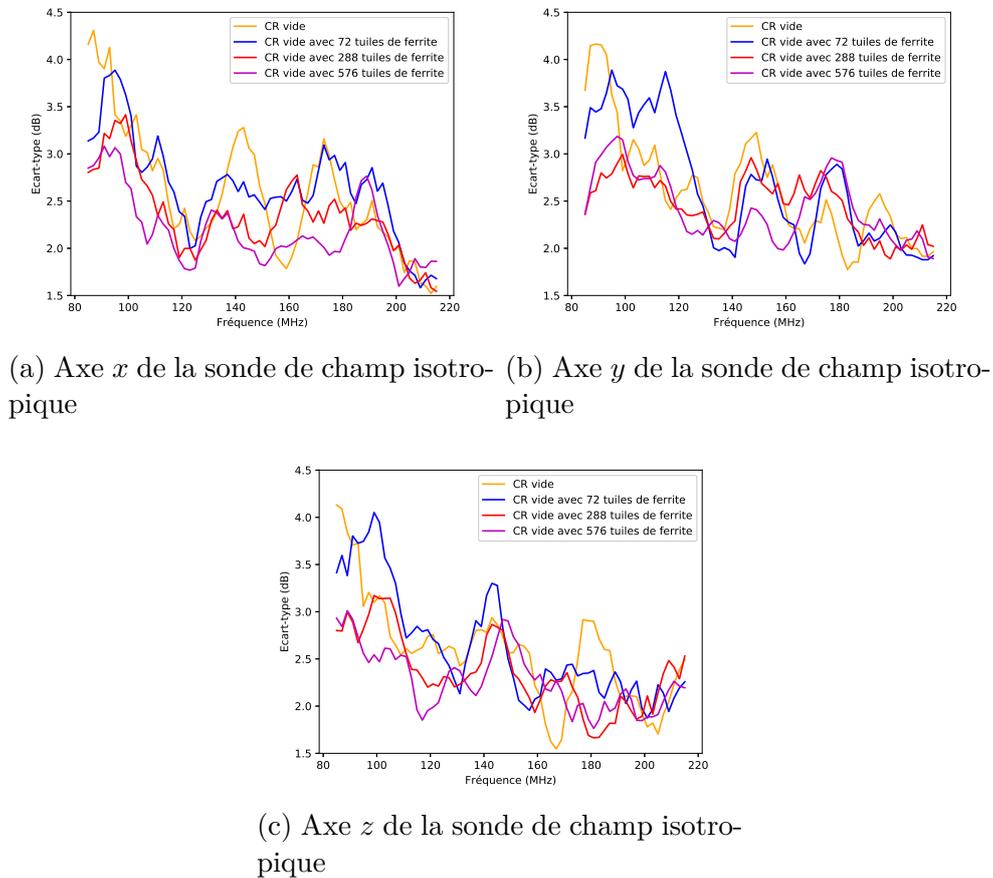


FIGURE 4.12 – Ecart-types de champ selon chaque axe de sonde moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et 576 tuiles de ferrite (violet) dans l'EOLE 200.

En observant le paramètre écart-type de champ moyenné sur une fenêtre glissante on voit que 288 tuiles de ferrite et surtout 576 tuiles se distinguent par la baisse de l'écart-type. Il y a par ailleurs plus de dispersion lorsque les pertes sont plus faibles (moins bonne isotropie).

Nous traçons ensuite les écart-types de champ selon la norme EN 61000-4-21 et les comparons au gabarit normatif pour chaque configuration de CRBM (figure 4.13).

## CHAPITRE 4. IMPACT DE LA VARIATION DE CHARGE EN CRBM

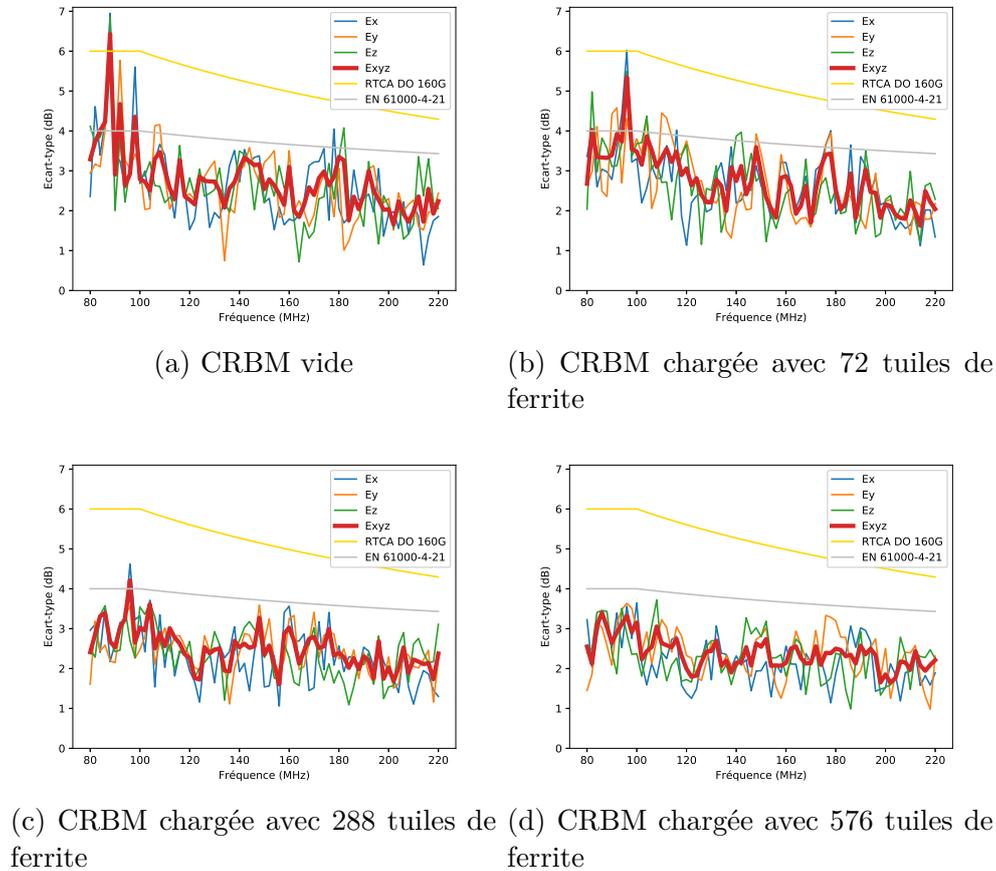


FIGURE 4.13 – Écarts-types de champ selon la norme EN 61000-4-21 dans l'EOLE 200.

En augmentant la charge, nous améliorons l'uniformité du champ, cependant, entre la configuration à vide et chargée avec 72 tuiles de ferrite, les différences sont peu marquées. La CRBM devient conforme sur l'ensemble de la bande fréquentielle 80 - 220 MHz selon la norme EN 61000-4-21 à partir d'une charge de 288 tuiles de ferrite. La CRBM vide est conforme à partir d'environ 100 MHz, la CRBM contenant 72 tuiles de ferrite l'est quant à elle selon la norme aux alentours de 120 MHz. Pour des niveaux de charge plus importants, les résultats des écarts-types de champ montrent une amélioration de l'uniformité du champ dans l'enceinte lorsque la CRBM est chargée. Le gabarit normatif de l'EN 61000-4-21 est donc respecté sur la bande 80 - 220 MHz à partir d'une charge de 288 tuiles de ferrite. Nous traçons les mêmes figures pour l'EOLE 400 (figures 4.14 et 4.15).

## CHAPITRE 4. IMPACT DE LA VARIATION DE CHARGE EN CRBM

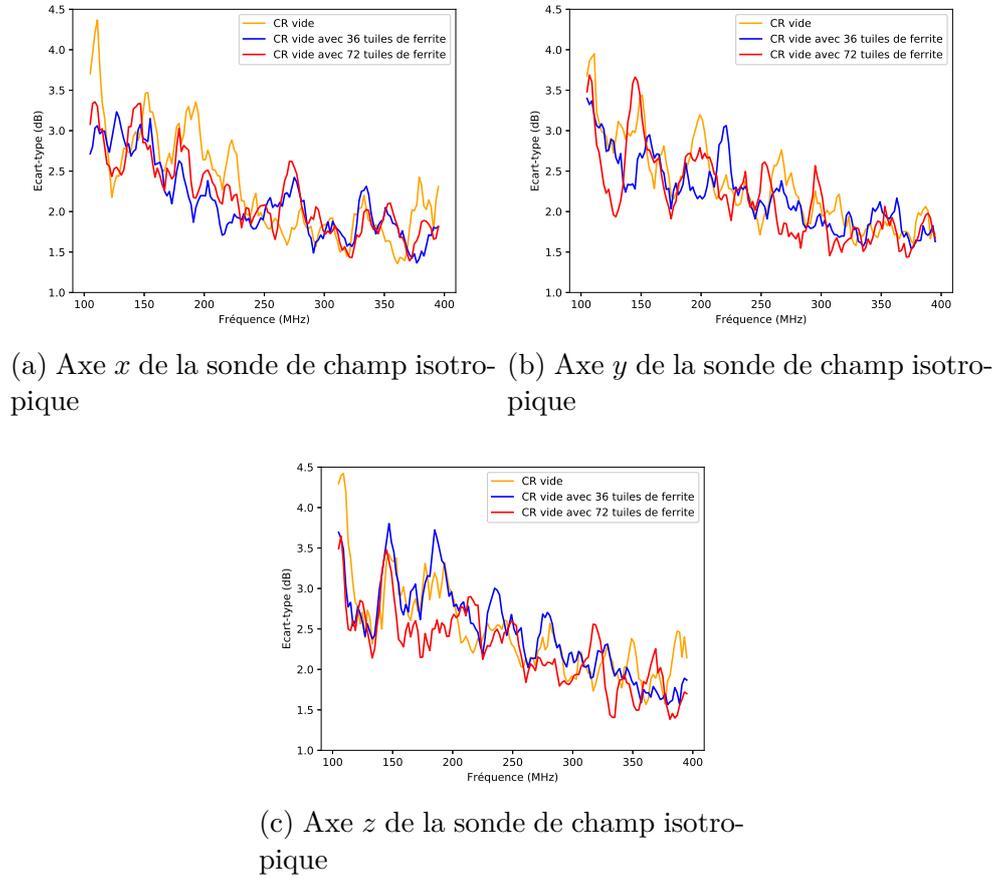
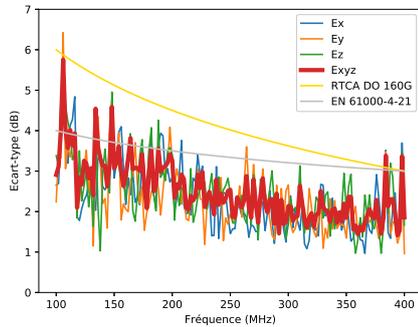
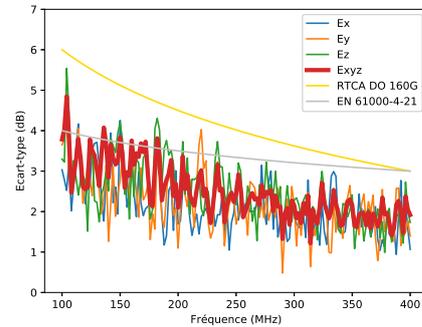


FIGURE 4.14 – Ecart-types de champ selon chaque axe de sonde moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge) dans l'EOLE 400.

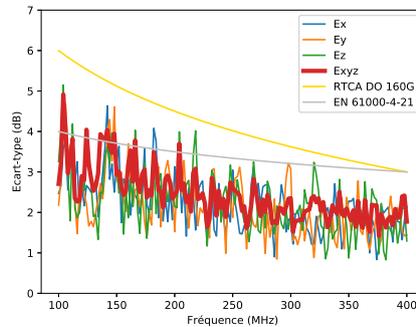
## CHAPITRE 4. IMPACT DE LA VARIATION DE CHARGE EN CRBM



(a) CRBM vide



(b) CRBM chargée avec 36 tuiles de ferrite



(c) CRBM chargée avec 72 tuiles de ferrite

FIGURE 4.15 – Ecarts-types de champ selon la norme EN 61000-4-21 dans l'EOLE 400.

Ces courbes valident les conclusions obtenues avec l'EOLE 200. Nous constatons une légère diminution de l'écart-type de champ en chargeant la CRBM avec 36 et 72 tuiles de ferrite. D'après la norme EN 61000-4-21, en introduisant 36 ou 72 tuiles de ferrite, nous abaissons la LUF à environ 200 MHz.

Pour confirmer les conclusions précédemment établies, nous calculons le coefficient de variation défini comme le rapport écart-type sur moyenne de champ défini à l'équation (3.6) pour l'axe  $x$  de la sonde de champ isotropique.

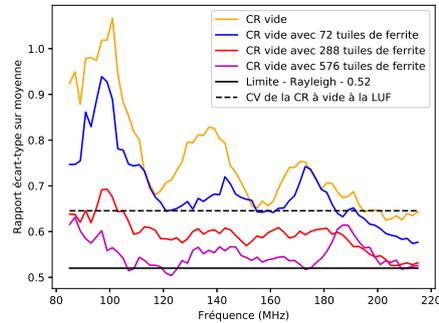


FIGURE 4.16 – Rapports écarts-types sur moyenne de champ selon l’axe  $x$  moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et avec 576 tuiles de ferrite (violet) dans l’EOLE 200.

Sur le paramètre CV (figure 4.16), les différences entre configurations sont notables avec une diminution du paramètre en augmentant la charge et la fréquence pour se rapprocher de la valeur d’une CRBM idéale selon la loi de Rayleigh établie à 0,52. La LUF à vide de cette CRBM est de 200 MHz, le rapport obtenu à vide à cette fréquence est de 0,64. Ce rapport est obtenu pour des fréquences plus basses lorsque la CRBM est chargée ; autour de 150 MHz lorsque la CRBM contient 72 tuiles de ferrite et sur quasiment l’intégralité de la bande pour 288 tuiles de ferrite et sur la totalité de la bande lorsque la CRBM est chargée avec 576 tuiles de ferrite.

Il en va de même pour l’EOLE 400 comme nous le montre la figure ci-dessous. Ici, la LUF est de 400 MHz, le CV à cette fréquence est de 0,71. Ce rapport est atteint non pas à 400 MHz mais vers 200 MHz quand la CRBM est chargée avec 36 ou 72 tuiles de ferrite.

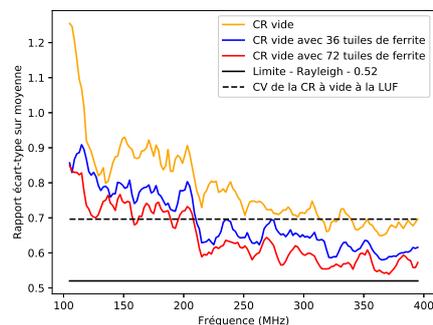


FIGURE 4.17 – Rapports écarts-types sur moyenne de champ selon l’axe  $x$  moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge) dans l’EOLE 400.

Pour affiner notre étude, regardons maintenant les coefficients d’anisotropie et d’inhomogénéité du champ décrits selon la norme EN 61000-4-21. Le tableau récapitulatif

## CHAPITRE 4. IMPACT DE LA VARIATION DE CHARGE EN CRBM

des valeurs types des coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ est présenté dans le tableau 2.3.

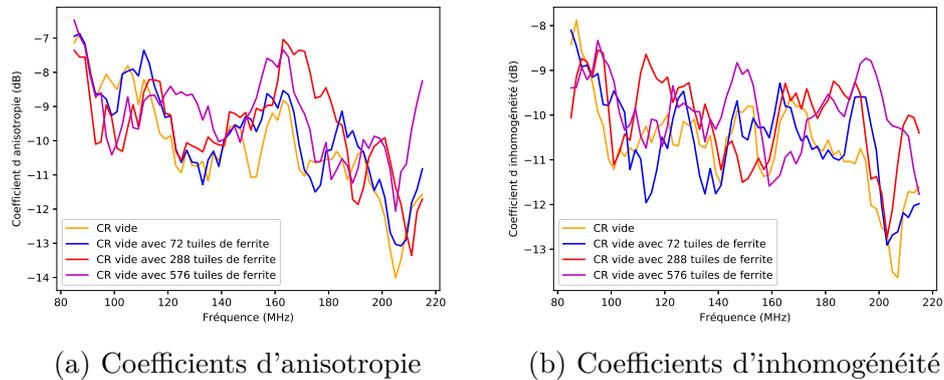


FIGURE 4.18 – Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et avec 576 tuiles de ferrite (violet) dans l'EOLE 200.

Les différences entre configurations pour les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité ne sont pas notables (figure 4.18). Ceci est conforme avec ce que nous avons observé en fonction de l'évolution de  $d$  lorsque nous considérons une distribution de Pnini-Shapiro (figures 2.13 et 2.14). En effet, les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité diminuent légèrement pour un recouvrement modal allant jusqu'à environ 2,5 pour ensuite stagner en augmentant  $d$ . Nous avons également noté qu'en augmentant la taille des échantillons non corrélés nous diminuons ces coefficients, cependant, en considérant l'incertitude de mesure, les courbes sont proches.

Ces conclusions sont confirmées par le traitement des données de l'EOLE 400 (figure 4.19).

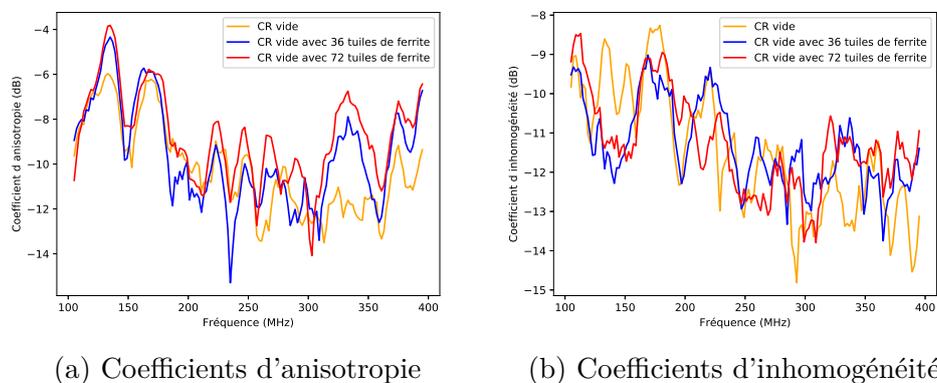


FIGURE 4.19 – Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge) dans l'EOLE 400.

## CHAPITRE 4. IMPACT DE LA VARIATION DE CHARGE EN CRBM

Concernant les fonctions de répartition de l'amplitude du champ, nous effectuons dans un premier temps une comparaison avec une distribution gaussienne représentative du cas idéal. La figure 4.20 présente les CDF expérimentales et analytiques des distributions du champ électrique dans le cas d'une CRBM vide et dans celle chargée par 72 tuiles de ferrite pour une fréquence de 180 MHz.

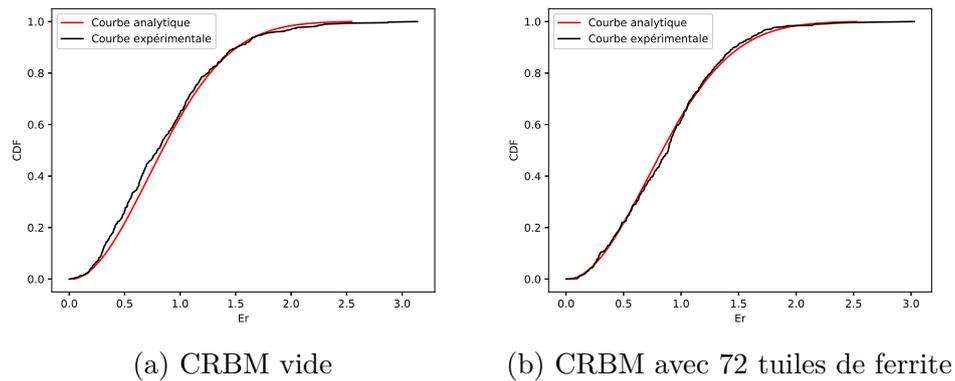


FIGURE 4.20 – CDF de champ expérimentales et analytiques selon la loi de Rayleigh à 180 MHz dans l'EOLE 200.

On constate un très bon accord entre les CDF expérimentales et analytiques pour l'EOLE 200 chargée de 72 tuiles à 180 MHz.

Nous présentons ensuite les résultats des écarts entre CDF expérimentales et analytiques selon la loi de Rayleigh pour une composante cartésienne de champ (figure 4.21).

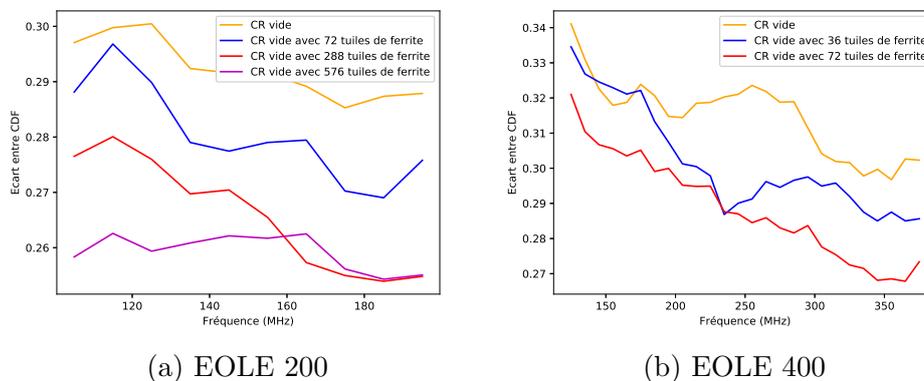


FIGURE 4.21 – Écarts entre CDF expérimentales des champs et analytiques selon la loi de Rayleigh en CRBM vide et chargée avec différentes quantités de tuiles de ferrite.

Les écarts entre CDF diminuent avec la fréquence et l'augmentation de la charge

dans l'enceinte. L'évolution est cohérente entre la CRBM vide et les différents nombres de tuiles de ferrite placées dans l'enceinte.

### 4.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'appréhender les effets de variation de charge à travers l'ajustement de différentes quantités de tuiles de ferrite et ainsi de confirmer les résultats de l'étude sur la chaoticité (chapitre 3).

En ajoutant de l'absorption, on baisse le facteur de qualité ce qui entraîne une diminution du champ normalisé et du nombre d'états non corrélés. En contrepartie, une amélioration de l'uniformité du champ selon la norme EN 61000-4-21 est observée grâce à l'ajout de tuiles de ferrite dans l'enceinte. Il en va de même pour le rapport écart-type sur moyenne de champ. Un compromis doit donc être trouvé afin de préserver un nombre d'états de CRBM non corrélés acceptable tout en améliorant les performances de la CRBM.

Pour l'EOLE 200 d'EMITECH, le meilleur compromis est d'ajouter 288 tuiles de ferrite dans l'enceinte. En effet, avec cette quantité de charge, le nombre de réalisations non corrélées sur la bande 80 - 220 MHz est supérieur à 10 et la CRBM est conforme à la norme EN 61000-4-21 malgré une diminution de moitié du champ normalisé. Grâce à l'ajout de 288 tuiles de ferrite dans l'enceinte, la LUF de la CRBM diminue de 200 MHz à 80 MHz. Pour l'EOLE 400, les résultats obtenus avec une charge de 36 ou 72 tuiles de ferrite sont proches excepté pour le nombre d'états de brasseur non corrélés. C'est pourquoi le meilleur compromis est d'ajouter 36 tuiles de ferrite dans l'enceinte d'une EOLE 400. En effet, pour cette quantité de charge, le nombre de réalisations non corrélées sur la bande 100 - 400 MHz est plus élevé qu'en CRBM chargée de 72 tuiles de ferrite et la LUF estimée est de 200 MHz. Par ailleurs, entre 100 et 200 MHz le champ normalisé est proche en CRBM vide ou chargée, à partir de 200 MHz, 60 V/m sont obtenus en chargeant la chambre avec 36 tuiles de ferrites contre 100 V/m en CRBM vide.

La solution envisagée afin de baisser la LUF de la CRBM et d'améliorer ses performances en basses fréquences est liée à l'absorption donc à l'augmentation de la charge (facteur de qualité et nombre d'états non corrélés dégradés et baisse du champ normalisé). Cette solution présente des inconvénients en termes de bilan de puissance et n'est pas très originale puisque ce concept est abordé dans les normes relatives aux CRBM ; cependant, nous nous sommes intéressés à de nombreux indicateurs pour définir de façon précise l'impact de la charge et pas uniquement étudier les critères normatifs.

On ne sait pas agir sans contrepartie avec l'augmentation des pertes, des techniques alternatives sont donc envisagées. Afin d'augmenter le nombre d'états décorrélés de la cavité, le prochain chapitre traite d'un système de brassage par commutation de plaques métalliques fixées sur les parois d'une CRBM.

# Chapitre 5

## Brassage par commutation de plaques

### Introduction

L'objectif de ce doctorat est de réduire la LUF d'une CRBM et d'améliorer ses performances lorsque la fréquence est proche de celle-ci. Plusieurs systèmes ont été éprouvés. Nous avons commencé notre étude en introduisant des calottes sphériques au sein d'une cavité pour répondre à notre objectif initial. Cependant, ce système permet l'amélioration de certains critères mais cet effet semble principalement lié à la dégradation du facteur de qualité. C'est pourquoi, par la suite nous avons travaillé à la recherche d'un compromis entre abaissement du facteur de qualité et amélioration des performances en basses fréquences. Pour cela, différents types et quantités de charges ont été placés au sein de multiples cavités. En introduisant des tuiles de ferrite nous avons pu jouer sur une baisse maîtrisée du facteur de qualité en améliorant certains critères de performance. Ce système n'étant cependant pas optimal en terme de bilan de puissance, nous recherchons une solution alternative. La solution envisagée est un nouveau type de brassage.

### 5.1 Concept du brassage par commutation

Comme nous l'avons abordé dans la section 1.2, le brassage mécanique est utilisé par les normes mais d'autres types de brassage existent. Parmi les approches consistant à modifier les conditions aux limites sur les parois de la cavité, des études présentées dans l'introduction de ce document envisagent le placement de métamatériaux dans une CRBM pour en améliorer le fonctionnement. Cependant, ces solutions ne sont performantes, à notre connaissance, que sur des faibles bandes fréquentielles. Au cours de notre travail de recherche, d'autres publications sont parues sur ce thème. L'article [94] montre qu'en revêtant la paroi d'une CRBM d'une métasurface, on peut agrandir son volume utile tout en maintenant l'uniformité du champ aussi bonne que celle d'une CRBM conventionnelle. L'article [64] propose un guide pour choisir son métamatériau bas coût et facile à mettre en œuvre. Les articles [65] et [95] montrent à travers des études spectrale et spatiale qu'il est possible de construire une CRBM chaotique équipée de modulateurs spatiaux

micro-ondes (spatial microwave modulators ou SMM) reconfigurables. Le SMM est utilisé ou non en combinaison avec une cavité qui peut être, qui plus est, chaotique. La figure suivante tirée de l'article [95] présente une vue de dessus d'une cavité électromagnétique de volume  $0,18 \text{ m}^3$  rendue reconfigurable grâce à deux SMM.

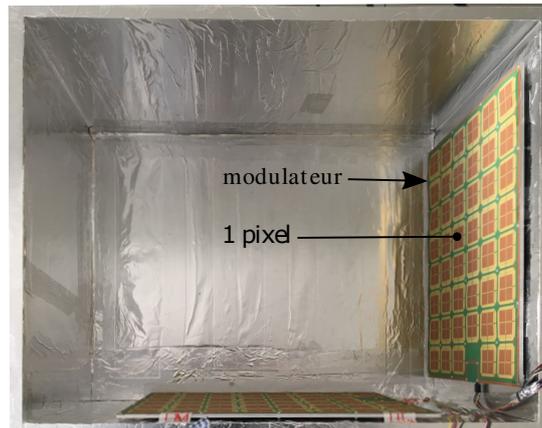


FIGURE 5.1 – Vue de dessus d'une cavité électromagnétique de volume  $0,18 \text{ m}^3$  rendue reconfigurable grâce à deux SMM - Figure tirée de [95].

L'article [96] montre une augmentation du nombre d'états non corrélés lorsqu'au moins une métasurface est présente dans l'enceinte, une amélioration de l'uniformité du champ définie selon les normes est également constatée à partir de deux métasurfaces tapissant les murs de la cavité. Le concept abordé dans la thèse de Philipp del Hougne [97], et dans les articles [98], [99] et [100], est de placer des résonateurs reconfigurables électroniquement via un système de switch qui permet à chacun de passer d'une condition sur la plaque de type conducteur électrique parfait à une condition de type conducteur magnétique parfait. Grâce à ce concept, les conditions aux limites de la cavité électromagnétique peuvent être contrôlées localement, la cavité est alors rendue reconfigurable en plaçant plusieurs résonateurs contre ses parois. Ce concept a été repris dans l'article [101].

Nous nous sommes inspirés de ces différentes études ainsi que du brevet déposé par PSA [102] (brevet déposé en 2005 et publié en 2006) afin d'implémenter un système constitué de plaques métalliques placées contre les parois d'une CRBM (figure 5.2).



FIGURE 5.2 – Système de plaques métalliques dans l'enceinte d'une CRBM.

Un module d'entrée/sortie inséré dans une boîte métallique est placé au plafond de la cage (en dehors du volume utile) et relié aux plaques grâce à des relais. Nous modifions l'état des plaques (connectée/déconnectée) à l'aide d'un commutateur placé entre la plaque et la paroi via une équerre. Le lien entre la plaque et l'équerre est assuré à l'aide d'un fil connecté au commutateur (figure 5.3).

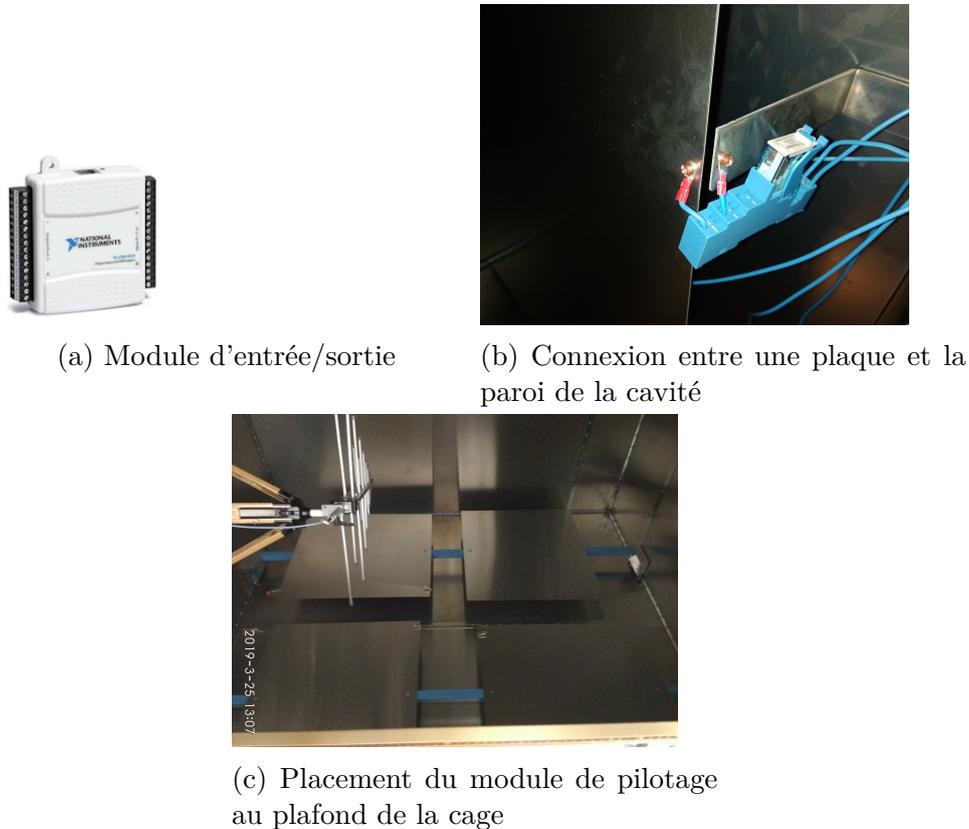


FIGURE 5.3 – Module d'entrée/sortie, connexion entre une plaque et la paroi de la cavité et placement du module de pilotage des switches au plafond de la cage.

Ainsi, l'ordinateur envoie une commande au module de pilotage qui via les relais connecte ou non la plaque à la masse de la cage. Nous appellerons ce système un brassage par commutation.

## 5.2 Etude de l'effet du brassage par commutation par simulations électromagnétiques

Dans le cadre d'une étude préliminaire, plusieurs simulations de l'EOLE 400 de l'ESYCOM avec son brasseur ont été réalisées sous HFSS par H. Boustia [103] pour une cavité contenant 4 plaques de dimensions 0,8 m x 0,8 m, d'épaisseur 3 mm placées à 10 cm des parois. Les positions des plaques ont été choisies pour éviter toute symétrie et leurs dimensions pour correspondre au même ordre de grandeur que la longueur d'onde dans la bande fréquentielle étudiée pour obtenir un effet notable des plaques. La structure simulée est présentée sur la figure 5.4.

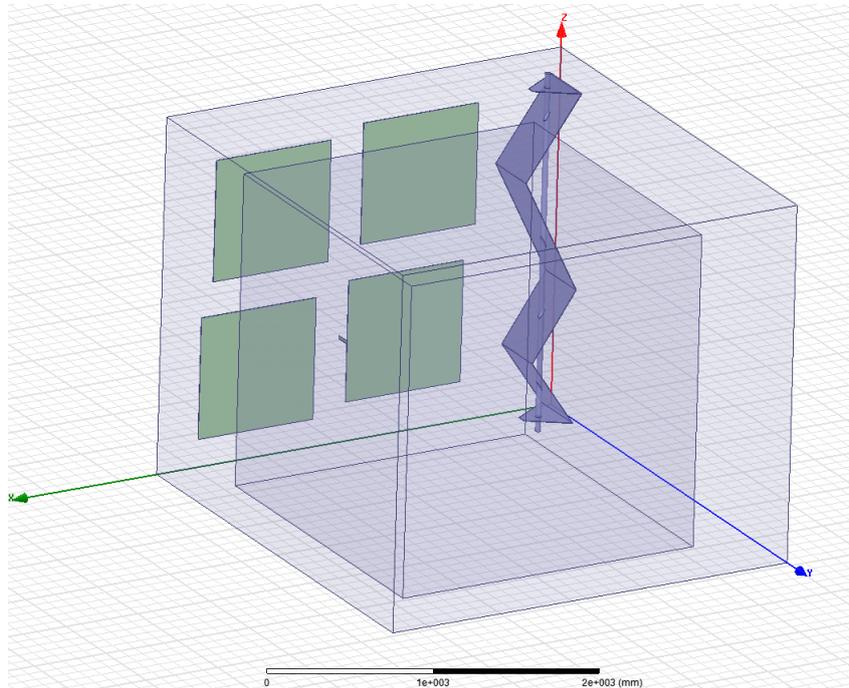


FIGURE 5.4 – Présentation de la structure simulée avec 4 plaques métalliques proches de la paroi située dans le plan  $xOz$ .

Pour chaque structure simulée, une ou plusieurs plaques sont connectées à la paroi (court-circuit) comme le montre la figure 5.5. La largeur de la languette métallique pour la connexion à la paroi est de 2 cm, l'épaisseur est de 3 mm et la longueur (i.e. la distance plaque-paroi) est de 10 cm.

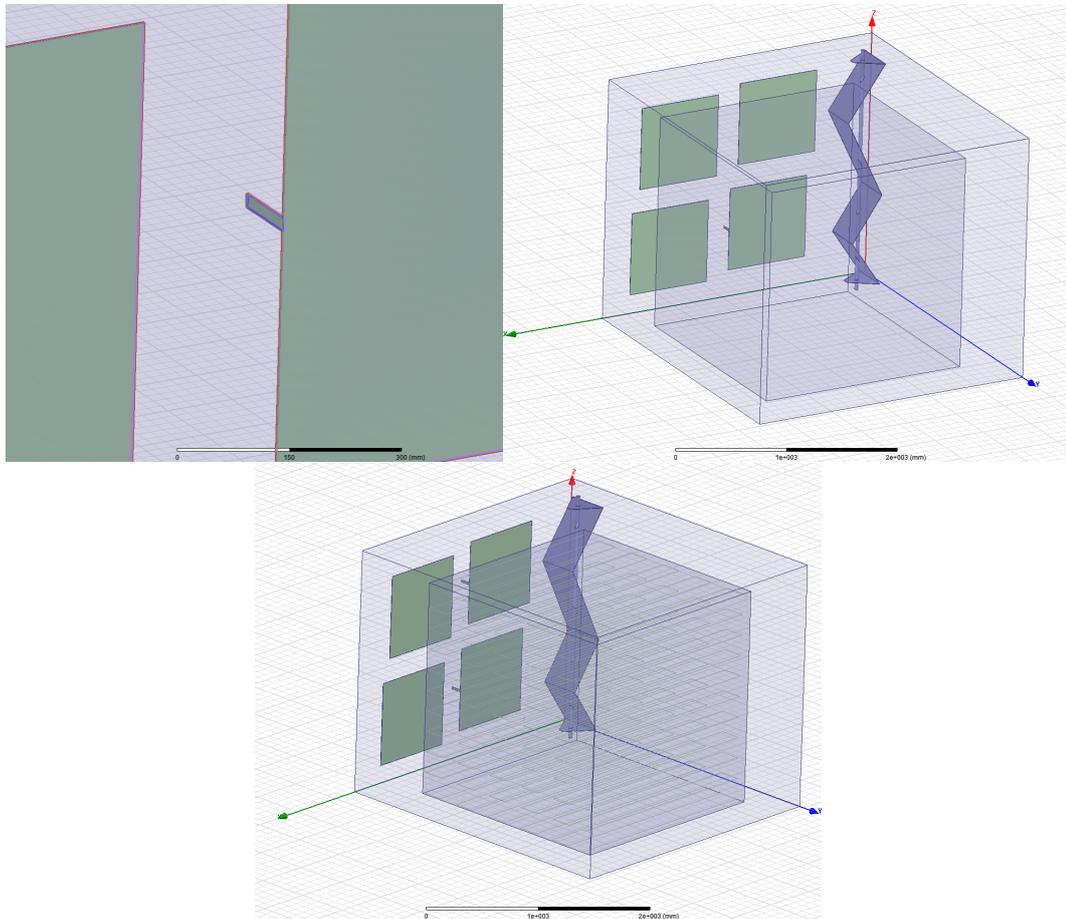


FIGURE 5.5 – Zoom sur une connexion métallique entre une plaque et une paroi. Cas d'une et deux plaques connectées.

Les valeurs de champ électrique ont été extraites en des points définis sur des lignes parallèles placées dans le volume de travail, comme le montre la figure ci-dessous. Il est à noter que pour l'ensemble des traitements réalisés, le brasseur est en position fixe.

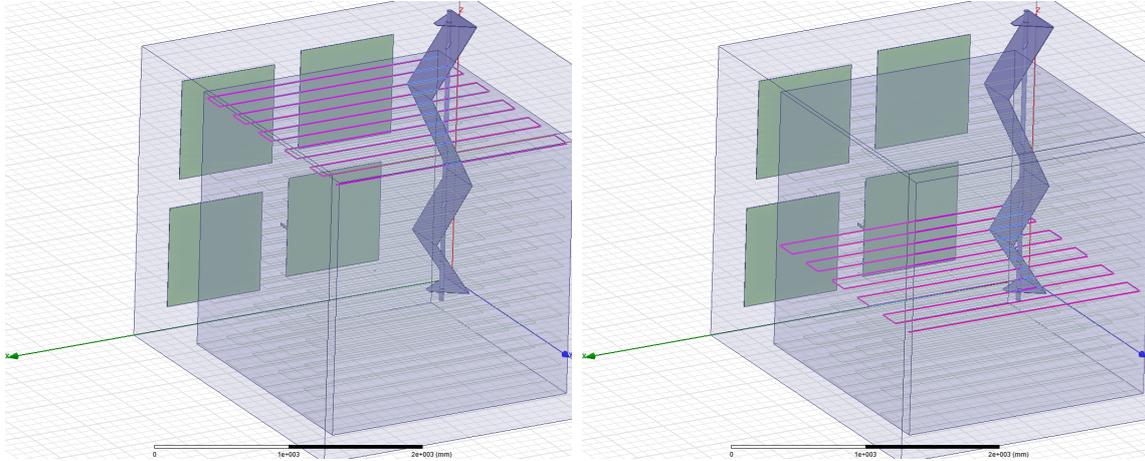


FIGURE 5.6 – Lignes d'extraction du champ électrique.

La bande fréquentielle d'intérêt se situe entre 500 et 510 MHz. 11 lignes parallèles sont définies dans le volume de travail et, sur chacune de ces lignes, le champ électrique est extrait en 110 points équidistants, avec une distance de 0,22 m entre 2 points successifs, cette distance correspond à  $\lambda/2$  à 500 MHz. Le nombre total de points est de 1210. Le champ électrique est reconstruit à partir des modes de résonance en considérant comme source d'excitation le courant le long d'une ligne simulant une petite antenne filaire, placée à côté du brasseur, en dehors du volume de travail où le champ électrique est extrait. Plus précisément, la source d'excitation considérée est le courant sur une ligne centrée en  $r_0$ , de faible longueur (de l'ordre du dixième de longueur d'onde, ce qui permet de la considérer comme ponctuelle), et oblique de coefficient directeur (1/3,1/3,1/3) dans le repère cartésien (de façon à exciter les 3 composantes de champ).

Dix résonances sont extraites dans la bande fréquentielle 500 - 510 MHz. Pour chaque résonance  $m$ , les fréquences de résonance  $f_m$  sont déterminées et les valeurs du champ électrique ( $e_{mx}$ ,  $e_{my}$ ,  $e_{mz}$  complexes) sont extraites aux 1210 points, ainsi que le courant sur la ligne d'excitation. Le champ est ainsi reconstruit en chacun des 1210 points du volume de travail à partir de l'équation (5.1). 20000 points fréquentiels sont obtenus. Un facteur de qualité de 1200 a été choisi car il correspond à l'ordre de grandeur des valeurs usuellement observées. Le champ électrique  $E(f, r)$  mesuré en  $\vec{r}$  et créé par une source arbitraire de courant  $\vec{J}_0(\vec{r}_0)$  dans un volume peut s'écrire comme une somme pondérée des champs propres  $e_m^{\vec{r}}$  associées aux résonances individuelles (ou modes propres)  $f_m$ . La formule suivante est utilisée pour reconstruire le champ aux différents points (avec la somme sur les modes de la cavité) :

$$\vec{E}(\omega) = E_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\vec{J}_0(\vec{r}_0) \cdot e_m^{\vec{r}_0}}{\omega_m^2 - \omega^2 [1 - (-1 + j) \cdot \omega_m / (Q\omega)]} \frac{e_m^{\vec{r}}}{\sqrt{\int_V |e_m^{\vec{r}}|^2 dv}} \quad (5.1)$$

Avec  $\omega_m$  la pulsation de résonance ( $\omega_m = 2\pi f_m$ ),  $Q$  le facteur de qualité,  $e_m^{\vec{r}}$  le champ du mode propre aux différents points du volume de travail,  $V$  le volume de la cavité et  $\vec{J}_0(\vec{r}_0)$  le courant sur l'antenne filaire.

Une comparaison des cartographies du champ électrique obtenu pour deux modes de résonance proches de 500 MHz dans la configuration où les 4 plaques sont connectées et celle où aucune plaque n'est connectée est présentée en figure 5.7.

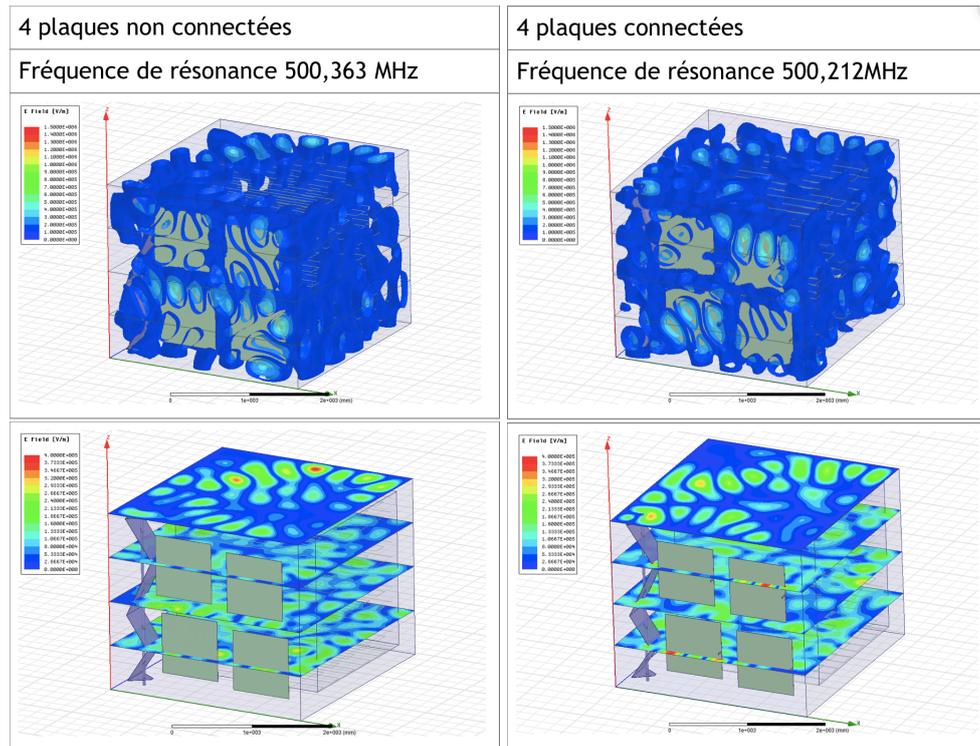


FIGURE 5.7 – Comparaison des cartographies de champ entre aucune plaque connectée et 4 plaques connectées.

Il y a donc bien une modification effective de la cartographie de champ dans le volume de la cavité par la connexion à la paroi des plaques dans l'enceinte.

Seules les cartographies pour une résonance sont ici présentées mais, sur l'ensemble de la bande fréquentielle étudiée, sur l'ensemble des fréquences simulées, les cartographies des modes de résonance de la cavité sont très différentes entre la configuration de plaques non connectées et celle où l'ensemble des plaques sont connectées.

La corrélation entre les champs électriques obtenus entre les différentes configurations de la cavité (plaques connectées ou non) est également estimée. Pour chaque fréquence (20000 points fréquentiels entre 500 MHz et 510 MHz), pour une composante de champ  $E_r$ , les valeurs des champs en tous les points du volume (1210 valeurs) sont corrélées avec celles obtenues pour une autre configuration à la même fréquence. 20 000 valeurs du coefficient de corrélation sont ainsi calculées (une pour chaque fréquence). Les histogrammes des modules des coefficients de corrélation sont tracés pour chaque axe en considérant pour configurations celle où les 4 plaques sont connectées et celle où aucune plaque n'est connectée à la cavité (figure 5.8).

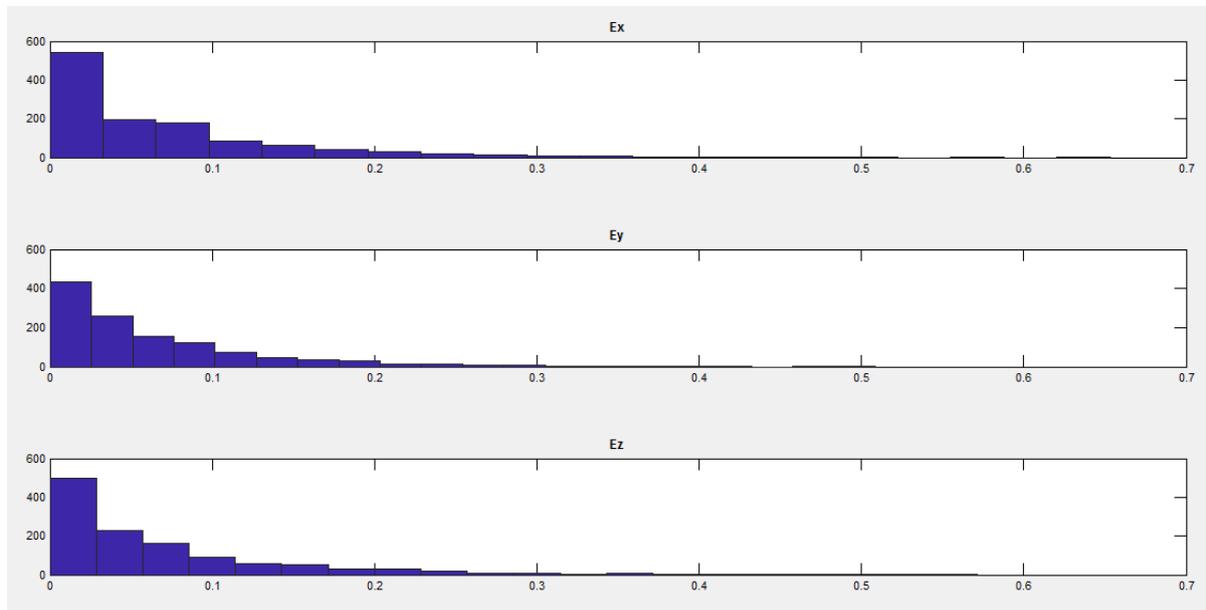


FIGURE 5.8 – Histogrammes des modules des coefficients de corrélation entre les champs extraits aux 1210 points du volume de travail lorsque les plaques sont toutes déconnectées où toutes connectées aux parois. Ces coefficients sont calculés en considérant chacune des composantes de champ ( $E_x$  pour la figure du haut,  $E_y$  au milieu et  $E_z$  en bas) et pour 20 000 points fréquentiels entre 500 MHz et 510 MHz.

La valeur moyenne du coefficient de corrélation obtenue pour l’axe x sur les points fréquentiels est de 0,0706. Pour l’axe y cette valeur est de 0,0635 et pour z de 0,0694. Il y a donc peu de corrélation entre les configurations comparées.

L’étude de H. Bousta montre que l’utilisation du brassage par les plaques métalliques peut présenter un grand intérêt pour les mesures en chambre réverbérante. En effet, la modification des connexions des plaques a un impact sur la distribution des champs dans l’enceinte, ceci se ressent sur les coefficients de corrélation entre les configurations de CRBM où les plaques sont toutes déconnectées et où elles sont toutes connectées.

### 5.3 Environnement de test dans le cadre de notre étude

Notre objet d’étude est une EOLE 400 de l’entreprise SIEPEL de dimensions 2,48 x 2,48 x 2,86 m<sup>3</sup>. Le système de brassage par commutation utilisé est un système de connexion/déconnexion à la masse de plaques métalliques fixées dans l’enceinte sur leurs supports diélectriques. Des équerres réalisent le lien entre la plaque et la paroi pour la mise à la masse de la cage. En couvrant les murs d’une cavité parallélépipédique avec ces plaques, nous obtenons une cavité reconfigurable. Huit plaques en aluminium d’épaisseur 1 mm et de dimensions 1 m en longueur et 0,9 m en largeur sont installées

dans l'enceinte à 10 cm des parois. Les dimensions ont été choisies pour travailler dans une gamme de fréquences allant de 100 à 400 MHz. Ainsi, les fréquences de résonance de la CRBM sont théoriquement  $\{150, 166, 224, 300, 333, 343, 365\}$  MHz, si on considère le cas analytique de la cavité parallélépipédique vide. Ces plaques sont positionnées sur deux parois verticales adjacentes de la cage puisque sur les autres murs de l'enceinte un élément est présent (porte, brasseur...), c'est également la raison pour laquelle nous ne pouvons placer que huit plaques dans l'enceinte. Enfin, 8 plaques permettent, en les connectant et les déconnectant des parois, de générer 256 configurations, ce qui semble suffisant comme base de comparaison avec un brasseur classique. La figure 5.9 présente le positionnement des 8 plaques dans l'enceinte.



(a) Mesures préliminaires avec antenne de réception (b) Mesures avec sonde de champ isotropique

FIGURE 5.9 – Plaques en aluminium au sein d'une CRBM et leurs supports - Système de brassage par commutation - Antenne log-périodique et sondes isotropiques de mesure.

### 5.3.1 Choix des paramètres de connexion des plaques métalliques

#### Mise en place du système

Une série de tests a été menée afin d'une part de vérifier si le brassage est bien effectif, i.e. si l'action de connecter/déconnecter une plaque à la masse dans l'enceinte modifie suffisamment les configurations du champ dans l'enceinte, d'autre part d'optimiser le système. Pour ces tests, le brasseur est en position fixe et une seule plaque est connectée. Nous n'utilisons pas de sonde de champ isotropique mais une antenne de réception fixe dans le volume utile de la CRBM ainsi qu'une antenne d'émission elle aussi à une position fixe dans l'enceinte, positionnée derrière le brasseur (entre le brasseur et la paroi). La bande fréquentielle se situe entre 100 et 400 MHz avec un pas fréquentiel de 2 MHz.

Deux voies sont à l'étude. Dans un premier temps, nous regardons si une connexion par plaque est suffisante pour permettre le brassage par commutation dans l'enceinte. Dans un second temps, nous comparons différentes longueurs et sections de câbles reliant la plaque à l'équerre. Pour vérifier le fonctionnement de notre système, nous observons

la variation de puissance reçue dans l'enceinte en fonction des états de connexion de la plaque à la masse par rapport à l'état non connecté.

### Nombre de connexions

Pour évaluer expérimentalement si une connexion par plaque suffit à modifier de façon significative les configurations de champ dans l'enceinte ou si plusieurs connexions sont nécessaires pour que la connexion/déconnexion soit efficace i.e. permette une grande variation de puissance reçue, nous connectons les 4 extrémités de la plaque à la paroi (figure 5.10). Le lien entre la plaque et l'équerre est assuré à l'aide d'un fil de 4 cm de longueur et de diamètre 1,5 mm<sup>2</sup>. Ce choix est arbitraire pour commencer les essais.

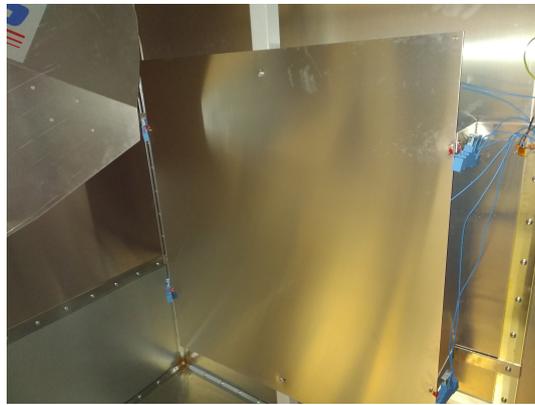


FIGURE 5.10 – Connexions aux 4 extrémités de la plaque.

L'étude consiste à découper un à un les câbles reliés aux automates et ainsi obtenir 16 états de brassage ( $2^4$  puisqu'il existe 4 points de connexion). Un exemple est présenté sur le schéma 5.11.

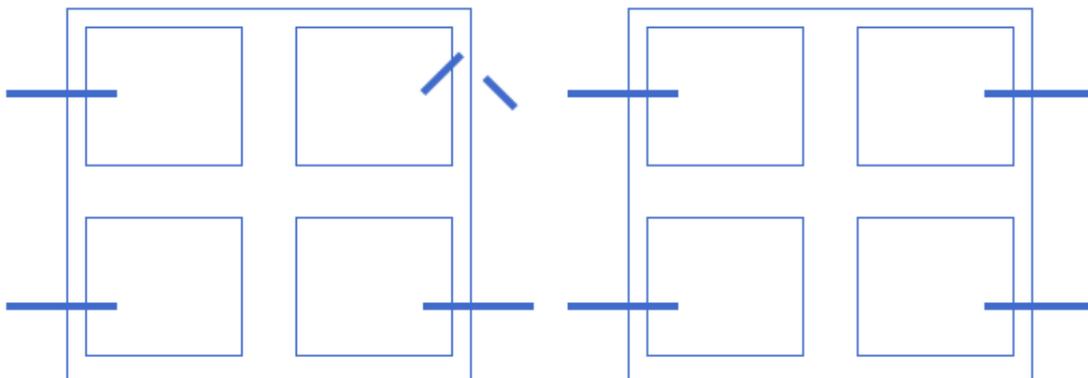


FIGURE 5.11 – Schéma des connexions sur une plaque en 3 extrémités (gauche) ou en 4 extrémités (droite).

Les écarts de puissance reçue sur l'antenne entre chaque état de connexion de la plaque et lorsque celle-ci n'est pas connectée sont calculés comme suit :

$$\delta_{x,0} = |P_{rec_0} - P_{rec_x}| \quad (5.2)$$

Avec  $\delta_{x,0}$  l'écart entre la connexion  $x$  et aucune connexion et  $P_{rec}$  la puissance reçue en dBm.

Ces écarts de puissance entre les différents états de connexion et le cas sans connexion sont moyennés sur 6 bandes fréquentielles de 50 MHz (figure 5.12).

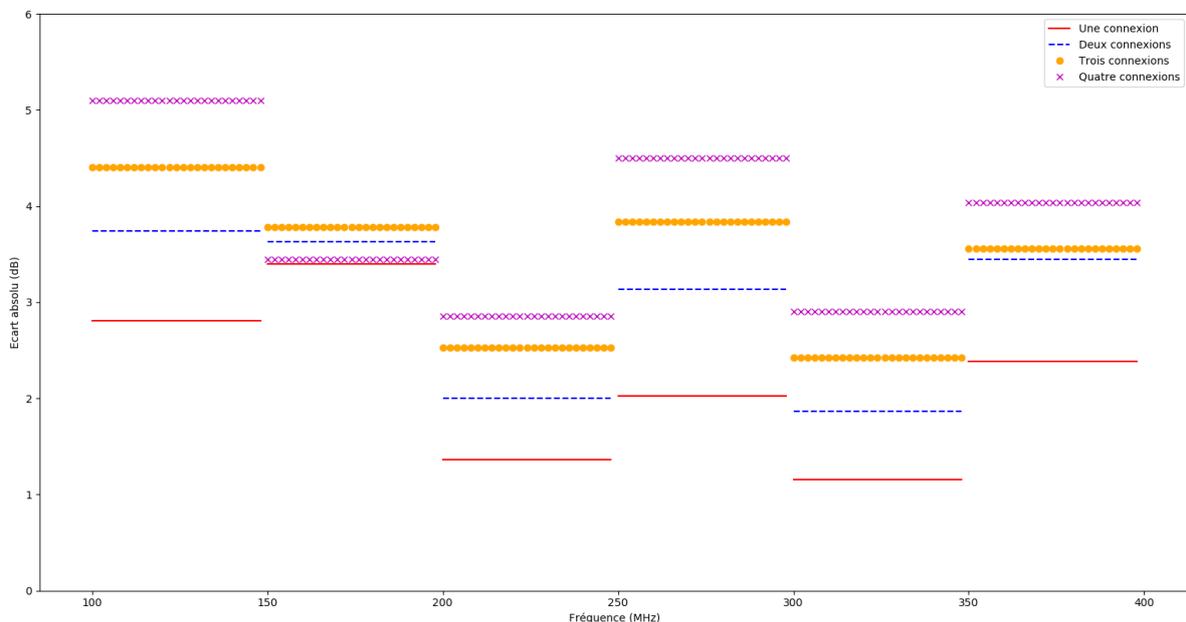


FIGURE 5.12 – Ecarts de puissance reçue entre chaque état des connexions (connexion en 1, 2, 3 ou 4 points) et l'état non connecté moyennés sur six bandes fréquentielles.

Nous constatons une influence du nombre de connexions sur la plaque sur les variations de puissance reçue. A l'exception de la bande 150 - 200 MHz, 1 seule connexion est toujours moins favorable à la variation de puissance que 2 qui elle-même l'est moins que 3. La meilleure configuration reste celle avec 4 connexions. Dans la bande 150 - 200 MHz, la plaque a un effet relativement important mais identique quel que soit le nombre de connexions. Pour un compromis entre performances et difficultés d'automatisation, nous avons choisi de connecter la plaque à la paroi sur 3 de ses extrémités dans la suite de notre étude. Ainsi, les 3 connexions par plaque ne se font pas indépendamment, une plaque connectée signifie que les 3 connexions sont activées. En effet, chacune des plaques est connectée à une sortie du module i.e. les 3 connexions sont toutes reliées à une unique sortie du module.

### Caractéristiques des câbles

A ce stade, nous pouvons affirmer que le système de connexion/déconnexion d'une plaque à la masse permet de modifier les configurations de champ dans l'enceinte pour un câble de 4 cm et de diamètre 1,5 mm<sup>2</sup> pour une position fixe du brasseur. Cependant, nous recherchons la configuration optimale à adopter. Pour cela, nous allons comparer différents diamètres et longueurs de câbles :

- Câble de 4 cm en 1,5 mm<sup>2</sup>,
- Câble de 40 cm en 1,5 mm<sup>2</sup>,
- Câble de 6 cm en 2,5 mm<sup>2</sup>. En effet, pour ce diamètre un câble de 4 cm était trop court pour réaliser la connexion,
- Câble de 6 cm en 1,5 mm<sup>2</sup> mais avec 2 fils en parallèle. En chaque point de connexion, les extrémités de ces 2 câbles sont connectées à la masse et à la plaque,
- Câble de 6 à 8 cm en 6 mm<sup>2</sup>.

Nous traçons les écarts de puissance absolus moyens sur les 6 bandes fréquentielles pour 3 points de connexion sur la plaque (figure 5.13).

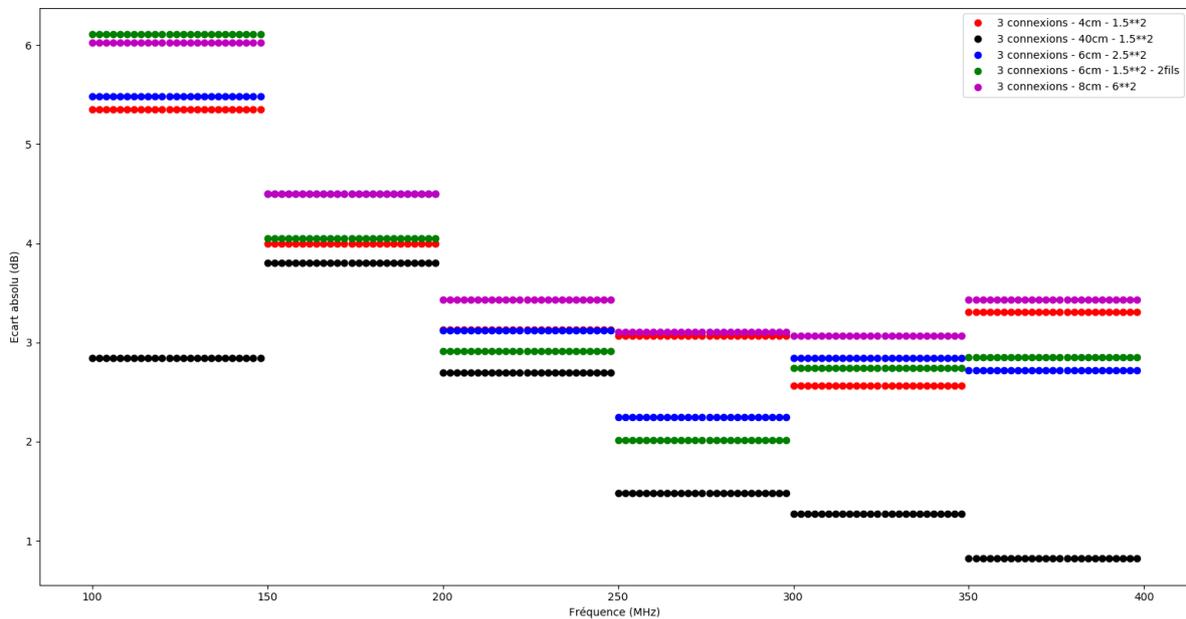


FIGURE 5.13 – Ecarts de puissance reçue entre les cas où la plaque est connectée ou non connectée, dans le cas où 3 points de connexion sont utilisés et pour plusieurs types de câbles, moyennés sur six bandes fréquentielles.

D'après la figure 5.13, la configuration avec le câble long implique des écarts beaucoup plus faibles que pour toutes les autres configurations. En dehors de ce dernier, l'impact de la nature du câble est moins important mais le plus grand écart de champ

est obtenu pour la configuration d'un câble de longueur 8 cm et de diamètre 6 mm<sup>2</sup>. Par ailleurs, cette configuration est plus solide du fait du plus grand diamètre du câble. Il est donc intéressant de retenir des câbles courts et de grosses sections probablement du fait de leur plus faible impédance (principalement de nature inductive).

### 5.3.2 Configuration choisie pour notre étude

Grâce aux mesures préliminaires, nous obtenons une configuration optimale pour les essais de brassage par commutation d'un système d'une plaque en CRBM. Nous avons automatisé les tests et défini les caractéristiques et types de connexions de la plaque à la masse optimaux pour notre étude. La connexion plaque - paroi est réalisée à l'aide d'un câble placé de chaque côté de l'interrupteur. Un ensemble de trois connexions simultanées s'est révélé être un bon compromis pour obtenir les écarts de puissance reçue les plus élevés par rapport à l'état non connecté. Ces écarts de puissance sont les plus importants avec un câble de grosse section et de petite longueur. Nous avons privilégié un câble de longueur 8 cm et de diamètre 6 mm<sup>2</sup>. De la même manière que pour l'ensemble des essais effectués au cours de ce doctorat, des mesures de répétabilité ont été réalisées afin de confirmer les résultats présentés.

Une variation de puissance reçue notable est constatée avec un système de plaque unique connectée. Or, l'effet est probablement limité puisque l'on active une seule plaque. Pour obtenir un effet plus ample, on décide d'activer l'ensemble des 8 plaques en utilisant pour chacune d'elles la connexion optimale établie (figure 5.14).

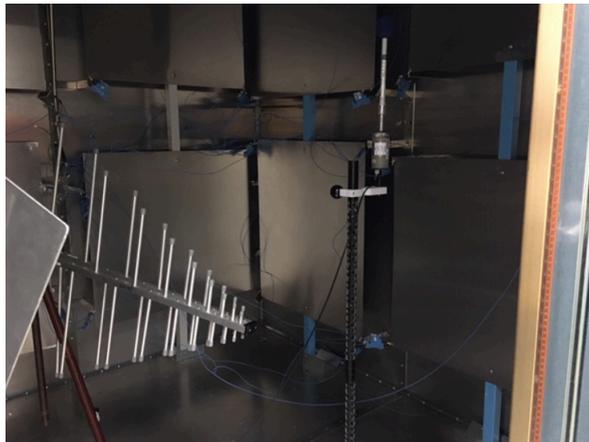


FIGURE 5.14 – Installation finale du système par commutation.

La configuration matérielle des essais est présentée en figure 2.15. Une antenne de réception mobile est placée dans l'enceinte mais nous collectons uniquement les données de puissance incidente et les données de champ via une sonde triaxiale. Nous rappelons que la distance plaque - sonde de champ triaxiale est de 67,5 cm avec une hauteur de sonde de 162 cm pour les positions hautes et 58 cm pour les positions basses. Les données

sont collectées sur les 8 positions du volume utile de la CRBM. La bande fréquentielle choisie pour ce système se situe entre 100 et 400 MHz avec un pas fréquentiel de 4 MHz. Cette configuration est choisie pour la poursuite des essais. Un récapitulatif des propriétés du banc de mesure utilisé est par ailleurs présenté dans l'annexe B.

## 5.4 Apport du brassage par commutation

### 5.4.1 Types de brassage étudiés

Grâce au système de brassage par commutation d'une plaque, nous avons constaté un changement des distributions du champ dans l'enceinte. Ce système peut être utilisé de différentes manières. La première est de remplacer le brasseur conventionnel par ce système de brassage. Il est également possible d'ajouter ce système au brasseur mécanique. Afin de quantifier l'apport des plaques par rapport à une solution conventionnelle, nous comparons différentes configurations d'intérêt :

- 256 états de plaques ( $2^8$  états),
- 256 positions de brasseur,
- 16 états de plaques et 16 positions de brasseur équidistantes.

Pour le brassage par 16 états de plaques et 16 positions de brasseur équidistantes, nous choisissons les états de plaques et de brasseur permettant de maximiser a priori le brassage. Pour le brasseur, nous prenons naturellement 16 états uniformément répartis sur une rotation complète. Pour les plaques, nous décidons de maximiser le nombre de plaques connectées changeant d'état entre chaque configuration. Afin de déterminer les états correspondant, nous calculons le nombre de plaques actives pour chaque état. Le tableau 5.1 présente les 4 premiers états de plaques associés au nombre de plaques connectées.

Etat	Codage de l'état	Plaques connectées	Nombre de plaques connectées
0	00000000	Aucune	0
1	00000001	Plaque 8	1
2	00000010	Plaque 7	1
3	00000011	Plaques 7 et 8	2

TABLE 5.1 – Lien entre code et états de connexions des plaques.

L'état « 0 » correspond à l'état où aucune plaque n'est connectée, ce qui se traduit par un code constitué uniquement de « 0 », chaque chiffre de ce code étant relatif à l'état d'une des 8 plaques. L'état « 3 » correspond à 2 plaques connectées, les plaques nommées 7 et 8 arbitrairement (les numérotations des plaques sont indiquées sur la figure 5.16). Puis, nous traçons le nombre de changement d'états de plaques entre l'ensemble des 256 états (figure 5.15).

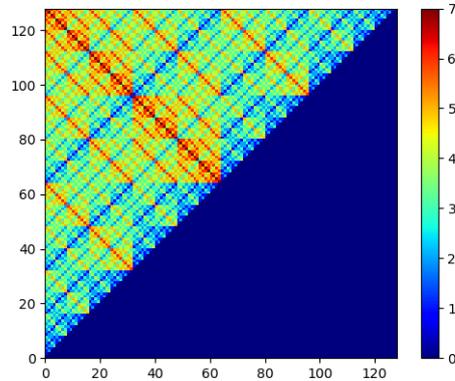


FIGURE 5.15 – Nombre de changements d'état de plaques entre deux états (numérotés de 0 à 127) sur les axes verticaux et horizontaux. En raison de la symétrie de ces changements, les résultats ne sont présentés que pour un état sur l'axe vertical de numéro au moins égal à celui de l'axe horizontal (triangle en haut à gauche) ; la zone bleu foncée en bas à droite correspond donc à des nombres de changements non calculés.

La différence entre l'état « 0 » et l'état « 1 » est la variation de l'état d'une seule plaque, la différence entre l'état « 0 » et l'état « 3 » correspond au changement d'état de 2 plaques puisque 2 plaques sont connectées dans le cas de l'état « 3 » et aucune dans le cas de l'état « 0 ». Ainsi, pour obtenir le maximum de réalisations non corrélées sur l'ensemble de la bande fréquentielle d'intérêt, nous choisissons les états où nous constatons au moins 4 bits d'écart par couple d'états en partant de l'état « 0 ». En d'autres termes, les configurations sélectionnées possèdent des codes binaires dont la distance de Hamming est supérieure ou égale à 4. Nous obtenons plusieurs octuplés en conservant l'état « 0 » dont la distance de Hamming est supérieure ou égale à 4. Nous choisissons arbitrairement deux octuplés et un état parmi la série obtenue pour atteindre 16 états de plaques (en effet, l'état « 0 » est présent dans les deux octuplés choisis). Au début de nos tests, une des sorties du module était défectueuse, ainsi nous n'avions que 128 états et non 256, nous avons donc réalisé le calcul pour 128 états de plaques et non 256. Par la suite, nous avons conservé ce choix malgré la réparation du module. La série obtenue est présentée dans le tableau ci-après (tableau 5.2).

<b>Série des états obtenus</b>
0 15 51 60 85 90 102 105
0 15 51 60 86 89 101 106
0 15 53 58 83 92 102 105
0 15 53 58 86 89 99 108
0 15 54 57 83 92 101 106
0 15 54 57 85 90 99 108
0 23 43 60 77 90 102 113
0 23 43 60 78 89 101 114
0 23 45 58 75 92 102 113
0 23 45 58 78 89 99 116
0 23 46 57 75 92 101 114
0 23 46 57 77 90 99 116
0 27 39 60 77 86 106 113
0 27 39 60 78 85 105 114
0 27 45 54 71 92 106 113
0 27 45 54 78 85 99 120
0 27 46 53 71 92 105 114
0 27 46 53 77 86 99 120
0 29 39 58 75 86 108 113
0 29 39 58 78 83 105 116
0 29 43 54 71 90 108 113
0 29 43 54 78 83 101 120
0 29 46 51 71 90 105 116
0 29 46 51 75 86 101 120
0 30 39 57 75 85 108 114
0 30 39 57 77 83 106 116
0 30 43 53 71 89 108 114
0 30 43 53 77 83 102 120
0 30 45 51 71 89 106 116
0 30 45 51 75 85 102 120

TABLE 5.2 – Séries des états obtenus.

Les états choisis sont  $\{0, 15, 29, 39, 51, 58, 60, 75, 85, 86, 90, 102, 105, 108, 113, 120\}$  c'est pourquoi ils sont indiqués en rouge dans le tableau ci-dessus. Le placement des plaques dans l'enceinte est présenté sur la figure 5.16.

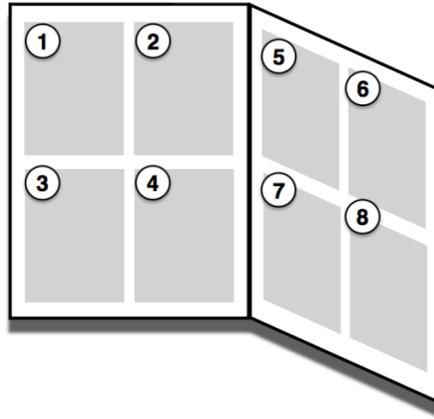


FIGURE 5.16 – Placement des plaques dans l'enceinte.

En comparant les trois configurations d'intérêt (256 positions de brasseur, 256 états de plaques et 16 positions de brasseur et 16 états de plaques), nous serons à-même de comprendre l'effet du système de brassage par commutation au sein d'une CRBM et de définir le meilleur type de brassage à adopter entre un système de brassage mécanique, un système de brassage par commutation ou bien l'utilisation conjointe des deux systèmes.

### 5.4.2 Comparaison des systèmes de brassage

Plusieurs critères sont à l'étude afin d'estimer l'apport de la solution de brassage par commutation. Etant donné les fortes variations fréquentielles constatées à cause de la nature stochastique des grandeurs observées, nous appliquons une moyenne glissante sur 8 MHz tous les MHz pour l'ensemble des critères. Une moyenne glissante sur 8 MHz est définie ici au lieu des 10 MHz des chapitres précédents car le pas fréquentiel est de 4 MHz alors qu'il était de 1 ou 2 MHz pour les configurations précédentes.

Nous étudions dans un premier temps le facteur de qualité à l'aide de l'équation (2.8) en moyennant les résultats sur un tour de brasseur (60 positions ici). Il convient également de calculer le recouvrement modal  $d$  (2.22). Ces critères sont comparés pour la configuration où les plaques non connectées sont présentes dans l'enceinte (16 positions de brasseur et 16 états de plaques) et la configuration de CRBM classique chez SIEPEL étudiée au cours du chapitre 3 (CR classique avant la pose des plaques) (figure 5.17).

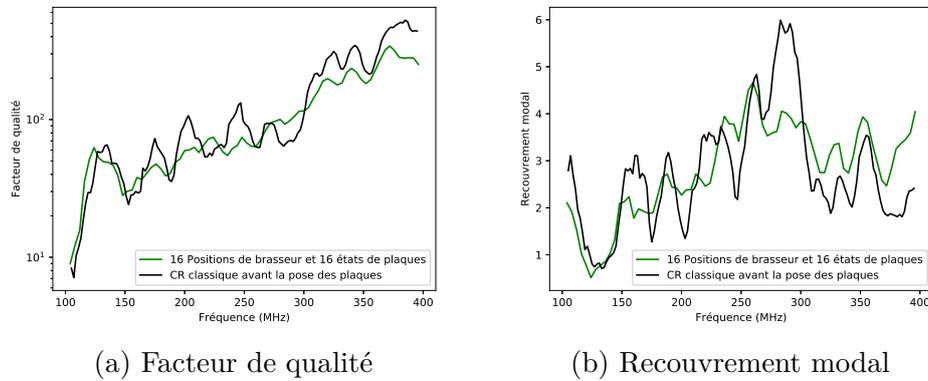


FIGURE 5.17 – Variations fréquentielles du facteur de qualité et du recouvrement modal entre la configuration où les plaques sont présentes dans l’enceinte (verte) et la configuration de CRBM classique (noire).

En ce qui concerne la figure 5.17, on peut analyser et observer que le facteur de qualité n’a pas été significativement modifié. La solution envisagée ne dégrade donc pas le facteur de qualité.

Nous regardons également ces deux critères dans le cas de 256 positions de brasseur, 256 états de plaques, 16 positions de brasseur et 16 états de plaques et enfin 16 positions de brasseur lorsque les plaques sont déconnectées (figure 5.18).

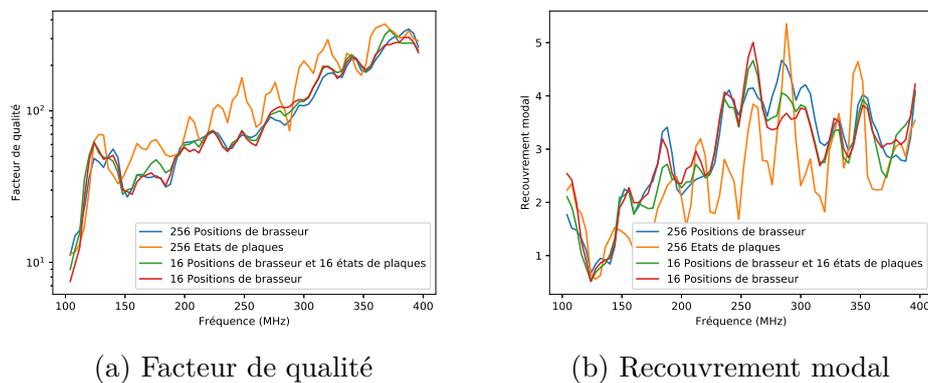


FIGURE 5.18 – Variations fréquentielles du facteur de qualité et du recouvrement modal pour 256 positions de brasseur (bleue), 256 états de plaques (orange), 16 positions de brasseur avec 16 états de plaques (verte) et 16 positions de brasseur avec les plaques déconnectées (rouge).

Les écarts entre les courbes sur la figure 5.18 ne correspondent pas à des changements de facteur de qualité (aucune raison physique à cela) mais bien à une modification des conditions d’estimation du facteur de qualité. La courbe orange (256 états de plaques)

oscillante témoigne de la difficulté d'estimation quand il y a peu de réalisations non corrélées; ceci sera confirmé par la suite lors de l'estimation du nombre d'états décorrélés dans ces différentes configurations. L'estimation du facteur de qualité est proche pour l'ensemble des types de brassage à l'exception de 256 états de plaques où il est légèrement plus élevé, ce qui implique un recouvrement modal plus faible mais ceci est probablement lié à une difficulté d'estimation du facteur de qualité en raison d'une moins bonne qualité de brassage.

Nous traçons ensuite la variation fréquentielle du nombre d'états non corrélés et du champ normalisé (équation (3.8)) dans le cas de 256 positions de brasseur (courbe bleue), 256 états de plaques (courbe orange), 16 positions de brasseur équidistantes avec les 16 états de plaques (verte) et 16 positions de brasseur lorsque les plaques sont déconnectées (rouge) définies en section 5.4.1 de ce chapitre (figure 5.19). La méthode employée pour calculer le nombre d'états non corrélés à chaque fréquence est l'approximation de la méthode basée sur la théorie de l'information (équation (2.14)). L'emploi de la méthode normative n'est pas possible dans le cadre du brassage par commutation car cette méthode est basée sur la corrélation de proche en proche, or dans le cas du brassage par commutation, les configurations ne sont pas adjacentes.

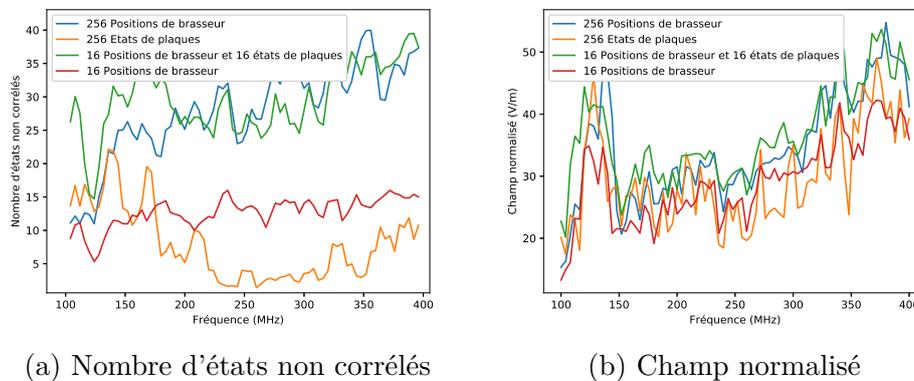


FIGURE 5.19 – Variations fréquentielles du nombre d'états non corrélés et du champ normalisé pour les quatre types de brassage étudiés.

Nous n'appliquons pas de moyenne glissante sur le critère du champ normalisé car c'est un critère normatif usuellement observé fréquence par fréquence. Entre 100 et 200 MHz, la configuration de brassage combiné présente davantage de réalisations non corrélées que les autres configurations. Cette gamme fréquentielle est également celle sur laquelle l'utilisation des seules plaques est la plus efficace; le brassage par plaque est moins efficace aux fréquences plus élevées. On constate également que les courbes représentant les configurations pour 16 positions de brasseur et 256 états de plaques sont proches. 15 à 35 états non corrélés sont dénombrés pour le brassage combiné, 10 à 30 pour le brassage mécanique et entre 5 et 20 pour le brassage par commutation seule. Au-delà de 200 MHz,

le nombre d'états non corrélés est bien plus faible dans la configuration de 256 états de plaques avec une moyenne de 5 états non corrélés sur la bande 200 - 400 MHz. L'utilisation de 16 positions de brasseur délivre davantage d'états non corrélés pour une moyenne aux alentours de 10 entre 200 et 400 MHz. On notera toutefois que, le nombre de positions décorréelées excédant le nombre de 16 lorsque 256 positions de brasseur sont considérées, une valeur de 16 états décorréelés était attendu aux plus hautes fréquences dans le cas du brassage par 16 positions du brasseur ; cet écart montre une erreur d'estimation du nombre d'états décorréelés. Enfin, les courbes des brassages avec 256 positions de brasseur ou avec 16 positions de brasseur et 16 états de plaques sont proches pour des valeurs entre 20 et 40 entre 200 et 400 MHz. Ainsi, les états de plaques ajoutés au 16 positions de brasseur permettent d'augmenter le nombre de positions décorréelées : l'utilisation conjointe de 16 états de plaques et 16 positions de brasseur est celle qui permet d'atteindre le nombre d'états décorréelés le plus élevé sur l'ensemble de la bande fréquentielle.

Globalement, le champ normalisé est plus important avec le brassage mécanique et le brassage combiné ; ceci s'explique par le fait que le nombre d'états non corrélés est plus important dans ces configurations. Or, dans le cas de l'examen du champ normalisé, on recherche le champ maximal. Les courbes des mesures avec 256 états de plaques et 16 positions de brasseur sont les plus basses sur l'ensemble de la bande fréquentielle. L'avantage des plaques est donc constaté, spécialement aux basses fréquences.

Nous poursuivons nos investigations avec la variation fréquentielle du rapport écart-type sur moyenne du champ tiré de l'équation (3.6) (figure 5.20).

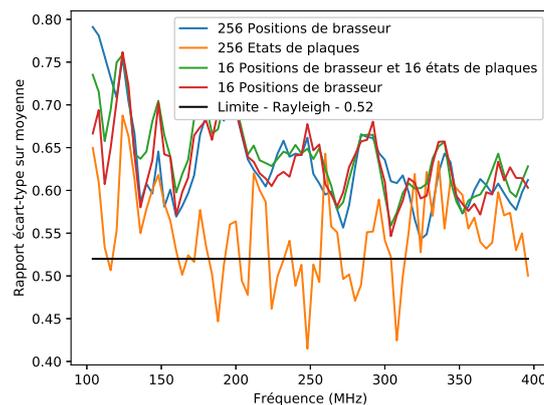


FIGURE 5.20 – Variations fréquentielles du rapport écart-type sur moyenne de champ pour les quatre types de brassage étudiés.

Le CV est bien plus bas dans le cas du brassage par commutation seule, avec un CV moyen autour de la valeur attendue 0,52. Le brassage par commutation couplé au brassage mécanique donne des valeurs équivalentes aux tests réalisés pour un brassage mécanique avec des valeurs de CV autour de 0,6.

## CHAPITRE 5. BRASSAGE PAR COMMUTATION DE PLAQUES

Nous avons vu au cours des chapitres précédents que cet indicateur ne peut pas être regardé seul. En effet, si par exemple un seul mode est présent, le CV est proche de 0 mais le nombre de modes est insuffisant. C'est pourquoi l'observation d'un critère supplémentaire est nécessaire.

L'uniformité des valeurs maximales de champ (méthode développée dans la section 2.1.1) est tracée sur les figures 5.21 et 5.22.

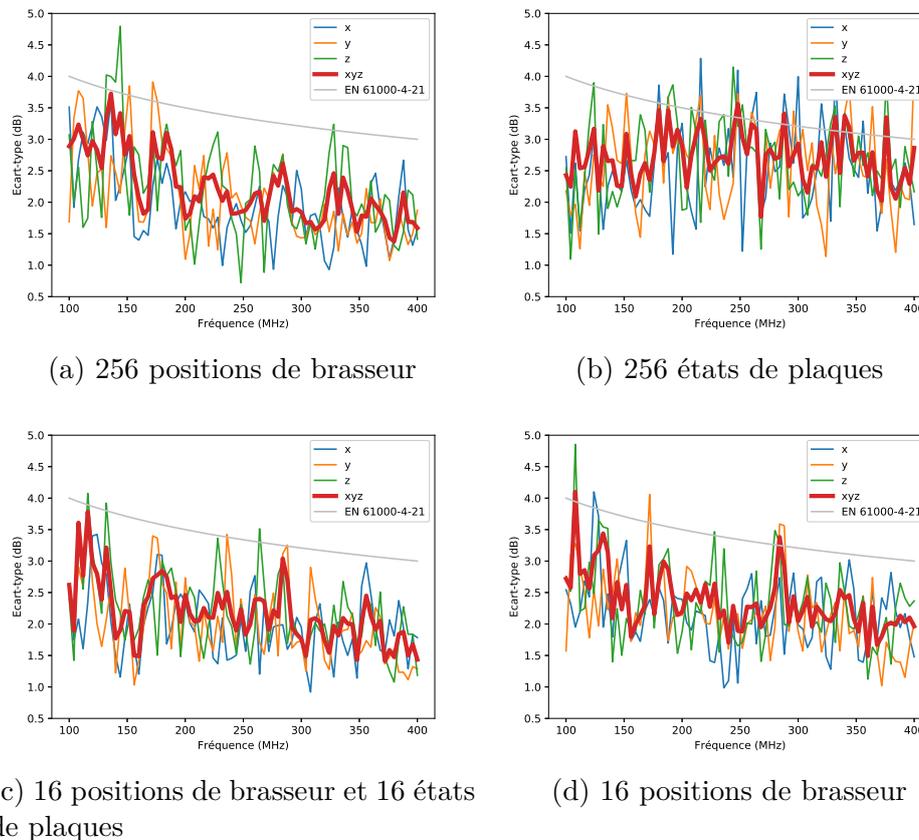


FIGURE 5.21 – Variations fréquentielles de l'écart-type de champ.

On compare dans un premier temps les écarts-types des valeurs maximales de champ pour chaque type de brassage de CRBM par rapport à la norme EN 61000-4-21 (figure 5.21). La CRBM est conforme à la norme aux alentours de 300 MHz pour le brassage avec 16 positions de brasseur, à partir de 150 MHz pour le brassage avec 256 positions de brasseur. En ce qui concerne le brassage avec 256 états de plaques, il n'est pas conforme selon la norme EN 61000-4-21 sur la bande 100 - 400 MHz malgré de faibles valeurs d'écarts-types de champ entre 100 et 200 MHz, ce qui rejoint les observations faites sur le faible nombre de positions décorréelées au-delà de 180 MHz. Enfin, pour le brassage avec 16 positions de brasseur et 16 états de plaques, il est conforme à partir de 100 MHz. On constate cependant une amélioration du critère normatif en basses fréquences grâce

au brassage par commutation de plaques seule.

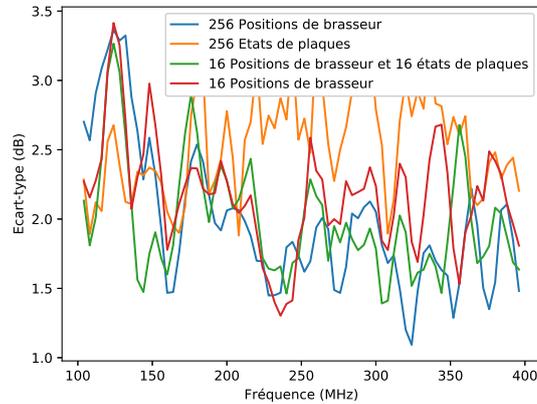


FIGURE 5.22 – Ecart-type de champ moyenné en fréquence pour les quatre types de brassage étudiés.

L'apport du brassage combiné et du brassage par commutation seule est constaté en basses fréquences soit entre 100 et 200 MHz sur le critère d'uniformité du champ. Au-delà, les courbes du brassage combiné et du brassage mécanique sont proches mais l'écart-type de champ pour le brassage avec 256 états de plaques est élevé. Ainsi, le brassage par commutation seule ou le brassage combiné sont efficaces pour décroître l'écart-type de champ en basses fréquences i.e. entre 100 et 200 MHz. A plus hautes fréquences, le brassage combiné présente les mêmes valeurs que le brassage mécanique seul. Ceci est cohérent puisque le nombre de configurations décorréélées pour les plaques est très faible en haut de la bande de fréquence.

Concluons cette partie par l'observation des coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ décrits en section 2.1.1 (figure 5.23).

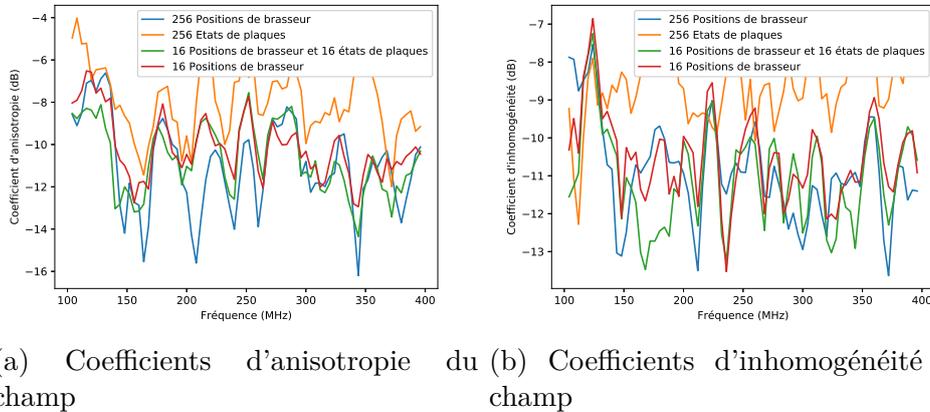


FIGURE 5.23 – Variations fréquentielles des coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ pour les quatre types de brassage étudiés.

Les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité sont élevés dans le cas du brassage par 256 états de plaques mais sont proches pour les autres types de brassage. Ces observations corroborent les conclusions précédemment établies. Ainsi, le champ à l'intérieur de la CRBM est moins uniforme au regard des coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ dans le cas du brassage par commutation seule.

## 5.5 Conclusion sur les systèmes de brassage par commutation

De grandes fluctuations du paramètre CV et des valeurs faibles par rapport à la valeur 0,52 attendue pour une loi de Rayleigh sont constatées dans la bande fréquentielle 200 à 400 MHz dans le cas du brassage par commutation seule avec un écart-type de champ fort et des coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité élevés. En effet, à ces fréquences, il y a une pauvreté de modes. Or, quand on excite très peu de modes, le champ fluctue trop peu. Ainsi, les rapports écart-type de champ sur moyenne demeurent faibles car les valeurs de champ sont quasi-identiques. La loi de Rayleigh n'est pas très discriminante dans le cas d'un échantillon comportant un faible nombre d'états non corrélés. Par conséquent, le CV est bas en basses fréquences i.e. quand il y a peu de modes. La dispersion sur la moyenne est donc importante et la densité de modes est faible avec un nombre d'états non corrélés aux alentours de 5 entre 200 et 400 MHz pour ce type de brassage. Ainsi, le brassage par commutation seule n'améliore pas les critères observés par rapport aux tests usuels entre 200 et 400 MHz. En effet, malgré un CV faible, il faut être prudent sur ce critère seul car nous constatons par le biais d'autres critères que le champ est très inhomogène, non gaussien lorsque seul le brassage par commutation est utilisé. Les modes peuvent également ne pas être ergodiques. On note cependant une contribution du brassage par commutation de plaques, notamment sur le critère d'uniformité du champ, en basses fréquences, soit entre 100 et 200 MHz.

En revanche, le brassage combiné permet une augmentation du nombre d'états non corrélés et une amélioration de l'écart-type de champ défini selon la norme EN 61000-4-21 par rapport au brassage mécanique en basses fréquences (entre 100 et 200 MHz), sans pour autant dégrader les performances sur ces critères à plus hautes fréquences. Pour les autres critères observés (champ normalisé à 1 W au connecteur de l'antenne, facteur de qualité, rapport écart-type sur moyenne, coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ) le brassage combiné est équivalent au brassage mécanique seul (pour un même nombre de configurations soit 256) sur l'ensemble de la bande fréquentielle étudiée soit entre 100 et 400 MHz.

Grâce à la combinaison du brassage mécanique et du brassage par commutation, on parvient à modifier l'état de la CRBM et améliorer ses performances en basses fréquences sans toutefois diminuer le facteur de qualité et le champ normalisé. On obtient des distributions de champ plus variées, mais la densité de modes est peu modifiée car celle-ci est liée au volume de la CRBM. On arrive cependant à pondérer i.e. à exciter de manière différente les modes. On obtient davantage d'états non corrélés grâce à ce type de brassage. Un gain supplémentaire est apporté par la solution du brassage combiné en plus de l'amélioration de ses performances en basses fréquences, il s'agit d'un gain de temps. En effet, grâce à cette solution, les temps d'attente sont améliorés puisque nous ne lançons que 16 positions de brasseur et non pas 256, les modifications des 16 états de plaques sont quant à elles très rapides, contrairement à la rotation du brasseur.

En résumé, la solution de brassage combiné permet avec une même CRBM de réaliser des tests à plus basses fréquences (100 MHz pour une EOLE 400 par exemple) tout en conservant à la fois un fonctionnement conforme aux critères normatifs mais également les performances observées sur des critères comme le rapport écart-type sur moyenne de champ, les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité, le nombre d'états non corrélés ou encore le champ normalisé. Ainsi, une fois le système de brassage combiné installé (brasseur mécanique normatif et système de commutation), la CRBM ne nécessite aucune modification pour la réalisation des tests. Grâce à ce système un gain de temps est également constaté car il n'est pas nécessaire de collecter les données pour un grand nombre de positions de brasseur et le changement des connexions de plaques est très rapide.

# Conclusion et perspectives

## Conclusion générale

Pour répondre aux besoins croissants d'obtention de hauts niveaux de champ lors des tests de CEM et pour palier les difficultés techniques associées qui engendrent des coûts financiers importants, la chambre réverbérante à brassage de modes constitue un environnement de test avantageux. Ce type de structure permet la réalisation de tests en champs forts grâce à l'utilisation d'une enceinte faradisée sans matériaux absorbants réduisant l'amplitude des puissances à injecter pour un niveau de champ visé, ce qui réduit les coûts associés aux amplificateurs utilisés. Les CRBM permettent également la réalisation des tests sur des temps plus courts avec des investissements bien plus faibles que pour d'autres moyens d'essais. Nous avons cependant vu dans l'introduction de ce mémoire que les CRBM présentent quelques limitations sur les propriétés du champ électromagnétique au voisinage de leur fréquence basse d'utilisation car elles diffèrent des propriétés idéales. Ainsi, il est difficile de caractériser et de prédire leur comportement dans des conditions non idéales et d'atteindre les recommandations suivant les critères relatifs aux CRBM choisis, qu'ils soient normatifs ou statistiques. Notre projet s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances des CRBM dans un régime où le fonctionnement de celles-ci ne peut pas être considéré comme idéal selon les critères normatifs et statistiques relatifs aux CRBM. L'objectif principal de ce doctorat a été de comprendre les mécanismes en jeu dans une CRBM afin d'obtenir une meilleure caractérisation du comportement statistique de plusieurs grandeurs physiques et une meilleure maîtrise du fonctionnement des CRBM. Pour répondre à ces objectifs, plusieurs méthodes ont été envisagées et une grande variété d'indicateurs ont été pris en compte afin d'évaluer leur pertinence et complémentarité en fonction des solutions. De nombreuses campagnes de mesures ont été menées dans plusieurs environnements d'essais et l'apport des méthodes employées afin de répondre aux objectifs de la thèse a été mis en lumière.

Au cours de cette thèse, nous avons travaillé à la recherche de critères facilement exploitables dans un contexte industriel, en tenant compte notamment des contraintes liées au temps de mesure et aux manipulations requises. Nous avons vu que l'examen de plusieurs indicateurs est nécessaire pour décrire le comportement du champ dans l'enceinte d'une CRBM, c'est pourquoi deux catégories d'indicateurs ont été considérées. Le premier groupe concerne les indicateurs normatifs que sont le facteur de qualité, le nombre d'états de CRBM non corrélés, l'uniformité du champ via le calcul de l'écart-type et enfin les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ. La deuxième catégorie repose sur

l'observation de deux lois supports, la loi de Rayleigh relative au modèle idéal de cavité surdimensionnée de Hill et la loi de Pnini-Shapiro décrivant l'allure du champ  $y$  compris dans le cas de cavités sous-dimensionnées, en tenant compte du recouvrement modal aux fréquences considérées. Après avoir reconstruit une distribution du champ à partir de simulations de Monte-Carlo d'une loi de Pnini-Shapiro et d'une loi de Rayleigh, nous avons pu étudier les indicateurs et confronter ces modèles afin de justifier l'utilisation d'une loi de Pnini-Shapiro en basses fréquences et comparer le caractère discriminant des différents indicateurs proposés. L'impact de l'augmentation du nombre d'états non corrélés a été constaté sur les critères normatifs et sur les écarts relatifs entre CDF à 50% établis aux différentes positions de mesure mais a peu d'impact sur le rapport écart-type sur moyenne de champ. On note une nette amélioration des critères observés pour un recouvrement modal d'environ 2 et une stagnation des indicateurs à partir d'un recouvrement modal de 5. Or, d'après le Goodness-of-fit test selon Anderson-Darling pour une loi de Pnini-Shapiro, nous pouvons estimer suivre une loi de Rayleigh pour un  $d$  aux alentours de 5 selon un critère de rejet à 50%; ceci serait valable pour une taille d'échantillons inférieure à 60 mais n'est pas recevable pour de plus grandes tailles. Grâce à cette étude nous avons pu vérifier la cohérence de ces modèles avec les données expérimentales et justifier leur utilisation dans le cadre de la description du champ au sein d'une cavité électromagnétique.

Nos recherches de solutions pour améliorer les performances des CRBM ont débuté dans la continuité des travaux sur le chaos ondulatoire. Nous avons cherché à proposer une CRBM chaotique respectant les critères de bon fonctionnement selon la normalisation en vigueur et évaluer ses performances ainsi que le gain apporté par cette nouvelle solution dans un contexte industriel. Nous avons modifié géométriquement une CRBM de référence par l'ajout de calottes métalliques dans l'enceinte afin de la rendre chaotique. D'après les confrontations des données expérimentales avec des tirages de Monte-Carlo selon les lois de Pnini-Shapiro et de Rayleigh, nous avons vu que l'écart-type du champ défini selon les normes est beaucoup moins discriminant que le CV; ainsi, une étude du CV est nécessaire pour faire apparaître l'effet de ces modifications. La pertinence de la loi de Pnini-Shapiro a également été montrée pour décrire le comportement du champ une fois son facteur de qualité connu (ceci dans toutes les situations testées), alors que la distribution de Rayleigh n'est valide qu'à très hautes fréquences. Il est alors possible de prédire différents indicateurs en se basant sur une loi de Pnini-Shapiro plutôt qu'une loi de Rayleigh avec la seule connaissance du recouvrement modal, i.e. en ne mesurant que le facteur de qualité. Nous avons montré que l'ajout de calottes sphériques métalliques sur les parois d'une CRBM améliore l'uniformité du champ mais que cette modification de la cavité diminue également le facteur de qualité en raison de l'effet de charge. C'est pourquoi, afin de distinguer l'effet de la géométrie de celui des pertes, nous avons comparé la CRBM dans sa configuration chaotique avec deux configurations de CRBM comprenant des absorbants afin que leurs facteurs de qualité encadrent celui de la CRBM chaotique. Nous avons vu que les cavités chaotiques et chargées présentent le même comportement quant aux statistiques de champ et aux critères normatifs. La distribution de Pnini-Shapiro confirme ces résultats. Cette conclusion s'explique car en pratique, d'une

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

part l'antenne d'excitation utilisée est une antenne directive orientée vers le brasseur, ce qui permet d'éviter l'excitation de modes réguliers, et d'autre part, la CRBM n'est plus assimilable à une cavité parallélépipédique intégrable à partir du moment où des éléments diffusants sont présents dans l'enceinte (notamment le brasseur mécanique); c'est pourquoi la CRBM possède un comportement proche de celui d'une CRBM chaotique. L'apport des CRBM chaotiques n'a pas été jugé assez probant pour être mis en oeuvre dans un contexte industriel. Nos études des différents indicateurs montrent que les critères visés sont mieux respectés quand le recouvrement modal augmente, donc quand les pertes sont plus importantes pour une géométrie fixée. Or, la présence de pertes impacte le fonctionnement des CRBM : on constate une diminution du niveau de champ à puissance délivrée constante et une amélioration de l'homogénéité du champ dans l'enceinte. Un compromis peut être recherché en ce qui concerne la quantité de matériau absorbant à ajouter dans une cavité déjà chaotique pour atteindre une bonne uniformité de champ tout en réduisant le moins possible le niveau de champ et en maintenant un nombre de positions de brasseur non corrélées suffisant.

Nos travaux se sont poursuivis par les effets de variation de charge à travers l'ajustement de différentes quantités d'absorbants afin de dégager un compromis acceptable y compris sur le plan de la puissance requise pour atteindre le niveau de champ souhaité. Nous avons proposé de considérer l'impact de la variation de charge sur les propriétés d'une CRBM à travers l'insertion de tuiles de ferrite qui présentent l'intérêt d'être de faible épaisseur, plus absorbantes dans les gammes de fréquences de notre travail et sont résistantes au feu lorsque la puissance injectée est élevée. Par ailleurs, la bande de fréquence pour laquelle les tuiles de ferrite représentent des absorbants efficaces correspond le plus souvent au domaine pour lequel les performances des CRBM doivent être optimisées. Ce chapitre nous a permis d'appréhender les effets de variation de charge à travers l'ajustement de différentes quantités de tuiles de ferrite et ainsi confirmer les résultats de l'étude sur la chaotité. En ajoutant de l'absorption, on baisse le facteur de qualité ce qui entraîne une diminution du champ normalisé et du nombre d'états non corrélés. En contrepartie, une amélioration de l'uniformité du champ selon la norme EN 61000-4-21 est observée grâce à l'ajout de tuiles de ferrite dans l'enceinte. Il en va de même pour le rapport écart-type sur moyenne de champ. La solution envisagée afin de baisser la LUF de la CRBM et d'améliorer ses performances en basses fréquences est liée à l'absorption donc à l'augmentation de la charge (facteur de qualité et nombre d'états non corrélés dégradés et baisse du champ normalisé). Les résultats montrent ainsi que, pour une CRBM donnée, un compromis satisfaisant peut être trouvé, sur la base de l'observation de l'ensemble des critères introduits au cours de ce manuscrit. Pour l'EOLE 200 d'EMITECH, le meilleur compromis est d'ajouter 288 tuiles de ferrite dans l'enceinte. Grâce à cet ajout, la LUF de la CRBM diminue de 200 MHz à 80 MHz. Pour l'EOLE 400, le meilleur compromis à faire est d'ajouter 36 tuiles de ferrite dans l'enceinte et ainsi réduire la LUF à 200 MHz au lieu de 400 MHz.

Puisqu'on ne sait pas agir sans contrepartie avec l'augmentation des pertes, une troisième voie a été envisagée, il s'agit d'un brassage par commutation de plaques. Nous

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

avons mis en œuvre une nouvelle technique de brassage préservant la forme parallélépipédique du volume utile et qui s'est avérée particulièrement adaptée aux basses fréquences ; ce dispositif pourrait être utilisé comme une solution de brassage complémentaire au brasseur mécanique traditionnel. Ce système est constitué de plaques métalliques, placées dans l'enceinte à proximité des parois, permettant à l'aide d'un interrupteur d'établir une connexion ou non à la masse de la cage. Grâce à ce système, le volume de travail est préservé et l'introduction de plaques n'induit pas une baisse du facteur de qualité. Nous avons automatisé les tests et défini les caractéristiques et types de connexions des plaques à la masse optimaux pour notre étude. De grandes fluctuations du paramètre CV et des valeurs faibles par rapport à la valeur 0,52 attendue pour une loi de Rayleigh sont constatées dans la bande fréquentielle 200 à 400 MHz dans le cas du brassage par commutation seule avec un écart-type de champ fort et des coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité élevés. La loi de Rayleigh n'est pas très discriminante dans le cas d'un nombre faible d'échantillons non corrélés. Ainsi, le brassage par commutation seule présente un apport en basses fréquences mais n'est pas à lui seul suffisant pour supplanter aux tests usuels. En effet, malgré un CV faible, il faut être prudent quand à l'étude de cet indicateur seul car nous constatons par le biais d'autres critères que le champ est très inhomogène lorsque seul le brassage par commutation est utilisé.

En revanche, en basses fréquences (entre 100 et 200 MHz), le brassage combiné permet une augmentation du nombre d'états non corrélés et une amélioration de l'écart-type de champ défini selon la norme EN 61000-4-21 par rapport au brassage mécanique sans pour autant dégrader les performances sur ces critères à plus hautes fréquences. Pour les autres indicateurs observés (champ normalisé à 1 W au connecteur de l'antenne, facteur de qualité, rapport écart-type sur moyenne, coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ) le brassage combiné est équivalent au brassage mécanique seul (pour un même nombre de configurations soit 256) sur l'ensemble de la bande fréquentielle étudiée soit entre 100 et 400 MHz. La solution de brassage combiné permet avec une même CRBM de réaliser des tests à plus basses fréquences (100 MHz pour une EOLE 400 par exemple) tout en conservant à la fois un fonctionnement conforme aux critères normatifs mais également les performances observées sur des critères comme le rapport écart-type sur moyenne de champ, les coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité, le nombre d'états non corrélés ou encore le champ normalisé. Ainsi, une fois le système de brassage combiné installé (brasseur mécanique normatif et système de commutation), la CRBM ne nécessite aucune modification pour la réalisation des tests. Grâce à ce système un gain de temps est également constaté car il n'est pas nécessaire de collecter les données pour un grand nombre de positions de brasseur et le changement des connexions de plaques est instantané.

Au cours de ce travail de recherche, plusieurs objectifs ont été atteints. Des études préliminaires ont pu être menées afin d'assurer la fiabilité et la répétabilité des mesures, nous avons réussi à diminuer la LUF d'une CRBM pour un même volume de cavité, l'uniformité du champ est désormais conforme aux normes à la fréquence désirée ; enfin, avec le nouveau système de brassage combiné, nous avons réussi à limiter les temps de mesure tout en assurant la fiabilité des résultats et utilisé l'instrumentation la plus adaptée

aux essais. A travers ces études, nous avons montré qu'il est possible, avec la même CRBM, de travailler à plus basse fréquence tout en conservant un bon fonctionnement et en respectant les recommandations normatives. La même CRBM pourra être utilisée pour réaliser des tests à plus basses fréquences grâce à une solution facile à mettre en œuvre et bas coût.

## Perspectives

Les recherches dans le domaine des CRBM se poursuivent et de nombreux documents continuent d'être publiés chaque année. Plusieurs travaux portent sur les propriétés intrinsèques des CRBM, comme dans [104] qui met en lumière un biais dans les mesures effectuées en CRBM. D'autres tendent à étendre le domaine applicatif des CRBM, avec par exemple la caractérisation de SER ou celle d'antenne sans contact en CRBM [105, 106, 107, 108].

Bien que l'apport des calottes n'ait pas été significatif, il reste du travail pour valider les hypothèses de cavité déjà chaotique à cause du brasseur. Est-il possible de faire des mesures dans une cavité non chaotique ? Nous pourrions envisager des essais dans une CRBM dépourvue de brasseur de modes et limiter le matériel invasif à l'intérieur de l'enceinte. En effet, il serait intéressant d'étudier une cavité la plus régulière possible afin de mettre en évidence l'aspect non chaotique. Etant donné que le brasseur n'est plus présent dans la CRBM, une solution serait d'effectuer des relevés en plusieurs points de l'espace afin de pouvoir moyenner les résultats.

En ce qui concerne les perspectives d'amélioration des performances en CRBM, l'ajout de charges serait à envisager via l'insertion d'absorbants dans l'enceinte mais cette fois-ci placés dans des boîtiers. Ainsi, il serait possible de sélectionner les absorbants aux gammes de fréquences désirées et de les cacher aux autres fréquences. Plusieurs types d'absorbants pourraient être envisagés (mousse, tuiles de ferrites, de différentes formes et concentrations en fonction des gammes fréquentielles choisies).

Une application de notre travail pourrait être mise en place industriellement afin d'améliorer les performances du brassage par commutation. Nous pourrions optimiser le dimensionnement des plaques en fonction des fréquences de résonance. Les dimensions des plaques utilisées dans ce travail sont de 1 m x 0,9 m. Ainsi, les fréquences de résonance sont, d'après les calculs, {150, 166, 224, 300, 333, 343, 365}MHz. E. Richalot a réalisé un travail de simulation sous HFSS afin d'observer les coefficients de corrélation pour 15 bandes fréquentielles de 20 MHz. Ces résultats ne sont pas présentés ici puisque ce travail n'est pas finalisé, cependant quelques conclusions ont déjà pu être extraites notamment quant à l'importance de la distribution des fréquences de résonance. Prenons par exemple les bandes 140 - 160 MHz (qui abrite  $f_r = 150$  MHz) et 360 - 380 MHz (qui abrite 365 MHz). Pour la bande la plus haute, il y a davantage de corrélation entre états. On observe des coefficients de corrélation plus élevés dans les bandes fréquentielles pour lesquelles les fréquences de résonance sont les plus éloignées. C'est donc dans cette bande

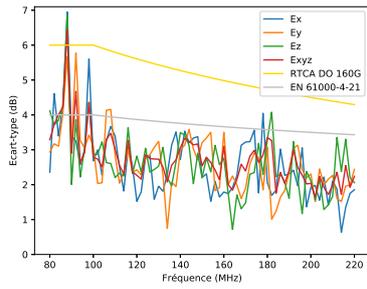
## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

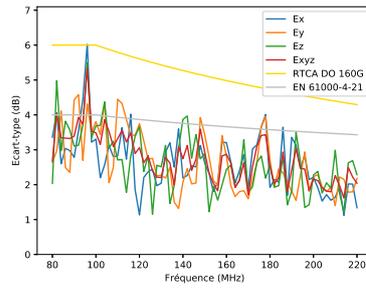
que les écarts entre fréquences de résonance sont les plus grands. L'idée serait donc de dimensionner les plaques pour obtenir le plus de résonances possibles dans une certaine gamme fréquentielle. Un choix serait nécessaire pour obtenir des fréquences de résonance les plus variées possibles et avec le moins d'écarts entre elles s'additionnant aux fréquences de résonance des plaques initiales. Il serait possible également d'utiliser des plaques de dimensions différentes (brassage plus large bande mais moins d'états dans chaque bande). Au cours de cette thèse, notre étude du nombre de connexions et de leur position sur chaque plaque a été rapide mais une étude approfondie pourrait permettre d'optimiser le changement d'état. Enfin, nous pourrions optimiser le nombre d'états par plaque. Pour des raisons pratiques, nous avons utilisé un seul actionneur par plaque (relié aux trois connexions). On pourrait imaginer avoir un actionneur par connexion et ainsi avoir plus de deux états d'une même plaque, démultipliant ainsi le nombre d'états possibles.

# Annexe A

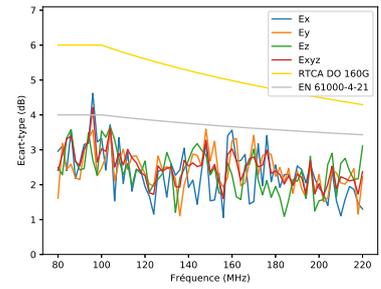
**Ecart-types de champ selon les normes EN 61000-4-21 et RTCA DO 160G**



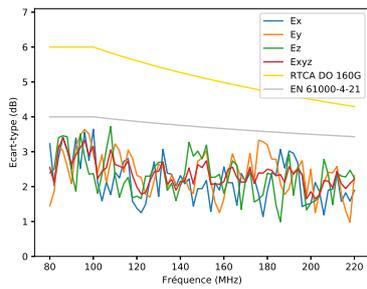
(a) EOLE 200 vide



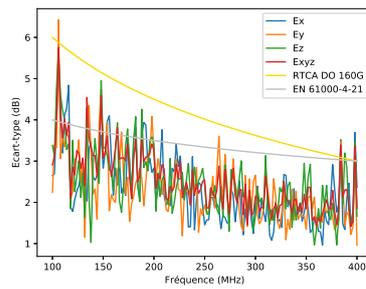
(b) EOLE 200 chargée avec 72 tuiles de ferrite



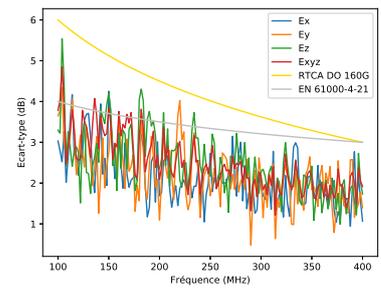
(c) EOLE 200 chargée avec 288 tuiles de ferrite



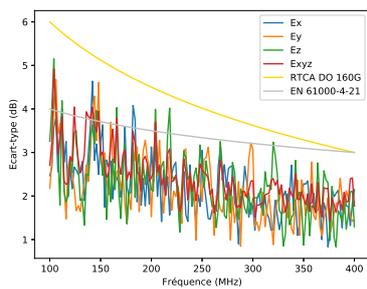
(d) EOLE 200 chargée avec 576 tuiles de ferrite



(e) EOLE 400 vide



(f) EOLE 400 chargée avec 36 tuiles de ferrite



(g) EOLE 400 chargée avec 72 tuiles de ferrite

Figure A.1 - Ecart-types de champ selon les normes EN 61000-4-21 et RTCA DO 160G (équation (2.17)) dans l'EOLE 200 et dans l'EOLE 400.

## Annexe B

Tableau récapitulatif des mesures réalisées  
et présentées dans ce mémoire

L'orientation et la polarisation des antennes de réception sont choisies aléatoirement.

A l'exception du volume de la cavité chaotique de SIEPEL où une diminution de 4% environ du volume est constaté par rapport à une cavité vide, nous considérons pour chacune des solutions implémentées le volume de la cavité classique. En effet, la baisse du volume apportée par les solutions est considérée comme faible.

	<b>ESYCOM</b>	<b>IETR</b>	<b>SIEPEL</b>
Dimensions CRBM	2,9 x 2,7 x 2,3 m <sup>3</sup>	8,7 x 2,9 x 3,7 m <sup>3</sup>	2,4 x 2,4 x 2,8 m <sup>3</sup>
Volume CRBM vide	19 m <sup>3</sup>	93 m <sup>3</sup>	17 m <sup>3</sup>
Réduction du volume en CRBM chaotique	2,7%	1,5%	3,8%
Caractéristiques antenne d'émission	Monopôle	Log-périodique	Log-périodique
Caractéristiques antenne de réception	Monopôle	Pas d'antenne de réception	Pas d'antenne de réception
Caractéristiques sonde de champ	Pas de sonde de champ	Monoaxiale	Triaxiale
Utilisation d'un ARV	Oui	Oui	Non
Utilisation d'une sonde de puissance	Non	Non	Oui
Nombre de calottes	3 Calottes	5 Hémisphères et 3 calottes	3 Calottes
Diamètre des calottes	1,5 m	50 cm	1,8 m
Profondeur des calottes	28 cm	25 cm	30 cm
LUF estimée (EN 61000-4-21)	400 MHz	200 MHz	400 MHz
Bande fréquentielle	300 - 600 MHz	200 - 1000 MHz	200 - 900 MHz
Pas fréquentiel	1 MHz	1 MHz	2 MHz
Etats de brasseur	60	60	60
Caractéristiques des absorbants plats	Mousse polyuréthane chargée en carbone	Mousse polyuréthane chargée en carbone	Mousse polyuréthane chargée en carbone

Tableau B.1 - Configurations de mesure dans le cadre de l'étude de l'apport de la chaotité (Chapitre 3).

	<b>EOLE 400</b>	<b>EOLE 200</b>
Dimensions CRBM	2,4 x 2,8 x 3,4 m <sup>3</sup>	4,9 x 3,7 x 3,1 m <sup>3</sup>
Volume CRBM	24 m <sup>3</sup>	39 m <sup>3</sup>
Caractéristiques antenne d'émission	Log-périodique	Log-périodique
Caractéristiques sonde de champ	Triaxiale	Triaxiale
Utilisation d'une sonde de puissance	Oui	Oui
LUF estimée (EN 61000-4-21)	400 MHz	200 MHz
Bande fréquentielle	100 - 400 MHz	80 - 220 MHz
Pas fréquentiel	2 MHz	2 MHz
Etats de brasseur	60	60
Dimensions des tuiles de ferrite	100 cm <sup>2</sup>	100 cm <sup>2</sup>
Epaisseur des tuiles de ferrite	6,7 mm	6,7 mm

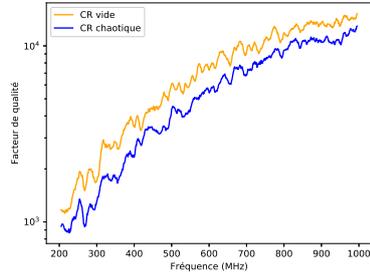
Tableau B.2 - Configurations de mesure dans le cadre de l'étude de l'impact de la variation de la charge (Chapitre 4).

	<b>SIEPEL</b>
Dimensions CRBM	2,4 x 2,4 x 2,8 m <sup>3</sup>
Volume CRBM	17 m <sup>3</sup>
Caractéristiques antenne d'émission	Log-périodique
Caractéristiques antenne de réception	Pas d'antenne de réception
Caractéristiques sonde de champ	Triaxiale
Utilisation d'un ARV	Non
Utilisation d'une sonde de puissance	Oui
LUF estimée (EN 61000-4-21)	400 MHz
Bande fréquentielle	100 - 400 MHz
Pas fréquentiel	4 MHz
Etats de brasseur	60

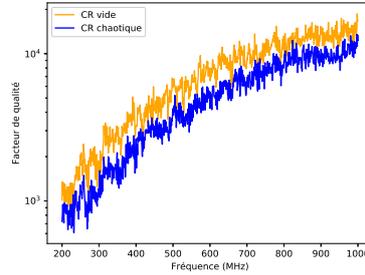
Tableau B.3. Configurations de mesure dans le cadre de l'étude du brassage par commutation de plaques (Chapitre 5).

## Annexe C

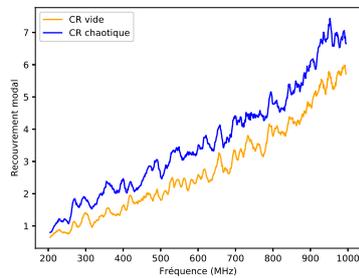
Variation fréquentielle des paramètres statistiques et normatifs en CRBM classique et chaotique issus des mesures à l'IETR moyennées sur une fenêtre glissante ou non moyennées



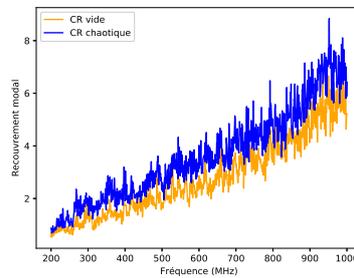
(a) Facteur de qualité - Moyenne glissante



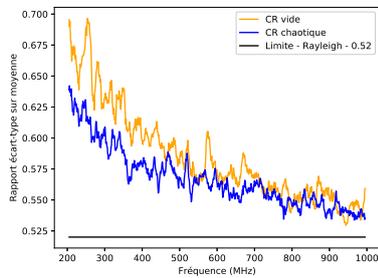
(b) Facteur de qualité non moyenné



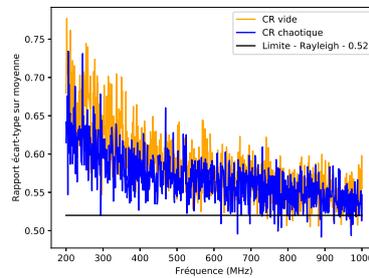
(c) Recouvrement modal - Moyenne glissante



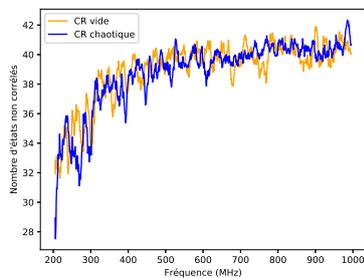
(d) Recouvrement modal non moyenné



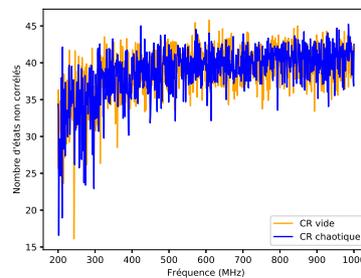
(e) Coefficient de variation - Moyenne glissante



(f) Coefficient de variation non moyenné



(g) Nombre d'états non corrélés - Moyenne glissante



(h) Nombre d'états non corrélés non moyennés

Figure C.1 - Variation fréquentielle des paramètres statistiques et normatifs en CRBM classique (orange) et en CRBM chaotique (bleue) issues des mesures dans la CR de l'IETR.

# Bibliographie

- [1] K. Remley, J. Dortmans, K. Weldon, R. Horansky, T. Meurs, C.-M. Wang, D. Williams, C. Holloway, and P. Wilson. Configuring and verifying reverberation chambers for testing cellular wireless devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 3, 2016.
- [2] Y. Gong, M. Capstick, S. Kuehn, P. Wilson, J. Ladbury, G. Koepke, D. McCormick, R. Melnick, and N. Kuster. Life time dosimetric assessment for mice and rats exposed in reverberation chambers for the two-year NTP cancer bioassay study on cell phone radiation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 6, 2017.
- [3] Qian Xu and Yi Huang. *Anechoic and Reverberation Chambers - Theory, Design and Measurements*. Wiley IEEE Press, 2019, 380 p.
- [4] P. Corona, G. Lateral, E. Paolini, and L. Piccioli. Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-18, no. 2, 1976.
- [5] Bernard Démoulin and Philippe Besnier. *Les chambres réverbérantes en électromagnétisme*. Paris : Lavoisier, 2010, 422 p.
- [6] *ISO 11452-11 :2010 Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 11 : Reverberation chamber*, 2010.
- [7] *NF EN 61000-4-3 Electromagnetic Compatibility : Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*, 2011.
- [8] *RTCA DO-160G Environmental conditions and test procedures for airborne equipment*, 2010.
- [9] Jean-François Rosnarho and Stéphane Le Berre. *Reverberation chambers handbook*. SIEPEL, 2018 - version 4, 121 p.
- [10] SIEPEL. Site Web SIEPEL. <https://www.siepel.com>.
- [11] Schwarzbeck. Hochgewinn-Hornantenne BBHA 9120 K. <http://schwarzbeck.de/Datenblatt/k9120K.pdf>.
- [12] C. Lemoine, P. Besnier, and M. Drissi. Investigation of reverberation chambers measurements through high power goodness of fit tests. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 4, pp. 745-755, 2007.

- [13] G. Gradoni and L. Arnaut. Generalized extreme-value distributions of power near a boundary inside electromagnetic reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 52, no. 3, 2010.
- [14] C. Dembowski, B. Dietz, H. Gräf, A. Heine, T. Papenbrock, A. Richter, and C. Richter. Experimental test of a trace formula for a chaotic three-dimensional microwave cavity. *Physical review letters*, 89(6), 064101, 2002.
- [15] S. Deus, P. M. Lock, and L. Sirko. Statistical properties of the eigenfrequency distribution of three-dimensional microwave cavities. *Physical review letters*, 52(1), 1146, 1995.
- [16] U. Dörr, H. J. Stöckmann, M. Barth, and U. Kuhl. Scared and chaotic field distributions in a three-dimensional Sinai-microwave resonator. *Physical review letters*, 80(5), 1030, 1998.
- [17] D. Hill. Electromagnetic fields in cavities : deterministic and statistical theories. *IEEE Press series on electromagnetic wave theory*, 2009.
- [18] D. Hill. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 3, pp. 209-217, 1998.
- [19] Andrea Cozza. *Stochastic modelling of large cavities - Random and coherent field applications*. PhD thesis, Université Paris Sud - Paris XI, 2012.
- [20] Mihai Ionut Andriés. *Recherche de méthodes expérimentales de simulation de canaux de propagation en chambre réverbérante à brassage de modes*. PhD thesis, INSA de Rennes, 2013.
- [21] Frédéric Hoëppe. *Analyse du comportement électromagnétique des chambres réverbérantes à brassage de modes par l'utilisation de simulations numériques*. PhD thesis, Université de Lille, 2001.
- [22] Gérard 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*. PhD thesis, Université de Marne-La-Vallée, 2005.
- [23] A. Adardour, G. Andrieu, and A. Reineix. On the low-frequency optimization of reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 2, 2014.
- [24] A. Adardour, G. Andrieu, and A. Reineix. Quantification des performances d'une chambre réverbérante à brassage de modes par détection fréquentielle du régime "quasi-idéal". *URSI : Journées scientifiques*, 2013.
- [25] A.K. Fall, P. Besnier, C. Lemoine, M. Zhadobov, and R. Sauleau. Determining the lowest usable frequency of a frequency-stirred reverberation chamber using modal density. *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 263-268, 2014.
- [26] H.-J. Stöckmann. *Quantum chaos : An introduction*. Cambridge University Press, 1999.

- [27] E.A. Godfrey. Effect of corrugated walls on the field uniformity of reverberation chambers at low frequencies. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, vol. 1, 1999.
- [28] L.R. Arnaut. Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at low frequencies. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, vol. 43, no. 4, 2001.
- [29] L.R. Arnaut. Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 4, pp. 637-653, 2001.
- [30] L. Arnaut. Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 44, no. 3, 2002.
- [31] J. B. Gros, U. Kuhl, O. Legrand, F. Mortessagne, E. Richalot, and D. V. Savin. Experimental width shift distribution : A test of non-orthogonality for local and global perturbations. *Physical review letter* 113, 224101, 2014.
- [32] E. Richalot, U. Kuhl, O. Legrand, F. Mortessagne, J.-B. Gros, and S. Grivet-Talocia. Experimental characterization of the distribution of resonance widths in chaotic reverberation chambers. *2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, pp. 177-181, 2016.
- [33] Jean-Baptiste Gros. *Statistiques spatiales des cavités chaotiques ouvertes : Applications aux cavités électromagnétiques*. PhD thesis, Université Nice Sophia Antipolis, 2014.
- [34] Kamardine Selemani. *Analyse et optimisation des chambres réverbérantes à l'aide du concept de cavité chaotique*. PhD thesis, Université Paris Est Marne-la-Vallée, 2013.
- [35] K. Selemani, E. Richalot, O. Legrand, O. Picon, and F. Mortessagne. Energy localization effects within a reverberation chamber and their reduction in chaotic geometries. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 2, 2017.
- [36] J.-B. Gros, U. Kuhl, O. Legrand, F. Mortessagne, O. Picon, and E. Richalot. Statistics of the electromagnetic response of a chaotic reverberation chamber. *AEM Journal - Advanced Electromagnetics*, 2014.
- [37] J. B. Gros, O. Legrand, F. Mortessagne, U. Kuhl, K. Selemani, E. Richalot, and O. Picon. Field uniformity in chaotic reverberation chambers : Experimental validation. *2005 Nice-Nottingham Days of Waves in Complex Media*, 2015.
- [38] M. Magdowski, J. Immidiseti, and R. Vick. Experimental analysis of the field homogeneity and isotropy inside a reverberation chamber with two hemispherical diffractors. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, pp. 683-688, 2018.
- [39] G. Andrieu. On the possible benefits of inserting metallic diffractors to improve low frequency performance of reverberation chambers. *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 1, 2021.

- [40] K. Selemani, J.-B. Gros, E. Richalot, O. Legrand, O. Picon, and F. Mortessagne. Comparison of reverberation chamber shapes inspired from chaotic cavities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 1, 2015.
- [41] J.-B. Gros, O. Legrand, F. Mortessagne, E. Richalot, and K. Selemani. Universal behavior of a wave chaos based electromagnetic reverberation chamber. *Wave motion*, vol. 51, no. 4, pp. 664-672, 2014.
- [42] C. Lemoine, J. Sol, P. Besnier, J.-F. Rosnarho, and C. Dorgan. Effet de la charge sur la statistique des mesures en chambre réverbérante. *Colloque CEM 2010 Limoges*, 2010.
- [43] 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*. PhD thesis, Université de Rouen, 2011.
- [44] M. Andries, P. Besnier, and C. Lemoine. On the prediction of the average absorbing cross section of materials from coherence bandwidth measurements in reverberation chamber. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-6, 2012.
- [45] P. Corona, G. Latmiral, and E. Paolini. Performance and analysis of a reverberating enclosure with variable geometry. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-22, no. 1, pp. 2-5, 1980.
- [46] E. Amador, M. Andries, C. Lemoine, and P. Besnier. Absorbing material characterization in a reverberation chamber. *10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2011)*, pp. 117-122, 2011.
- [47] J. Dortmans, K. Remley, D. Senic, C.M. Wang, and C. Holloway. Use of absorption cross section to predict coherence bandwidth and other characteristics of a reverberation chamber setup for wireless-system tests. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2011)*, vol. 58, 2016.
- [48] D. Fedeli, M. Iuale, V. M. Primiani, and F. Moglie. Experimental and numerical analysis of a carousel stirrer for reverberation chambers. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 228-233, 2012.
- [49] C. Bruns, P. Leuchtman, and R. Vahldieck. Simulation and comparison of different stirrer types inside a reverberation chamber. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, vol.1, pp. 241-244, 2004.
- [50] Y. Huang, J. T. Zhang, and P. Liu. A novel method to examine the effectiveness of a stirrer. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, vol. 2, pp. 556-561, 2005.
- [51] N. Wellander, O. Lundén, and M. Bäckström. Experimental investigation and mathematical modeling of design parameters for efficient stirrers in mode-stirred reverberation chambers. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 94-103, 2007.
- [52] *NF 61000-4-21 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-21 : Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods*, 2011.

- [53] S. Li, J. Wang, H. Xie, and X. Lu. Improvement of source stirring to field uniformity in reverberation chamber. *PIERS Proceeding 2011 in Suzhou*, vol.1, pp. 302-307, 2011.
- [54] A. De Leo, G. Cerri, P. Russo, and V. Mariani Primiani. Statistical analysis of the induced voltage on a DUT in a reverberation chamber where mechanical and source stirring actions are implemented. *Proc. of the 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2019)*, 2019.
- [55] U. Carlberg, P.-S. Kildal, and J. Carlsson. Numerical study of position stirring and frequency stirring in a loaded reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, no.1, pp. 12-17, 2009.
- [56] R. Serra and A.C. Rodriguez. Vibrating intrinsic reverberation chamber for electromagnetic compatibility measurements. *IEEE Latin america Transactions*, vol. 11, no. 1, 2013.
- [57] F. Leferink, J. Boudenot, and W. van Etten. Experimental results obtained in the vibrating intrinsic reverberation chamber. *IEEE International symposium in electromagnetic compatibility*, vol. 2, pp. 639-644, 2000.
- [58] F. Leferink. In-situ high field strength testing using a transportable reverberation chamber. *Asia Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 379-382, 2008.
- [59] R. Serra, F. Leferink, and F. Canavero. "Good-but-imperfect" electromagnetic reverberation in a VIRC. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 954-959, 2011.
- [60] G. Andrieu, N. Meddeb, C. Jullien, and N. Ticaud. Complete framework for frequency and time-domain performance assessment of vibrating intrinsic reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 5, 2020.
- [61] M.I. Andries, D. Seetharamdoo, and P. Besnier. Analytical modal analysis to evaluate the contribution of metamaterials to the improvement of reverberation chambers. *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 883-888, 2014.
- [62] L.F. Wanderlinder, D. Lemaire, I. Coccato, and D. Seetharamdoo. Investigation on the use of metamaterials to lower the operating frequency of reverberation chamber. *10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 680-685, 2011.
- [63] L.F. Wanderlinder, D. Lemaire, and D. Seetharamdoo. Experimental analysis for metamaterials used to lower the luf of a reverberation chamber. *2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 240-244, 2016.
- [64] L.F. Wanderlinder, D. Lemaire, I. Coccato, and D. Seetharamdoo. Pratical implementation of metamaterials in a reverberation chamber to reduce the LUF. *2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-3, 2017.
- [65] J.-B. Gros, P. del Hougne, and G. Lerosey. Tuning a regular cavity to wave chaos with metasurface-reconfigurable walls. *Physical Review A*, vol. 101, no. 6, 2020.

- [66] Marco Klingler. Dispositif et procédé de brassage électromagnétique dans une chambre réverbérante à brassage de modes. *Brevet*, 2005.
- [67] C. Lemoine, P. Besnier, and M. Drissi. Proposition of tolerance requirements adapted for the calibration of a reverberation chamber. *2009 20th International Zurich Symposium on electromagnetic compatibility*, pp. 41-44, 2009.
- [68] *MIL-STD-461G Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*, 2015.
- [69] L. Arnaut, M. Andries, J. Sol, and P. Besnier. Evaluation method for the probability distribution of the quality factor of mode-stirred reverberation chambers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 8, 2014.
- [70] P. Besnier, C. Lemoine, and J. Sol. Various estimations of composite Q-factor with antennas in a reverberation chamber. *Electromagnetic Compatibility (EMC), IEEE International Symposium*, pp. 1223-1227, 2015.
- [71] W. Krouka, F. Sarrazin, J. Sol, P. Besnier, and E. Richalot. Comparison of antenna radiation efficiency measurement techniques in reverberation chamber using or not a reference antenna. *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-4, 2020.
- [72] X. Zhang, M. Robinson, and I. Flintoft. On measurement of reverberation chamber time constant and related curve fitting techniques. *IEEE International Symposium Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2015.
- [73] Q. Xu, Y. Huang, L. Xing, and Z. Tian. Extract the decay constant of a reverberation chamber without satisfying Nyquist criterion. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 3, 2016.
- [74] S. Pfenning and H. G. Krauthäuser. A general method for determining the number of independent stirrer positions in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 4, pp. 1252-1258, 2016.
- [75] G. Gradoni, V.M. Primiani, and F. Moglie. Carousel stirrer efficiency evaluation by a volumetric lattice-based correlation matrix. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 819-824, 2013.
- [76] C. Bron and J. Kerbosch. Algorithm 457 : finding all cliques of an undirected graph. *Communications of the ACM*, pp. 575-577, 1973.
- [77] H. G. Krauthäuser, T. Winzerling, J. Nitsch, N. Eulig, and A. Enders. Statistical interpretation of autocorrelation coefficients for fields in mode-stirred chambers. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Chicago*, pp. 550-555, 2005.
- [78] C. Lemoine, P. Besnier, and M. Drissi. Estimating the effective sample size to select independent measurements in a reverberation chamber. *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 2, pp. 227-236, 2008.
- [79] Christophe 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*. PhD thesis, L'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2008.

- [80] G. Gradoni, V. Mariani Primiani, and F. Moglie. Reverberation chamber as a multivariate process : FDTD evaluation of correlation matrix and independent positions. *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 133, pp. 217-234, 2013.
- [81] Ryan J. Pirkel, Kate A. Remley, and Christian S. Lötbäck Patané. Reverberation chamber measurement correlation. *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 3, 2012.
- [82] D. Hill. Boundary fields in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 2, 2005.
- [83] J.-B. Gros, U. Kuhl, O. Legrand, F. Mortessagne, P. Besnier, and E. Richalot. Tolerance requirements revisited for the calibration of chaotic reverberation chambers. *18th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (CEM 2016)*, 2016.
- [84] Matthew Wright and Richard Weaver. *New directions in linear acoustics and vibration - Quantum chaos, random matrix theory and complexity*. Cambridge University Press, 2010, 284 p.
- [85] L. Le Bars, J.-F Rosnarho, P. Besnier, J. Sol, F. Sarrazin, and E. Richalot. A study of electric-field measurement disturbances brought by probe supports. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe*, 2018.
- [86] EMITECH Groupe. Site Web du groupe EMITECH. <https://www.emitech.fr/fr>.
- [87] J.-B. Gros, U. Kuhl, O. Legrand, F. Mortessagne, and E. Richalot. Universal intensity statistics in a chaotic reverberation chamber to refine the criterion of statistical field uniformity. *Metrology for aerospace (MetroAeroSpace) 2015 IEEE*, pp. 225, 2015.
- [88] E. Richalot, K. Selemanni, J.-B. Gros, O. Picon, O. Legrand, S. Grivet-Talocia, and F. Mortessagne. Criterion based on resonant frequencies distributions for reverberation chamber characterization. *2015 International conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA)*, pp. 1112-1115, 2015.
- [89] U. Kuhl, O. Legrand, F. Mortessagne, K. Oubaha, and M. Richter. Statistics of reflection and transmission in the strong overlap regime of fully chaotic reverberation chambers. *Invited Paper for session special sessions EMC at EUMCWeek 2017 un Nürnberg*, 2017.
- [90] J.-B. Gros, U. Kuhl, O. Legrand, and F. Mortessagne. Lossy chaotic electromagnetic reverberation chambers : Universal statistical behavior of the vectorial field. *Physical review E*, 93(3), 032108, 2016.
- [91] L. Le Bars, J.-F Rosnarho, P. Besnier, J. Sol, F. Sarrazin, and E. Richalot. Geometry and loading effects on performances of mode-stirred reverberation chambers : an experimental study. *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe*, 2019.
- [92] O. Legrand and F. Mortessagne. Wave chaos for the Helmholtz equation. *Cambridge University Press*, pp. 24-41, 2010.
- [93] B.H. Liu, D.C Chang, and M.T. Ma. Eigen modes and the composite quality factor of a reverberation chamber. *NBS Technical notes 1066*, vol. 47, no. 2, 1989.

- [94] H. Sun, Z. Li, C. Gu, Q. Xu, X. Chen, Y. Sun, S. Lu, and F. Martin. Metasurfaced reverberation chamber. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20066-0>, 2018.
- [95] J.-B. Gros, P. del Hougne, and G. Lerosey. Les cavités micro-ondes reconfigurables : Une nouvelle approche pour fabriquer des chambres réverbérantes chaotiques. *19e Colloque International et Exposition sur la Compatibilité Electromagnétique (CEM 2018)*, 2018.
- [96] H. Sun, C. Gu, Z. Li, Q. Xu, J. Song, B. Xu, X. Dong, K. Wang, and F. Martin. Enhancing the number of modes in metasurfaced reverberation chambers for field uniformity improvement. *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 18, 2018.
- [97] Philipp del Hougne. *Shaping Green's functions in cavities with tunable boundary conditions : From fundamental science to applications*. PhD thesis, Université Sorbonne Paris Cité, 2018.
- [98] N. Kaina, M. Dupré, M. Fink, and G. Lerosey. Hybridized resonances to design tunable binary phase metasurfaced unit cells. *Opt. Express* *22*, 18881-18888, 2014.
- [99] P. del Hougne, F. Lemoult, M. Fink, and G. Lerosey. Spatiotemporal Wave Front Shaping in a Microwave Cavity. *Phys. Rev. Lett.* *117*, 134302, 2016.
- [100] J.-B. Gros, G. Lerosey, F. Mortessagne, U. Kuhl, and O. Legrand. Uncorrelated configurations and field uniformity in reverberation chambers stirred by reconfigurable metasurfaces. *Appl. Phys. Lett.* *118*, 144101, 2021.
- [101] P. del Hougne, M. Fink, and G. Lerosey. Shaping microwave fields using non-linear unsolicited feedback : Application to enhanced energy harvesting. *Physical Review Applied* *8*, no. 6, 2017.
- [102] M. Klingler. *Dispositif et procédé de brassage électromagnétique dans une chambre réverbérante à brassage de modes - Patent FR 2 887 337, 17/06/2005*. PSA, 2005.
- [103] Hamouche Bousta. *Etude du processus de brassage en chambre réverbérante : Détermination du nombre d'échantillons décorrélés et proposition d'une solution innovante*. Rapport de stage - Université Gustave Eiffel, 2019.
- [104] Wafa Krouka. *Caractérisation non biaisée de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante : apport du brassage et mise en place d'une méthode sans contact*. PhD thesis, Université Gustave Eiffel, 2021.
- [105] Ariston De Freitas Tavares Dos Reis. *Méthode de mesure de surface équivalente radar en chambre réverbérante à brassage de modes : application à la caractérisation sans contact d'antenne*. PhD thesis, Université Paris Est, 2020.
- [106] A. Reis, F. Sarrazin, E. Richalot, S. Méric, J. Sol, P. Pouliguen, and P. Besnier. Radar cross-section pattern measurements in a mode-stirred reverberation chamber : Theory and experiments. *IEEE transactions on Antennas and Propagation, Institute of electrical and electronics engineers*, vol. 69, no. 9, pp. 5942-5952, doi : 10.1109/TAP.2021.3060581, sept 2021.
- [107] A. Reis, F. Sarrazin, P. Besnier, P. Pouliguen, and E. Richalot. Contactless antenna gain pattern estimation from backscattering coefficient measurement performed within reverberation chambers. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*,

*Institute of electrical and electronics engineers*, vol. 78, no. 3, pp. 2318-2321, doi : 10.1109/TAP.2021.3111184, march 2022.

- [108] W. Krouka, F. Sarrazin, J. De Rosny, A. Labdouni, and E. Richalot. Antenna radiation efficiency estimation from backscattering measurement performed within reverberation chambers. *IEEE transactions on Antennas and Propagation, Institute of electrical and electronics engineers*, doi : 10.1109/TAP.2021.3129912, 2021.

# Table des figures

1	Comparaison des chambres anéchoïque et réverbérante [9]. . . . .	5
1.1	Architecture extérieure type d'une CRBM. . . . .	10
1.2	Différents types de brasseurs mécaniques. . . . .	11
1.3	Schéma de l'installation type d'une CRBM tiré de la norme EN 61000-4-21 [7]. . . . .	12
1.4	Cavité parallélépipédique rendue chaotique par l'ajout d'un hémisphère (a), de deux hémisphères (b), d'un hémisphère et de deux calottes (c) et la cavité parallélépipédique avec brasseur (d) - Figure issue de [40]. . . . .	16
1.5	CRBM contenant des absorbants mousse - Tirée de l'article [23]. . . . .	17
1.6	Configuration du champ dans l'enceinte sans et avec dispositif de brassage [10]. . . . .	19
2.1	Comparaison des méthodes de calcul du nombre d'états non corrélés dans l'enceinte d'une CRBM de SIEPEL (EOLE 400) en collectant l'amplitude du champ électrique. . . . .	31
2.2	Différents régimes de recouvrement modal - Figure tirée de [33]. . . . .	35
2.3	Taux de rejets du test d'ajustement selon AD en fonction de la taille des échantillons simulés selon la loi de Rayleigh. . . . .	40
2.4	Taux de rejets du test d'ajustement selon AD en fonction du recouvrement modal et de la taille d'échantillons simulés générés selon la loi de Pnini-Shapiro. . . . .	40
2.5	Rapport écart-type sur moyenne de champ Loi de Rayleigh . . . . .	41
2.6	Rapport écart-type sur moyenne de champ selon la loi de Pnini-Shapiro . . . . .	42
2.7	Uniformité du champ selon la loi de Rayleigh. . . . .	43
2.8	Uniformité de champ selon la loi de Pnini-Shapiro . . . . .	44
2.9	Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ en fonction de la taille des échantillons simulés selon la loi de Rayleigh. . . . .	45
2.10	Coefficients d'anisotropie du champ en fonction du recouvrement modal et de la taille d'échantillons simulés selon la loi de Pnini-Shapiro. . . . .	46
2.11	Coefficients d'inhomogénéité du champ en fonction du recouvrement modal et de la taille d'échantillons simulés selon la loi de Pnini-Shapiro. . . . .	47
2.12	CDF de champ selon la loi de Rayleigh pour trois positions de sonde, 300 échantillons simulés et un tirage arbitraire. . . . .	48
2.13	Ecarts entre CDF à 50% minima et maxima selon la loi de Rayleigh. . . . .	49
2.14	Ecarts entre CDF à 50% minima et maxima selon la loi de Pnini-Shapiro. . . . .	50

2.15	Configuration matérielle d'une chaîne de mesure en CRBM. . . . .	52
2.16	Disposition de la sonde de champ au sein du volume utile de la CRBM. . .	53
2.17	CRBM basées sur une configuration normative. . . . .	55
3.1	Deux modes d'un billard de Sinai 2D avec des conditions aux limites de Dirichlet : un mode ergodique (gauche) et un mode bouncing-ball (droite) - Figure tirée de l'article [40]. . . . .	59
3.2	Configuration chaotique de la CRBM de SIEPEL. . . . .	61
3.3	Configuration chaotique de la CRBM de l'ESYCOM. . . . .	62
3.4	Configuration classique de la CRBM de l'IETR. . . . .	63
3.5	Configuration chaotique de la CRBM de l'IETR. . . . .	64
3.6	Variation fréquentielle des paramètres statistiques et normatifs en CRBM classique (orange) et en CRBM chaotique (bleue) pour les données de l'IETR. . . . .	69
3.7	CDF de champ expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM vide à l'IETR. . . . .	71
3.8	CDF de champ expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM chaotique à l'IETR. . . . .	71
3.9	Ecarts maximaux entre CDF expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM chaotique (bleue) et en CRBM classique (orange) à l'IETR. . . . .	72
3.10	Coefficients de variation en fonction de la fréquence pour les données expérimentales de l'IETR (noire), selon la loi de Rayleigh (rouge) et la loi de Pnini-Shapiro (bleue). . . . .	73
3.11	Ecarts-types du maximum de champ en fonction de la fréquence pour les données expérimentales de l'IETR (noire), selon la loi de Rayleigh (rouge) et la loi de Pnini-Shapiro (bleue). . . . .	74
3.12	Variation fréquentielle des paramètres statistiques et normatifs en CRBM classique (orange) et en CRBM classique avec un absorbant (rouge) pour les données de SIEPEL. . . . .	76
3.13	Ecarts maximums entre CDF expérimentale et CDF obtenus par tirage suivant la loi de Pnini-Shapiro en CRBM classique (orange) et contenant un absorbant (rouge) chez SIEPEL. . . . .	77
3.14	Coefficients de variation en fonction de la fréquence pour les données expérimentales à SIEPEL (noire), selon la loi de Rayleigh (rouge) et la loi de Pnini-Shapiro (bleue) en cavités classique et chargée. . . . .	78
3.15	Ecarts-types de champ en fonction de la fréquence pour les données expérimentales à SIEPEL (noire), selon la loi de Rayleigh (rouge) et la loi de Pnini-Shapiro (bleue) en cavités classique et chargée. . . . .	79
3.16	Photos des absorbants 1 et 2 présents dans la CRBM classique de l'IETR. . . . .	80
3.17	Variation fréquentielle des paramètres statistiques et normatifs en CRBM chargée avec l'absorbant 1 (rouge), chargée avec l'absorbant 2 (violet) et en CRBM chaotique (bleue) pour les données de l'IETR. . . . .	81
3.18	Ecarts entre CDF expérimentales et analytiques selon la loi de Pnini-Shapiro en CRBM chaotique (bleue) et en CRBM chargée avec l'absorbant 1 (rouge) et 2 (violet) à l'IETR. . . . .	82

4.1	Photos des configurations de l'EOLE 400. . . . .	87
4.2	Photos de l'EOLE 200 vide et contenant 72 tuiles de ferrite. . . . .	88
4.3	Photos de l'EOLE 200 contenant 288 tuiles de ferrite. . . . .	88
4.4	Photos de l'EOLE 200 contenant 576 tuiles de ferrite. . . . .	89
4.5	Facteur de qualité et recouvrement modal en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et 576 tuiles de ferrite (violet) dans l'EOLE 200. . . . .	90
4.6	Facteur de qualité estimé pour une tuile de ferrite extrait des mesures pour différentes configurations de l'EOLE 200 CRBM chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et 576 tuiles (violet). . . . .	91
4.7	Facteur de qualité et recouvrement modal en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et avec 72 tuiles de ferrite (rouge) dans la CRBM EOLE 400. . . . .	92
4.8	Facteur de qualité estimé pour une tuile de ferrite extrait de mesures des différentes configurations de l'EOLE 400 CRBM chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge). . . . .	92
4.9	Nombre de positions de brasseur non corrélées et champ normalisé dans l'EOLE 200 en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et 576 tuiles de ferrite (violet). . . . .	93
4.10	Rapport des champs normalisés (orange) et racine des rapports des facteurs de qualité (bleu) entre les mesures effectuées dans l'EOLE 200 à vide et chargée par 72 tuiles de ferrite. . . . .	94
4.11	Nombre de positions de brasseur non corrélées et champ normalisé dans l'EOLE 400 en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge). . . . .	95
4.12	Ecarts-types de champ selon chaque axe de sonde moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et 576 tuiles de ferrite (violet) dans l'EOLE 200. . . . .	97
4.13	Ecarts-types de champ selon la norme EN 61000-4-21 dans l'EOLE 200. . . . .	98
4.14	Ecarts-types de champ selon chaque axe de sonde moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge) dans l'EOLE 400. . . . .	99
4.15	Ecarts-types de champ selon la norme EN 61000-4-21 dans l'EOLE 400. . . . .	100
4.16	Rapports écarts-types sur moyenne de champ selon l'axe $x$ moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et avec 576 tuiles de ferrite (violet) dans l'EOLE 200. . . . .	101
4.17	Rapports écarts-types sur moyenne de champ selon l'axe $x$ moyennés sur 10 MHz par pas de 2 MHz en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge) dans l'EOLE 400. . . . .	101
4.18	Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité en CRBM vide (jaune), chargée avec 72 tuiles de ferrite (bleue), avec 288 tuiles de ferrite (rouge) et avec 576 tuiles de ferrite (violet) dans l'EOLE 200. . . . .	102

4.19	Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité en CRBM vide (jaune), chargée avec 36 tuiles de ferrite (bleue) et 72 tuiles de ferrite (rouge) dans l'EOLE 400. . . . .	102
4.20	CDF de champ expérimentales et analytiques selon la loi de Rayleigh à 180 MHz dans l'EOLE 200. . . . .	103
4.21	Ecarts entre CDF expérimentales des champs et analytiques selon la loi de Rayleigh en CRBM vide et chargée avec différentes quantités de tuiles de ferrite. . . . .	103
5.1	Vue de dessus d'une cavité électromagnétique de volume 0,18 m <sup>3</sup> rendue reconfigurable grâce à deux SMM - Figure tirée de [95]. . . . .	106
5.2	Système de plaques métalliques dans l'enceinte d'une CRBM. . . . .	107
5.3	Module d'entrée/sortie, connexion entre une plaque et la paroi de la cavité et placement du module de pilotage des switches au plafond de la cage. . . .	108
5.4	Présentation de la structure simulée avec 4 plaques métalliques proches de la paroi située dans le plan xOz. . . . .	109
5.5	Zoom sur une connexion métallique entre une plaque et une paroi. Cas d'une et deux plaques connectées. . . . .	110
5.6	Lignes d'extraction du champ électrique. . . . .	111
5.7	Comparaison des cartographies de champ entre aucune plaque connectée et 4 plaques connectées. . . . .	112
5.8	Histogrammes des modules des coefficients de corrélation entre les champs extraits aux 1210 points du volume de travail lorsque les plaques sont toutes déconnectées où toutes connectées aux parois. Ces coefficients sont calculés en considérant chacune des composantes de champ ( $E_x$ pour la figure du haut, $E_y$ au milieu et $E_z$ en bas) et pour 20 000 points fréquentiels entre 500 MHz et 510 MHz. . . . .	113
5.9	Plaques en aluminium au sein d'une CRBM et leurs supports - Système de brassage par commutation - Antenne log-périodique et sondes isotropiques de mesure. . . . .	114
5.10	Connexions aux 4 extrémités de la plaque. . . . .	115
5.11	Schéma des connexions sur une plaque en 3 extrémités (gauche) ou en 4 extrémités (droite). . . . .	115
5.12	Ecarts de puissance reçue entre chaque état des connexions (connexion en 1, 2, 3 ou 4 points) et l'état non connecté moyennés sur six bandes fréquentielles. . . . .	116
5.13	Ecarts de puissance reçue entre les cas où la plaque est connectée ou non connectée, dans le cas où 3 points de connexion sont utilisés et pour plusieurs types de câbles, moyennés sur six bandes fréquentielles. . . . .	117
5.14	Installation finale du système par commutation. . . . .	118
5.15	Nombre de changements d'état de plaques entre deux états (numérotés de 0 à 127) sur les axes verticaux et horizontaux. En raison de la symétrie de ces changements, les résultats ne sont présentés que pour un état sur l'axe vertical de numéro au moins égal à celui de l'axe horizontal (triangle en haut à gauche); la zone bleu foncée en bas à droite correspond donc à des nombres de changements non calculés. . . . .	120

5.16	Placement des plaques dans l'enceinte. . . . .	122
5.17	Variations fréquentielles du facteur de qualité et du recouvrement modal entre la configuration où les plaques sont présentes dans l'enceinte (verte) et la configuration de CRBM classique (noire). . . . .	123
5.18	Variations fréquentielles du facteur de qualité et du recouvrement modal pour 256 positions de brasseur (bleue), 256 états de plaques (orange), 16 positions de brasseur avec 16 états de plaques (verte) et 16 positions de brasseur avec les plaques déconnectées (rouge). . . . .	123
5.19	Variations fréquentielles du nombre d'états non corrélés et du champ normalisé pour les quatre types de brassage étudiés. . . . .	124
5.20	Variations fréquentielles du rapport écart-type sur moyenne de champ pour les quatre types de brassage étudiés. . . . .	125
5.21	Variations fréquentielles de l'écart-type de champ. . . . .	126
5.22	Ecart-type de champ moyenné en fréquence pour les quatre types de brassage étudiés. . . . .	127
5.23	Variations fréquentielles des coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité du champ pour les quatre types de brassage étudiés. . . . .	128

# Liste des tableaux

2.1	Tableau récapitulatif des principales normes internationales relatives aux CRBM. . . . .	24
2.2	Ecart-types de champ selon la norme EN 61000-4-21. . . . .	33
2.3	Coefficients d'anisotropie et d'inhomogénéité selon la norme EN 61000-4-21. . . . .	34
2.4	Tableau récapitulatif des données collectées ainsi que les références des indicateurs employés pour le calcul du facteur de qualité pour chaque structure de CRBM de l'étude. . . . .	56
3.1	Exigences d'échantillonnage selon la norme EN 61000-4-21. . . . .	62
3.2	Tableau récapitulatif des protocoles de test. . . . .	65
5.1	Lien entre code et états de connexions des plaques. . . . .	119
5.2	Séries des états obtenus. . . . .	121

**Titre :** Contribution à l'analyse et à l'optimisation des performances des chambres réverbérantes électromagnétiques en régime de recouvrement modal faible ou modéré

**Mots-clés :** *Chambres réverbérantes à brassage de modes ; Chaos ondulatoire ; Absorbants ; Brassage par commutation de plaques ; Fréquence basse d'utilisation*

**Résumé :** Ce travail de recherche s'est opéré dans le cadre d'une collaboration entre les laboratoires de l'ESYCOM et de l'IETR et la Société Industrielle d'Études et Protections Electroniques SIEPEL. L'objectif de ce doctorat concerne l'étude et l'amélioration des propriétés des chambres réverbérantes pour des fréquences proches de leur fréquence basse d'utilisation mais également la diminution de cette fréquence dans des contextes académique et industriel. Après une justification du choix des indicateurs retenus et la présentation des différents environnements de test utilisés au cours de ce travail, nous abordons le concept de chambres réverbérantes chaotiques. En nous appuyant sur le concept de chambre réverbérante chaotique, nous montrons qu'en ajoutant des diffuseurs métalliques dans l'enceinte il est possible d'abaisser la fréquence basse d'utilisation d'une chambre réver-

bérante. Cependant, ces travaux ont mis en lumière un impact important de la charge induite par les ca-lottes sur les critères observés, dont l'abaissement de la fréquence. Dans la continuité de cette étude, un deuxième paramètre a été examiné, il s'agit de l'impact de la variation de charge en chambre réverbérante. Un compromis est recherché entre abaissement de la fréquence basse d'utilisation d'une chambre réverbérante et conservation d'un haut niveau de champ. Cette approche nécessitant de charger l'enceinte, une troisième voie est envisagée. Il s'agit d'un nouveau type de brassage basé sur l'utilisation de plaques métalliques de potentiel variable. L'intérêt de ce nouveau système est démontré et comparé au système de brassage normatif. L'apport des méthodes employées par rapport aux méthodes conventionnelles est présenté au cours de ce manuscrit afin de répondre aux objectifs de la thèse.

**Title :** Contribution to the analysis and the optimization of the performance of electromagnetic reverberation chambers in low or moderate modal overlap regime

**Keywords :** *Mode-stirring reverberation chambers ; Wave chaos ; Absorbers ; Plate switching stirring ; Lowest usable frequency*

**Abstract :** This research work has been performed within the framework of a partnership between the ESYCOM and IETR laboratories and the Industrial Society for Electronic Studies and Protections SIEPEL. The objective of this PhD concerns the study and improvement of the properties of reverberation chambers for frequencies close to their lowest usable frequency but also the reduction of this frequency in academic and industrial contexts. After a justification of the choice of indicators selected and the presentation of the different test environments used during this work, we approach the concept of chaotic reverberation chambers. By proposing the concept of chaotic reverberation chamber, we show that by adding metallic diffracting caps in the enclosure it is possible to decrease the lowest usable frequency of a reverbera-

tion chamber. However, this work has brought to light a significant impact of the load induced by the caps on the observed criteria, including the lowering of the frequency. Following on this study, a second parameter was examined, namely the impact of the variation in load in the reverberation chamber. A compromise is sought between lowering the lowest usable frequency of a reverberation chamber and maintaining a high field level. As this approach requires charging the enclosure, a third way is relevant. This is a new type of stirring based on the use of metal plates of variable potential. The interest of this new system is demonstrated and compared to the standard stirring system. The contribution of the methods used compared to conventional ones is presented during this manuscript in order to meet the objectives of the PhD.