

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE n° 521 – Sciences et Ingénierie pour l'Information, Mathématiques

FACULTE des Sciences et Techniques XLIM - Département Ondes et Systèmes Associés

Année : 2012

Thèse N° 64-2012

Thèse
pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Discipline : Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes

Présentée et soutenue par
Aziz ADARDOUR

Le 19 Décembre 2012

Optimisation des performances des Chambres Réverbérantes à Brassage de Modes aux basses fréquences - Proposition d'une nouvelle définition de la fréquence minimale d'utilisation

Thèse dirigée par Alain REINEIX et Guillaume ANDRIEU

JURY :

Président :

Mme. Valérie MADRANGEAS **Professeur**
Université de Limoges, XLIM, MINACOM, Limoges

Rapporteurs :

M. Philippe BESNIER **Chargé de Recherche CNRS (HDR)**
Université de Rennes 1, IETR, INSA, Rennes

M. Pierre BONNET **Maître de Conférences (HDR)**
Université Blaise Pascal II, LASMEA, MATELEC, Aubière

Examineurs :

M. Bernard DÉMOULIN **Professeur émérite**
Université de Lille 1, TELICE – IEMN, Villeneuve d'Ascq

M. Guillaume ANDRIEU **Maître de Conférences**
Université de Limoges, XLIM, OSA, Limoges

M. Alain REINEIX **Directeur de Recherche CNRS**
Université de Limoges, XLIM, OSA, Limoges

Remerciements

Cette thèse a été effectuée à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Limoges au sein du laboratoire XLIM dans le département ondes et systèmes associés (OSA), projet CEM. Cette thèse n'aurait pas vu le jour sans la participation de nombreuses personnes qui méritent mes plus profonds remerciements.

Je commence par remercier Alain REINEIX, directeur de recherche CNRS et responsable du projet CEM du département OSA pour avoir dirigé ma thèse et apporté ses conseils et son encadrement tout au long de celle-ci.

Je remercie sincèrement, Guillaume ANDRIEU, maître de conférences, Co-encadrant de cette thèse, pour ses conseils et ses nombreuses remarques, tout au long de ces trois années de thèse ainsi que pour les corrections apportées à ce manuscrit.

Merci à Monsieur Philippe BESNIER, chargé de recherche CNRS (HDR) à l'université de Rennes et Monsieur Pierre BONNET, maître de conférences (HDR) à l'université Blaise Pascal de Clermont Ferrand, de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse.

Merci à Madame Valérie MADRANGEAS, professeur à l'université de Limoges et à Monsieur Bernard DÉMOULIN, professeur émérite à l'université de Lille, pour avoir acceptée d'être examinateurs de ma thèse.

Je tiens à remercier également, Christophe GUIFFAUT, chargé de recherche CNRS, pour sa disponibilité et son aide sur le logiciel TEMSI-FD et sa gentillesse.

Je remercie François TORRES, chargé de recherche CNRS et Omar DAFIF, ingénieur de recherche CNRS pour leur gentillesse et leur amabilité.

Je remercie aussi Nadine AYMARD, secrétaire du département OSA pour sa gentillesse et ses précieuses aides administratives.

Je tiens à remercier le Conseil Régional du Limousin d'avoir financé ma thèse.

Je remercie aussi tous les doctorants, les ex-doctorants du département OSA et mes amis à XLIM pour les moments passés ensemble que se soit pour le travail ou pour les divertissements.

Enfin je tiens à remercier très chaleureusement toute ma famille pour leur soutien, leur aide et leur encouragement.

Table des matières

Introduction générale 11

Chapitre 1. La chambre réverbérante à brassage de modes .. 13

1.1	Introduction	13
1.2	Généralités.....	13
1.2.1	Principe et Définition	13
1.2.2	Utilisations	14
1.2.3	Fréquences de résonance	14
1.2.4	Densité de modes d'une cavité vide	15
1.2.5	Brassage de modes	16
1.3	Outils de caractérisation d'une CRBM	17
1.3.1	Caractérisation par le protocole de calibrage 61000-4-21	17
1.3.2	Caractérisation de l'efficacité de brassage	21
1.3.2.1	L'efficacité de brassage ("Stirring ratio")	21
1.3.2.2	Calcul du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur	21
1.3.3	Caractérisation des lois de distribution du champ EM.....	23
1.3.3.1	Présentation du modèle idéal d'une cavité surdimensionnée.....	23
1.3.3.2	Les tests d'ajustement à une loi de probabilité	27
1.3.4	Caractérisation de l'énergie emmagasinée via le facteur de qualité	28
1.4	Campagne expérimentale préliminaire.....	30
1.4.1	Introduction	30
1.4.2	Présentation des résultats obtenus	31
1.4.2.1	Evaluation de l'uniformité du champ EM.....	31
1.4.2.2	Evaluation du nombre de réalisations indépendantes obtenus sur un tour de brasseur	32
1.4.2.3	Evaluation des lois de distribution du champ EM.....	33
1.5	Conclusion.....	36

Chapitre 2. Etude modale d'une CRBM..... 37

2.1	Introduction	37
2.2	Etat de l'art	37
2.3	Présentation du principe d'extraction des poids de modes	38
2.3.1	Principe.....	38
2.3.2	Description des simulations sous FEKO	38
2.3.3	Principe d'extraction des poids de modes	39
2.3.4	Vérification des poids de mode obtenus	44
2.4	Présentation des principaux résultats obtenus	46
2.4.1	Influence de la forme du brasseur	46
2.4.1.1	Etude des modes fondamentaux	46
2.4.1.2	Etude à plus hautes fréquences.....	51
2.4.2	Influence du coefficient de qualité	54
2.5	Conclusion.....	57

Chapitre 3. Influence de la quantité d'absorbants insérée sur les caractéristiques intrinsèques d'une CRBM59

3.1	Introduction	59
3.2	Etat de l'art sur l'effet des absorbants en CRBM.....	60
3.3	Résultats expérimentaux	61
3.3.1	Description de la configuration de mesure.....	61
3.3.2	Présentation des différents facteurs de qualité obtenus.....	63
3.3.3	Evaluation du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur ...	64
3.3.4	Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling.	64
3.3.5	Evaluation de l'uniformité du champ EM.....	66
3.4	Résultats numériques.....	67
3.4.1	Choix de la méthode de modélisation	67
3.4.2	Principe de la méthode de modélisation de la CRBM	68
3.4.3	Description de la configuration de simulation	71
3.4.4	Résultats obtenus.....	74
3.4.4.1	Présentation des différents facteurs de qualité considérés	74
3.4.4.2	Evaluation du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur	75
3.4.4.3	Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling	76
3.4.4.4	Evaluation de l'uniformité du champ EM.....	78
3.5	Interprétation physique des résultats obtenus.....	78
3.6	Conclusion.....	79

Chapitre 4. Influence de la géométrie du brasseur de modes sur les caractéristiques intrinsèques d'une CRBM.....81

4.1	Introduction	81
4.2	Etat de l'art sur l'effet du brasseur de modes en CRBM	81
4.3	Résultats expérimentaux	82
4.3.1	Description de la configuration de mesure.....	82
4.3.2	Evaluation du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur ...	84
4.3.3	Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling.	85
4.3.4	Evaluation de l'uniformité du champ EM.....	87
4.4	Résultats numériques.....	88
4.4.1	Introduction	88
4.4.2	Evaluation du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur ...	90
4.4.3	Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling.	92
4.4.4	Evaluation de l'uniformité du champ EM.....	94
4.5	Interprétation physique des résultats obtenus.....	95
4.6	Conclusion.....	96

Chapitre 5. Proposition d'une méthode de détermination de la fréquence minimale d'utilisation (LUF) d'une CRBM97

5.1	Introduction	97
5.2	Proposition d'une méthode de détermination de la LUF	98
5.2.1	Choix de valeurs seuils pertinentes	99
5.2.2	Détermination de la LUF.....	102
5.2.2.1	Variation de la LUF obtenue en fonction de la quantité d'absorbants dans la CRBM	102
5.2.2.2	Variation de la LUF obtenue en fonction du nombre de plaques du brasseur de modes	103
5.3	Conclusion.....	104

Chapitre 6. Modélisation numérique de chambres réverbérantes à parois mobiles ou à structures diffractantes.....107

6.1	Introduction	107
6.2	Cas d'une CRBM contenant une paroi mobile.....	107
6.2.1	Principe.....	107
6.2.2	Evaluation du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur .	109
6.2.3	Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling.	110
6.3	Cas d'une cavité contenant une paroi mobile de géométrie complexe	111
6.3.1	Introduction	111
6.3.2	Cas d'une paroi mobile sphérique	111
6.3.3	Cas d'une paroi mobile recouverte de 4 cônes métalliques	113
6.4	Ajout de structures diffractantes sur les parois d'une CRBM munie d'un brasseur de modes	115
6.5	Conclusion.....	117

Conclusion générale.....119

Perspectives121

Bibliographie123

Liste des publications de l'auteur.....129

INTRODUCTION GENERALE

La chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM) est un moyen d'essai utilisé en compatibilité électromagnétique (CEM) depuis une vingtaine d'année environ. Utilisée au départ principalement pour la réalisation de tests d'immunité rayonnée et d'émission rayonnée en CEM, les domaines d'application de la CRBM sont aujourd'hui de plus en plus variés. On peut citer par exemple la mesure d'efficacité d'antennes ou l'émulation de canaux de propagation multi-trajets.

Une CRBM représente une alternative intéressante et complémentaire à la chambre anéchoïque qui permet, elle, de représenter un environnement en espace libre. En effet, lors d'un test d'immunité par exemple, les essais en chambre anéchoïque nécessitent de faire tourner l'objet, ce qui augmente la durée des essais. De plus, il est impossible de savoir si la configuration pire cas a bien été testée. Dans le cas d'une CRBM, l'objet sous test est considéré comme illuminé par un champ électromagnétique (EM) homogène (les caractéristiques du champ EM agressant l'objet sont considérées comme identiques quelle que soit la position de l'objet dans le volume utile) et isotrope (l'objet est illuminé par des ondes EM provenant de toutes les directions de l'espace). Ainsi, il n'est plus nécessaire de déplacer l'objet sous test durant les essais. De plus, du fait de la réflexion des ondes EM sur les parois métalliques de la CRBM, un champ EM de forte amplitude peut être généré dans la CRBM pour une puissance injectée par la source raisonnable.

A cause de la jeune histoire des CRBM, de nombreux aspects relatifs aux CRBM restent encore relativement méconnus. Ainsi, par exemple de nombreuses valeurs imposées par les normes en vigueur sont empiriques. C'est le cas par exemple de la détermination de la fréquence minimale d'utilisation (en anglais LUF pour « Lowest Usable Frequency ») qui est basée sur le respect d'un gabarit que des calculs basés sur l'uniformité de champ obtenu au sein du volume utile ne doivent pas dépasser.

De manière générale, le fonctionnement de la bande de fréquences intermédiaires située entre la fréquence de résonance fondamentale de la cavité et la fréquence où le modèle idéal d'une cavité surdimensionnée décrit par Hill est bien accepté est relativement méconnu.

L'objectif de cette thèse est donc d'améliorer la compréhension physique des phénomènes intervenant dans cette bande de fréquences. L'objectif final étant, à partir d'une meilleure compréhension physique des choses, de proposer des pistes permettant d'optimiser

le fonctionnement des CRBM et donc d'abaisser la LUF en agissant sur les bons paramètres. Cette démarche s'appuie donc sur la réalisation de nombreuses campagnes de mesures et également sur la réalisation de simulations numériques.

Le premier chapitre commence par la description de quelques concepts généraux liés aux CRBM. Il se termine par la présentation des résultats d'une campagne de mesures préliminaire illustrant les écarts obtenus entre le fonctionnement réel d'une CRBM et le modèle idéal d'une cavité surdimensionnée dans la bande de fréquences intermédiaires.

Le second chapitre présente une méthode permettant d'extraire les poids des modes de cavité à partir d'une simulation « exacte » tridimensionnelle d'une CRBM. L'étude de l'influence de la forme du brasseur ou du coefficient de qualité de l'enceinte sur l'établissement des modes au sein de la cavité permet d'améliorer notre compréhension physique du fonctionnement des CRBM.

Au cours du troisième chapitre, des résultats expérimentaux et numériques illustrent les modifications profondes des caractéristiques intrinsèques d'une CRBM engendrées par la modification du coefficient de qualité de l'enceinte. Il est ainsi montré que la méthode préconisée par les normes en vigueur pour déterminer la LUF d'une CRBM ne reflète pas ces changements.

Le quatrième chapitre s'intéresse, à partir de résultats de mesure et de simulation, à l'influence de la géométrie du brasseur de modes sur les caractéristiques intrinsèques des CRBM et notamment sur le nombre d'échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur ou sur la distribution du champ EM obtenu au sein du volume utile.

Dans le chapitre 5, une nouvelle méthode permettant de déterminer la LUF d'une CRBM est proposée. Celle-ci est basée sur l'étude des deux critères suivants : le nombre de réalisations indépendantes obtenus sur un tour de brasseur et le calcul du taux de rejet aux lois de distribution proposées par le modèle idéal établi par Hill.

Enfin, dans le dernier chapitre, trois géométries différentes de CRBM, déjà proposées dans la littérature, sont étudiées à l'aide de simulations numériques. Même si ces géométries sont au final décrites comme peu pertinentes par rapport à la géométrie généralement utilisée, leur étude permet d'améliorer la compréhension physique des CRBM.

Chapitre 1. La chambre réverbérante à brassage de modes

1.1 Introduction

Ce premier chapitre a pour objet de présenter, dans un premier temps, les concepts généraux relatifs à une chambre réverbérante à brassage de mode. Ensuite, les différents observables servant à caractériser le champ EM généré au sein d'une CRBM sont présentés. Enfin, les principaux résultats d'une campagne expérimentale préliminaire réalisée au sein de la CRBM du laboratoire XLIM présente les enjeux de ce travail de thèse.

1.2 Généralités

1.2.1 Principe et Définition

À la fin des années 40, les cavités réverbérantes ont été utilisées pour la première fois pour cuire des aliments [1], à l'aide d'un dispositif connu actuellement sous le nom 'four microonde'. Son principe de fonctionnement a été repris plus tard afin d'obtenir un moyen d'essai en compatibilité électromagnétique (CEM) [2] : La chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM).

La CRBM est une cavité métallique fermée (cage de Faraday) surdimensionnée par rapport aux longueurs d'ondes. Le spectre de modes d'une cavité métallique étant discret, la CRBM nécessite de réaliser un brassage modal. Ceci est généralement réalisé grâce à l'insertion d'un brasseur chargé de modifier les conditions aux limites du système : on parle alors de brassage mécanique. Il s'agit généralement d'un objet diffractant à la géométrie complexe en rotation à l'intérieur de la CRBM. La rotation du brasseur permet de modifier la cartographie des modes ainsi que la répartition spatiale du champ EM en le rendant statistiquement homogène (champ EM indépendant de la position de l'objet dans la CRBM) et isotrope (mêmes propriétés suivant toutes les directions de l'espace).

En CEM, la CRBM est utilisée comme une alternative à la chambre anéchoïque (CA) [3], moyen d'essai permettant de reproduire un environnement en espace libre. La CRBM présente ainsi plusieurs avantages :

- du fait de l'absence d'absorbants, le coût d'une CRBM est moins élevé par rapport à une CA ;

- la CRBM étant une cavité métallique à fort coefficient de qualité, des niveaux de champ électrique importants peuvent être obtenus à l'intérieur de la CRBM pour une puissance injectée raisonnable ;
- dans le cas d'essais en susceptibilité rayonnée, l'objet étant illuminé par des ondes EM provenant de toutes les directions de l'espace, il n'est donc pas nécessaire de déplacer l'objet sous test, ce qui réduit la durée des essais.

1.2.2 Utilisations

Les chambres réverbérantes à brassage de modes initialement conçues pour la réalisation de tests CEM en susceptibilité rayonnée ou en émission rayonnée sont désormais également utilisées pour des applications de plus en plus variées. Parmi elles, on peut citer :

- la mesure d'efficacité de blindage [4] de câbles, de connecteurs ou d'enceintes blindées;
- la caractérisation d'antennes: mesures d'efficacité, de gain de diversité d'antennes [5]-[6];
- le test de technologies sans fil ;
- l'étude des effets biologiques des ondes EM sur les végétaux ou les personnes ;
- l'émulation de canaux de propagation multitrajets.

1.2.3 Fréquences de résonance

Il n'existe pas de formules analytiques qui définissent les fréquences de résonances de la chambre en présence du brasseur.

Dans le cas d'une cavité parallélépipédique sans brasseur, les premiers modes de résonance de la cavité apparaissent à certaines fréquences qui dépendent de ces dimensions. Ces fréquences sont calculées à l'aide de l'Équation 1-1:

$$f_{m,n,p} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad \text{Équation 1-1}$$

avec : **a** la longueur de la cavité, **b** sa largeur, **d** sa hauteur,
 ϵ_r et **μ_r** sont la permittivité et la perméabilité relative du milieu,
m, **n** et **p** des entiers positifs qui définissent le mode,
c la vitesse de la lumière dans le vide.

Pour les modes de la cavité, il est possible de considérer la cavité comme un guide d'onde court-circuité à ses extrémités. Pour cela, la direction correspondant à la plus grande longueur (Oz dans l'exemple ci-dessous) est choisie comme direction principale du guide. Ce

choix permet de classer les modes de résonance en modes transverses électriques (TE) et transverses magnétiques (TM). Le Tableau 1-1 montre les différents modes propres de la cavité selon les ordres m, n et p et les composantes de champ E et H non nulles.

Ordre	Polarisation	Composantes non nulles
$m \neq 0 ; n \neq 0 ; p \neq 0$	TM	$E_x E_y E_z H_x H_y$
	TE	$E_x E_y H_x H_y H_z$
$m \neq 0 ; n \neq 0 ; p = 0$	TM	$E_z H_x H_y$
$m \neq 0 ; n = 0 ; p \neq 0$	TE	$E_y H_x H_z$
$m = 0 ; n \neq 0 ; p \neq 0$	TE	$E_x H_y H_z$

Tableau 1-1 : Modes propres de la cavité

Dans le cas où $m \neq 0$, $n \neq 0$ et $p \neq 0$, un mode TE et un mode TM d'indices mnp identiques apparaissent à la même fréquence : ces modes TE/TM sont dits « dégénérés ».

1.2.4 Densité de modes d'une cavité vide

Le bon fonctionnement d'une CRBM dépend fortement de la densité de modes. Cette densité doit être suffisamment élevée à chaque fréquence d'étude. Le nombre et la densité de modes d'une cavité vide dépendent des dimensions de la chambre et de la fréquence de travail. Le nombre de modes d'une cavité vide de dimensions a, b et d en dessous d'une fréquence f est évalué par la formule suivante [7]-[8]:

$$N_E(f) \approx \frac{8\pi}{3c^3} \cdot abd \cdot f^3 - \frac{a+b+d}{c} f + \frac{1}{2} \quad \text{Équation 1-2}$$

La densité de modes autour d'une fréquence f est la dérivée de la relation précédente:

$$n_E(f) = \frac{\partial N_E(f)}{\partial f} = \frac{8\pi}{c^3} \cdot abd \cdot f^2 - \frac{a+b+d}{c} \quad \text{Équation 1-3}$$

1.2.5 Brassage de modes

Le brassage mécanique consiste à déplacer un objet métallique dans la CRBM : le brasseur de modes. Le brasseur, généralement constitué de pâles métalliques fixées sur un axe de rotation, modifie fictivement les conditions limites de la cavité, ce qui a pour effet de déplacer les fréquences d'apparition des modes de résonances pour chaque position de brasseur. Ainsi, si le brassage mécanique est efficace et si la densité modale est suffisamment importante, le champ électromagnétique à l'intérieur de la CRBM pourra être considéré comme homogène et isotrope pour les différentes positions du brasseur.

Le brassage de modes est efficace à partir du moment où le décalage des modes dû à la rotation du brasseur permet un recouvrement entre les modes. Ce recouvrement est plus facile à obtenir en hautes fréquences où la densité de modes est élevée. Par contre, en basses fréquences, le recouvrement provoqué par la rotation du brasseur est insuffisant. L'utilisation des chambres réverbérantes à brassage de modes est donc soumise à une limite en basses fréquences, la fréquence minimale d'utilisation (désignée dans ce manuscrit par l'acronyme « LUF » pour « Lowest Usable Frequency »).

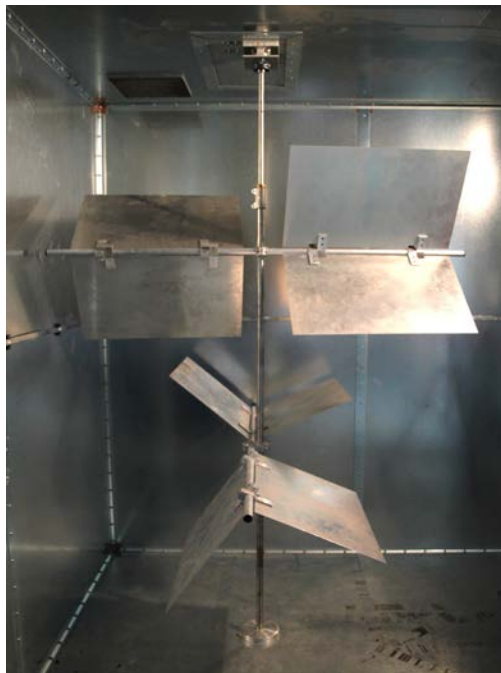


Figure 1-1 : Photographie du brasseur de modes de la CRBM de XLIM

Le deuxième type de brassage est le brassage électronique [8] qui consiste à exciter une cavité vide sur plusieurs fréquences très proches les unes des autres. En effet, dans le cas où la densité de modes est élevée, la répartition modale se révèle très différente pour une faible variation de la fréquence de la source. La réalisation de ce type de brassage exige une modulation aléatoire de la fréquence de la source ou un mélange du signal harmonique avec

un bruit à large bande de fréquence [9] ou en procédant directement par saut de fréquence. On peut aussi combiner le brassage électronique au brassage mécanique dans le but d'augmenter l'efficacité de brassage [10]. D'autres types de brassage ont été utilisés dans la littérature, parmi eux, la chambre réverbérante à paroi mobile [11]-[12], la chambre réverbérante intrinsèque à parois vibrantes [13].

1.3 Outils de caractérisation d'une CRBM

1.3.1 Caractérisation par le protocole de calibrage 61000-4-21

Dans cette partie, nous présentons le protocole de calibrage de la CRBM imposé par la norme civile CEI 61000-4-21. Ce protocole de calibrage de la CRBM permet de déterminer la fréquence minimale d'utilisation de la CRBM grâce à l'évaluation de l'uniformité et de l'homogénéité du champ EM au sein du volume de test. Les autres normes présentent des procédures similaires.

La première étape consiste à définir un volume de test parallélépipédique, à l'intérieur duquel l'uniformité du champ doit être vérifiée. Le volume de test (appelé aussi volume utile ou volume d'essai) doit être situé à une distance minimale de $\lambda/4$ [14] de tout objet (parois de la chambre, antennes, brasseur de modes) (Figure 1-2), λ étant la longueur d'onde correspondant à la fréquence minimale d'utilisation de la CRBM. L'équipement sous test peut être placé dans ce volume dans n'importe quelle position et orienté dans n'importe quelle direction.

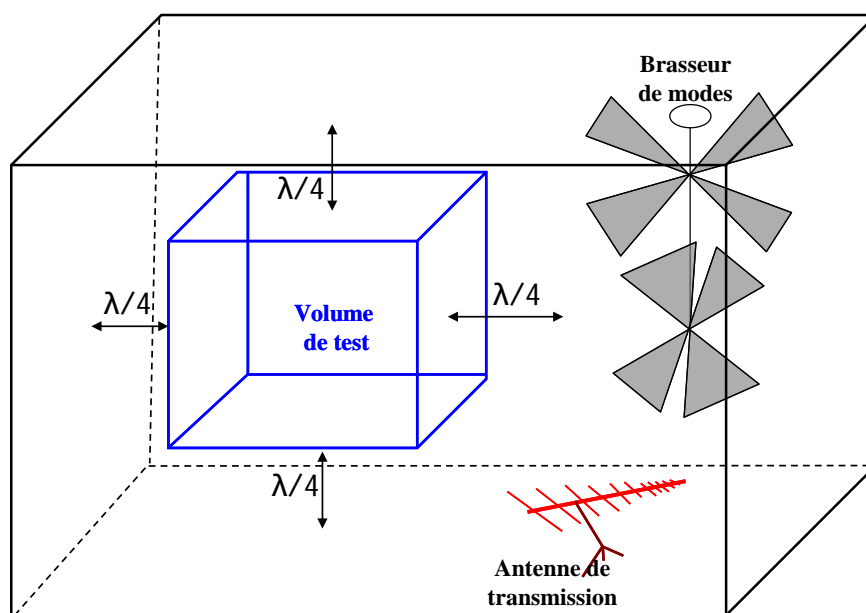


Figure 1-2 : Définition du volume de test d'une CRBM

La procédure impose de mesurer chacune des 3 composantes rectangulaires du champ électrique (E_x , E_y , E_z) sur un certain nombre de points du volume de test (Figure 1-3) pour un nombre de positions de brasseur décrit dans les tableaux ci-dessous.

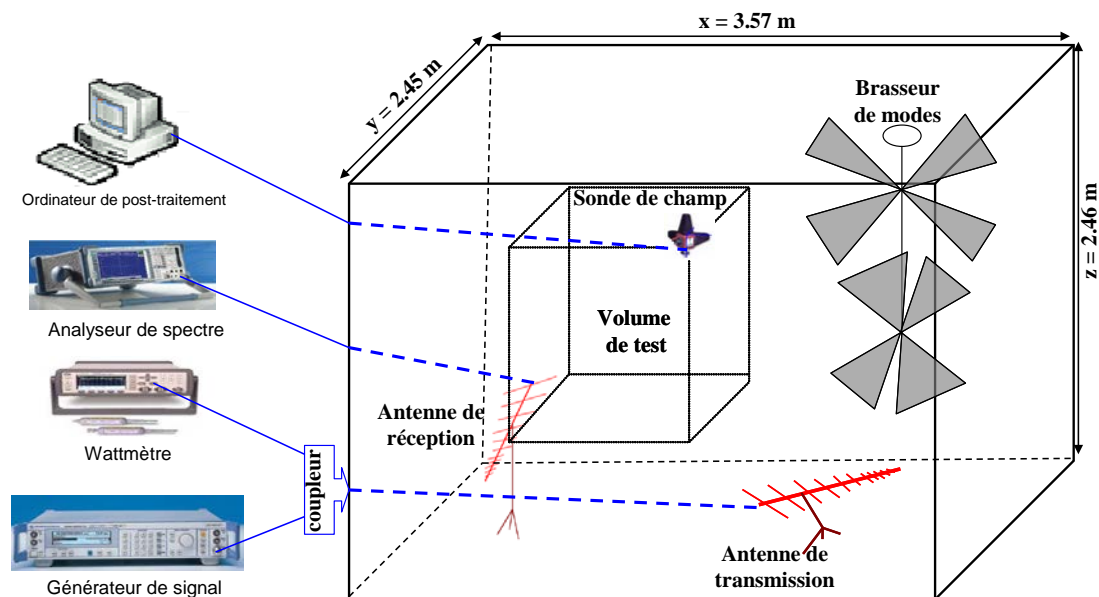


Figure 1-3 : Protocole de calibration de la CRBM

Le nombre de points du volume de test où est réalisée la mesure ainsi que le nombre de positions de brasseur à considérer sont décrits dans le tableau ci-dessous.

Bande de fréquence (MHz)	Nombre de positions du brasseur (pour un tour complet)	Nombre de points de mesure
80 à 3 fs	50	8
3 fs à 6fs	18	8
6 fs à 10 fs	12	8
> 10 fs	12	4
où fs est la fréquence minimale d'utilisation de la CRBM		

Tableau 1-2 : Nombre de pas de brasseur et nombre de points de mesure de champ en fonction de la fréquence selon la norme civile 61000-4-21.

En basse fréquence, le champ EM doit donc être mesuré sur chacun des 8 sommets du volume utile.

L'application de ce protocole demande donc de mesurer, à l'aide d'un capteur de champ triaxial isotrope, les modules des trois composantes rectangulaires E_x , E_y et E_z du champ électrique pour chaque fréquence, pour chaque position de sonde et pour chaque position du

brasseur sur un tour complet du brasseur. Ensuite, seule la valeur maximale de chaque composante de champ est retenue pour chaque point : il reste donc 24 valeurs permettant de calculer l'écart-type des valeurs maximales du champ électrique. Ensuite, il faut normaliser ces valeurs maximales du champ électrique à la racine carrée de la puissance injectée P_{in} . Le champ E maximum normalisé pour chaque axe de la sonde s'écrit donc :

$$E_i = \frac{E_{i,max}}{\sqrt{P_{in}}} \quad \text{Équation 1-4}$$

où $i = x, y$ ou z

Pour chaque fréquence, l'écart type en dB pour chaque composante cartésienne normalisée E_i (E_x, E_y ou E_z) s'écrit sous la forme suivante :

$$\sigma_{i,N}(dB) = 20 \log \left(\frac{\sigma_{i,N} + \langle E_i \rangle_N}{\langle E_i \rangle_N} \right) \quad \text{Équation 1-5}$$

avec :

$$\sigma_{i,N} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (E_i - \langle E_i \rangle_N)^2}{N-1}} \quad \text{Équation 1-6}$$

$$\langle E_i \rangle_N = \frac{\sum_{n=1}^N E_i}{N} \quad \text{Équation 1-7}$$

Les 8 maxima de E_x donnent accès à l'écart-type σ_x en dB, les 8 maxima de E_y donnent accès à l'écart-type σ_y en dB et les 8 maxima de E_z donnent accès à l'écart-type σ_z en dB.

La notation $\langle \rangle_N$ désigne la moyenne sur les N positions de sonde, et le paramètre $\sigma_{i,N}(dB)$ est l'écart type en linéaire des N maxima retenus par chaque composante cartésienne normalisée du champ électrique.

Il est également possible de calculer directement l'écart-type correspondant à ces 24 valeurs. Ce paramètre sera appelé dans ce manuscrit σ_{xyz} ou σ_{24} .

$$\sigma_{i,3N}(dB) = 20 \log \left(\frac{\sigma_{i,3N} + \langle E_i \rangle_{3N}}{\langle E_i \rangle_{3N}} \right) \quad \text{Équation 1-8}$$

$$\sigma_{i,3N} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{3N} (E_i - \langle E_i \rangle_{3N})^2}{3N - 1}} \quad \text{Équation 1-9}$$

$$\langle E_i \rangle_{3N} = \frac{\sum_{n=1}^{3N} E_i}{3N} \quad \text{Équation 1-10}$$

où E_i correspond à l'ensemble des 24 valeurs maximum et N le nombre de points de mesure du champ.

L'écart-type de chaque composante du champ ou de l'ensemble des composantes du champ ne doit pas dépasser un gabarit (Tableau 1-3) précisé par la norme 61000-4-21. Le gabarit impose une limite de 4 dB pour la bande de fréquence [80 MHz, 100 MHz], une limite de 4 dB à 100 MHz en décroissant linéairement à 3 dB à 400 MHz et une limite de 3 dB au-delà de 400 MHz. La norme tolère toutefois un nombre de trois fréquences par octave pouvant dépasser la limite sans excéder un niveau de 1 dB.

Fréquences	Tolérances de l'écart type
80 MHz à 100 MHz	4 dB
100 MHz à 400 MHz	4 dB à 100 MHz puis décroît linéairement jusqu'à 3 dB à 400 MHz
> 400 MHz	3 dB

Tableau 1-3 : Tolérances de l'homogénéité du champ électrique à partir de l'écart-type

Il est également à préciser que la communauté CEM a pour habitude d'évaluer à l'aide d'une formule empirique très simple la fréquence minimale d'utilisation d'une CRBM. Celle-ci est considérée comme un multiple de la fréquence théorique f_0 du premier mode de résonance de la cavité vide :

$$LUF = k * f_0 \quad \text{Équation 1-11}$$

où k est un nombre entier compris entre 3 et 7.

1.3.2 Caractérisation de l'efficacité de brassage

Parmi les paramètres utilisés pour caractériser l'efficacité du brasseur, on trouve le "Stirring ratio" (SR) et le coefficient d'autocorrélation.

1.3.2.1 L'efficacité de brassage ("Stirring ratio")

L'efficacité du brasseur de modes d'une CRBM est souvent analysée à l'aide d'une grandeur appelée « efficacité de brassage » (SR en anglais pour Stirring Ratio) correspondant au rapport entre l'énergie maximum et l'énergie minimum captée par une antenne de réception sur un tour de brasseur.

$$SR_{dB} = 10 * \log \left(\frac{P_r^{\max}}{P_r^{\min}} \right)_{1 \text{ tour de brasseur}} \quad \text{Équation 1-12}$$

L'efficacité de brassage peut également être calculée à l'aide des paramètres S mesurés entre 2 antennes placées dans la CRBM :

$$SR_{dB} = 20 * \log \left(\frac{S_{21\max}}{S_{21\min}} \right)_{1 \text{ tour de brasseur}} \quad \text{Équation 1-13}$$

Généralement, l'efficacité de brassage est considérée comme suffisante lorsqu'elle est supérieure à 20 dB.

Malgré le fait que ce critère soit largement utilisé par les utilisateurs des CRBM, il ne donne qu'une idée relative de l'efficacité réelle du brassage de modes. Il n'est, par exemple, pas possible d'utiliser ce critère afin d'évaluer le nombre d'échantillons indépendants obtenus sur une révolution du brasseur de modes.

1.3.2.2 Calcul du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur

L'objectif d'un brasseur de modes est de modifier les conditions aux limites du système afin d'obtenir pour chaque position du brasseur un champ EM indépendant du champ obtenu pour chacune des autres positions du brasseur de modes. L'objectif est donc d'obtenir le maximum de positions indépendantes (correspondant au même nombre de réalisations non corrélées) sur un certain nombre de positions de brasseur.

Pour quantifier le nombre de positions indépendantes d'un brasseur de modes, la communauté CEM utilise le coefficient d'autocorrélation. Le coefficient d'autocorrélation r à l'ordre n d'une série de données x se calcule simplement avec l'expression suivante :

$$r(n) = \frac{\sum_{k=1}^N (x(k) - \langle x \rangle)(x(k+n) - \langle x \rangle)}{\sum_{k=1}^N (x(k) - \langle x \rangle)^2} \quad \text{Équation 1-14}$$

Le coefficient d'autocorrélation à l'ordre n d'une série de données correspond au coefficient de corrélation entre une série de données et la même série de données décalée de n rangs.

Les normes considèrent l'indépendance d'une composante du champ électrique en un point du volume utile de la CRBM lorsque le coefficient d'autocorrélation au premier ordre sur la série de N données (correspondant aux N positions du brasseur) est inférieur à 0,37. Cependant, cette valeur ne tient pas compte du nombre de réalisations de la série de données, ce qui est problématique comme cela a été démontré par [15] car la fonction d'autocorrélation est une variable aléatoire dont la densité de probabilité $\psi(r)$ dépend du nombre de réalisations:

$$\psi(r) = \frac{N-2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\Gamma(N-1)}{\Gamma(N-1/2)} \cdot \frac{(1-\rho^2)^{\frac{N-1}{2}} \cdot (1-r^2)^{\frac{N-4}{2}}}{(1-\rho r)^{N-\frac{3}{2}}} \cdot A(r) \quad \text{Équation 1-15}$$

avec :

$$A(r) = 1 + \frac{1 + \rho r}{4(2N-1)} + \dots \quad \text{Équation 1-16}$$

où r est le coefficient d'autocorrélation obtenu (pour N échantillons) à un ordre donné et ρ est le coefficient d'autocorrélation qui serait obtenu pour un nombre de réalisations infini.

Pour remédier à la non prise en compte du nombre de réalisations sur la valeur maximum du coefficient de corrélation toléré, Lünden [15] a présenté une méthode permettant de déterminer la valeur du coefficient d'autocorrélation maximum à considérer en fonction du nombre d'échantillons de la série de données et du seuil de confiance que l'on choisit (généralement 1 ou 5%).

Pour cela, Lünden a calculé, à partir des équations 1-15 et 1-16 la probabilité que le coefficient d'autocorrélation r de 2 séries de N échantillons totalement décorrélés ($\rho=0$) soit supérieur au coefficient d'autocorrélation ρ_0 de la série de N échantillons à tester. Cette probabilité s'exprime ainsi :

$$prob_N(|r| \geq |\rho_0|) = \frac{2\Gamma[(N-1)/2]}{\sqrt{\pi}\Gamma[(N-2)/2]} \int_{|\rho_0|}^1 (1-r^2)^{(N-4)/2} dr \quad \text{Équation 1-17}$$

Lorsque cette probabilité est inférieure à un seuil de risque α choisi, la série de données est donc considérée comme corrélée.

La Figure 1-4 présente les valeurs limites du coefficient d'autocorrélation calculées par Lünden en fonction du nombre d'échantillons pour les 3 seuils de risque les plus couramment utilisés:

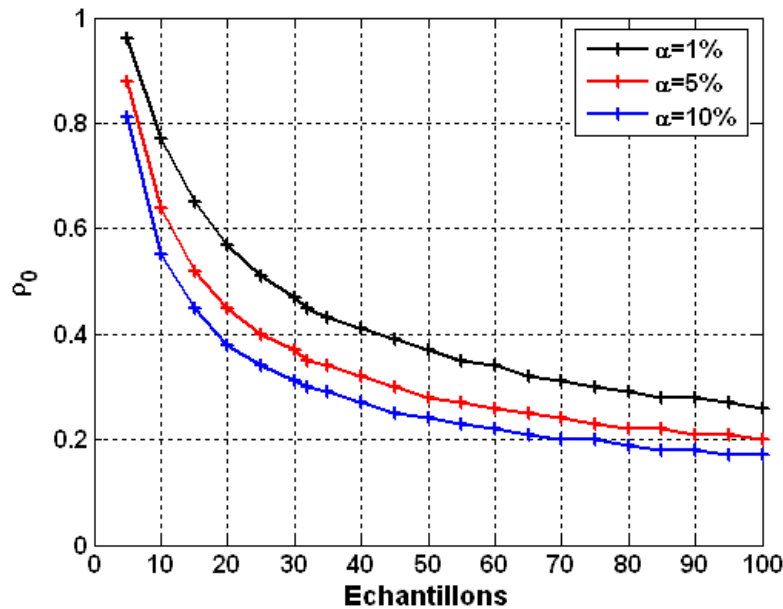


Figure 1-4 : Valeurs limites du coefficient d'autocorrélation en fonction du nombre d'échantillons de la série de données pour 3 seuils de confiance

1.3.3 Caractérisation des lois de distribution du champ EM

Dans cette section, nous présentons le modèle idéal de Hill qui assimile le fonctionnement d'une CRBM à une somme infinie d'ondes planes d'orientation et de polarisation aléatoires pour chaque position du brasseur de modes. Ce « modèle idéal de cavité surdimensionnée » est désormais largement utilisé par la communauté CEM. Nous rappelons brièvement les lois de distributions du champ EM issues de ce modèle.

1.3.3.1 Présentation du modèle idéal d'une cavité surdimensionnée

Le modèle de Hill est un modèle statistique basé sur la superposition d'une infinité d'ondes planes d'amplitude, de polarisation, d'angle d'incidence et de phase aléatoires. A une fréquence et pour un point de l'espace, le champ électrique est défini comme une intégrale d'ondes planes sur l'angle solide de la sphère (Figure 1-5).

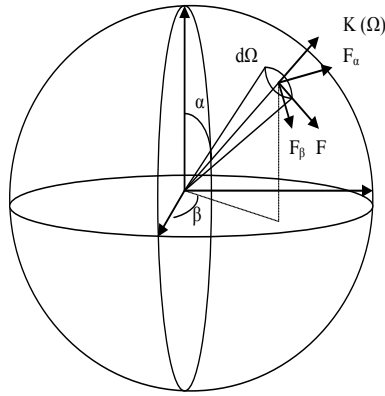


Figure 1-5: Représentation polaire d'une onde plane

D'après ce modèle, le champ électrique au point r peut être représenté comme une intégrale d'ondes planes provenant de toutes les directions de l'espace, c'est-à-dire d'un angle solide de 4π stéradians :

$$\vec{E}(\vec{r}) = \iint_{4\pi} \vec{F}(\Omega) e^{j\vec{k}\vec{r}} d\Omega \quad \text{Équation 1-18}$$

Où F est une fonction qui décrit l'orientation et la polarisation de chaque onde plane.

L'angle solide Ω dépend des angles α et β décrits sur la Figure 1-5 :

$$d\Omega = \sin \alpha \cdot d\alpha \cdot d\beta \quad \text{Équation 1-19}$$

Le vecteur du nombre d'onde k s'écrit alors :

$$\vec{k} = -k(\hat{x} \sin \alpha \cos \beta + \hat{y} \sin \alpha \sin \beta + \hat{z} \cos \alpha) \quad \text{Équation 1-20}$$

où $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ est le nombre d'onde en espace libre, μ_0 est la perméabilité du vide et ϵ_0 est la permittivité du vide.

Le modèle que propose Hill est le modèle probabiliste le plus simple, capable de représenter le comportement aléatoire du champ électromagnétique dans une chambre réverbérante en régime de cavité surdimensionnée. Ce modèle par intégration d'ondes planes est largement utilisé par la communauté scientifique pour lequel un objet sous test décrit de manière déterministe est plongé dans un spectre d'ondes planes afin de simuler son comportement dans une chambre réverbérante (Figure 1-6).

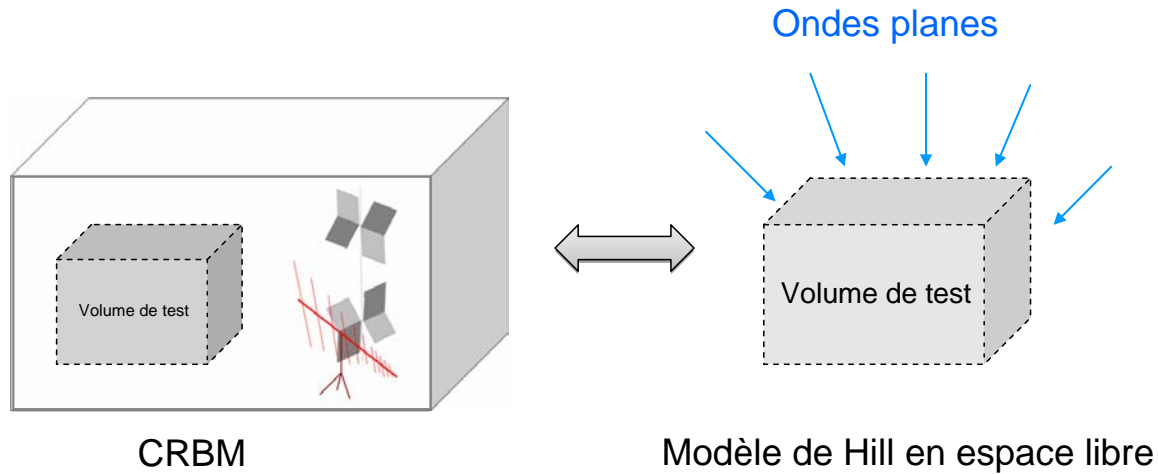


Figure 1-6 : Modèle simple de HILL utilisée en simulation

Dans le cadre de ce modèle, la répartition du champ électrique sur un nuage de points ou sur un même point pour différentes positions de brasseur au sein du volume utile de la CRBM suit les lois de distribution statistiques que nous allons présenter ci-dessous.

La distribution du champ électrique est issue des propriétés des parties réelle et imaginaire de chaque composante cartésienne E_x , E_y et E_z :

$$\begin{aligned} E_x &= E_{xr} + iE_{xi} \\ E_y &= E_{yr} + iE_{yi} \\ E_z &= E_{zr} + iE_{zi} \end{aligned} \quad \text{Équation 1-21}$$

Hill a montré que dans le contexte de représentation du champ EM en ondes planes pour une CRBM idéale, les parties réelles et imaginaires de chaque composante du champ électrique suivent la loi normale (ou loi gaussienne, de moyenne μ nulle, et d'écart type σ):

$$\mu = \langle E_{xr} \rangle = \langle E_{xi} \rangle = \langle E_{yr} \rangle = \langle E_{yi} \rangle = \langle E_{zr} \rangle = \langle E_{zi} \rangle = 0 \quad \text{Équation 1-22}$$

$$\sigma^2 = \langle E_{xr}^2 \rangle = \langle E_{xi}^2 \rangle = \langle E_{yr}^2 \rangle = \langle E_{yi}^2 \rangle = \langle E_{zr}^2 \rangle = \langle E_{zi}^2 \rangle = \frac{E_0^2}{6} \quad \text{Équation 1-23}$$

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

Par conséquent, la densité de probabilité et la fonction de répartition de la partie réelle et imaginaire d'une composante rectangulaire notée E_r du champ électrique (E_x , E_y , E_z) s'écrivent respectivement :

$$f(E_r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{E_r^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Équation 1-24}$$

$$F(E_r) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{E_r}{\sigma\sqrt{2}} \right) \quad \text{Équation 1-25}$$

Un raisonnement mathématique simple (non démontré ici) permet d'en déduire que le module de chaque composante cartésienne (E_x , E_y , E_z) du champ électrique suit la loi de Rayleigh (ou loi du χ à 2 degrés de liberté) dont la formule simplifiée de la densité de probabilité et de la fonction de répartition en fonction du paramètre θ (avec $\theta > 0$) peuvent être énoncées ainsi:

$$f(x) = \frac{2x}{\theta} \cdot e^{-\frac{x^2}{\theta}} \quad \text{Équation 1-26}$$

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x^2}{\theta}} \quad \text{Équation 1-27}$$

La moyenne et l'écart type des variables aléatoires (E_x , E_y , E_z) ont pour valeur:

$$\langle E_i \rangle = \theta \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \text{Équation 1-28}$$

$$\sqrt{\operatorname{var}(E_i)} = \theta \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}}$$

avec $i = x, y$ et z .

Une propriété remarquable de la loi de Rayleigh concerne le rapport de l'écart-type sur la moyenne qui est constant et vaut approximativement 0,523.

Par conséquent, le module du champ électrique total suit la loi exponentielle (ou loi du χ^2 à 2 degrés de liberté) dont la formule simplifiée de la densité de probabilité et de la fonction de répartition en fonction du paramètre θ (avec $\theta > 0$) peuvent être énoncées ainsi:

$$f(x) = \frac{1}{\theta} \cdot e^{-\frac{x}{\theta}} \quad \text{Équation 1-29}$$

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\theta}} \quad \text{Équation 1-30}$$

1.3.3.2 Les tests d'ajustement à une loi de probabilité

Les tests d'ajustement sont utilisés en statistique pour tester si un échantillon de valeurs suit une loi de probabilité donnée. Ils ont donc été utilisés dans notre étude afin de vérifier si le champ électrique au sein du volume utile suit bien les lois de distribution décrites auparavant sur un nuage de points pour une position du brasseur de modes puis sur un seul point pour plusieurs positions de brasseur.

La première étape d'un test d'ajustement est de formuler une hypothèse H_0 telle que : « les N réalisations suivent la loi statistique X ». Les fonctions de répartition théorique et empirique (correspondant aux N réalisations) doivent alors être calculées. Pour la fonction de répartition théorique, il faut faire appel à la méthode du maximum de vraisemblance afin de déterminer les paramètres inconnus de la distribution en fonction de la valeur des échantillons. Par exemple dans le cas de la loi de Rayleigh, le paramètre θ de l'équation 27 est égal à la moyenne quadratique des réalisations:

$$\theta = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad \text{Équation 1-31}$$

Dans le cas de la loi exponentielle, le paramètre θ de l'équation 30 est égal à la moyenne des réalisations :

$$\theta = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{Équation 1-32}$$

La seconde étape consiste à calculer la valeur d'un paramètre statistique spécifique à chaque test afin de la comparer à une valeur critique tabulée dépendant du nombre d'échantillons N , du seuil de risque α choisi et de la loi statistique testée. Lorsque la statistique du test est inférieure à la valeur critique, l'hypothèse est acceptée. Dans le cas inverse, elle est rejetée.

C. Lemoine [5] a indiqué dans sa thèse que le test d'ajustement à une loi de probabilité le plus puissant et le plus adapté aux tests des lois de distribution du champ EM dans une CRBM était le test d'Anderson-Darling. Ainsi, seul ce test sera présenté et utilisé dans ce manuscrit. La statistique d'Anderson – Darling appelée A^2 est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$A^2 = - \frac{\sum_{i=1}^N (2i-1) [\ln F_0(x_i) + \ln(1 - F_0(x_{N+1-i}))]}{N} - N \quad \text{Équation 1-33}$$

où $F_0(x_i)$ est la fonction de distribution cumulée théorique et x_i correspond à la $i^{\text{ème}}$ valeur expérimentale ordonnée dans l'ordre croissant.

D'après [16], les valeurs critiques les plus appropriées sont celles données par Stephens [17]. Ces valeurs sont listées dans le Tableau 1-4 pour les valeurs de seuil de risque les plus représentatives dans le cas du test de la distribution de Rayleigh:

Seuil de risque α	0,15	0,1	0,05	0,01
Valeur critique	0,922	1,078	1,341	1,957

Tableau 1-4 : Valeurs critiques pour le test d'Anderson – Darling d'une loi de Rayleigh

Généralement, on utilise le seuil de risque $\alpha=5\%$ qui correspond à un bon compromis afin d'obtenir un test d'ajustement significatif sans être trop restrictif.

Ces valeurs critiques sont donc comparées à la statistique modifiée A_m^2 suivante dépendante du nombre d'échantillons N et de A^2 :

$$A_m^2 = A^2 \left(1 + \frac{0,6}{N} \right) \quad \text{Équation 1-34}$$

1.3.4 Caractérisation de l'énergie emmagasinée via le facteur de qualité

Le facteur de qualité (ou coefficient de qualité) est un des paramètres fondamentaux d'une CRBM. Il permet de quantifier la capacité d'une CRBM à emmagasiner de l'énergie EM. En effet, l'obtention de niveaux de champ EM dans la CRBM requiert un facteur de qualité élevé.

Le facteur de qualité est défini pour chaque fréquence f comme le rapport entre l'énergie moyenne emmagasinée (U) et l'énergie dissipée au sein de la structure par unité de temps (où P_d est la puissance dissipée) :

$$Q = 2\pi f \cdot \frac{U}{P_d} \quad \text{Équation 1-35}$$

Le facteur de qualité d'une CRBM est calculé à partir de la mesure des paramètres $[S]$ entre 2 antennes placées dans la CRBM sur une rotation complète du brasseur de modes. Les paramètres S mesurés permettent alors de calculer une grandeur appelée CCF (maximum ou moyenne) représentant le rapport entre la puissance (maximum ou moyenne) reçue sur l'antenne de réception et la puissance injectée dans la CRBM :

$$CCF_{\max, moy} = \frac{P_{reçue_{\max, moy}}}{P_{injectée}} = \left(\frac{1 - |S_{21}|^2}{|S_{11}|^2} \right)_{\max, moy} \quad \text{Équation 1-36}$$

Le facteur de qualité (maximum ou moyen) de la CRBM est alors calculé en fonction du CCF (maximum ou moyen), du volume V de la CRBM, de la longueur d'onde λ et de l'efficacité η des 2 antennes :

$$Q_{\max, moy} = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot V}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \lambda^3} * CCF_{\max, moy} \quad \text{Équation 1-37}$$

Il est également possible de calculer le facteur de qualité théorique d'une CRBM. Celui-ci dépend de son volume V , des pertes métalliques sur les parois de la CRBM, des pertes introduites par les antennes de mesure et des pertes dues aux fuites EM.

Les pertes métalliques sur les parois de la CRBM (due à la conductivité finie σ des parois) peuvent être associées à un facteur de qualité Q_σ dépendant du volume V , de la surface totale des parois S , de la conductivité du métal σ et de la fréquence f :

$$Q_\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{V}{S \cdot \mu_r} \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \quad \text{Équation 1-38}$$

Les pertes dues à chaque antenne présente dans la CRBM peuvent également être associées à un facteur de qualité propre Q_{ant} dépendant de la fréquence, du volume total V de la cavité et de l'efficacité η de l'antenne :

$$Q_{ant} = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot V}{\lambda^3 \cdot \eta} \quad \text{Équation 1-39}$$

Les fuites EM à travers les jointures de la CRBM notamment sont, quant à elles, mal connues et ne peuvent être exprimées par une formule analytique simple. Elles sont donc généralement négligées dans le calcul théorique du facteur de qualité d'une CRBM.

Le facteur de qualité Q d'une CRBM contenant M antennes (considérées ici comme identiques) peut donc être calculé simplement à l'aide de la relation suivante :

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_\sigma} + \frac{M}{Q_{ant}} \quad \text{Équation 1-40}$$

1.4 Campagne expérimentale préliminaire

1.4.1 Introduction

L'objectif de cette campagne de mesures est de présenter les résultats typiques obtenus lors de la phase de calibration d'une CRBM. Cette campagne de mesures préliminaires a été effectuée dans la chambre réverbérante à brassage de modes du laboratoire XLIM (Figure 1-7) dont les dimensions sont les suivantes :

- Longueur (axe O_x) = 3,57 m ;
- Largeur (axe O_y) = 2,45 m ;
- Hauteur (axe O_z) = 2,46 m.

Compte tenu de ses dimensions, le premier mode de résonance de la cavité vide (sans brasseur) est le mode TE₁₀₁ intervenant théoriquement à $f_0=74,05$ MHz. On peut donc évaluer empiriquement la fréquence minimale d'utilisation (LUF) à environ 370 MHz ($5 \cdot f_0$).

Le brasseur de modes est constitué de 8 pales métalliques rectangulaires (Figure 1-1) en rotation autour d'une barre métallique verticale sous l'effet d'un moteur pas à pas. Chaque pale métallique a une longueur de 60 cm et une largeur de 40 cm.

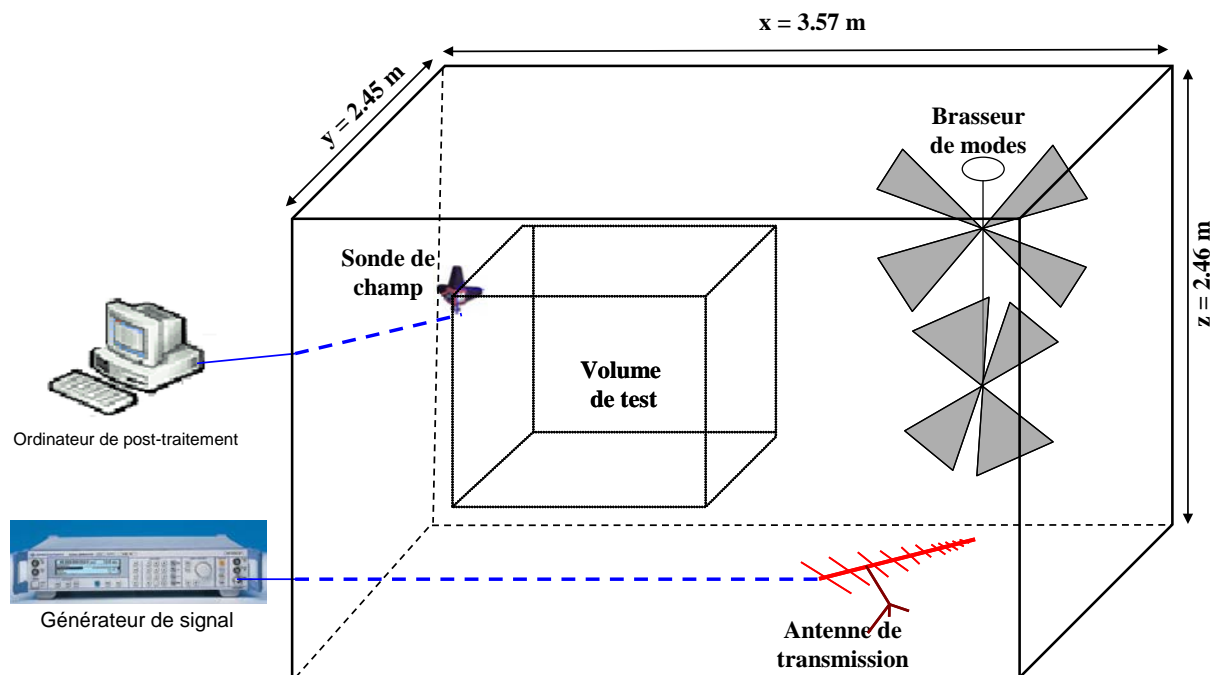


Figure 1-7 : Description de la configuration de mesure

L'antenne d'émission est une antenne log-périodique (ETS-Lindgren 3148). Elle est placée dans un coin de la CRBM (Figure 1-7) en dehors du volume de test. Elle est orientée

vers le brasseur afin de limiter au maximum le couplage direct entre l'antenne d'émission et le volume utile.

Le module de chaque composante rectangulaire du champ électrique (E_x , E_y , E_z) est mesuré à l'aide d'une sonde de champ triaxiale (sonde HI-6005 ETS-Lindgren) pour 50 positions en 8 points différents correspondant aux 8 sommets du volume utile de 1m^3 considéré. Les points de relevés de champ sont ainsi espacés d'une distance minimale de 1 m afin d'éviter une corrélation des résultats obtenus entre les différents points de mesure [18]. Chaque point est également situé à une distance minimale égale à 42 cm ($\lambda/4$ à 178 MHz) de tout objet de la CRBM (parois, antenne d'émission, brasseur de modes) afin de respecter les préconisations de la norme 61000-4-21 [14].

Les mesures sont réalisées dans la bande de fréquence 200 MHz - 1 GHz par pas de 25 MHz.

1.4.2 Présentation des résultats obtenus

1.4.2.1 Evaluation de l'uniformité du champ EM

L'écart-type du champ EM est calculé selon la procédure de calibrage décrite par la norme 61000-4-21 en 8 points du volume de test.

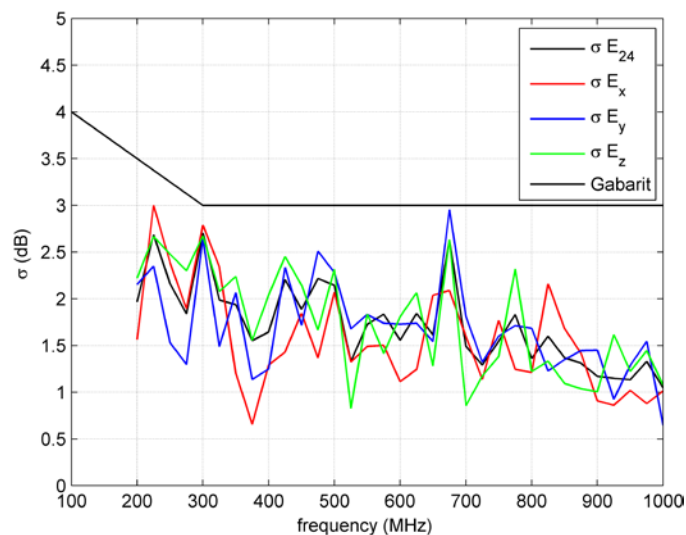


Figure 1-8 : Comparaison des écarts-types σ_{E_x} , σ_{E_y} , σ_{E_z} et σ_{24} calculés à l'aide des mesures et du gabarit proposé par la norme 61000-4-21

Les 4 écarts-types obtenus respectent le gabarit proposé par la norme pour toutes les fréquences comprises entre 200 MHz et 1 GHz. Par conséquent, le volume utile défini préalablement au sein de la CRBM satisfait bien les prescriptions d'uniformité de champ.

Ainsi, selon la norme 61000-4-21, la fréquence minimale d'utilisation de la CRBM est égale ou inférieure à 200 MHz, ce qui est inférieur à 3 fois la fréquence du mode de résonance fondamental de la cavité.

1.4.2.2 Evaluation du nombre de réalisations indépendantes obtenus sur un tour de brasseur

Dans ce paragraphe, nous présentons tout d'abord 3 résultats obtenus pour le coefficient d'autocorrélation $r(1)$. Le premier résultat correspond au coefficient $r(1)$ obtenu après analyse du module de la composante E_x obtenu au point n°1 pour les 50 positions de brasseur. Le second et le troisième résultat correspondent aux mêmes résultats pour les composantes E_y et E_z . Ces trois courbes de $r(1)$ obtenues en fonction de la fréquence sont tracées sur la Figure 1-9.

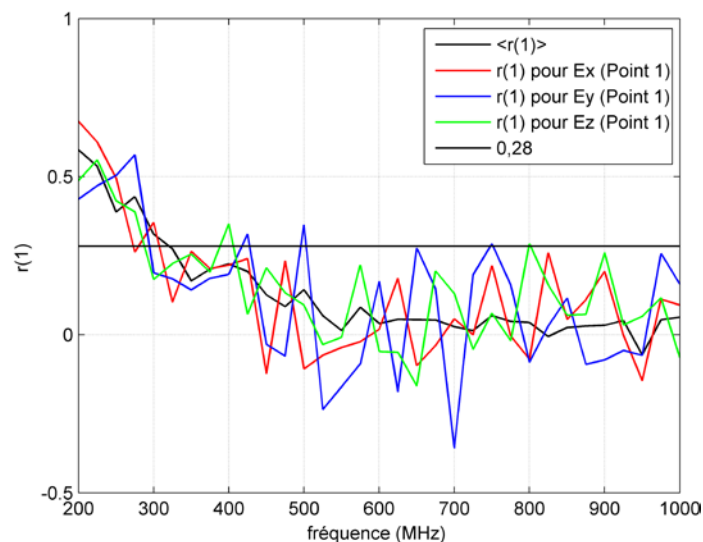


Figure 1-9 : Coefficient d'autocorrélation $r(1)$ obtenu pour 3 configurations différentes – Comparaison avec le coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$

Il apparaît tout de suite que, d'une série de données à une autre, les résultats présentent des variations relativement importantes bien que les mêmes tendances générales soient observées pour chaque courbe. Ainsi, il apparaît donc logique de calculer (et de tracer sur la Figure 1-9) le coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ permettant d'obtenir une courbe plus « lissée », c'est-à-dire aux variations plus faibles. Ce coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ correspond donc à la moyenne de $r(1)$ obtenu pour chacune des 24 séries de données (8 points de mesure * 3 composantes de champ mesurées en chaque point). Dans cette thèse, le coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ moyen sera donc utilisé afin de déterminer l'efficacité du brassage et le nombre d'échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur.

En comparant $\langle r(1) \rangle$ à la valeur limite de 0,28 déterminée par la méthode de Lünden pour 50 positions de brasseur et un seuil de confiance $\alpha=5\%$, il apparaît que les 50 positions de brasseur peuvent être considérées comme indépendantes autour de 330 MHz.

Ainsi, les positions de brasseur sont loin d'être indépendantes les unes des autres en dessous de 330 MHz alors que la LUF a été évaluée comme inférieure à 200 MHz. Les mesures effectuées sur 50 positions de brasseur (comme le préconise la norme 61000-4-21 en basse fréquence) seront donc en partie corrélées.

1.4.2.3 Evaluation des lois de distribution du champ EM

L'objectif est ici de tester, à l'aide du test d'Anderson-Darling si le module d'une composante rectangulaire du champ électrique obtenu pour toutes les positions de brasseur en un point donné suit la loi de Rayleigh. Cependant, la réalisation d'un seul test paraît insuffisante, les résultats pouvant fluctuer de façon importante d'une série de données à une autre. Nous avons donc réalisé 24 tests différents : chaque test correspond donc à un point de mesure et une des 3 composantes de champ. Les N échantillons considérés dans chacun des tests correspondent donc aux valeurs obtenues pour chacune des N positions du brasseur de modes.

Le résultat binaire (acceptation ou rejet de l'hypothèse) obtenu sur chacun des tests permet alors de calculer le taux de rejet du test. Ce taux de rejet correspond donc au nombre de tests rejetés divisé par le nombre total de tests. Il est présenté sur la Figure 1-10. En plus de ce résultat, nous avons également calculé la valeur moyenne de la statistique A_{m^2} calculée pour chacun des 24 tests (Figure 1-11).

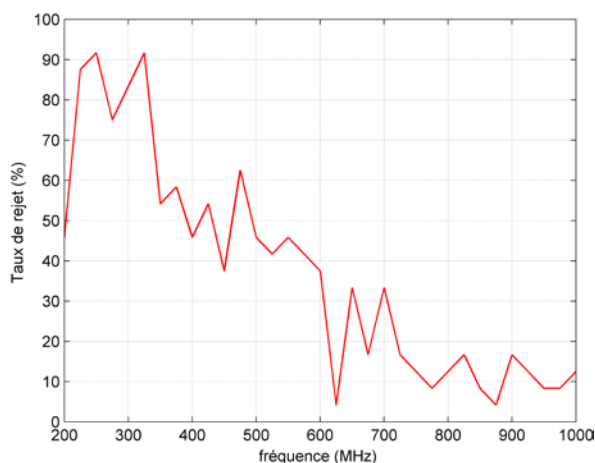


Figure 1-10 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling obtenu sur les 24 tests

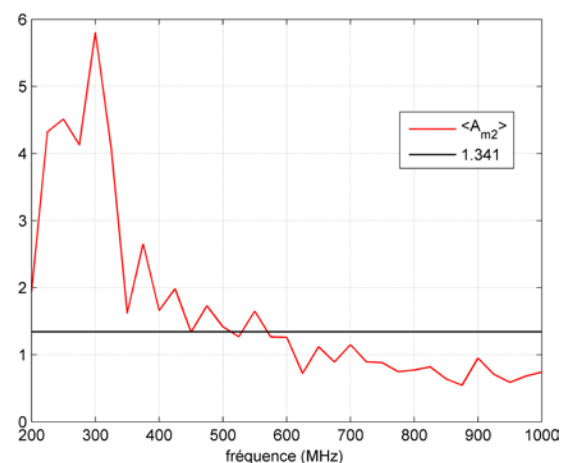


Figure 1-11 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenu sur les 24 tests

La loi de Rayleigh est majoritairement rejeté jusqu'à la fréquence de 500 MHz environ. En se rapprochant de la fréquence de 1 GHz, le taux de rejet diminue mais ne descend que pour une seule fréquence au-dessous de 10% (soit 2 rejets sur 24). L'analyse de la statistique moyenne du test indique qu'elle est du même ordre de grandeur que la valeur critique autour de 500 ou 600 MHz.

Tout comme dans le paragraphe précédent concernant la corrélation des échantillons, il est intéressant de constater que le modèle idéal de Hill (correspondant à la loi de Rayleigh pour le module des composantes rectangulaires du champ électrique) est très majoritairement rejeté à la fréquence de 200 MHz. A cette fréquence, la LUF de la CRBM est pourtant considéré comme déjà atteinte.

Nous avons également calculé le rapport σ/μ moyen obtenu lors de cette campagne de mesures. Ainsi, pour chaque point de mesure, nous avons calculé à chaque fréquence le rapport entre l'écart-type et la moyenne des 50 échantillons correspondant aux 50 positions de brasseur pour chaque composante du champ électrique. En répétant cette opération sur chacun des 8 points de mesure, nous avons alors obtenu 24 valeurs différentes à chaque fréquence. Le coefficient moyen $\langle\sigma/\mu\rangle$ correspond donc à la moyenne de ces 24 valeurs. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 1-12. Ils indiquent clairement que ce rapport tend vers la valeur 0,523 représentative du modèle idéal d'une cavité surdimensionnée lorsque la fréquence augmente. En revanche, pour des fréquences inférieures et notamment en-dessous de 500 MHz, les résultats obtenus montrent que le champ EM est éloigné du modèle idéal de Hill alors que la LUF de la CRBM est très largement dépassée.

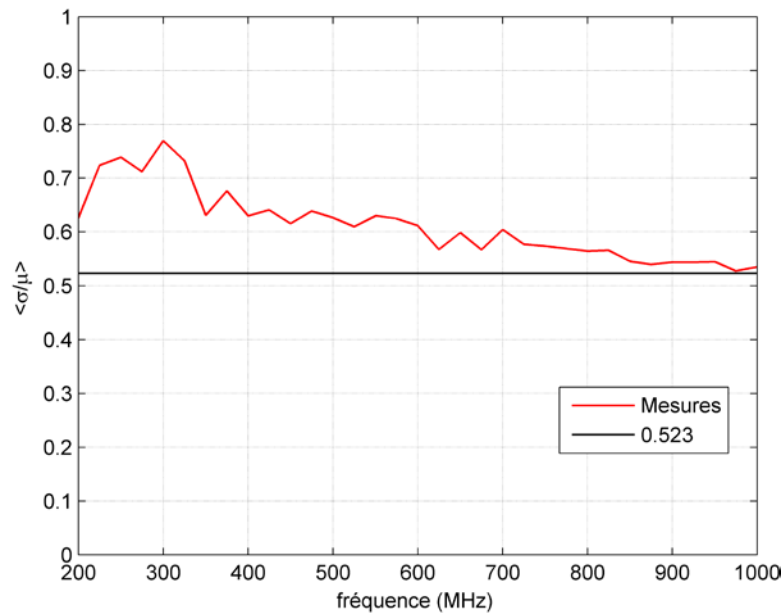


Figure 1-12 : Moyenne du rapport σ/μ obtenu dans la CRBM de XLIM – Comparaison avec la valeur de 0,523 caractéristique du modèle idéal.

D’après les résultats présentés dans cette section, le modèle de Hill semble valide aux environs de 1 GHz, ce qui correspond à environ 13 fois la fréquence de résonance fondamentale de la cavité vide. Cette valeur est également largement supérieure à la LUF déterminée précédemment.

Il est également important de rajouter qu’avant de réaliser des tests d’ajustement à une loi de probabilité, la première étape consiste à vérifier l’indépendance des échantillons. Or, en basse fréquence, les échantillons sont corrélés. Nous avons donc répété le test d’Anderson-Darling en prenant 1 échantillon sur 2, c’est-à-dire 25 échantillons par tour de brasseur afin de travailler sur des échantillons moins corrélés. Un taux de rejet similaire a été observé : la corrélation des échantillons ne peut donc pas expliquer le rejet du modèle de Hill en basse fréquence.

Le rejet des lois de distribution du modèle idéal en basse fréquence est bien connu de la communauté CEM. Il a été montré dans de nombreuses publications que d’autres lois de distribution étaient mieux acceptées en basse fréquence, par exemple la loi de distribution de Weibull (une loi de distribution à 2 paramètres dont la loi de Rayleigh est un cas particulier) [19]-[20], de K-Bessel [21] ou d’autre [22]. Cependant, il est difficile de raccrocher ces lois de distribution asymptotiques à une représentation physique particulière comme c’est le cas pour le modèle de Hill qui correspond à la somme d’un nombre infini d’ondes planes d’orientation et de position aléatoires pour chaque position du brasseur de modes. Ainsi, dans cette thèse, afin de ne pas perdre de vue notre objectif premier qui est de mieux comprendre le

fonctionnement physique des CRBM en basse fréquence, nous ne nous intéresserons pas à la loi de Weibull ou autres lois de distribution proposées dans la littérature.

1.5 Conclusion

Ce chapitre introductif a dans un premier temps présenté rapidement quelques concepts généraux des CRBM. Ensuite, tous les indicateurs généralement utilisés pour caractériser la qualité du champ EM au sein d'une CRBM ont été présentés en détail. Ces indicateurs ont ensuite été utilisés afin d'analyser les résultats de mesure obtenus dans la CRBM du laboratoire XLIM.

Cette campagne de mesures préliminaire a permis d'introduire la problématique de la thèse en illustrant le manque de connaissances actuelles sur le fonctionnement physique d'une CRBM dans la bande de fréquences intermédiaires, c'est-à-dire pour les fréquences inférieures aux fréquences où le modèle idéal d'une cavité surdimensionnée établi par Hill est largement accepté. Cette bande de fréquences critique, où l'efficacité du brassage de modes est primordiale, est donc relativement mal connue. En particulier, il a été montré que la LUF d'une CRBM, déterminée à partir de valeurs seuils empiriques, peut être définie à une fréquence où les échantillons récoltés sur un tour de brasseur sont majoritairement corrélés et où les lois de distribution du champ EM sont très éloignées du modèle idéal.

Par extension, on peut en conclure qu'aucune définition réelle définissant ce que doit être le fonctionnement d'une CRBM n'a pour l'instant été réellement adoptée par la communauté CEM. Est-ce un moyen d'essai permettant de générer un champ homogène et isotrope dans le volume de test? Il n'est alors pas logique que la LUF ne tienne pas compte des lois de distribution du champ EM générées dans ce même volume utile. Est-ce un moyen d'essai permettant d'obtenir un certain nombre d'échantillons non corrélés lorsque les conditions aux limites du système sont modifiées (quelles que soient les lois de distribution du champ EM obtenues) ? Il n'est alors pas logique que la LUF ne tienne pas compte de la corrélation des échantillons obtenus. Est-ce un moyen d'essai permettant d'obtenir un champ qui soit suffisamment homogène pour ne pas avoir à modifier la position de l'objet sous test ? Pourquoi, dans ce cas, la LUF confronte l'écart-type du champ EM à un gabarit empirique lié à aucune démonstration physique mais plutôt adapté aux résultats généralement observés par l'expérience ?

Chapitre 2. Etude modale d'une CRBM

2.1 Introduction

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous avons présenté des résultats expérimentaux montrant clairement que le modèle idéal d'une cavité surdimensionnée décrit par Hill est majoritairement rejeté pour des fréquences supérieures à la LUF, fréquence déterminée par des mesures d'uniformité de champ. Ce résultat bien connu de la communauté CEM indique que le brassage de modes n'est pas suffisamment efficace à cause de la densité modale insuffisante. Il a également été souligné dans ce chapitre que la connaissance des phénomènes physiques se produisant dans une CRBM à basse fréquence était insuffisante.

L'objectif de ce chapitre est donc d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques intervenant au sein d'une CRBM à partir de l'étude du comportement des modes de cavité en fonction de la géométrie du brasseur de modes ou du coefficient de qualité de l'enceinte.

2.2 Etat de l'art

L'étude de l'établissement des modes de cavité à l'intérieur d'une CRBM est un sujet relativement peu étudié [23]-[24].

Dans [24], F. Petit a étudié l'influence du brasseur sur les modes de cavité. Son étude a été faite en basse fréquence pour les premiers modes de cavité, faciles à distinguer par leurs cartographies et espacés en fréquence les uns des autres. F. Petit conclut que le brasseur décale les modes vers les basses fréquences et que ce décalage est différent pour chaque mode de la cavité. Du fait que son étude ait été faite à l'aide des cartographies du champ, il était impossible de réaliser cette étude à plus haute fréquence où les modes se chevauchent.

Dans [25]-[26], G. Orjubin, réalise une étude modale de la CRBM en la modélisant par la méthode des éléments finis (FEM) et en déterminant les modes par l'algorithme de Jacobi-Davidson. Il a étudié l'influence du brasseur sur les modes de la cavité. Malheureusement, le brasseur choisi est une simple plaque perturbant trop peu le champ EM au sein de la CRBM.

Dans [27], suite à un modèle théorique permettant de construire le champ EM total au sein d'une CRBM à partir de l'attribution de poids aléatoires à chaque mode de cavité, A. Cozza met en évidence le rôle des pertes au sein d'une CRBM sur l'interférence modale et sur la définition de la condition de cavité surdimensionnée.

2.3 Présentation du principe d'extraction des poids de modes

2.3.1 Principe

Comme cela a été présenté précédemment, des formules analytiques simples permettent de connaître les composantes du champ électrique et magnétique induites par un mode TE ou TM dans une cavité parallélépipédique. En revanche, il n'existe pas de formules semblables après l'introduction au sein de la cavité d'un brasseur de modes de forme complexe. Dans cette section, nous présentons donc une méthode permettant d'extraire le poids de n'importe quel mode relatifs à une cavité vide et prenant en compte la modification des cartographies dûe au chargement de la cavité ou de la présence d'un brasseur de modes. En appliquant les poids de modes obtenus à chaque mode, la reconstruction de la cartographie initiale du champ permet alors de valider la méthode. Ainsi, nous considérons comme point de départ le champ EM obtenu numériquement à l'intérieur de la CRBM à l'aide d'un calcul « exact » résolvant les équations de Maxwell (code de calcul tridimensionnel ou « full-wave »). Pour cela, le logiciel FEKO est utilisé.

2.3.2 Description des simulations sous FEKO

Dans ce chapitre, les calculs 3D ont été réalisés à l'aide du logiciel FEKO. FEKO est un logiciel commercial développé par la société EMSS qui utilise la méthode des moments pour résoudre les équations de Maxwell sous forme intégrale dans le domaine fréquentiel.

A l'aide de FEKO, une cavité (Figure 2-1) de longueur $a=3.5\text{m}$, de largeur $b=2.5\text{m}$ et de hauteur $d=3\text{m}$ a été modélisée. Cette CRBM, aux dimensions similaires à la CRBM du laboratoire XLIM, n'a toutefois pas deux dimensions identiques afin de pouvoir mieux dissocier chacun des modes. Compte tenu de ses dimensions, le mode fondamental TE₁₀₁ de la cavité vide se produit théoriquement à la fréquence de 65,85 MHz.

Cette cavité contient un brasseur de modes constitué de 6 plaques métalliques identiques (de longueur T_1 et de largeur $T_2=2/3*T_1$) (Figure 2-2) jointes en un point. La cavité contient aussi une antenne d'émission de type dipôle électrique, de longueur 0.6 m et de rayon 1 mm, excitée par une source de tension d'amplitude 1 V et d'impédance interne 50Ω .

Les champs électrique et magnétique au sein de la CRBM sont calculés sur plusieurs points régulièrement espacés et contenus dans 2 plans z de la cavité de coordonnées z_1 et z_2 . Les simulations sont reproduites pour 50 positions de brasseur différentes (rotation du brasseur de $7,2^\circ$ entre 2 positions successives).

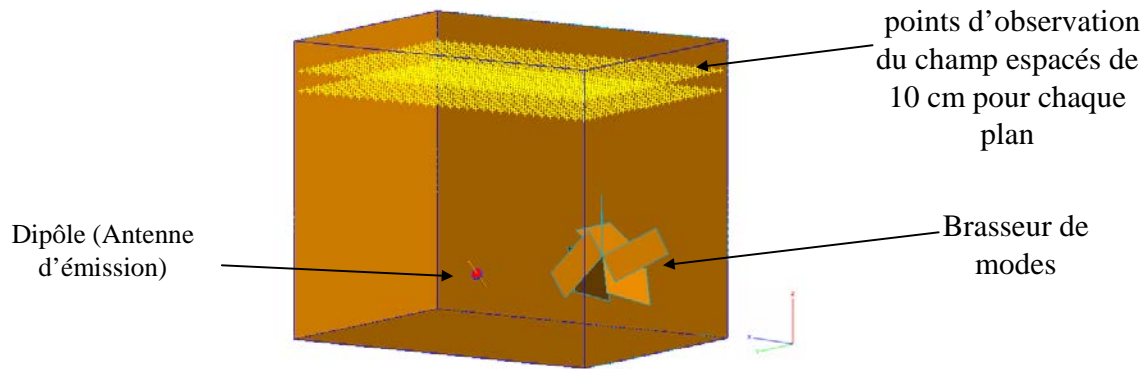


Figure 2-1: Modélisation FEKO de la CRBM de dimensions $a=3.5\text{m}$, $b=2.5\text{m}$ et $d=3\text{m}$

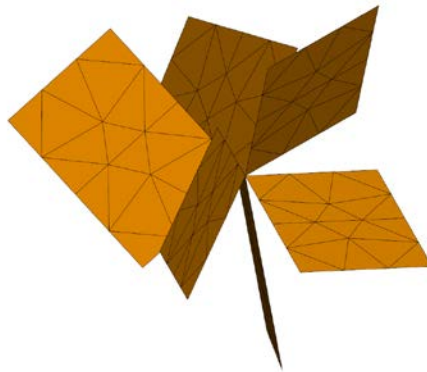


Figure 2-2: Modélisation du brasseur de modes constitué de 6 plaques métalliques identiques (de longueur $T1=0.6\text{m}$ et de largeur $T2=0.4\text{m}$)

2.3.3 Principe d'extraction des poids de modes

L'objectif ici est de trouver les poids des modes excités dans une cavité vide reproduisant une cartographie identique à ceux d'une cavité chargée par le brasseur. Pour cela, nous allons supposer que le brasseur et l'antenne sont situés dans une région au sein de laquelle nous ne cherchons pas à reconstruire le champ. Par contre, comme le montre la Figure 2-3, il existe une région (région supérieure sur la figure) pour laquelle la topologie est celle d'une cavité vide.

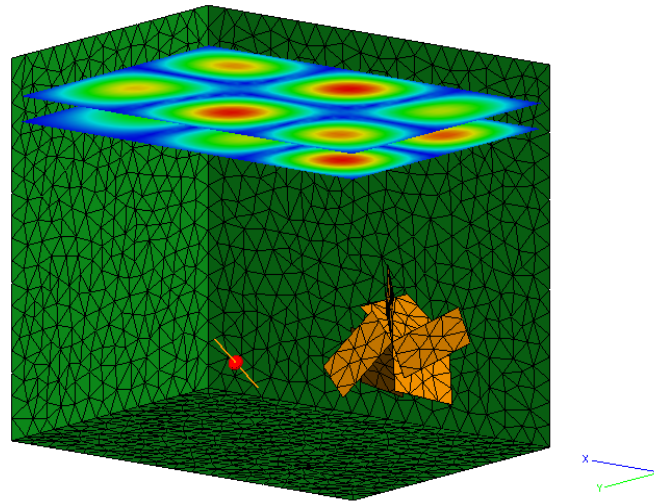


Figure 2-3 : Modélisation d'une CRBM de dimensions $a=3.5$, $b=2.5$ et $d=3m$ avec le logiciel FEKO

C'est donc dans cette région que l'on va chercher à reproduire une cartographie identique à celle obtenue par FEKO en utilisant un développement modal. Pour ce faire, en reprenant la figure précédente, nous pouvons considérer la région supérieure comme étant un guide court-circuité sur la face supérieure de la CRBM. Les parois latérales de la cavité constituent alors la section du guide. Classiquement, il est possible de caractériser la structure du champ dans un guide par ses modes de propagation qui sont de type TE et TM.

La méthode de calcul est présentée dans ce manuscrit pour le cas des modes TE (pour lesquels la composante $E_z=0$ si z est l'axe de propagation). Dans ce cas, nous analysons la composante magnétique H_z , la composante E_z étant analysée dans le cas des modes TM.

A ce niveau, nous pouvons dire que le fait d'imposer la présence d'un brasseur va faire qu'il est impossible d'exciter séparément les modes TE et TM. Toutefois, ce n'est pas problématique pour notre propos puisque nous cherchons juste les composantes du champ sur la base modale. Il est important de noter aussi que ce développement sera fait fréquence par fréquence. En effet, compte tenu de la structure complexe du brasseur, les poids vont évoluer en fonction des bandes de fréquence.

Le champ théorique H_z d'un mode TE_{mnp} de cavité s'écrit :

$$H_z = P_{TE_{mnp}} \cdot \frac{1}{j\omega\mu} \cdot k_{xy}^2 \cdot \cos(k_x \cdot x) \cdot \cos(k_y \cdot y) \cdot \sin(k_z \cdot z) \quad \text{Équation 2-1}$$

avec :

$$k_x = \frac{m\pi}{a} \quad \text{Équation 2-2}$$

$$k_y = \frac{n\pi}{b} \quad \text{Équation 2-3}$$

$$k_z = \frac{p\pi}{d} \quad \text{Équation 2-4}$$

$$k_{xy}^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad \text{Équation 2-5}$$

où $P_{TE_{mnp}}$ est le poids complexe du mode.

Nous en déduisons l'expression de la composante H_z (Équation 2-6) faisant intervenir la constante K dans le cas d'un guide d'onde infini orienté suivant z et de même dimension x et y que la cavité étudiée :

$$H_{z-xy} = K(z) \cdot \cos(k_x \cdot x) \cdot \cos(k_y \cdot y) \quad \text{Équation 2-6}$$

où $K(z) = 1 / j\omega\mu * P_{TE_{mnp}} \cdot k_{xy}^2 \cdot \sin(k_z \cdot z)$ prend en compte l'amplitude du champ en fonction de la position z . C'est cette structure de champ qui sert de base de développement.

La démarche va être maintenant détaillée suivant plusieurs étapes.

Dans une première étape, on extrait le poids de tous les modes TE_{mn} de guide considérés dans chacun des 2 plans pour lesquels la composante du champ magnétique H_z a été calculée à l'aide du logiciel FEKO. La justification de la prise en compte de 2 plans est effectuée plus loin dans la démonstration.

- 1) A une fréquence donnée f_1 : on commence par chercher tous les modes TE_{mn} qui peuvent exister dans la bande $[f_1 - \Delta f \text{ MHz } \quad f_1 + \Delta f]$. Il est important de prendre les modes autour de f_1 car le coefficient de qualité n'étant pas infini, ils peuvent avoir une influence non négligeable à la fréquence f_1 .
- 2) On effectue alors le produit scalaire de la cartographie associée à chaque mode TE_{mn} du guide avec la cartographie du champ obtenu par la simulation 3D sur le plan 1 (Équation 2-7).

$$T_{z1} = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{z(x,y,z1)} \cdot H_{z-xy(x,y,z1)}^*)}{\sum_{i=1}^N (H_{z-xy(x,y,z1)} \cdot H_{z-xy(x,y,z1)}^*)} \quad \text{Équation 2-7}$$

où N est le nombre de points considérés dans chaque plan. On obtient alors la grandeur scalaire Tz1 pour chaque mode de guide.

3) On effectue la même opération pour le plan 2 (équation 2-8).

$$T_{z2} = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{z(x,y,z2)} \cdot H_{z-xy(x,y,z2)}^*)}{\sum_{i=1}^N (H_{z-xy(x,y,z2)} \cdot H_{z-xy(x,y,z2)}^*)} \quad \text{Équation 2-8}$$

On obtient alors la grandeur scalaire Tz2 pour chaque mode de guide.

A ce stade, nous avons alors évalué les poids des modes TE_{mn} du guide sur chacun des 2 plans considérés.

Le calcul du produit scalaire appliqué à une cartographie 2D du champ EM dans la cavité permet de déterminer les divers poids des modes composant cette cartographie. En effet, si le mode est effectivement présent, le produit scalaire donne une grandeur scalaire tandis que le résultat sera nul si le mode est absent.

Dans une deuxième étape, il s'agit de déterminer le poids des modes de guide TE_{mn} excités au sein de la CRBM.

Pour cela, il faut désormais prendre en compte la dimension z en insérant 2 conditions aux limites (court-circuit) en z=0 et z=d. Ceci revient à considérer la dépendance en z du mode TE_{mn} et à utiliser le mode de cavité TE_{mnp} pour une cavité vide équivalente de longueur d.

Pour effectuer ce calcul, il suffit de se souvenir que l'on a considéré un guide d'onde. Or pour un guide, les champs peuvent être écrits comme étant la superposition d'une onde incidente et d'une onde réfléchie. L'amplitude du mode, en faisant abstraction des variations transverses s'écrit alors comme suit :

$$T_{z1} = A.e^{-j\beta z_1} + B.e^{j\beta z_1} \quad \text{Équation 2-9}$$

$$T_{z2} = A.e^{-j\beta z_2} + B.e^{j\beta z_2} \quad \text{Équation 2-10}$$

où A et B sont deux constantes (à déterminer) propres à chaque mode dans la cavité (sans brasseur).

- Pour déterminer A et B, nous utilisons les poids de modes trouvés pour chaque mode à chaque plan. On résout donc le système suivant :

$$\begin{cases} T_{z1} = A.e^{-j\beta z_1} + B.e^{j\beta z_1} \\ T_{z2} = A.e^{-j\beta z_2} + B.e^{j\beta z_2} \end{cases}$$

Il est à noter que la distance entre les deux plans doit être choisie de façon à ne pas tomber dans deux plans où le champ est nul pour le même mode (ce problème peut se poser très haut en fréquence).

Pour déterminer les constantes A et B, on résout le système constitué des 2 équations précédentes exprimé sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} T_{z1} \\ T_{z2} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\beta z_1} & e^{j\beta z_1} \\ e^{-j\beta z_2} & e^{j\beta z_2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = [C] \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} \quad \text{Équation 2-11}$$

avec $C1 = e^{-j\beta z_1}$, $C2 = e^{j\beta z_1}$, $C3 = e^{-j\beta z_2}$, $C4 = e^{j\beta z_2}$.

La matrice [C] doit alors être inversée afin de déterminer les constantes A et B :

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = [C]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} T_{z1} \\ T_{z2} \end{pmatrix} \quad \text{Équation 2-12}$$

Une fois le système résolu pour chaque mode de guide considéré et pour chaque fréquence d'étude, nous connaissons l'expression de chaque mode de guide $TE_{mn}(z)$ en fonction de z dans la cavité grâce à la relation suivante :

$$TE_{mn}(z) = A.e^{-j\beta z} + B.e^{j\beta z} \quad \text{Équation 2-13}$$

Dans une dernière étape, le poids $P_{TE_{mnp}}$ de chaque mode de la cavité est obtenu grâce au produit scalaire suivant. Il s'agit donc d'intégrer le poids du mode de guide $TE_{mn}(z)$ sur toute la longueur du guide (d) en prenant en compte la dépendance en z du mode de cavité considéré.

$$P_{TE_{mnp}} = \frac{\int_0^d T_{mn}(z) \cdot \sin(k_z \cdot z) dz}{\int_0^d \sin^2(k_z \cdot z) dz} \quad \text{Équation 2-14}$$

2.3.4 Vérification des poids de mode obtenus

Afin de valider le programme du calcul des poids de modes. Nous avons effectué une simulation FEKO en calculant le champ dans 8 plans (Figure 2-4). Après le calcul des poids de modes à partir des plans 7 et 8 sur la même figure, nous avons reconstruit la cartographie du champ électromagnétique dans chacun des 8 plans à l'aide des poids de modes évalués. Nous avons ensuite comparé la cartographie « reconstruite » avec la cartographie d'origine calculée par le logiciel FEKO. La composante H_z est tracée pour une position du brasseur de modes à une fréquence f proche de 200 MHz :

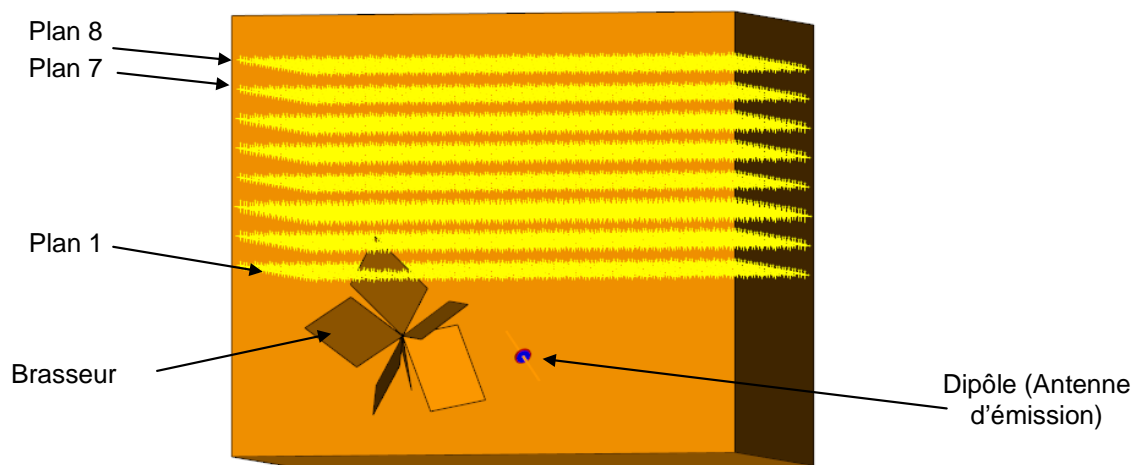


Figure 2-4 : Modélisation d'une CRBM de dimensions $a=3.5$, $b=2.5$ et $d=3m$ avec le logiciel FEKO

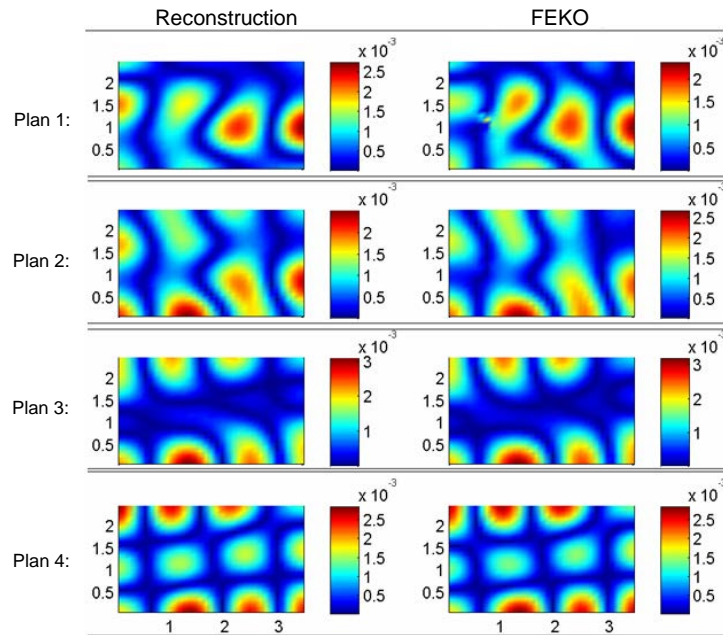


Figure 2-5 : Comparaison de la cartographie du champ Hz obtenu avec le logiciel FEKO et la cartographie reconstruite à l'aide du poids des modes dans les plans 1 à 4

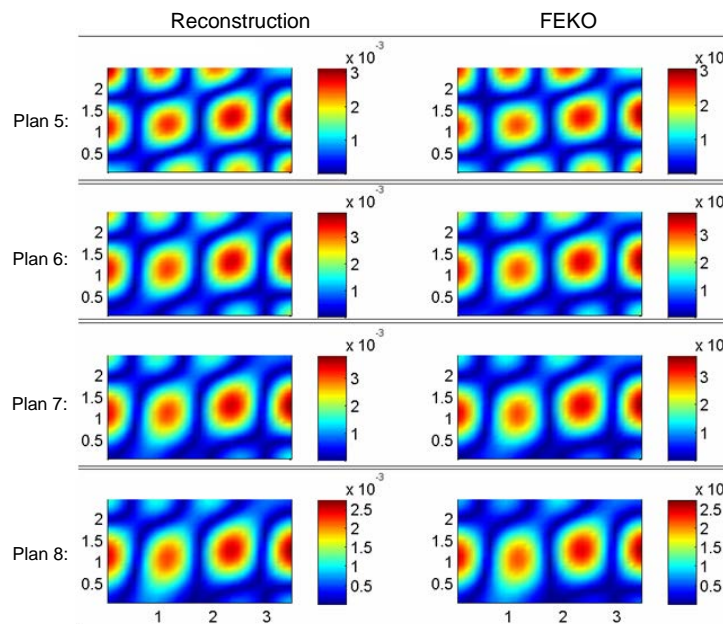


Figure 2-6 : Comparaison de la cartographie du champ Ez obtenu avec le logiciel FEKO et la cartographie reconstruite à l'aide du poids des modes dans les plans 5 à 8

Nous remarquons qu'il existe une excellente corrélation entre la cartographie fournie par le logiciel FEKO et la cartographie reconstruite en utilisant les poids de modes calculés pour les plans éloignés du brasseur de modes. Le programme d'extraction des poids de modes est donc considéré comme validé.

En revanche, la reconstruction des cartographies du champ n'est, comme attendu, pas possible pour les plans proches du brasseur.

2.4 Présentation des principaux résultats obtenus

Dans ce chapitre, l'influence de la géométrie du brasseur de modes et l'influence d'une variation du coefficient de qualité sur l'établissement des modes au sein d'une CRBM ont été successivement étudiés.

2.4.1 Influence de la forme du brasseur

2.4.1.1 Etude des modes fondamentaux

Lors de l'étude des modes de résonance fondamentaux de la cavité, les simulations ont été réalisées sur un nombre réduit de fréquences afin de diminuer les temps de calculs. En effet, en méthode des moments pour laquelle la résolution du système est réalisée fréquence par fréquence, le temps de calcul est directement lié au nombre de fréquences étudiées.

Bien évidemment, les modes fondamentaux d'une CRBM apparaissent dans une bande de fréquences où le moyen d'essai ne peut être utilisé comme CRBM. Néanmoins, nous faisons l'hypothèse que l'étude de ces modes fondamentaux nous apporte des informations utiles permettant de mieux comprendre comment les modes de cavité peuvent s'installer au sein d'une CRBM en fonction de divers paramètres.

La courbe représentant le module du poids du mode a ensuite été recalculée précisément à l'aide d'une technique de « vector fitting » [28]. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que la courbe représentant le module du poids d'un mode est analogue à la réponse fréquentielle d'un filtre RLC du second ordre. La Figure 2-7 présente le tracé du poids du mode TE_{101} pour une position du brasseur avant et après l'application de la technique de vector-fitting.

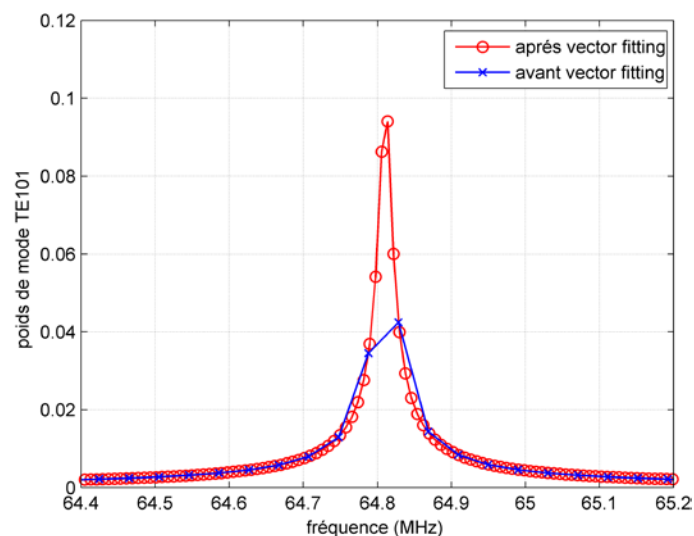


Figure 2-7 : Exemple de reconstruction du poids d'un mode avec la technique du « vector fitting »

Les figures 2-7, 2-8 et 2-9 présentent respectivement les modules des poids des modes TE_{101} , TE_{011} et TM_{110} obtenus sans brasseur et avec 50 positions du brasseur de modes de taille T_1 (définie précédemment) :

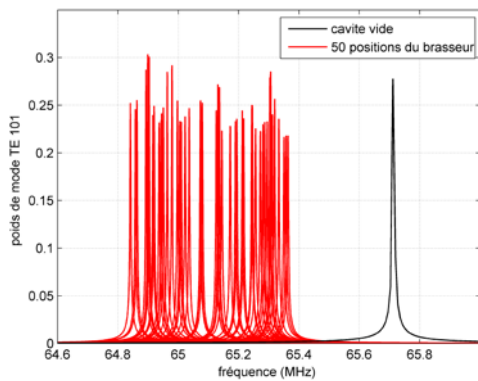


Figure 2-8 : Module du poids du mode TE_{101} dans une cavité avec brasseur (50 positions) et sans brasseur

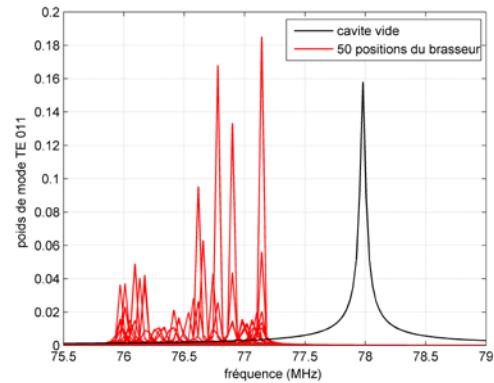


Figure 2-9 : Module du poids du mode TE_{011} dans une cavité avec brasseur (50 positions) et sans brasseur

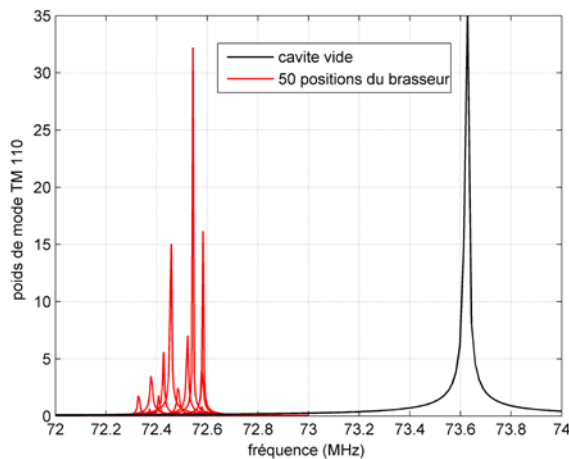


Figure 2-10 : Module du poids du mode TM_{110} dans une cavité avec brasseur (50 positions) et sans brasseur

Les figures montrent clairement l'effet du brasseur sur l'apparition des premiers modes de la CRBM. En particulier, il apparaît que le poids maximum et la fréquence centrale sont différents pour chaque position du brasseur de modes. De plus, la présence du brasseur entraîne une diminution de la fréquence d'apparition du mode vers les basses fréquences, comme si les dimensions de la CRBM étaient agrandies de par la présence du brasseur.

Nous avons alors étudié le décalage de fréquence entre la fréquence théorique du mode dans une cavité vide et la fréquence centrale du mode au sein de la même cavité équipée d'un brasseur. Nous faisons donc l'hypothèse que ce décalage fréquentiel est directement lié à la qualité du brassage : plus le décalage est important, plus les dimensions fictives de la cavité sont modifiées et plus le brassage est efficace.

Nous avons alors étudié le décalage fréquentiel obtenus pour les 50 positions de brasseur en fonction de la longueur T_1 des plaques et donc du volume brassé (volume de la sphère englobant le brasseur lors d'une révolution complète). R_1 étant considéré comme le rayon de la sphère représentant le volume brassé, celui-ci est donc calculé ainsi :

$$V_{brassé} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_1^3 \quad \text{Équation 2-15}$$

Le décalage fréquentiel obtenu pour les modes TE_{101} ($f_{théorique}=65,8$ MHz), TE_{011} ($f_{théorique}=78,1$ MHz) sont présentés sur les figures 2-10 et 2-11. Les résultats sont présentés pour $T_1=60$ cm et 4 autres valeurs plus faibles de T_1 ($0.9 \cdot T_1$, $0.8 \cdot T_1$, $0.6 \cdot T_1$, $0.45 \cdot T_1$), c'est-à-dire pour 5 tailles de brasseur différentes. Ainsi, le volume brassé par les 4 brasseurs supplémentaires est respectivement égal à 75%, 50%, 25% et 10% du volume brassé par le brasseur initial.

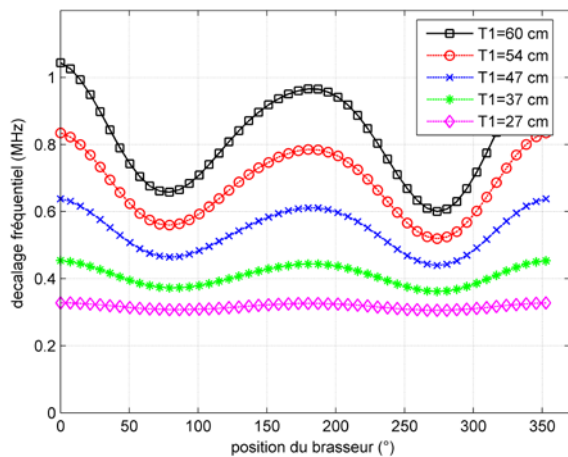


Figure 2-11 : Décalage fréquentiel du mode TE_{101} pour chaque position du brasseur et pour différentes tailles de brasseur

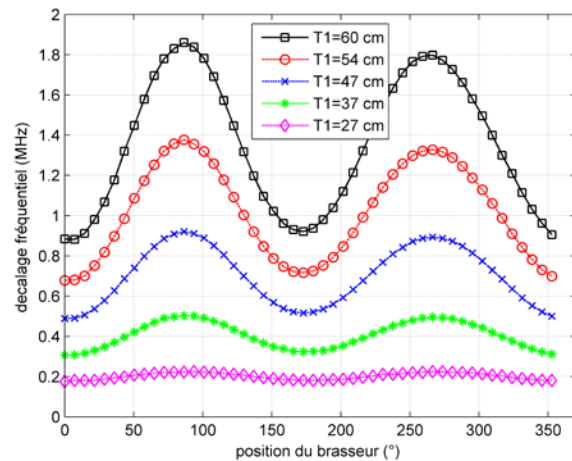


Figure 2-12 : Décalage fréquentiel du mode TE_{011} pour chaque position du brasseur et pour différentes tailles de brasseur

Le décalage fréquentiel obtenu pour chacune des 50 positions montre tout d'abord la forte corrélation présente entre deux positions successives du brasseur : le décalage fréquentiel observé à une position est peu différent de celui observé à la position précédente. Ensuite, il est très net que le décalage ainsi que ses variations autour de la valeur moyenne augmente lorsque la taille du brasseur augmente. Ainsi, le décalage fréquentiel obtenu pour le plus petit brasseur est pratiquement constant. Le champ électromagnétique obtenu dans la CRBM dans ce cas, bien que différent du champ qui est obtenu sans la présence du brasseur, est pratiquement identique d'une position de brasseur à une autre. La taille du brasseur, qui modifie trop peu les conditions aux limites du système, peut alors être considérée comme insuffisante.

Pour aller plus loin, nous avons tracé le décalage fréquentiel moyen observé sur les 3 premiers modes de la cavité en fonction du volume brassé par chaque brasseur.

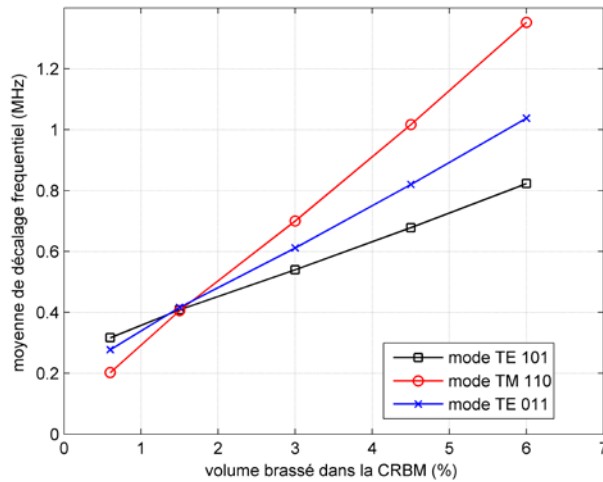


Figure 2-13 : Décalage fréquentiel moyen calculé pour 50 positions de brasseur en fonction du volume brassé pour les modes TE_{101} , TE_{101} et TM_{110}

Cette figure montre que le décalage fréquentiel moyen observé est directement proportionnel au volume brassé dans le cas où la géométrie du brasseur est conservée (à un facteur d'échelle près).

Dans une deuxième étude, nous observons le décalage fréquentiel moyen obtenu sur les modes fondamentaux pour différents brasseurs ayant sensiblement le même volume brassé en fonction du nombre de plaques métalliques que contient le brasseur. La Figure 2-14 présente les différents brasseurs étudiés.

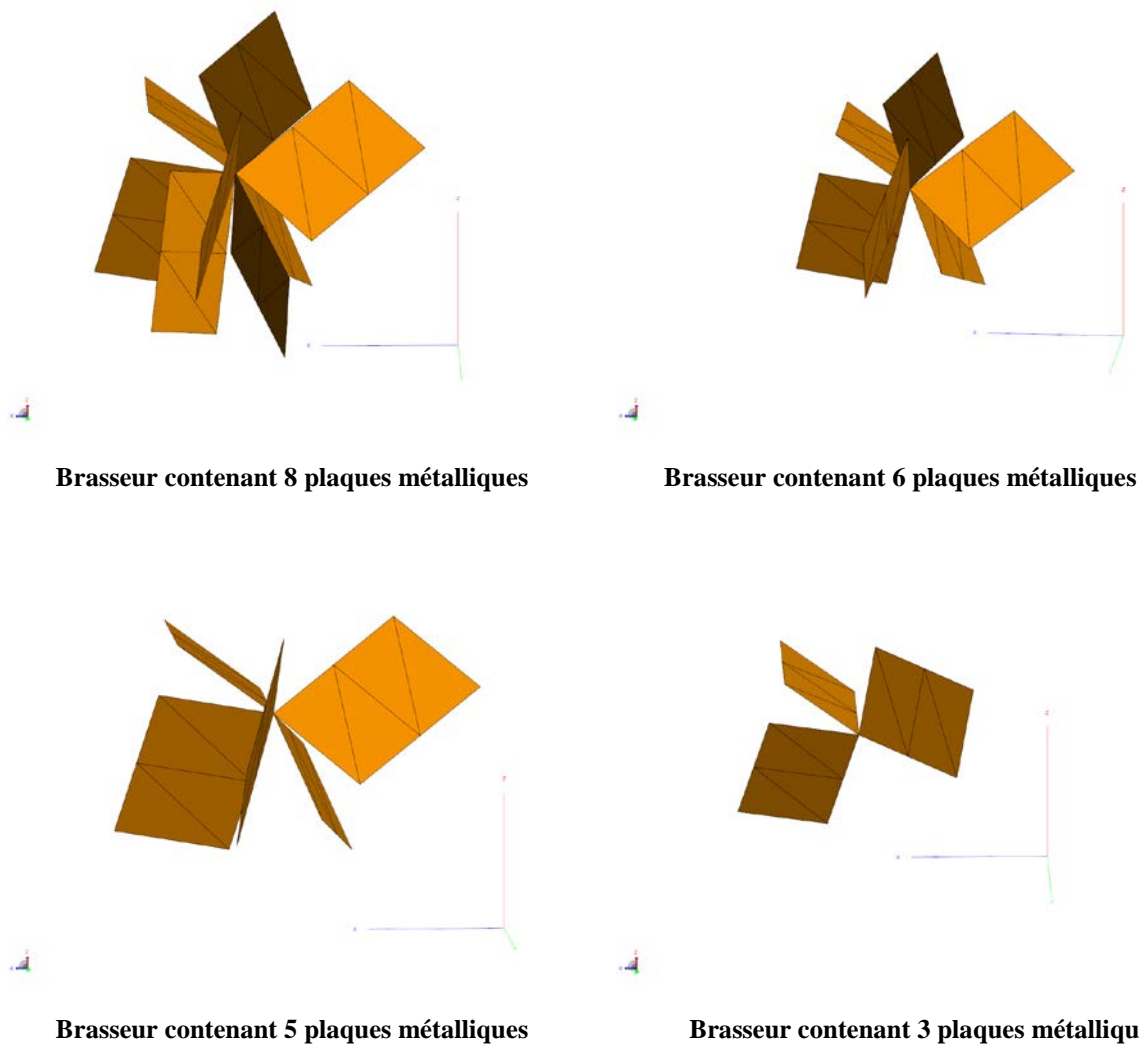


Figure 2-14 : Modélisation FEKO des différents brasseurs étudiés

La Figure 2-15 présente le décalage fréquentiel moyen obtenu sur 50 positions de brasseur pour les 3 premiers modes de la cavité.

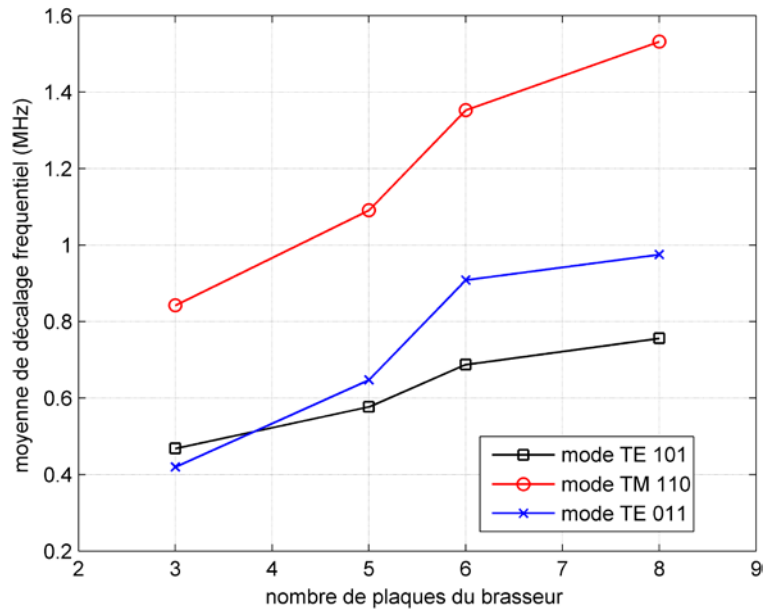


Figure 2-15 : Décalage fréquentiel moyen obtenu en fonction du nombre de plaques du brasseur pour les modes TE_{101} , TE_{011} et TM_{110}

De la même façon que lorsqu'on augmente le volume brassé, le décalage fréquentiel moyen est relativement proportionnel au nombre de plaques d'un brasseur. Ainsi, la qualité du brassage de modes s'en trouve améliorée.

2.4.1.2 Etude à plus hautes fréquences

Après avoir étudié les modes fondamentaux fortement isolés en fréquence les uns des autres, nous choisissons d'étudier les modes de cavité sur une bande de fréquences où de nombreux modes interviennent afin d'observer l'effet du recouvrement de modes. Nous avons ainsi choisi d'extraire le mode TE_{221} dont la fréquence de résonance théorique est égale à 155,7 MHz. En effet, théoriquement, 4 modes de cavité sont susceptibles d'intervenir entre 155 et 157 MHz.

Sur la Figure 2-16, nous avons tracé le module du poids du mode obtenu dans une cavité sans brasseur et avec un brasseur de taille T_1 pour 50 positions de celui-ci.

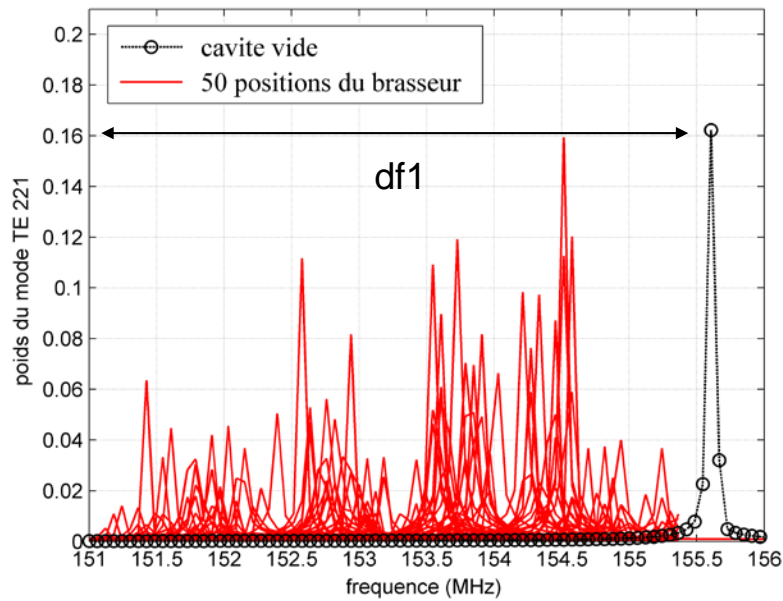


Figure 2-16 : Module du poids du mode TE_{221} dans la cavité avec brasseur de taille T_1 (50 positions) et sans brasseur

De façon logique, les conclusions relevées sur les modes fondamentaux restent valides. Cependant, contrairement à ces modes fondamentaux, le module du poids du mode présente plusieurs maxima à des fréquences différentes. Pour illustrer cette remarque, le poids du mode TE_{221} est tracé sur la Figure 2-17 pour une seule position du brasseur de modes :

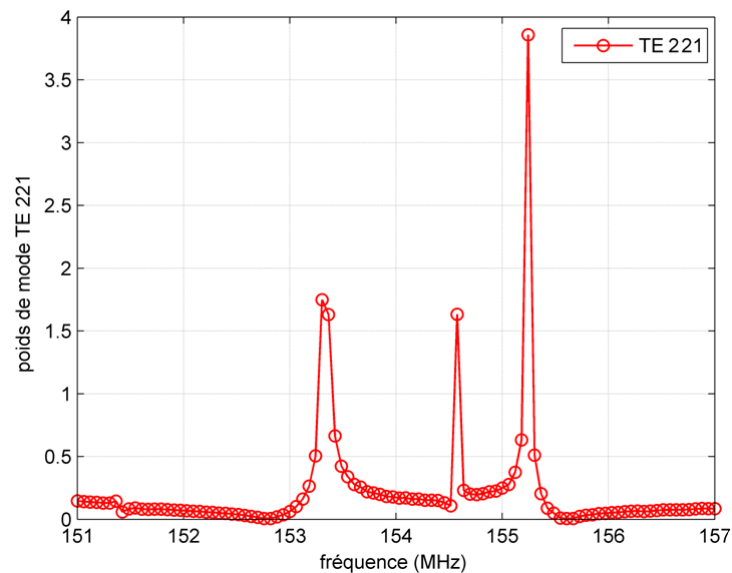


Figure 2-17 : Poids du mode TE_{221} calculé pour une position du brasseur de modes

Ce phénomène augmente donc d'autant l'efficacité de brassage, un même mode pouvant être excité sur une bande de fréquences beaucoup plus large.

Nous formulons l'hypothèse que le module d'un mode présente un maximum lorsqu'un mode voisin est excité. Ceci expliquerait le fait que le module du poids du mode présente

plusieurs maxima pour une position de brasseur donnée. Afin de confirmer cette hypothèse, nous visualisons sur la Figure 2-18 le module du poids de tous les modes TE excités autour de la fréquence de 154,55 MHz.

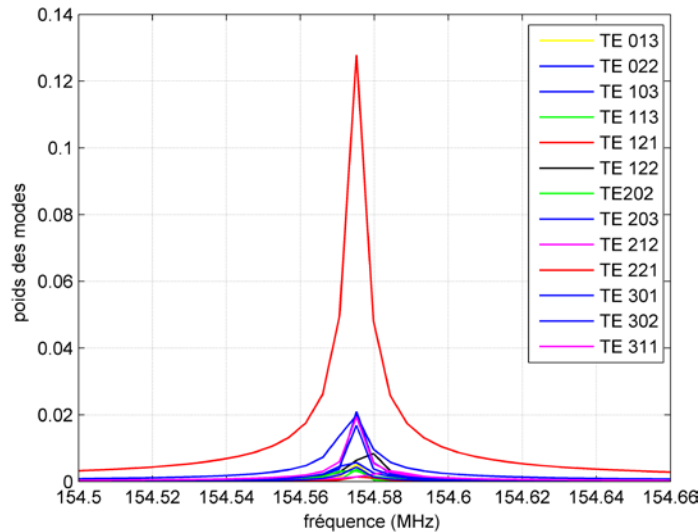


Figure 2-18 : Modules du poids des modes TE pour une position du brasseur après vector fitting

Ces résultats confirment l’hypothèse formulée précédemment. En effet, à la fréquence de 154,5 MHz, plusieurs modes sont excités simultanément.

Nous étudions ensuite le poids du mode TE₂₂₁ étudié précédemment pour un brasseur de même forme mais de plus petite taille ($0,8 \cdot T_1$) que le brasseur précédent. La Figure 2-19 présente le module du poids obtenu pour les 50 positions de brasseur.

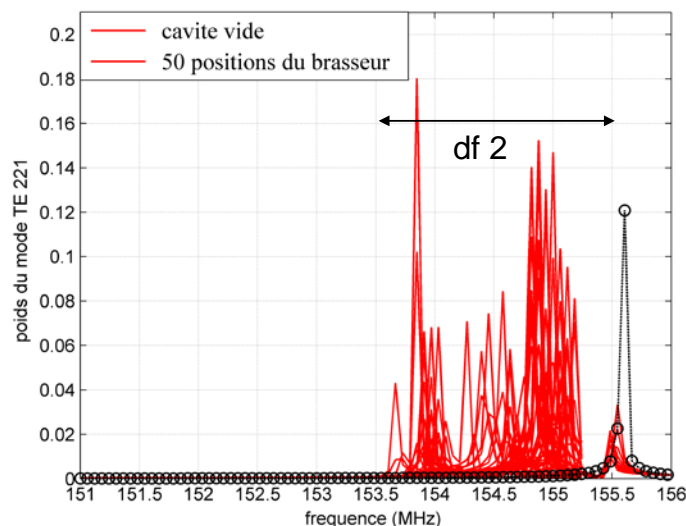


Figure 2-19 : Module du poids du mode TE₂₂₁ dans une cavité avec brasseur de taille $0,8 \cdot T_1$ (50 positions) et sans brasseur

La bande de fréquences où un mode est susceptible d’être excité augmente donc avec la taille du brasseur.

2.4.2 Influence du coefficient de qualité

Pour montrer l'influence du facteur de qualité d'une CRBM sur le poids des modes de cavité, nous choisissons de faire varier la conductivité des parois de la CRBM lors de la simulation FEKO. Dans le paragraphe précédent correspondant à notre cas de référence, les parois étaient considérées comme infiniment conductrices (et où les seules pertes du système provenaient de l'antenne d'émission chargée sur 50Ω). Plusieurs conductivités de paroi ont été considérées dans cette partie : $\sigma_1=59.6 \cdot 10^6$ S/m (conductivité du cuivre à 20°C); $\sigma_2=59.6 \cdot 10^5$ S/m ; $\sigma_3=59.6 \cdot 10^4$ S/m ; $\sigma_4=59.6 \cdot 10^3$ S/m et $\sigma_5=59.6 \cdot 10^2$ S/m.

Les figures 2-19, 2-20 et 2-21 présentent respectivement les poids des modes TE_{101} ($f_{\text{théorique}}=65,8$ MHz), TE_{011} ($f_{\text{théorique}}=78,1$ MHz) et TE_{221} ($f_{\text{théorique}}=155,7$ MHz) pour une position du brasseur en fonction de la conductivité des parois de la CRBM.

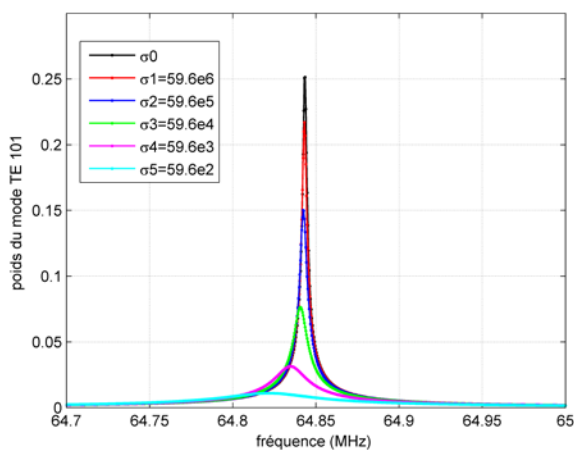


Figure 2-20 : Poids du mode TE_{101} pour une position du brasseur donnée en fonction de la conductivité des parois

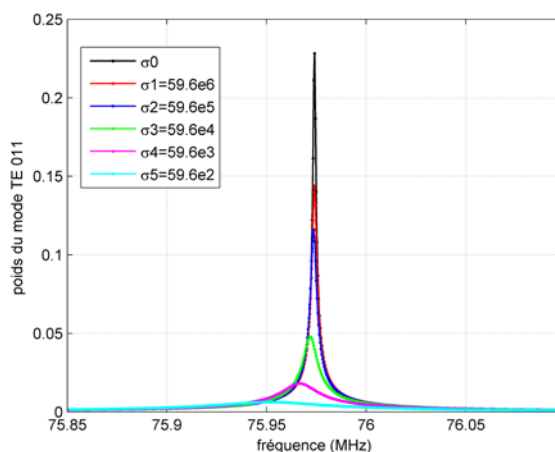


Figure 2-21 : Poids du mode TE_{011} pour une position du brasseur donnée en fonction de la conductivité des parois

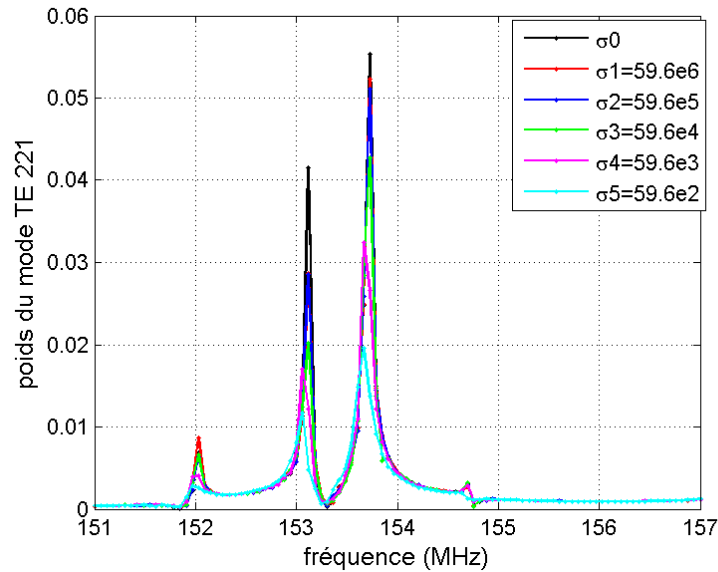


Figure 2-22 : Poids du mode TE₂₂₁ pour une position du brasseur en fonction de la conductivité des parois

La baisse du facteur de qualité d'une CRBM se traduit par l'atténuation de chaque maximum. Ainsi, plus le coefficient de qualité est faible, plus le module du poids diminue. De plus, il est à noter qu'il n'y a pas de décalage en fréquence de chaque maximum lors de l'ajout de pertes dans la CRBM. Il est donc possible d'en conclure que les fréquences où les modes sont excités prioritairement ne dépendent que de la géométrie de la cavité et du brasseur, ceci expliquant pourquoi ces fréquences sont différentes pour chaque position du brasseur.

En revanche, contrairement à une idée relativement répandue, la baisse du coefficient de qualité ne se traduit pas par un élargissement fréquentiel du poids du mode. C'est-à-dire que si les conditions géométriques ne sont pas réunies pour que le mode soit présent à une fréquence lorsque le coefficient de qualité est élevé, il n'y a pas de raison pour que ces conditions soient réunies pour un coefficient de qualité plus faible.

Pour aller plus loin, la Figure 2-23 présente le module du poids du mode fondamental TE₁₀₁ pour 50 positions du brasseur de modes et pour les différentes conductivités étudiées.

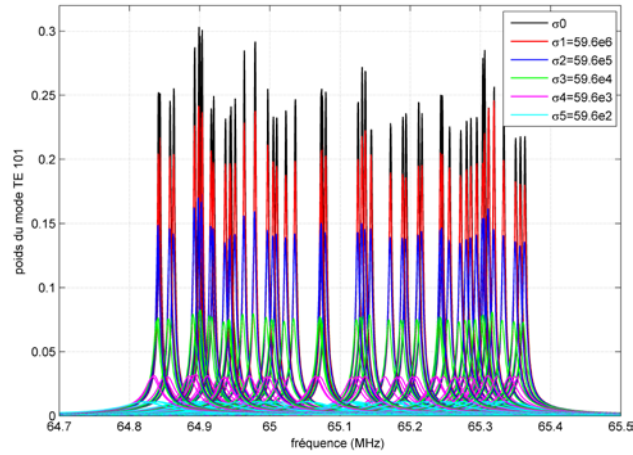


Figure 2-23 : Module du poids du mode TE₁₀₁ pour 50 positions de brasseur en fonction de la conductivité des parois

Cette figure présente un autre résultat remarquable : le poids maximum du mode tend à s’uniformiser lorsque les pertes dues aux parois augmentent. En effet, alors que de fortes disparités sont présentes dans le cas où la conductivité des parois est infinie, ces différences sont gommées avec la diminution de la conductivité des parois. Pour mieux illustrer ce phénomène, les figures 2-23 et 2-24 présentent le poids du mode pour 50 positions de brasseur pour la plus haute et la plus basse des valeurs de conductivité.

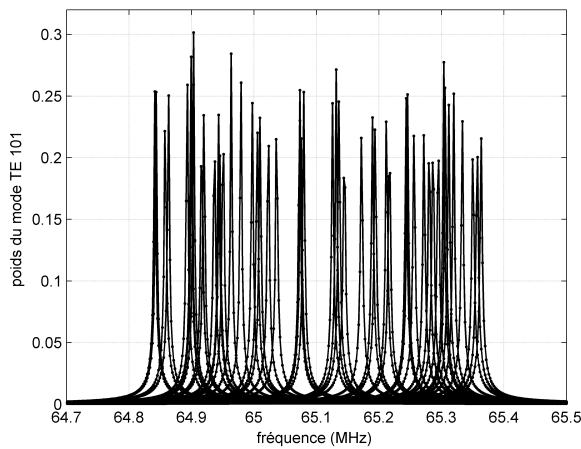


Figure 2-24 : Module du poids du mode TE₁₀₁ pour 50 positions du brasseur pour une conductivité infinie des parois de la CRBM

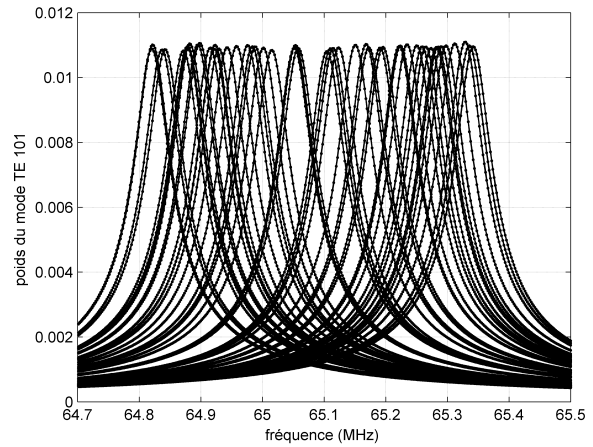


Figure 2-25 : Module du poids du mode TE₁₀₁ pour 50 positions du brasseur pour une conductivité $\sigma=59.6 \cdot 10^2$ S/m des parois de la CRBM

Ci-dessous, nous émettons quelques hypothèses permettant d’expliquer ce résultat. L’amplitude maximale des poids de modes est due aux pertes totales dans la chambre. Ainsi, pour une conductivité des parois faibles, les pertes de la CRBM sont majoritairement dues aux pertes métalliques dans les parois. Ces pertes varient peu d’une fréquence à une autre et il est donc logique que le poids maximum du mode tende à s’uniformiser même si le mode apparaît

à des fréquences différentes. En revanche, pour de fortes valeurs de conductivité, les pertes dans la chambre proviennent majoritairement de l'antenne d'émission. Ainsi, il est possible que d'une fréquence à une autre, les caractéristiques de l'antenne d'émission changent. Notamment son coefficient de réflexion varie de façon plus importante du fait de la rotation du brasseur placé dans son environnement proche. Ce phénomène expliquerait alors la variation du poids maximum obtenu dans ce cas pour chaque position de brasseur.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un programme d'extraction et de suivi du poids des modes excités au sein d'une CRBM. Ce programme nécessite le calcul du champ EM sur 2 plans de la chambre réverbérante par un code de calcul tridimensionnel résolvant les équations de Maxwell de façon « exacte ». Le programme a été validé à partir de la reconstruction du champ EM en affectant à chaque mode de cavité le poids de mode correspondant.

L'influence de la géométrie du brasseur de modes et du coefficient de qualité de l'enceinte sur l'établissement des modes au sein de la CRBM a été successivement étudiée. Cette étude permet donc d'améliorer la compréhension physique des chambres réverbérantes aux basses fréquences. En particulier, ces résultats permettront d'émettre des hypothèses expliquant l'influence de la variation du facteur de qualité ou de la modification de la géométrie du brasseur de modes sur les caractéristiques intrinsèques d'une CRBM étudiée dans les chapitres suivants.

Chapitre 3. Influence de la quantité d’absorbants insérée sur les caractéristiques intrinsèques d’une CRBM

3.1 Introduction

Un raisonnement logique consiste à considérer qu’une CRBM qui aurait un coefficient de qualité infini ne pourrait fonctionner correctement. En effet, chaque mode TE ou TM de la cavité ne pourrait s’installer qu’à une fréquence particulière. Ainsi, en basse fréquence, le recouvrement des modes serait insuffisant pour obtenir un régime de champ désordonné et ce malgré la présence d’un brasseur de modes.

A l’inverse, une CRBM ayant un coefficient de qualité trop faible impliquerait qu’un des principaux avantages des CRBM serait perdu : il ne serait en effet plus possible d’obtenir des niveaux de champ EM forts à l’intérieur du volume utile pour des niveaux de puissances injectées raisonnables.

Logiquement, les remarques précédentes impliquent qu’il doit y avoir une valeur (ou une bande de valeurs) du coefficient de qualité qui permet d’optimiser le fonctionnement des CRBM. Ainsi, il serait donc possible de déterminer une « charge optimale » ou une « quantité optimale d’absorbants » pour chaque CRBM.

L’objectif de ce chapitre est donc d’étudier les modifications engendrées par diverses quantités d’absorbants sur les caractéristiques intrinsèques d’une CRBM. En particulier, il s’agit d’étudier l’influence de la quantité d’absorbants sur l’uniformité du champ, la taille d’échantillon indépendant obtenu sur une révolution du brasseur de modes ou la comparaison des lois de distribution du champ EM obtenues en comparaison des lois de distribution prévues par le modèle idéal. Il s’agit ainsi de déterminer si la démarche consistant à travailler avec une CRBM vide de tout absorbant pour obtenir une enceinte ayant le facteur de qualité le plus élevé possible est pertinente.

Cette étude est ainsi réalisée à l’aide d’une campagne expérimentale effectuée dans la CRBM du laboratoire XLIM puis à l’aide de simulations numériques obtenues grâce au code FDTD TEMSI-FD développé au laboratoire.

L’objectif de cette étude est de déterminer les paramètres qui réagissent au changement de facteur de qualité de la CRBM par l’insertion des absorbants.

3.2 Etat de l'art sur l'effet des absorbants en CRBM

L'effet de l'insertion des absorbants dans une CRBM a déjà été étudié dans de nombreuses publications.

Le premier résultat évident concerne la réduction du facteur de qualité de la CRBM [29] observée lors de l'insertion de dispositifs absorbants.

En ce qui concerne l'uniformité du champ EM mesurée dans le volume utile, des résultats contradictoires peuvent être trouvés dans la littérature. [30]-[31] présentent des résultats dégradés par la présence d'absorbants par rapport à une CRBM vide tandis que [32]-[33]-[34] mettent en évidence une réduction qualifiée de significative de l'écart-type du champ électrique.

Concernant les lois de distribution du champ EM obtenues dans le volume utile, un effet positif est présenté dans [33] pour une quantité raisonnable d'absorbants tandis qu'une dégradation des résultats est observée lors de l'augmentation de la quantité d'absorbants. Ces résultats sont présentés à partir de la réalisation de tests d'ajustements de type Kolmogorov-Smirnov ou Anderson-Darling effectués sur la puissance reçue par une antenne et sur le module des composantes du champ électrique mesurées par une sonde triaxiale. Les auteurs expliquent ces résultats positifs par l'augmentation de la densité de mode de la cavité impliqués par la réduction de facteur de qualité de la CRBM. En effet, chaque mode intervient dans une bande de fréquences plus large améliorant ainsi le recouvrement modal aux basses fréquences.

Cette explication est confirmée par [27] où une description modale théorique du champ EM dans une CRBM conduit à la définition d'un « facteur de qualité maximum » à ne pas dépasser afin d'obtenir une distribution du champ EM convergeant au mieux vers les lois de distribution proposées par le modèle idéal [35]. Ainsi, ce papier rejette l'idée communément admise que le coefficient de qualité d'une CRBM doit être aussi élevé que possible.

Enfin, des publications récentes [15]-[36] montrent, à partir de résultats de mesures, que le nombre d'échantillons non corrélés obtenus sur un tour de brasseur diminue lors de l'introduction d'absorbants par rapport au cas d'une CRBM vidée de tout absorbant.

Pour conclure cet état de l'art, il est important de préciser que les quantités d'absorbants considérées dans les différentes publications ayant trait à ce sujet sont généralement relativement importantes : il s'agit souvent de blocs d'absorbants de taille importante. A notre

connaissance, l’effet d’absorbants dégradant très peu le facteur de qualité de l’enceinte n’a pas été jusqu’alors étudié en détail.

3.3 Résultats expérimentaux

3.3.1 Description de la configuration de mesure

Les mesures sont effectuées dans la CRBM de XLIM dont les caractéristiques géométriques ont été présentées au cours du premier chapitre. Ces mesures ont été effectuées dans la bande de fréquence 200 MHz -1 GHz avec un pas fréquentiel linéaire de 25 MHz (correspondant à 33 points de fréquence).

Une antenne log-périodique (modèle ETS-Lindgren 3148) a été utilisée comme antenne d’émission. Cette antenne située dans un coin de la CRBM est orientée vers le brasseur de modes afin de limiter autant que possible les trajets directs du champ EM entre l’antenne et le volume utile considéré. La position de l’antenne d’émission n’a pas été changée entre toutes les configurations de charge.

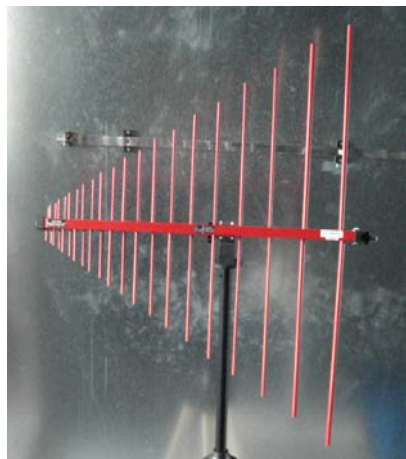


Figure 3-1 : Antenne log périodique du laboratoire XLIM

Chaque composante rectangulaire (E_x , E_y , E_z) du champ électrique a été mesurée avec une sonde de champ triaxial (PMM EP-600) sur les 8 points définissant le volume de test (1m^3) et pour 50 positions du brasseur de modes (correspondant donc à une rotation de $7,2^\circ$ entre deux positions successives). Chaque point est situé à une distance supérieure à 42 cm ($\lambda / 4$ à 178 MHz) des parois et est séparé des autres par une distance au moins égale à 1 m ($\lambda / 2$ à 150 MHz) dans le but de travailler avec des échantillons faiblement corrélés [18].

Pour la mesure du facteur de qualité moyen $\langle Q \rangle$ pour chaque quantité d’absorbants insérée, une seconde antenne log-périodique identique à la première a été ajoutée dans le volume de test de la CRBM pour pouvoir mesurer les paramètres S entre ces 2 antennes.

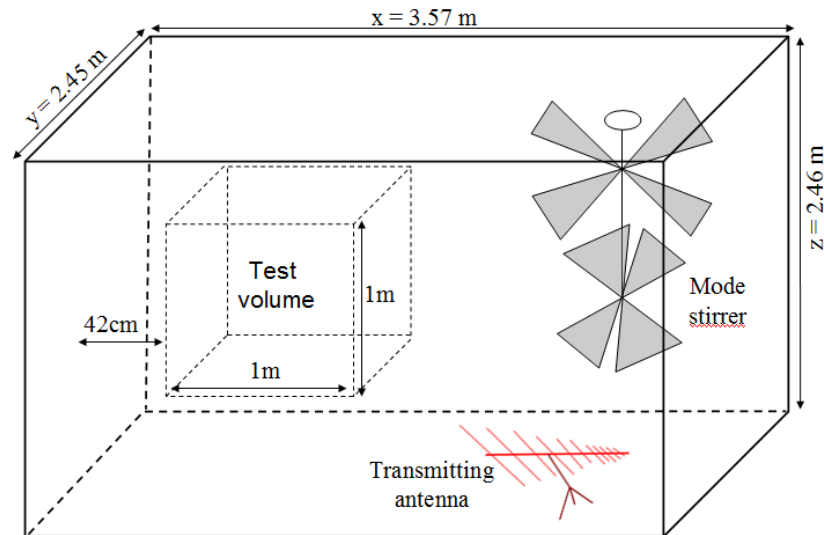


Figure 3-2: Description de la configuration de mesure pour la cavité sans absorbant

La mesure de référence correspond au cas de la cavité vidée de tout absorbant. Ensuite, les mesures ont été effectuées avec respectivement 1 et 4 blocs d’absorbants présentés sur la Figure 3-4. Chaque bloc d’absorbant comprend 36 pyramides absorbantes (36 PA), chaque pyramide ayant une surface au sol carrée de 10 cm de côté et une hauteur de 30 cm. Ainsi, chaque bloc a une surface au sol carrée de 60 cm de côté. De plus, pour disposer de quantités d’absorbants plus faibles permettant d’observer une variation lente du coefficient de qualité global de l’enceinte d’une configuration de charge à une autre, un bloc d’absorbants a été découpé afin d’insérer respectivement 3, 6, 9 et enfin 12 pyramides absorbantes.

Il est enfin à préciser que les absorbants sont placés sous le brasseur de modes afin qu’ils soient le plus éloigné possible du volume de test (Figure 3-3).

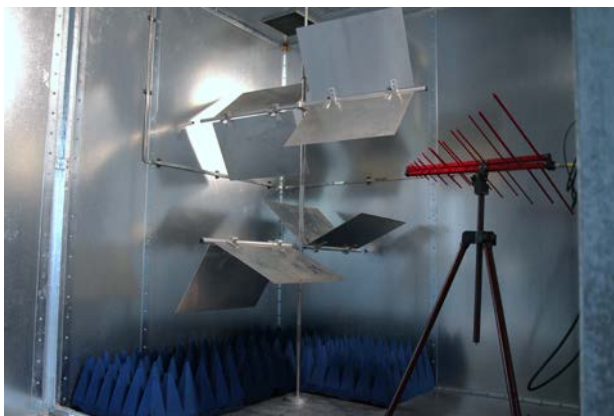


Figure 3-3: Photographie de la configuration de mesure incluant les absorbants disposés sous le brasseur

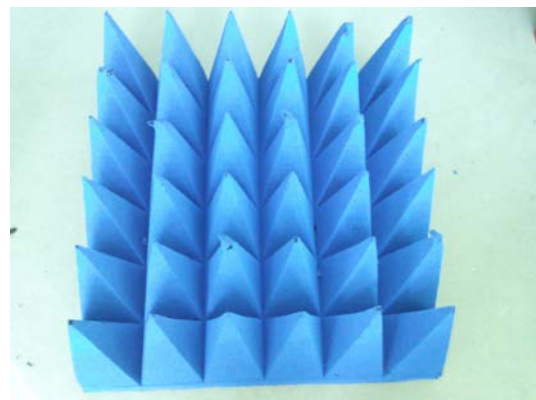


Figure 3-4 : Photographie d’un bloc d’absorbant constitué de 36 pyramides absorbantes

Nous présentons donc dans les sous-sections suivantes les principaux résultats obtenus.

3.3.2 Présentation des différents facteurs de qualité obtenus

Le facteur de qualité a été calculé pour chaque quantité d’absorbant selon la méthode présentée au chapitre 1. La Figure 3-5 présente les résultats obtenus.

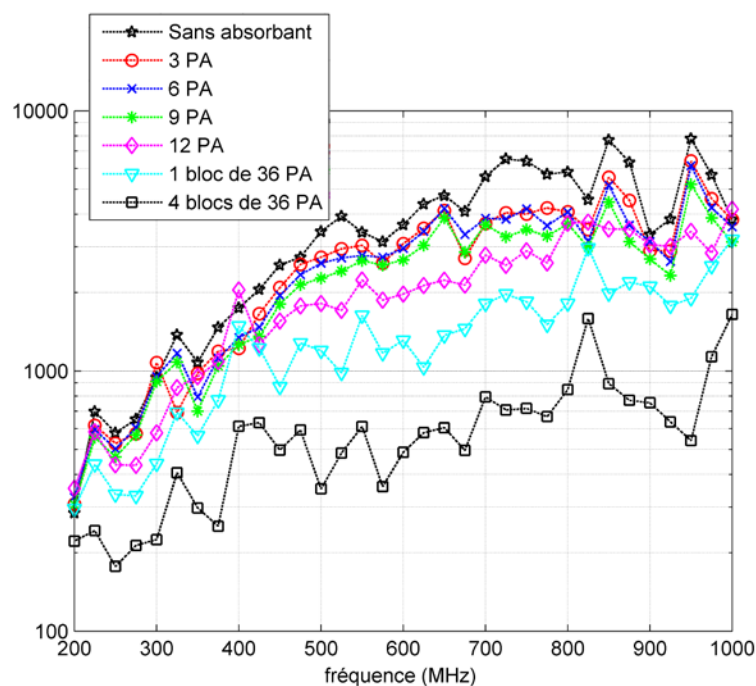


Figure 3-5 : Facteur de qualité moyen obtenu en fonction de la quantité d’absorbants insérée dans la CRBM

La Figure 3-5 montre évidemment que le facteur de qualité moyen diminue progressivement avec l’augmentation de la quantité d’absorbants. Le point important est que la diminution du coefficient de qualité est relativement lente pour les faibles quantités d’absorbants insérées. Par exemple, la diminution du facteur de qualité mesuré pour des charges de 3 pyramides absorbantes, 1 bloc et 4 blocs d’absorbants par rapport au cas de la CRBM vide est d’environ 20%, 60% et 85% (il s’agit d’une valeur moyenne approchée, les différences pouvant être importantes d’une fréquence à une autre). Il est également possible de conclure qu’une quantité de charge allant jusqu’à 12 pyramides absorbantes ne diminue pas de façon rédhibitoire pour une CRBM le coefficient de qualité, Q étant de l’ordre de 4000 à 1 GHz pour cette quantité de charge. Pour des quantités plus importantes d’absorbants (1 et 4 blocs), la diminution du facteur de qualité Q est beaucoup plus nette. On peut considérer qu’il sera très délicat d’obtenir des niveaux de champ EM très forts pour ces quantités de charge à moins de disposer d’une source de puissance très importante.

3.3.3 Evaluation du nombre d’échantillons indépendants sur un tour de brasseur

La Figure 3-6 présente la valeur du coefficient d’autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ défini au cours du premier chapitre pour les différentes quantités de charge étudiées.

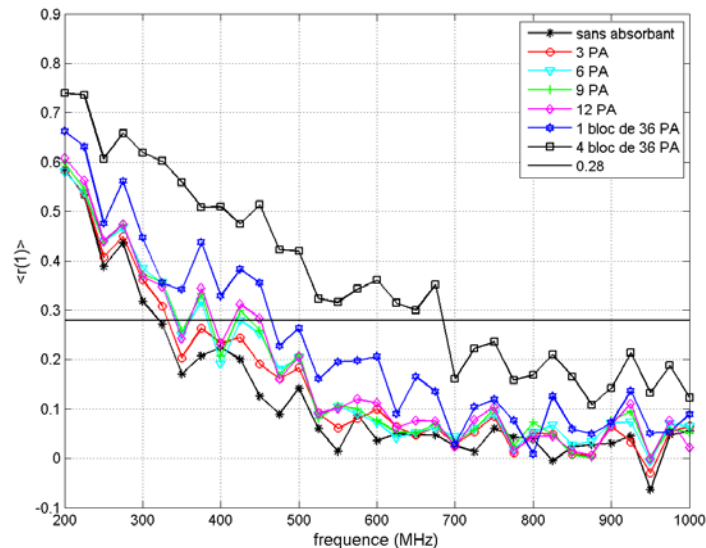


Figure 3-6 : Coefficient d’autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction de la quantité de charge insérée dans la CRBM.

Il apparaît clairement que le coefficient d’autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ augmente lorsque la quantité d’absorbants insérée augmente aussi. Ainsi, le cas correspondant au nombre maximum d’échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur correspond à la CRBM vidée de tout absorbant, ce qui est en accord avec les résultats trouvés dans la littérature. Toutefois, pour des quantités faibles d’absorbants (jusqu’à 12 pyramides absorbantes), l’augmentation de la corrélation reste relativement faible. Ainsi, la valeur limite de 0,28 est atteinte à 325 MHz et 450 MHz, respectivement, pour la CRBM vidée et la CRBM chargée par 12 pyramides absorbantes. En revanche, pour de fortes valeurs de charges (1 et 4 blocs absorbants), la corrélation entre les échantillons est fortement augmentée, la limite de 0,28 étant atteinte à 675 MHz pour 4 blocs absorbants.

3.3.4 Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling

Comme nous l’avons vu au chapitre 1, le modèle idéal de Hill indique que le module des composantes rectangulaires du champ électrique suit une distribution de Rayleigh. Conformément à la démarche présentée au chapitre 1, le taux de rejet de la loi de Rayleigh obtenu par le test d’ajustement d’Anderson-Darling (AD) a été calculé pour 24 tests (8 points

de relevés de champ * 3 composantes) comprenant 50 échantillons (correspondant au nombre de positions de brasseur considérées).

Les tests d'ajustement ont été réalisés pour un niveau de confiance de 95% équivalent à un seuil de risque de 5%. Il s'agit du seuil généralement utilisé pour des tests statistiques en CRBM car il correspond à un bon compromis pour l’obtention de taux de rejet significatifs [16].

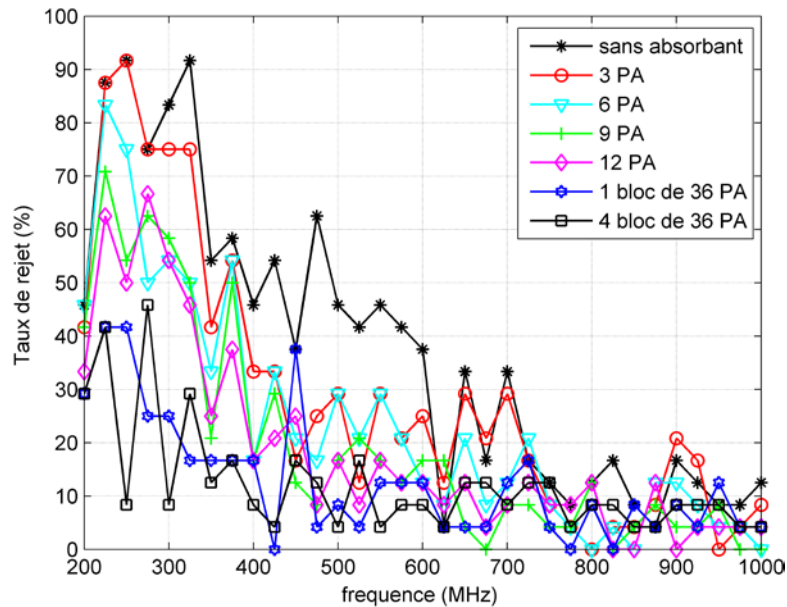


Figure 3-7 : Taux de rejet du test d’Anderson-Darling en fonction de la quantité d’absorbants insérée dans la CRBM

Les résultats obtenus démontrent clairement que l'insertion d'absorbants améliore spectaculairement les statistiques du champ EM obtenues dans le volume utile en comparaison de la CRBM sans absorbant, confirmant les résultats présentés dans [33]. Plus intéressant encore, ceux-ci démontrent qu’une faible quantité d’absorbants est suffisante pour réduire de manière significative le taux de rejet des tests AD. Par exemple, un taux de rejet inférieur à 40% est atteint à 600 MHz pour la CRBM vide, à 400 MHz pour 3 pyramides absorbantes et à 250 MHz pour 1 bloc de PA. Les résultats obtenus montrent également que les conditions de charge les plus favorables permettant de diminuer les taux de rejet correspondent aux charges les plus fortes, les résultats obtenus pour 1 et 4 bloc d’absorbants étant relativement similaires.

Afin de confirmer les résultats précédents tout en évitant les pertes d'informations liées au résultat binaire du test AD, la moyenne de la caractéristique A_m^2 du test AD obtenues pour les 24 tests a été calculée et comparée sur la Figure 3-8 pour chaque configuration de charge.

Ces résultats, comparés à la valeur critique appropriée égale à 1,341 (Chapitre 1), permettent de confirmer les conclusions tirées de l’étude du taux de rejet.

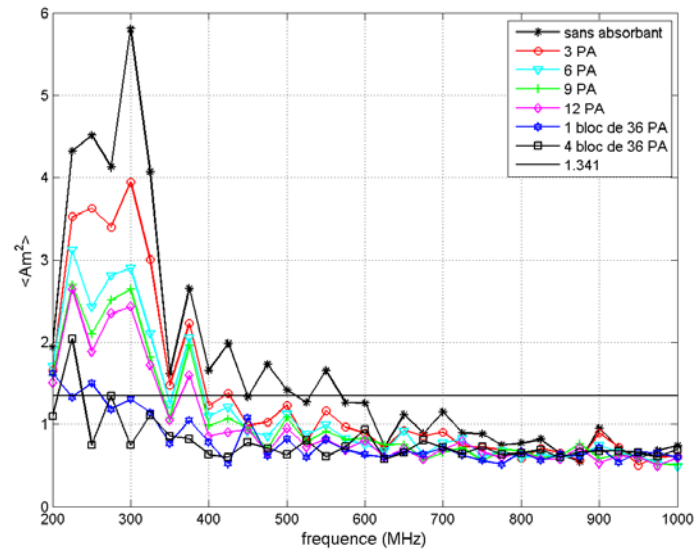


Figure 3-8 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d’Anderson-Darling obtenue en fonction de la quantité d’absorbants insérée dans la CRBM

Il est toutefois intéressant de noter qu’à partir d’une fréquence située autour de 700 ou 800 MHz, les résultats obtenus pour chaque configuration de charge sont comparables.

3.3.5 Evaluation de l’uniformité du champ EM

L’écart-type du champ électrique a également été calculé (Figure 3-9) pour chaque configuration de charge en fonction de la procédure proposée par la norme 61000-4-21.

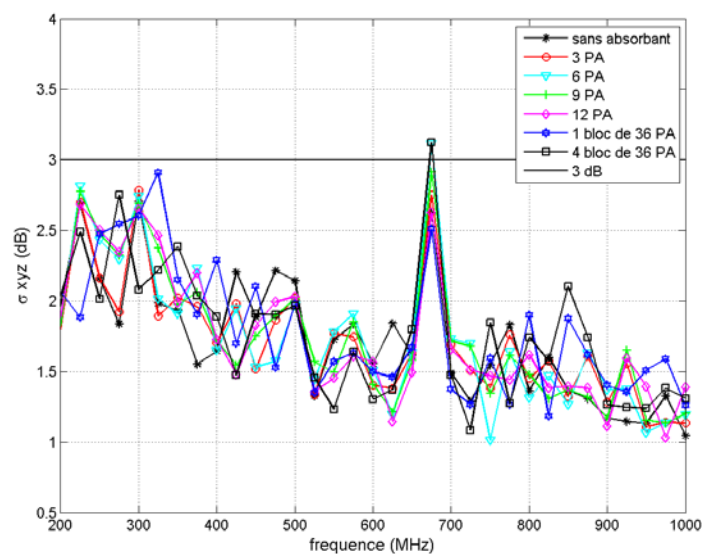


Figure 3-9 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction de la quantité d’absorbants insérée dans la CRBM

Il apparaît clairement que l'écart-type obtenu sur les maxima du champ électrique obtenus sur un tour de brasseur n'est pas significativement modifié par l'ajout d'absorbants, et ce quelle que soit la quantité d'absorbants insérée dans la CRBM. Cet indicateur ne rend donc compte des profondes modifications du comportement de la chambre engendrées par une modification de son facteur de qualité. Ces résultats confirment les résultats présentés dans [37] où l'écart-type du champ électrique était comparé en simulation numérique entre une CRBM et différents hangars de même dimension comportant des ouvertures.

La Figure 3-9 met également en évidence que l'écart-type obtenu à la fréquence de 675 MHz est largement supérieur aux valeurs obtenues aux autres fréquences, et ce quelle que soit la configuration de charge. Après vérification des données mesurées, il apparaît que pour chaque configuration de mesure, la valeur maximale obtenue sur une rotation de brasseur pour l'un des points de mesure de champ sort très nettement du lot par rapport aux valeurs maximales obtenues sur les autres points. Ceci pointe une faiblesse de cet observable : il est extrêmement dépendant des valeurs extrêmes du champ EM qui posent parfois problème en CRBM.

3.4 Résultats numériques

Afin de compléter les résultats de mesure obtenus précédemment et de permettre de confirmer les principales conclusions de l'étude expérimentale, une campagne de simulations numériques a été réalisée afin de quantifier en simulation l'influence des pertes sur les caractéristiques intrinsèques d'une CRBM.

3.4.1 Choix de la méthode de modélisation

La modélisation d'une CRBM n'est pas chose aisée principalement à cause du fait que le système à modéliser présente de faibles pertes et est de grande taille par rapport à la longueur d'onde. De plus, la simulation est à répéter autant de fois qu'il y a de positions de brasseur à considérer. Ainsi, et si on reste dans le cadre de méthodes de simulation 3D « exactes » ou « full wave », 2 options ayant chacune leurs inconvénients sont envisageables.

L'utilisation de la méthode des moments (logiciels NEC, FEKO, ...) résolvant les équations de Maxwell est la première solution. Cependant, compte tenu de la taille du système, la fréquence maximale envisageable est très limitée. Pour augmenter cette fréquence maximale, il est possible d'utiliser la méthode des multipôles rapides multi-niveau (MLFMM en anglais pour Multi-Level Fast Multipole Method). Malheureusement, le calcul itératif inhérent à cette méthode converge mal dans le cas d'enceintes fermées et il n'est guère

envisageable de modéliser une CRBM à des fréquences supérieures à quelques multiples de f_0 , f_0 étant la fréquence du premier mode de résonance de la cavité.

La deuxième solution consiste à réaliser des simulations à l’aide de la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD : Finite Difference Time Domain). Cependant, dans le cas d’enceintes fermées à faible perte, l’atténuation du champ très lente nécessite un nombre déraisonnable d’itérations temporelles avant que le champ ne s’annule dans la CRBM (et ainsi que la transformée de Fourier permettant d’obtenir des résultats fréquentiels puisse être correctement effectuée).

Compte tenu de tous ces éléments, nous avons choisi d’appliquer une méthode permettant d’intégrer des pertes « a posteriori » à partir d’une simulation FDTD sans pertes [24]. Cette méthode est présentée dans le paragraphe suivant.

3.4.2 Principe de la méthode de modélisation de la CRBM

Comme évoqué précédemment, la méthode retenue requiert 2 étapes. Dans une première étape, la CRBM est modélisée pendant un temps T_{max} suffisamment long mais tout de même trop court pour observer une annulation du champ à l’intérieur de l’enceinte. Un exemple correspondant à l’évolution temporelle du champ électrique E_x obtenu sur un point d’observation placé à l’intérieur de la chambre est présenté sur la Figure 3-10.

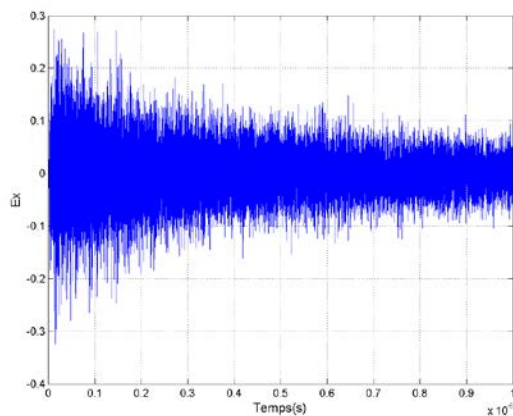


Figure 3-10 : Evolution temporelle de la composante E_x du champ électrique calculée en un point d’observation et pour une position du brasseur de modes.

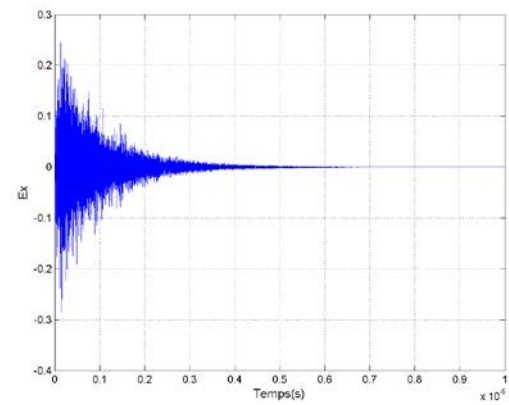


Figure 3-11 : Evolution temporelle de la même composante E_x du champ électrique obtenue après application du filtrage temporel.

Dans la seconde étape, nous appliquons aux résultats obtenus dans le cas de la cavité sans pertes une fonction d’atténuation $g_Q(t)$ de la façon suivante :

$$E(t) \approx \text{rect}_{T_{\max}}(t) \cdot g_Q(t) \cdot V_s(t) \quad \text{Équation 3-1}$$

où :

- $V_s(t)$ correspond au signal temporel de sortie obtenu pour la cavité sans perte ;
- $\text{rect}_{T_{\max}}(t)$ est la fenêtre temporelle allant de 0 à T_{\max} ;
- $E(t)$ correspond au signal temporel de sortie obtenu pour la cavité avec perte ;
- $g_Q(t)$ est la fonction d’atténuation appliquée.

Une fonction d’atténuation $g_Q(t)$ est appliquée dans le but d’obtenir des réponses temporelles d’une chambre avec perte. Elle dépend du facteur de qualité de la chambre et de la fréquence de travail. Le fait que les pertes du système soient appliquées à posteriori est un avantage fondamental pour cette étude. En effet, pour chaque position du brasseur de modes, une seule simulation sans pertes est nécessaire. Il est donc ensuite possible d’étudier l’effet de plusieurs valeurs du paramètre a ($a=f_0/Q$ correspondant en mesures à différentes quantités d’absorbants) en post-traitement.

La fonction d’atténuation appliquée $g_Q(t)$ dépend du facteur de qualité que l’on veut appliquer à la CRBM à la fréquence f :

$$g_Q(t) = \frac{\pi f}{Q} e^{-\frac{\pi f}{Q} t} \quad \text{Équation 3-2}$$

L’allure temporelle du filtre de sortie est obtenue en faisant l’analogie, pour chaque fréquence, entre la CRBM et un circuit du second ordre de type RLC.

L’équation précédente nous permet de faire apparaître le paramètre $a=f_0/Q$, ce paramètre étant donc inversement proportionnel au coefficient de qualité.

$$g_Q(t) = \pi a e^{-\pi a t} \quad \text{Équation 3-3}$$

Ainsi, pour chaque simulation, nous avons décidé d’appliquer à chaque fréquence une valeur de a constante en renseignant la valeur du coefficient de qualité Q_{\min} à la fréquence minimale considérée f_{\min} . Dans ce cas, le coefficient de qualité considéré à chaque fréquence f est proportionnel à la fréquence:

$$Q_f = \frac{f \cdot Q_{f \min}}{f_{\min}} \quad \text{Équation 3-4}$$

Cette démarche est cohérente car le coefficient de qualité d’une CRBM augmente généralement lorsque la fréquence augmente.

La Figure 3-11 représente l’évolution temporelle du signal présenté sur la Figure 3-10 après application du filtrage temporel.

La réponse fréquentielle du signal atténué est ensuite calculée à l’aide d’une transformée de Fourier discrète (TFD) dont la définition mathématique est la suivante pour un signal s comprenant N échantillons:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-2i\pi k \frac{n}{N}} \quad \text{Équation 3-5}$$

La fréquence d’échantillonnage doit respecter la condition de Shannon. Cette condition exige une fréquence d’échantillonnage f_e supérieure à deux fois la fréquence maximale utilisée.

Le signal devant être revenu à zéro après application du filtrage pour avoir le droit d’effectuer une transformée de Fourier, le temps d’observation T_{\max} de la simulation sans pertes mènent donc à une valeur maximum du paramètre a . Si on désire prendre en compte des valeurs plus faibles de a (correspondant à des valeurs de coefficient de qualité plus élevées), il s’avère donc nécessaire d’augmenter T_{\max} .

La Figure 3-12 présente l’évolution fréquentielle du signal temporel atténué présenté sur la Figure 3-11.

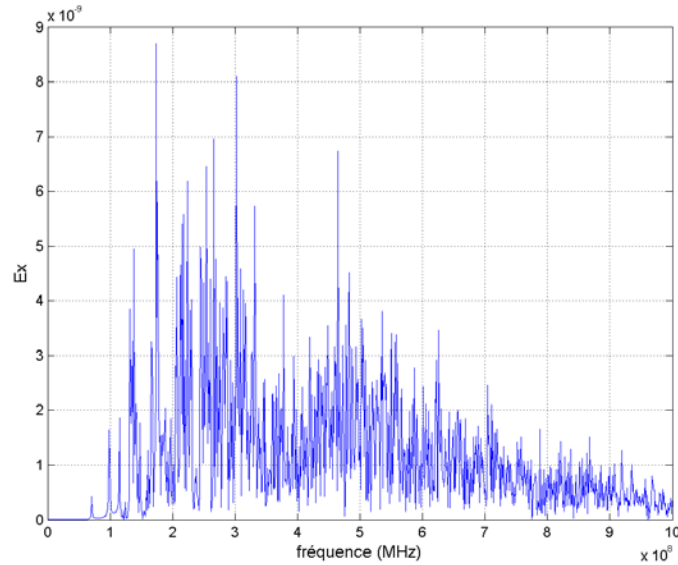


Figure 3-12 : Module de la même composante de champ E_x obtenu dans le domaine fréquentiel en un point d’observation et pour une position du brasseur de modes.

3.4.3 Description de la configuration de simulation

La structure modélisée contient 6 plaques parfaitement conductrices constituant l’enceinte de la CRBM, un brasseur de modes et une antenne d’émission.

Pour modéliser le volume de calcul (correspondant au volume de la CRBM), on définit un pas spatial suivant les trois directions d’un repère cartésien (Δ_x , Δ_y et Δ_z). Le pas spatial doit être choisi en fonction de la fréquence maximale souhaitée afin de limiter au maximum le nombre de mailles du système. En effet, le nombre de mailles influe directement sur le temps de calcul total. Nous avons également choisi le pas spatial ($\Delta_x = \Delta_y = \Delta_z = 2\text{cm}$) en prenant en compte la plus petite structure se trouvant dans la chambre.

La condition CFL (Courant-Friedrich-Levy) indique alors le pas temporel (Δ_t) optimal permettant d’éviter le risque de divergence des calculs.

$$\Delta_x = \Delta_y = \Delta_z = 2\text{cm} \Rightarrow \Delta_t \leq \frac{\Delta_x}{c\sqrt{3}} \Rightarrow \Delta_t \leq 3,84 \cdot 10^{-11}\text{s} \quad \text{Équation 3-6}$$

L’antenne d’émission choisie est, comme en mesures, une antenne log-périodique. Cette antenne directive et large-bande est constituée d’une succession de dipôles alimentés en opposition de phase (Figure 3-13).

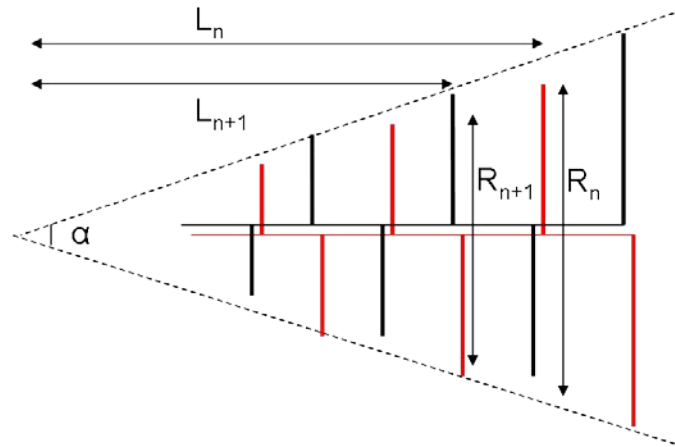


Figure 3-13 : Schéma simplifié d’une antenne log périodique

Dans une antenne log-périodique, les distances et les longueurs des dipôles sont dimensionnées suivant une progression géométrique de raison T :

$$T = (R_{n+1} / R_n) = (L_{n+1} / L_n) \quad \text{Équation 3-7}$$

La modélisation de l’antenne log-périodique (Figure 3-14) est faite dans TEMSI-FD avec quelques simplifications :

- le rayon des brins est considéré comme constant et identique pour tous les brins ;
- une ligne de transmission alimente les différents brins ;
- la modélisation des fils avec TEMSI-FD nécessite un pas temporel plus faible que celui imposé par la méthode des différences finies, et ce particulièrement pour les brins les plus courts. Ceux-ci ont donc été enlevés par rapport à l’antenne réelle présentée sur la Figure 3-1. Cette modification limite la bande passante de l’antenne en hautes fréquences. Ceci n’est pas un problème car seules les basses et les moyennes fréquences ($f_{\max} < 1$ GHz) nous intéressent.

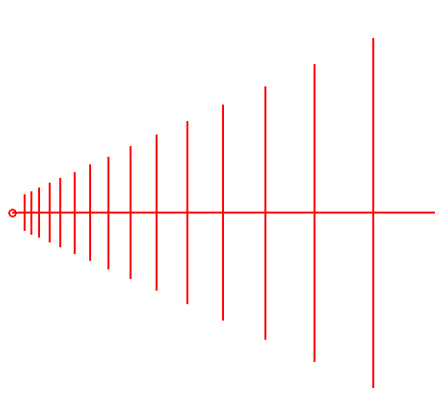


Figure 3-14 : Antenne log-périodique modélisée avec TEMSI-FD

L'antenne est ensuite alimentée par un générateur de tension d'impédance interne 50Ω . Pour définir la fonction temporelle d'excitation avec le solveur TEMSI-FD [38], nous utilisons la fonction gaussienne définie dans l'équation ci-dessous offrant une réponse entre le continu et une fréquence maximale donnée :

$$e(t) = A_0 e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \quad \text{Équation 3-8}$$

La transformée de fourrier de ce signal donne :

$$e(f) = A_0 T \sqrt{\pi} e^{-(\pi f T)^2} e^{-j2\pi f t_0} \quad \text{Équation 3-9}$$

où A_0 est l'amplitude, t_0 est le retard par rapport à l'origine des temps et T est la largeur de l'impulsion à mi-hauteur.

Le brasseur de modes modélisé dans cette étude correspond au brasseur de modes de la CRBM de XLIM. Il s'agit donc de 8 plaques de dimensions $60*40$ cm. Les plaques du brasseur sont maillées en marche d'escalier [24] suivant les trois axes de l'espace cartésien. Chaque position du brasseur est maillée séparément à l'aide du mailleur du logiciel TEMSI-FD.

Les données de sortie correspondent aux composantes rectangulaires du champ électrique calculées sur les 8 points délimitant un volume utile de 1 m^3 .

Il faut enfin préciser que la simulation est effectuée pour 50 positions du brasseur de modes, ce qui correspond à une rotation de $7,2^\circ$ entre 2 positions successives.

Pour résumer, la Figure 3-15 présente l'organigramme d'une simulation numérique correspondant à une position du brasseur de modes. A chaque nouvelle position du brasseur, la discrétisation du brasseur et son intégration dans le code principal doivent être refaites, toutes les autres parties du fichier de données FDTD restant inchangées.

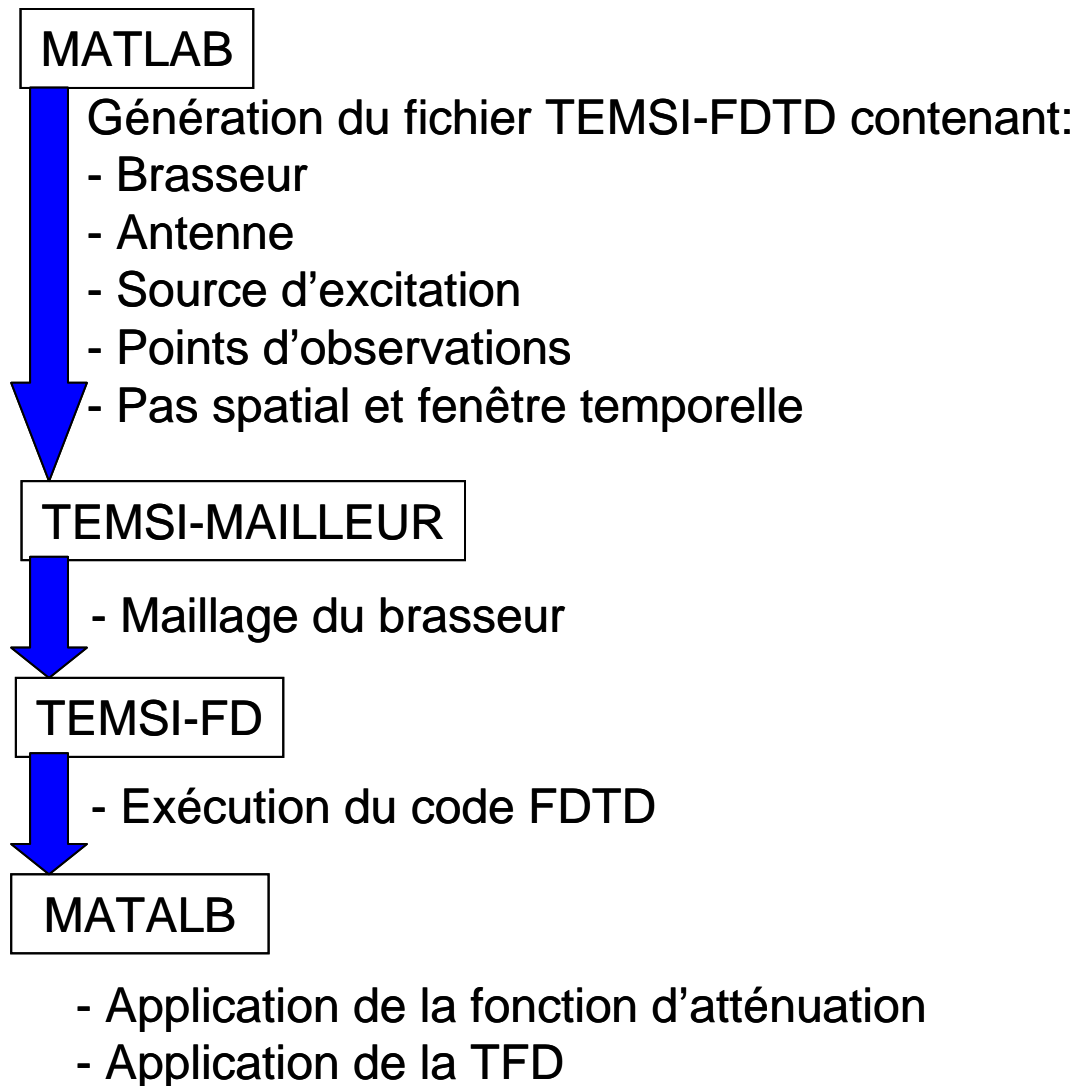


Figure 3-15 : Organigramme de la modélisation de la chambre pour chaque position du brasseur de modes

3.4.4 Résultats obtenus

3.4.4.1 Présentation des différents facteurs de qualité considérés

Pour étudier, en simulation, l'influence des pertes sur la CRBM, 5 valeurs différentes du paramètre a ont été prises en compte dans le processus de post-traitement dans la bande de fréquences 200 MHz - 1 GHz. La Figure 3-16 présente donc les variations en fréquence du coefficient de qualité pour chaque valeur de a .

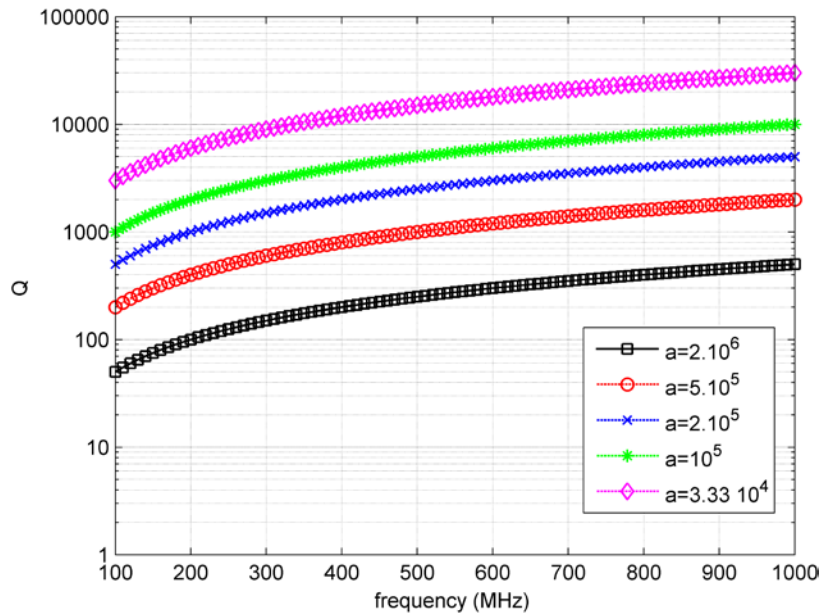


Figure 3-16 : Variation fréquentielle du facteur de qualité en fonction des différentes valeurs du paramètre a

Les valeurs de a choisies permettent donc de couvrir et même d’élargir l’intervalle de valeurs observées en mesure pour les différentes quantités d’absorbants (Figure 3-5).

3.4.4.2 Evaluation du nombre d’échantillons indépendants sur un tour de brasseur

Le coefficient d’autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ est présenté sur la Figure 3-17 en fonction des différentes valeurs du paramètre a considéré.

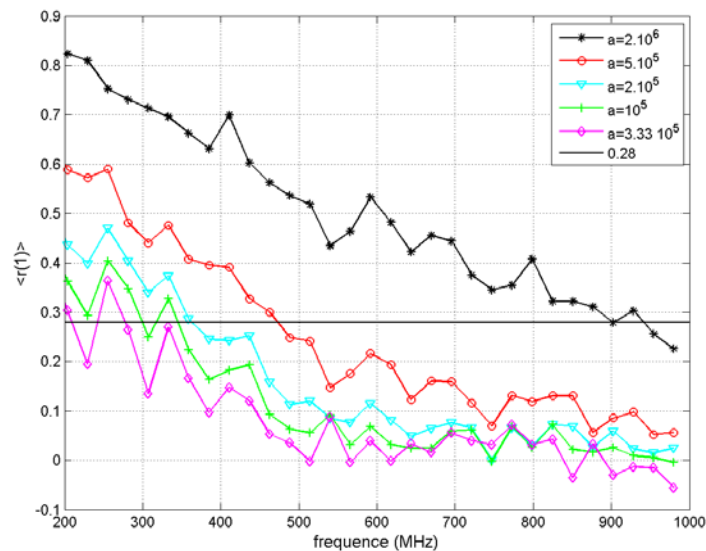


Figure 3-17 : Coefficient d’autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction des différentes valeurs du paramètre a

Les résultats montrent nettement l’augmentation de $\langle r(1) \rangle$ lorsque le paramètre a augmente (correspondant à une diminution du coefficient de qualité), confirmant ainsi les résultats de mesure. Il est donc possible de conclure qu’une CRBM vidée de tout absorbant correspond à la configuration optimale en vue d’obtenir le maximum d’échantillons indépendants sur un tour de brasseur. Tout comme en mesure, on remarque que l’augmentation de $\langle r(1) \rangle$ reste relativement limitée pour les plus faibles valeurs de a ($a=10^5$ et $a=2 \cdot 10^5$). La valeur limite de 0,28 est toujours respectée à partir de 275 MHz pour la plus grande valeur de a ($a=3,33 \cdot 10^5$) et à partir de 375 MHz pour $a=2 \cdot 10^5$. Ceci confirme que l’insertion d’une faible quantité d’absorbants dans une CRBM ne réduirait pas significativement le nombre d’échantillons non corrélés sur une rotation du brasseur de modes.

En revanche, pour les 2 plus grandes valeurs de a ($a=5 \cdot 10^5$ et $a=2 \cdot 10^6$) correspondant aux plus faibles valeurs du coefficient de qualité, l’augmentation du coefficient $\langle r(1) \rangle$ est très importante : la valeur limite est seulement respectée à partir de 950 MHz pour $a=2 \cdot 10^6$, ce qui correspond à une très forte diminution du nombre de positions indépendantes sur une révolution du brasseur de modes.

3.4.4.3 Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling

Le taux de rejet calculé sur les 24 tests d’Anderson-Darling est présenté sur la Figure 3-18 en fonction des différentes valeurs du paramètre a .

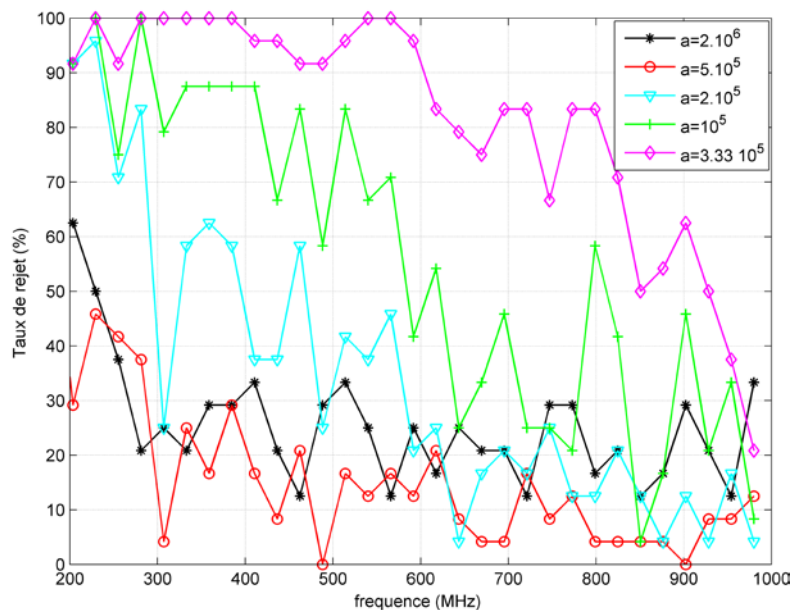


Figure 3-18 : Taux de rejet du test d’Anderson-Darling en fonction des différentes valeurs du paramètre a

Comme précédemment, les résultats observés confirment les résultats de mesure. Ainsi, la diminution du taux de rejet observé lorsque le coefficient de qualité de l'enceinte diminue est spectaculaire. Par exemple, le taux de rejet devient inférieur à 60% à partir de 910 MHz pour la valeur de a la plus élevée, à partir de 570 MHz pour $a = 10^5$ alors qu'il est tout le temps inférieur à cette valeur pour $a = 5 \cdot 10^5$. Ces résultats, confirmant les résultats de mesure, indiquent donc que l'adéquation des lois de distribution des champs EM aux lois établies par le modèle idéal s'améliore nettement lorsque le coefficient de qualité de la CRBM décroît. Nous remarquons aussi, une hausse du taux de rejet pour $a = 2 \cdot 10^6$, valeur correspondant au facteur de qualité le plus faible. Cette augmentation signifie qu'il existe un coefficient de qualité « optimal » du point de vue du taux de rejet des lois de distribution du modèle idéal. Cependant, ce facteur de qualité « optimal » est très faible et ne permet pas d'utiliser une chambre réverbérante à brassage de modes de façon convenable.

Les résultats précédents sont confirmés par l'analyse de la statistique moyenne $\langle A_m^2 \rangle$ du test d'Anderson-Darling (Figure 3-19).

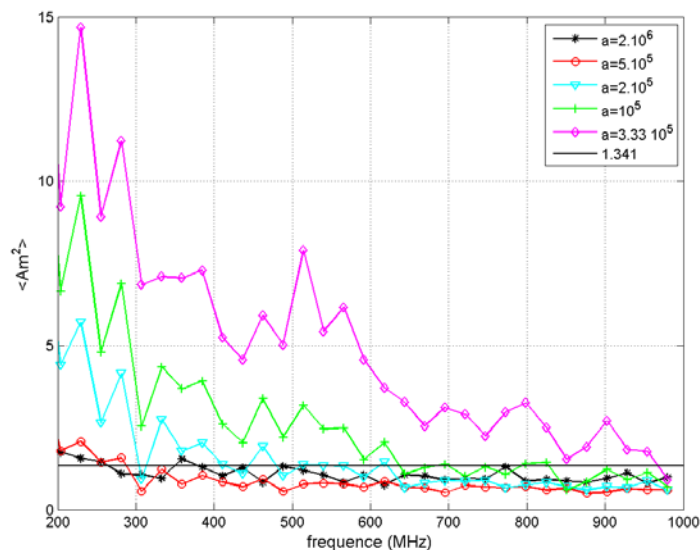


Figure 3-19 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling en fonction des différentes valeurs du paramètre a

3.4.4.4 Evaluation de l’uniformité du champ EM

L’écart-type σ_{24} (ou σ_{xyz}) calculé selon la méthode préconisée par la norme 61000-4-21 pour chaque valeur de a est tracé sur la Figure 3-20.

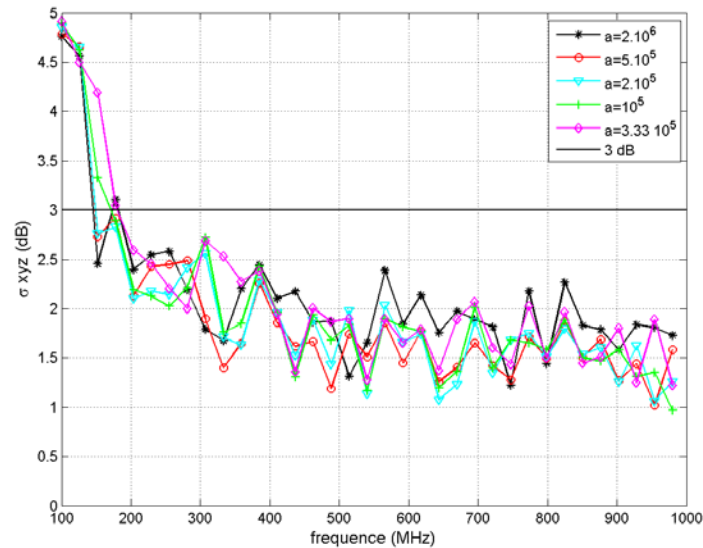


Figure 3-20 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction des différentes valeurs du paramètre a

Cette figure montre clairement que σ_{xyz} est indépendant de la valeur de a et donc du facteur de qualité Q de la CRBM. Les profondes modifications des caractéristiques intrinsèques d’une CRBM engendrées par la variation de son facteur de qualité ne sont donc pas retranscrites par cet observable.

3.5 Interprétation physique des résultats obtenus

Dans ce chapitre, les résultats de mesure et de simulation ont montré que la diminution du coefficient de qualité d’une CRBM avait un effet bénéfique sur les lois de distribution du champ EM (en comparaison des lois de distribution du modèle idéal) tout en diminuant le nombre d’échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur. Le but de cette section est d’émettre des hypothèses permettant de justifier physiquement ces résultats à partir des résultats obtenus dans le chapitre 2.

Comme cela a été observé au chapitre 2 lorsque les pertes dans une CRBM augmentent, le poids de chaque mode présente un maximum dont l’amplitude diminue par rapport au cas d’une CRBM présentant de faibles pertes tout en intervenant sur une bande de fréquences Δf de même largeur (Figure 3-21 et Figure 3-22).

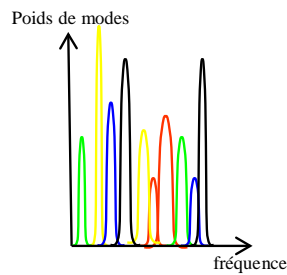


Figure 3-21 : Répartition modale schématisée dans le cas d’un fort coefficient de qualité

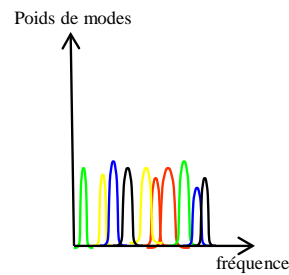


Figure 3-22 : Répartition modale schématisée dans le cas d’un faible coefficient de qualité

Ainsi, le champ total, correspondant à la somme des différents modes présents dans la cavité, est fortement dominé par le champ EM produit par le mode de poids le plus fort dans le cas d’une enceinte à fort coefficient de qualité. Il en résulte l’apparition de nombreuses valeurs extrêmes contribuant à rejeter la loi de Rayleigh.

Pour un coefficient de qualité plus faible, le champ EM total sera dépendant d’un plus grand nombre de modes considérés comme significatifs. Ainsi, d’une position du brasseur à une autre ou entre 2 fréquences proches, la combinaison de modes diffère moins que dans le cas d’une CRBM présentant un fort coefficient de qualité entraînant ainsi une augmentation de la corrélation des échantillons.

3.6 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre permettent de dresser les conclusions suivantes concernant l’effet de l’insertion d’absorbants au sein d’une CRBM :

- Le nombre d’échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur diminue lorsque le coefficient de qualité de l’enceinte diminue. Toutefois, pour de faibles valeurs de charge, cette diminution reste faible.
- Les lois de distribution du champ EM obtenues dans le volume utile de la CRBM convergent plus rapidement (c’est-à-dire à plus basses fréquences) vers les lois de distribution du modèle idéal de Hill lorsque le coefficient de qualité diminue.
- L’évaluation de l’uniformité du champ EM est relativement insensible aux variations du coefficient de qualité d’une CRBM.

Enfin, il convient de rajouter que la corrélation obtenue entre les résultats de mesure et de simulation est excellente : les mêmes conclusions ayant pu être tirées à partir des résultats expérimentaux et numériques. Cette solution de simulation consistant à modéliser une CRBM sans pertes puis à appliquer des pertes à posteriori, déjà utilisée dans de

nombreux travaux, semble être de nos jours la solution la plus pertinente pour modéliser une CRBM.

Chapitre 4. Influence de la géométrie du brasseur de modes sur les caractéristiques intrinsèques d'une CRBM

4.1 Introduction

Dans une chambre réverbérante, le brassage de modes est généralement réalisé de façon mécanique grâce à l'insertion d'un brasseur de modes. Le brasseur de modes, généralement en rotation autour d'un axe fixe, sert à modifier pour chaque position du brasseur les conditions aux limites du système. Comme cela a été montré au chapitre 2, le brasseur mécanique a pour effet de décaler en fréquence et de modifier les poids des différents modes de cavité présents pour chaque position du brasseur.

L'effet d'un brasseur de modes est généralement évalué à travers son efficacité de brassage, c'est-à-dire la capacité du brasseur à générer un nombre important d'échantillons non corrélés sur une rotation complète du brasseur. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'effet de la géométrie d'un brasseur de modes sur les caractéristiques intrinsèques d'une chambre réverbérante, à la manière de l'étude sur l'effet du coefficient de qualité réalisée dans le chapitre précédent. Comme dans le chapitre précédent, cette étude est réalisée à partir de mesures et de simulations numériques.

Il est important de noter que l'objectif de ce chapitre n'est pas de donner une méthode permettant d'aboutir à la géométrie de brasseur optimale mais de pointer les caractéristiques physiques de la chambre modifiées par une modification de la géométrie du brasseur.

4.2 Etat de l'art sur l'effet du brasseur de modes en CRBM

De nombreux articles concernant l'effet d'un brasseur de modes dans une CRBM sont disponibles dans la littérature scientifique. Le but de cette section est présenter les principaux résultats obtenus.

Les articles publiés sur ce thème ont traité de l'effet du brasseur de modes sur l'uniformité de champ obtenu au sein du volume de test [39]-[40]. Ces papiers présentent des résultats montrant une légère diminution de l'écart-type du champ électrique obtenu selon la procédure indiquée par la norme 61000-4-21 lorsque la géométrie du brasseur de mode devient plus complexe (augmentation de la taille du brasseur, ajout de plaques, plaques constituant le brasseur à la géométrie plus complexe, etc, ...).

D'autres papiers [40]-[41] ont étudié l'effet de la forme et des dimensions du brasseur de mode sur le nombre de réalisations indépendantes obtenues sur une révolution complète du brasseur. Tous ces articles concluent que l'augmentation de la taille ou de la complexité (ajout de plaques par exemple) du brasseur de modes impliquent une augmentation significative du nombre d'échantillons indépendants obtenus. Ces résultats sont encore améliorés lors de l'ajout d'un second brasseur [42].

Enfin, l'effet de l'augmentation des dimensions ou de la complexité du brasseur de mode sur les distributions du champ EM obtenus dans le volume idéal a été relativement peu étudié. A notre connaissance, seuls [41][43] présentent des résultats sur ce point indiquant que les dimensions du brasseur semblent n'avoir qu'un très faible impact sur les distributions du champ EM obtenues.

4.3 Résultats expérimentaux

4.3.1 Description de la configuration de mesure

La configuration de mesure est identique à celle présentée dans le chapitre précédent. Cependant, afin d'étudier l'effet de la géométrie du brasseur de modes sur les caractéristiques intrinsèques d'une CRBM, plusieurs géométries de brasseur ont été considérées. Pour cela, un certain nombre de plaques du brasseur initial contenant 8 plaques (de dimensions 60 cm par 40 cm) ont été enlevées (Figure 4-1). Ainsi, trois autres brasseurs de modes ont été étudiés contenant respectivement 6, 4 et 2 plaques du brasseur de référence.

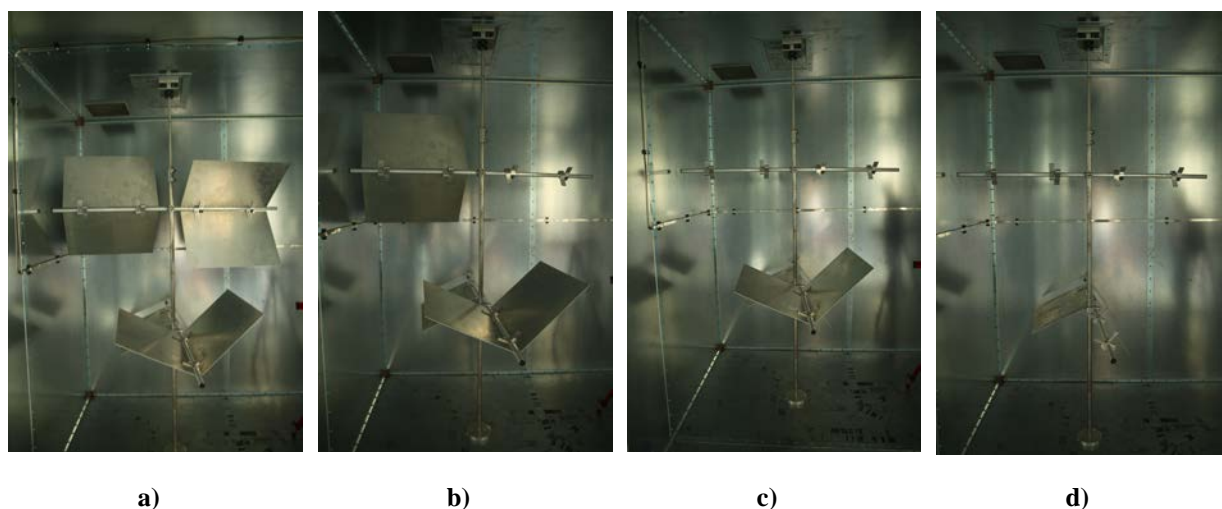


Figure 4-1 : Photographies des différents brasseurs de mode considérés : a) Brasseur 8 plaques, b) Brasseur 6 plaques, c) Brasseur 4 plaques, d) Brasseur 2 plaques.

Afin d'observer l'effet de la géométrie du brasseur de modes, les mesures ont été répétées pour 4 coefficients de qualité différents. Le premier correspond au cas de la CRBM vidée de tout absorbant, les trois suivantes correspondent respectivement à l'insertion de 6 pyramides absorbantes, 1 bloc d'absorbants et enfin 4 blocs d'absorbants insérés sous les plaques des différents brasseurs de modes.

La Figure 4-2 présente les coefficients de qualité correspondant à chaque configuration de charge :

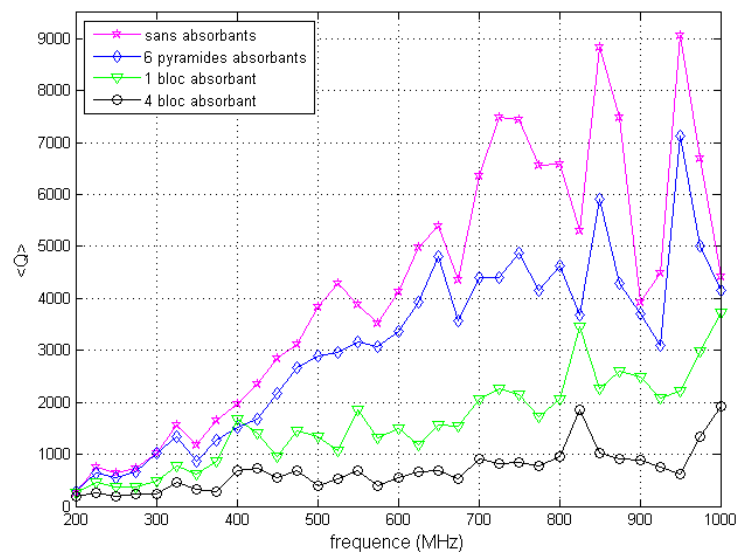


Figure 4-2 : Coefficients de qualité de la CRBM correspondant à chaque configuration de charge

Il est enfin à noter que, pour des raisons de manque de temps, seuls les brasseurs de mode contenant 8 et 2 plaques ont été étudiés pour les trois dernières configurations de charge.

4.3.2 Evaluation du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur

Les figures 4-3 à 4-6 présentent pour chaque configuration de charge le coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu pour les différents brasseurs étudiés (comparaison avec la valeur limite de 0,28).

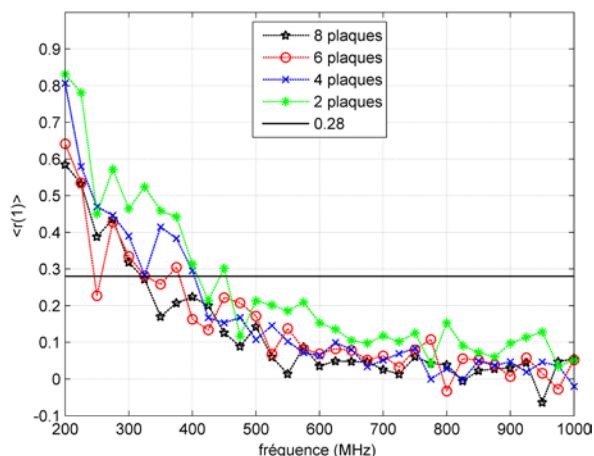


Figure 4-3 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM sans absorbants

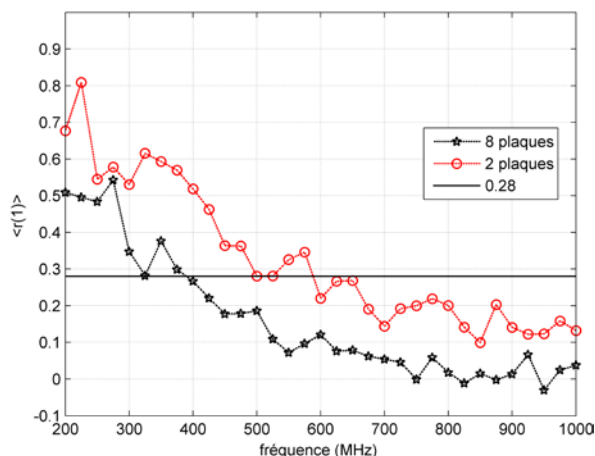


Figure 4-4 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 6 pyramides absorbantes

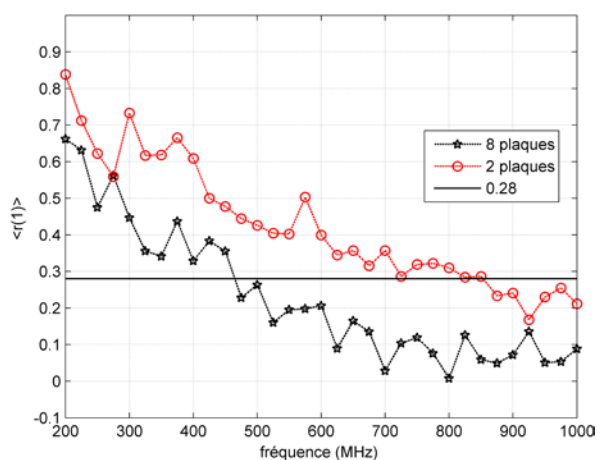


Figure 4-5 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 1 bloc d'absorbants

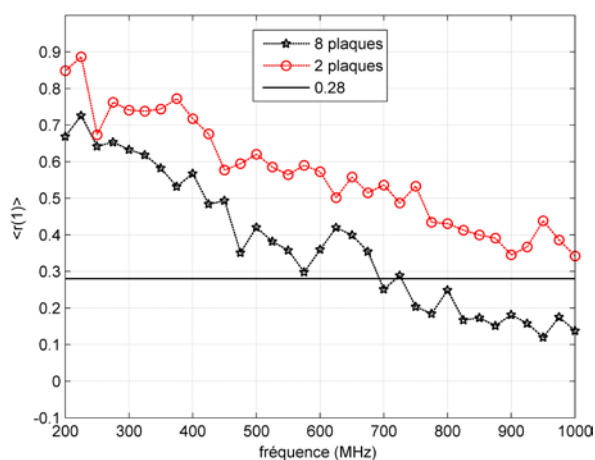


Figure 4-6 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 4 blocs d'absorbants

Ces figures montrent que l'accroissement de la complexité du brasseur réalisée en augmentant le nombre de plaques améliore nettement le nombre de positions indépendantes du brasseur de modes sur une rotation complète. Ces résultats confirment les précédents résultats présentés dans la littérature. De plus, ce résultat est indépendant de la charge introduite dans la CRBM, (même s'il semble que la diminution de la corrélation obtenue en augmentant le nombre de plaques est plus importante lorsque la quantité de charge augmente.)

4.3.3 Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling

Les figures 4-7 à 4-10 présentent pour chaque configuration de charge le taux de rejet au test d'Anderson-Darling de la loi de Rayleigh sur le module des différentes composantes rectangulaires du champ électrique obtenu pour les différents brasseurs étudiés.

Ces résultats montrent clairement que l'effet d'une augmentation de la complexité du brasseur de modes augmente avec la quantité de charge dans la CRBM. En effet, pour de faibles charges (CRBM vide ou chargée par 6 pyramides absorbantes), l'augmentation du nombre de plaques du brasseur semble n'avoir aucun effet sur le taux de rejet du test d'ajustement AD (résultats similaires aux articles [44][41]).

Cependant, un très faible effet positif est observé pour un bloc d'absorbant tandis que l'effet est très net pour 4 blocs d'absorbants, l'augmentation de la complexité du brasseur permettant alors aux lois de distribution du champ EM de converger vers les lois de distribution du modèle idéal.

Malheureusement, ces configurations de charge élevées correspondent à des coefficients de qualité trop faibles pour une CRBM. Ceci implique qu'il ne sera donc pas possible d'améliorer les lois de distribution du champ EM en augmentant la complexité du brasseur pour une CRBM ayant un coefficient de qualité élevé.

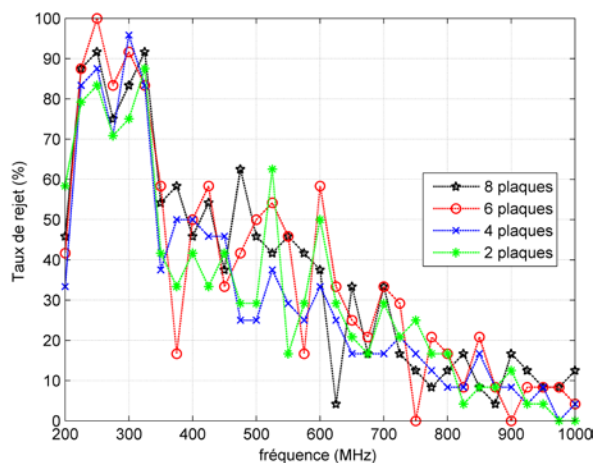


Figure 4-7 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM sans absorbants

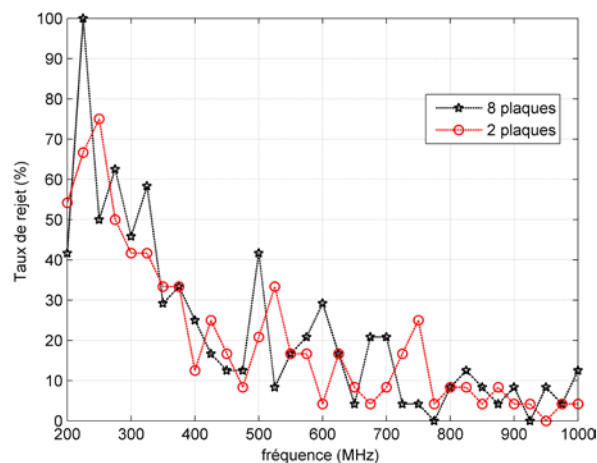


Figure 4-8 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 6 pyramides absorbantes

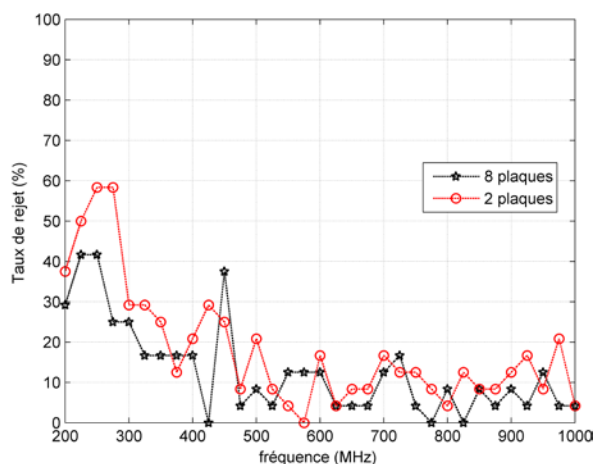


Figure 4-9 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 1 bloc d'absorbants

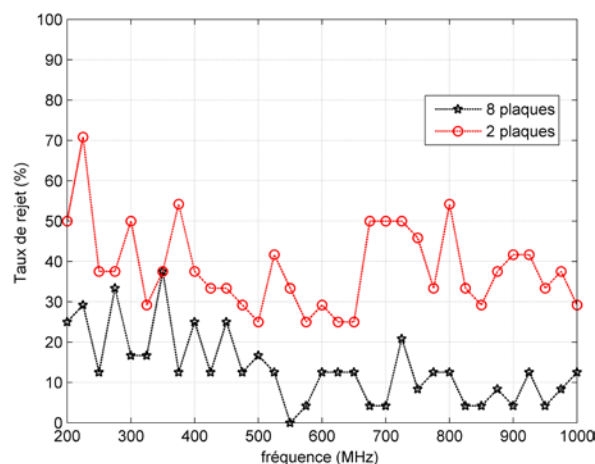


Figure 4-10 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 4 blocs d'absorbants

Ces différents résultats sont confirmés par l'analyse de la statistique du test d'Anderson-Darling moyennée sur les 24 tests réalisés pour chaque configuration ($\langle A_m^2 \rangle$).

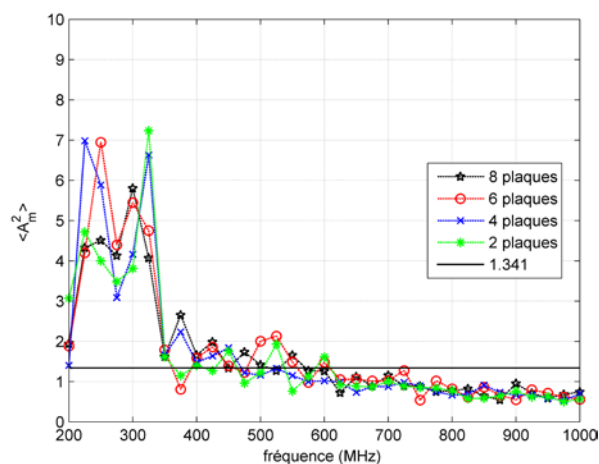


Figure 4-11 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenue en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM sans absorbants

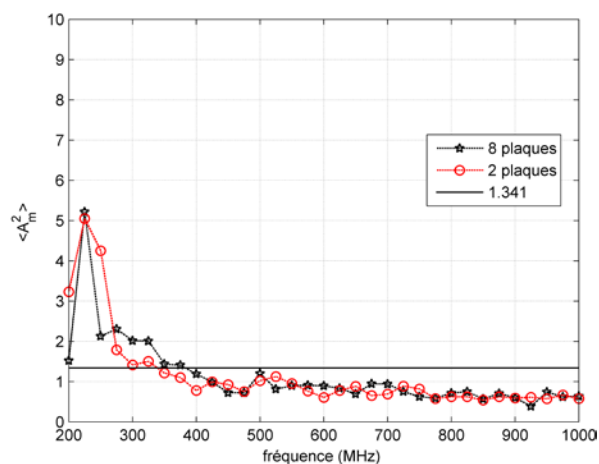


Figure 4-12 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenue en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 6 pyramides absorbantes

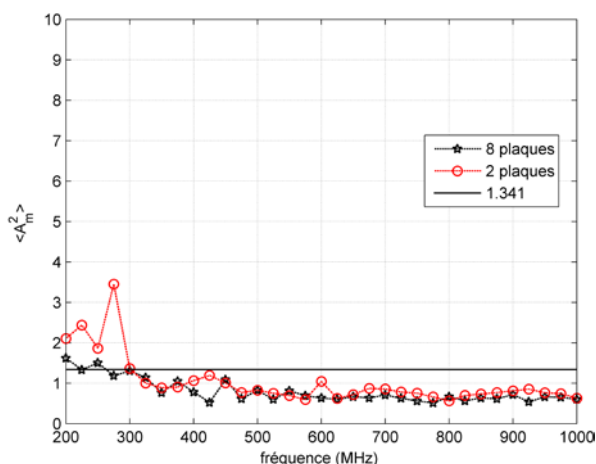


Figure 4-13 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenue en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 1 bloc d'absorbants

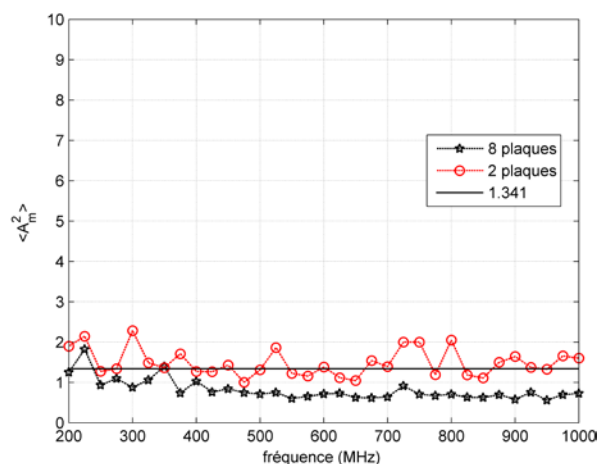


Figure 4-14 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenue en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 4 blocs d'absorbants

4.3.4 Evaluation de l'uniformité du champ EM

Les figures 4-15 à 4-18 présentent l'écart-type calculé selon la procédure décrite par la norme 61000-4-21 sur les maxima du champ électrique obtenus sur chacun des 8 points pour une révolution du brasseur de modes.

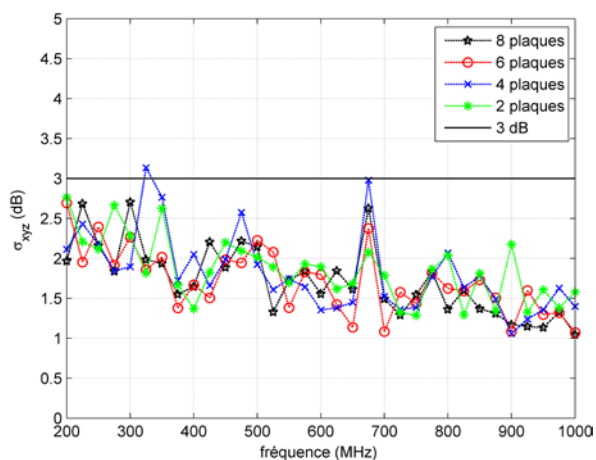


Figure 4-15 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM sans absorbants

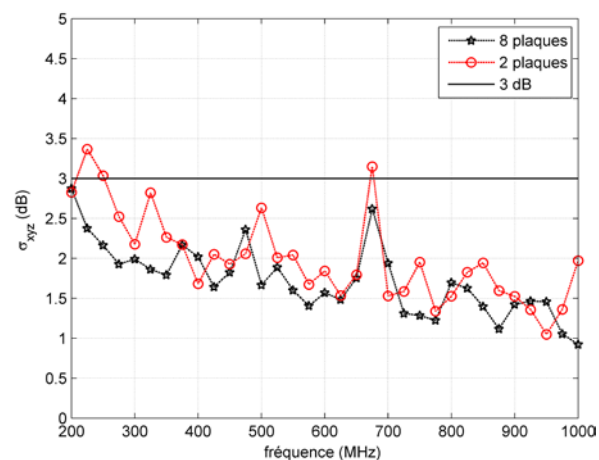


Figure 4-16 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 6 pyramides absorbantes

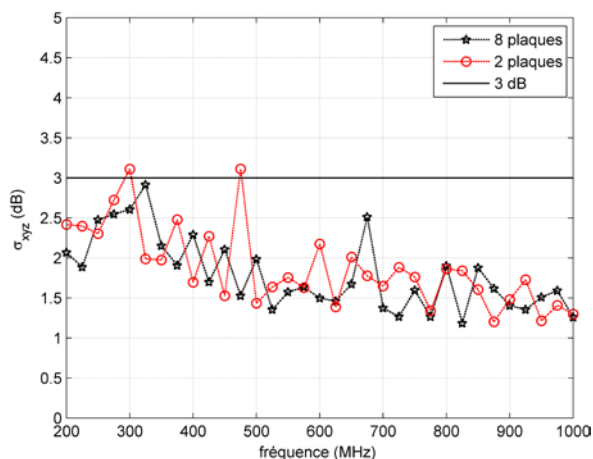


Figure 4-17 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 1 bloc d'absorbants

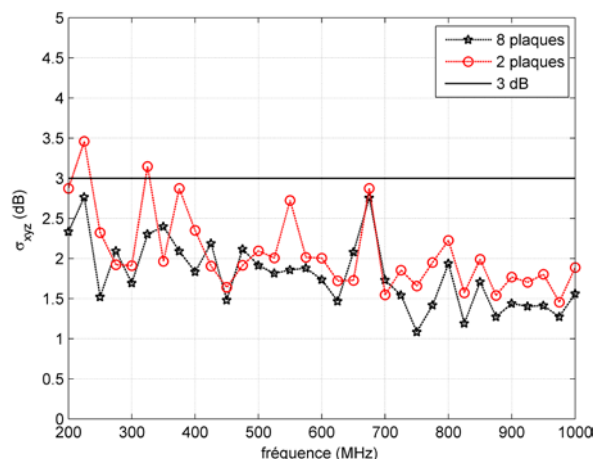


Figure 4-18 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques de brasseur pour la CRBM chargée par 4 blocs d'absorbants

L'augmentation de la complexité du brasseur de modes n'a qu'un très faible effet sur l'uniformité du champ EM obtenu. Cette remarque est valable pour toutes les configurations de charges étudiées. En effet, la diminution de l'écart-type est estimée à moins de 0.5 dB pour chaque configuration de charge lorsque le nombre de plaques du brasseur vaut 2 puis 8 plaques.

Ainsi, l'uniformité du champ reflète peu les profondes modifications des caractéristiques intrinsèques d'une CRBM engendrées par la modification de la géométrie du brasseur de modes.

4.4 Résultats numériques

4.4.1 Introduction

Les simulations numériques de la CRBM reprennent le protocole de simulation présenté et utilisé au chapitre 3. L'objectif de cette campagne de simulations numériques est de confirmer et d'affiner les résultats de mesure présentés dans la première partie de ce chapitre.

Dans cette étude, cinq brasseurs différents ont été modélisés. Le brasseur de référence, identique à celui étudié au chapitre 3, contient 8 plaques métalliques de dimensions 60 cm par 40 cm. Comme dans l'étude expérimentale, les 4 autres brasseurs correspondent au brasseur de référence auquel certaines plaques ont été enlevées. Ils contiennent donc respectivement 6 plaques, 4 plaques, 2 plaques et enfin 1 plaque.

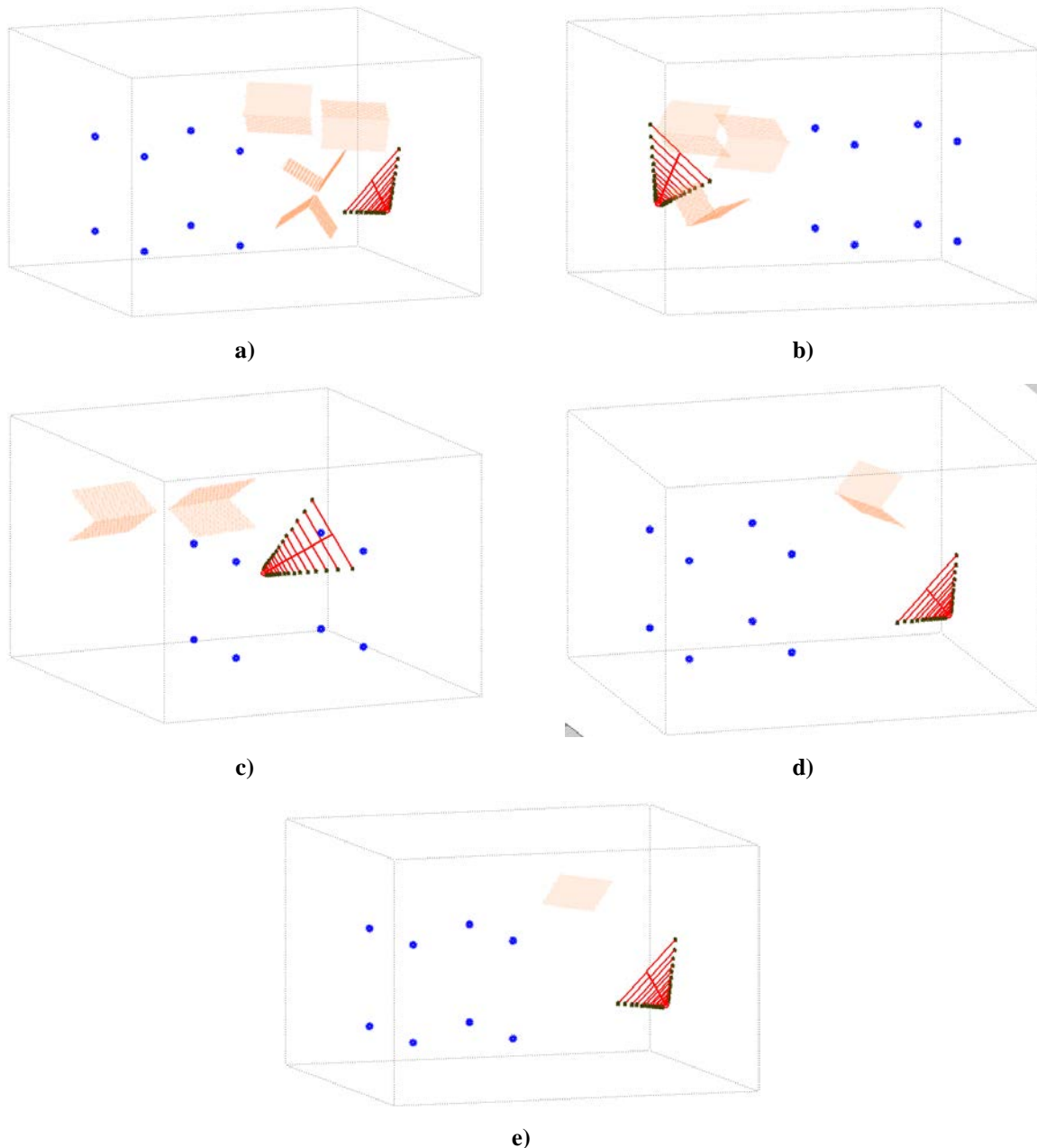


Figure 4-19 : Modélisation FDTD de la CRBM contenant un brasseur constitué a) de 8 plaques, b) de 6 plaques, c) de 4 plaques, d) de 2 plaques, e) d'1 plaque

L'effet du nombre de plaques de brasseur a été étudié pour 4 valeurs de a (grandeur présentée au chapitre 3) correspondant à 4 régimes de charges différents : $a=10^5$, $a=2 \cdot 10^5$, $a=5 \cdot 10^5$ et $a=2 \cdot 10^6$. La Figure 4-20 présente la variation du coefficient de qualité obtenu à chaque fréquence pour chacune des 4 valeurs de a considérées :

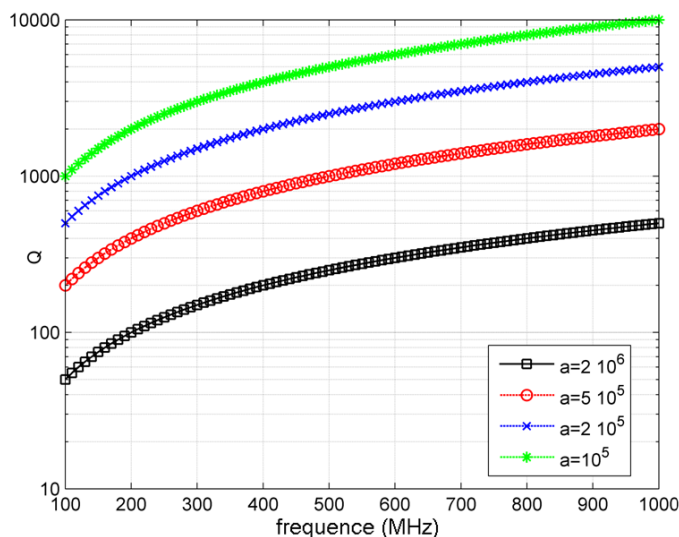


Figure 4-20 : Variation fréquentielle du facteur de qualité en fonction des différentes valeurs du paramètre a

4.4.2 Evaluation du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur

Les figures 4-21 à 4-24 présentent le coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu pour chacune des valeurs de a en fonction du nombre de plaques métalliques du brasseur.

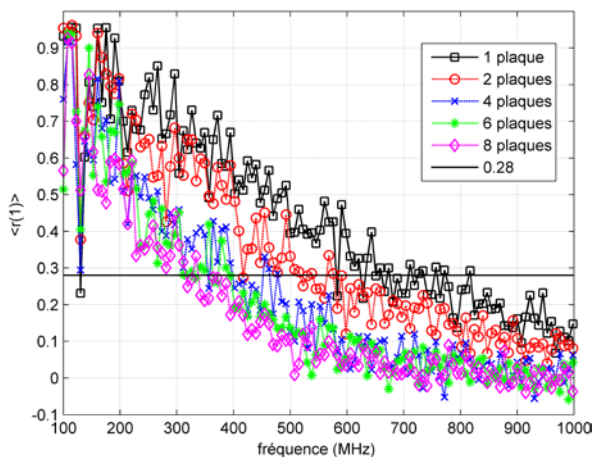


Figure 4-21 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=10^5$

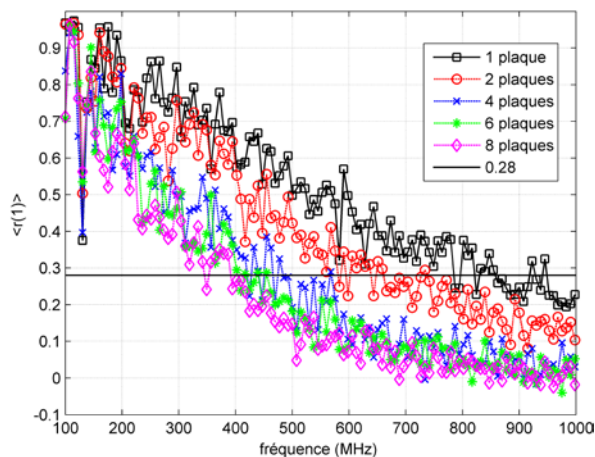


Figure 4-22 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=2 \cdot 10^5$

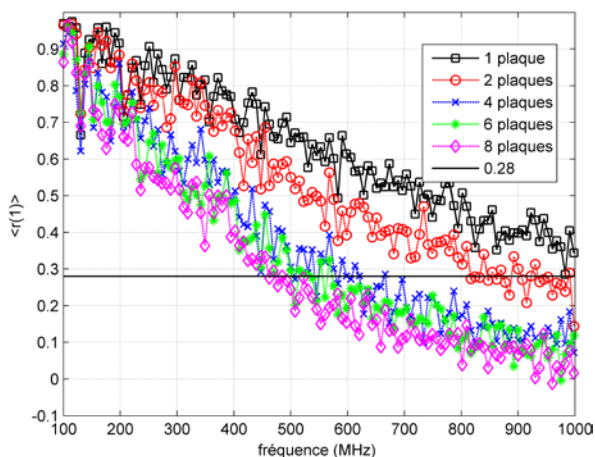


Figure 4-23 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=5 \cdot 10^5$

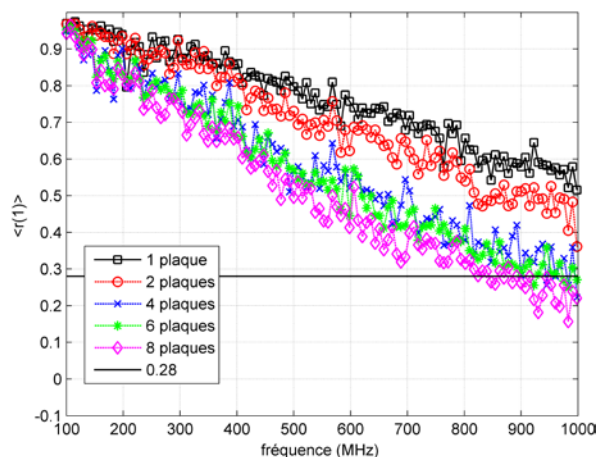


Figure 4-24 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=2 \cdot 10^6$

Les résultats présentés confirment les résultats obtenus en mesures, l'augmentation de la complexité du brasseur réalisée en augmentant le nombre de plaques du brasseur a pour effet d'augmenter le nombre d'échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur, et ce quelle que soit la configuration de charge. Enfin, il apparaît comme en mesures, que l'effet bénéfique observé lorsque le nombre de plaques de brasseur augmente est plus important pour des coefficients de qualité faibles (correspondant aux valeurs de a les plus élevées).

Enfin, les résultats de simulation montrent que l'écart obtenu entre les brasseurs contenant respectivement 8, 6 et 4 plaques est relativement faible. L'écart est en revanche beaucoup plus important lorsque le nombre de plaques est inférieur à 4 (1 ou 2).

4.4.3 Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling

Les figures 4-25 à 4-28 présentent le taux de rejet de la loi de Rayleigh calculé sur le module des composantes rectangulaires du champ électrique en fonction du nombre de plaques du brasseur pour chacune des 4 valeurs de a choisies.

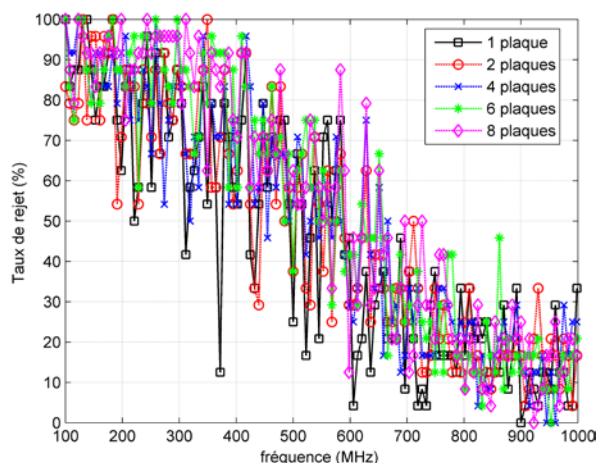


Figure 4-25 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=10^5$

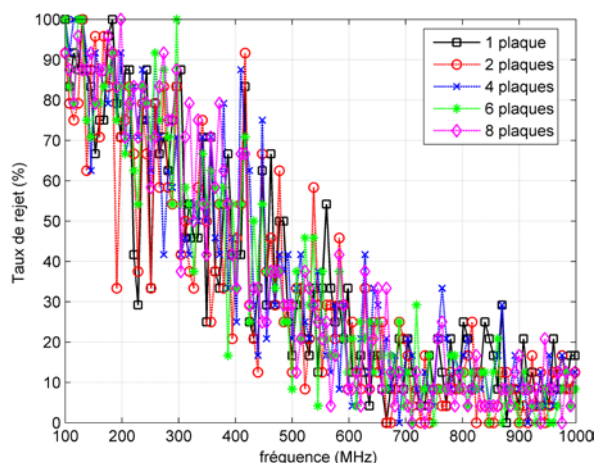


Figure 4-26 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=2 \cdot 10^5$

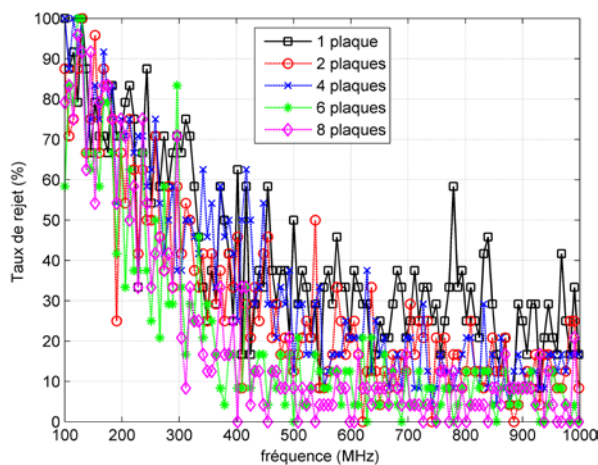


Figure 4-27 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=5 \cdot 10^5$

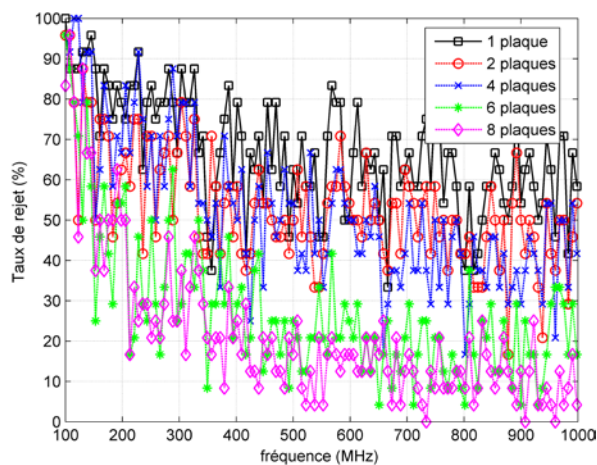


Figure 4-28 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=2 \cdot 10^6$

Une fois encore, les résultats de simulation confirment les résultats de mesure. Il apparaît clairement que l'augmentation de la complexité du brasseur de modes est sans effet sur le taux de rejet de la loi de Rayleigh lorsque le coefficient de qualité de l'enceinte est fort ($a=10^5$ et $a=2 \cdot 10^5$). L'augmentation du nombre de plaques de brasseur a pour effet de diminuer très légèrement le taux de rejet pour $a=5 \cdot 10^5$ et de la diminuer très fortement pour la plus forte valeur de a correspondant au facteur de qualité le plus faible.

Ces conclusions sont confirmées par l'analyse de la statistique d'Anderson-Darling moyennée sur les 24 tests.

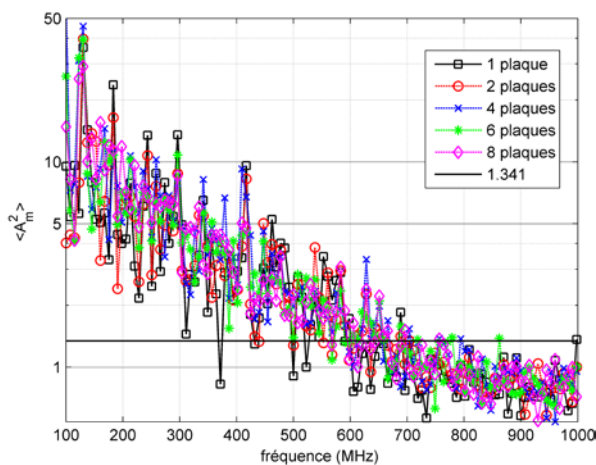


Figure 4-29 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenue en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=10^5$

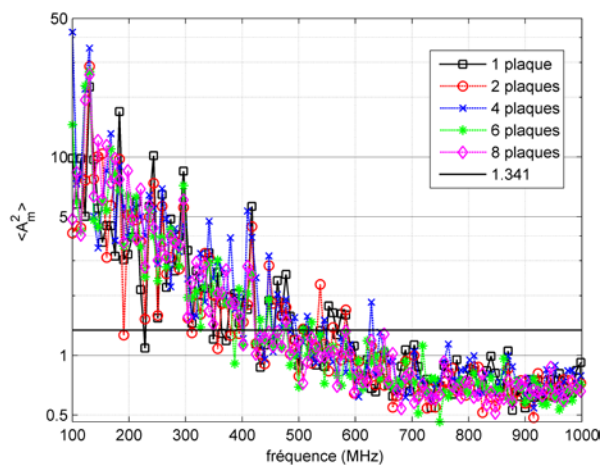


Figure 4-30 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenue en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=2 \cdot 10^5$

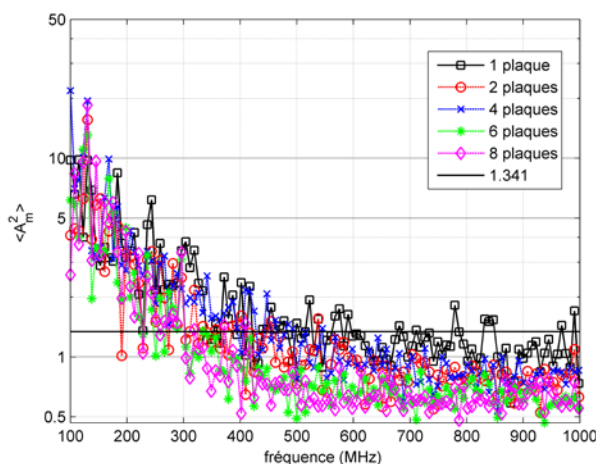


Figure 4-31 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenue en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=5 \cdot 10^5$

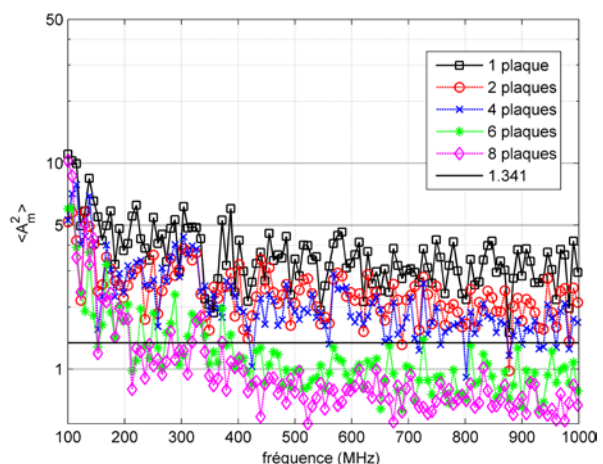


Figure 4-32 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling obtenue en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=2 \cdot 10^6$

4.4.4 Evaluation de l'uniformité du champ EM

Les figures 4-33 à 4-36 présentent l'écart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques du brasseur et pour les différentes valeurs de a choisies dans les simulations.

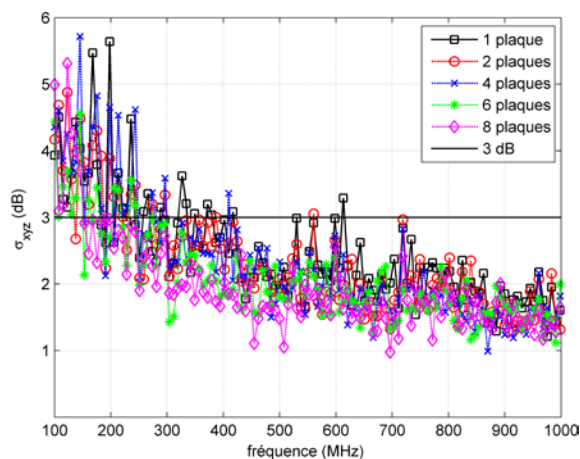


Figure 4-33 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=10^5$

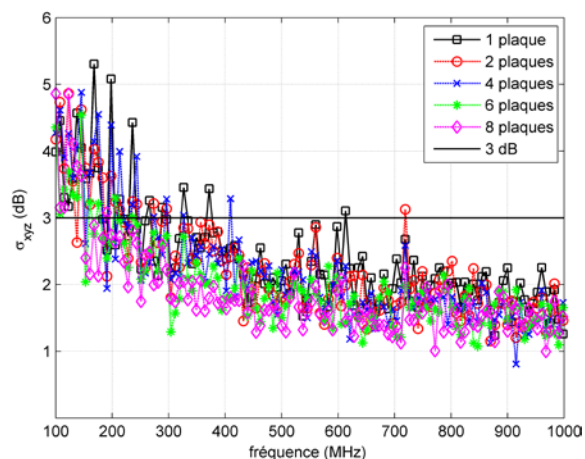


Figure 4-34 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=2 \cdot 10^5$

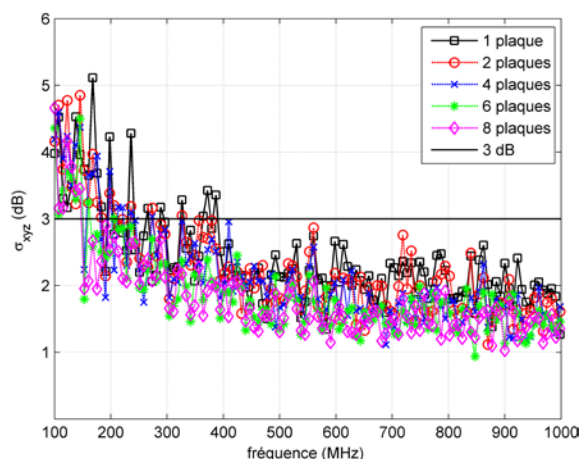


Figure 4-35 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=5 \cdot 10^5$

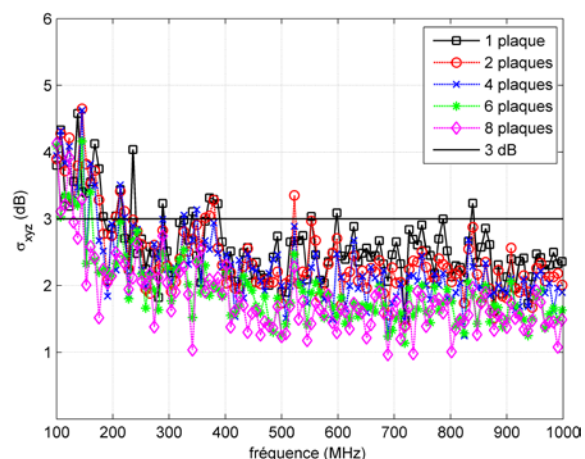


Figure 4-36 : Ecart-type σ_{xyz} (ou σ_{24}) calculé en fonction du nombre de plaques de brasseur pour $a=2 \cdot 10^6$

Comme cela a été observé lors des mesures, il apparaît clairement que l'augmentation de la complexité du brasseur de modes (par l'ajout de plaques de brasseur) n'a qu'un très faible effet sur l'uniformité du champ (effet inférieur à 0,5 dB).

4.5 Interprétation physique des résultats obtenus

De la même façon que dans le chapitre précédent, l'objectif de cette section est d'émettre des hypothèses permettant d'expliquer physiquement les résultats obtenus dans ce chapitre à partir de l'étude des poids de modes réalisée au chapitre 2.

Pour des enceintes à fort coefficient de qualité, l'augmentation de la complexité du brasseur via l'ajout de plaques métalliques n'entraîne pas d'effet bénéfique sur le taux de rejet des lois de Rayleigh. En effet, dans ce cas, chaque mode présente un maximum d'amplitude très important. Ainsi, à chaque fréquence, le champ EM total correspondant à la somme des différents modes présents dans la cavité sera fortement dominé par le champ EM produit par le mode de poids le plus fort. Ainsi, même un brasseur de modes de forte complexité qui va davantage décaler en fréquence chaque mode demeure inapte à améliorer le recouvrement modal. Le nombre de modes significatif mis en jeu à chaque fréquence étant trop faible, il en résulte un fort taux de rejet de la loi de Rayleigh. La Figure 4-37 illustre ce phénomène.

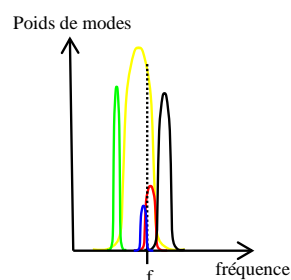


Figure 4-37 : Répartition modale schématique dans le cas d'un fort coefficient de qualité (pour 1 position de brasseur)

En revanche, lorsque le coefficient de qualité de l'enceinte diminue, l'augmentation de la complexité du brasseur induit une forte baisse du taux de rejet des lois de Rayleigh. Dans ce cas, chaque mode possède un poids maximum beaucoup plus faible. Ainsi, à chaque fréquence et pour chaque position de brasseur, le champ EM total est moins dépendant du mode dont le poids est maximum (Figure 4-38) mais dépend de la combinaison de plusieurs modes considérés comme significatifs. Il a été vu au chapitre 2 que l'augmentation de la complexité du brasseur se traduit par le fait que chaque mode va pouvoir être excité sur une bande de fréquences plus large. Ainsi, lorsque la complexité du brasseur augmente, le recouvrement modal est plus efficace et surtout plus varié entraînant des taux de rejet de la loi de Rayleigh plus faible. Ceci explique également la diminution de la corrélation des échantillons observée lorsque la complexité du brasseur augmente.

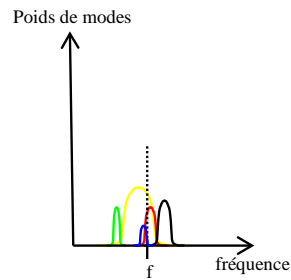


Figure 4-38 : Répartition modale schématique dans le cas d'un faible coefficient de qualité (pour 1 position de brasseur)

4.6 Conclusion

Les résultats expérimentaux et numériques présentés dans ce chapitre permettent de dresser les conclusions suivantes concernant l'effet de l'augmentation de la complexité d'un brasseur de modes placé au sein d'une CRBM :

- Le nombre d'échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur augmente quelle que soit le coefficient de qualité de l'enceinte.
- Les lois de distribution du champ EM obtenu dans le volume utile de la CRBM convergent plus rapidement (c'est-à-dire à plus basses fréquences) vers les lois de distribution du modèle idéal de Hill lorsque le coefficient de qualité diminue. Pour de fortes valeurs de coefficient de qualité, la modification de la géométrie du brasseur est sans effet sur les lois de distribution obtenues.
- L'uniformité du champ EM varie peu alors que les caractéristiques intrinsèques de la CRBM sont profondément modifiées par la modification de la géométrie du brasseur, et ce quel que soit le coefficient de qualité de l'enceinte.

Enfin, les résultats obtenus au cours du chapitre 2 ont permis d'émettre des hypothèses permettant d'expliquer ces différents résultats à partir d'une réflexion sur la composition modale obtenue dans le cas d'enceintes de coefficient de qualité variable.

Chapitre 5. Proposition d'une méthode de détermination de la fréquence minimale d'utilisation (LUF) d'une CRBM

5.1 Introduction

Actuellement, comme cela a été présenté au cours du chapitre 1, la fréquence minimale d'utilisation (LUF) est déterminée à l'aide de mesures par le calcul de l'écart-type des valeurs maximales du champ électrique obtenues sur une révolution complète de brasseur.

Cette méthode, utilisée largement par la communauté CEM, présente le grand avantage de proposer une procédure rapide pour la détermination de la LUF. Cependant, cette méthode doit être appréhendée prudemment. En effet, pour des fréquences immédiatement supérieures à la LUF, les lois de distribution du champ EM correspondant au modèle idéal sont généralement rejetées tandis que les échantillons collectés sur un tour de brasseur sont encore largement corrélés.

De plus, les résultats des deux chapitres précédents ont clairement montré que ce critère ne rendait pas du tout compte des modifications profondes des caractéristiques intrinsèques d'une CRBM engendrées par l'ajout d'absorbants ou la modification de la géométrie du brasseur de modes.

L'écart-type du champ est calculé sur les valeurs maximales du champ électrique obtenues pour chacun des points de mesure. Ce critère est donc fortement dépendant des valeurs extrêmes du champ EM, ce qui peut introduire de fortes variations du résultat y compris pour 2 fréquences très proches.

La norme indique également que le gabarit d'écart-type peut être dépassé pour un nombre de 3 fréquences par octave. Ceci n'est scientifiquement guère satisfaisant. Un critère pertinent se doit en effet d'être binaire : acceptation ou rejet. Les exceptions accordées par la norme confirment, de notre point de vue, l'insuffisance de ce critère pour évaluer la LUF.

Enfin, le gabarit proposé par la norme est empirique, il n'a pas de sens physique. De plus, l'augmentation du gabarit entre 100 et 300 MHz à des valeurs comprises entre 3 et 4 dB n'a pas de justification physique. Ces dernières années, un gabarit d'écart-type plus restrictif et basé sur une démonstration théorique relative à la distribution de Rayleigh a été proposé par C. Lemoine mais n'a pas été repris par les normes en vigueur.

Ainsi, de notre point de vue, la communauté CEM manque d'une méthode rigoureuse basée sur des indicateurs pertinents afin de quantifier la « qualité » du champ EM généré au

sein du volume utile d’une CRBM dans la bande de fréquences intermédiaires (fréquences comprises entre la LUF et la fréquence où la CRBM fonctionne en régime idéal). Nous nous attachons dans ce chapitre à proposer une nouvelle méthode d’estimation de la LUF plus pertinente que la méthode utilisée habituellement, plus rigoureuse car basée sur des considérations physiques.

5.2 Proposition d’une méthode de détermination de la LUF

Dans les chapitres précédents, il a été montré que l’ajout d’absorbants ou la modification de la géométrie du brasseur de modes avaient une forte influence sur les caractéristiques intrinsèques d’une CRBM.

En particulier :

- Il est possible de déterminer une quantité optimale d’absorbants permettant d’améliorer grandement le respect des lois de distribution du champ EM considérées dans le modèle idéal par rapport à une CRBM vide. Le nombre de positions indépendantes du brasseur de modes sur une rotation est alors légèrement diminué par l’ajout d’absorbants.
- Une augmentation de la complexité de la géométrie du brasseur de modes se traduit par une augmentation sensible du nombre d’échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur. Cependant, ceci ne se traduit pas par une amélioration nette de la distribution du champ EM vers les lois du modèle idéal sauf pour des coefficients de qualité faibles incompatibles avec le fonctionnement classique d’une CRBM.

Au vu de ses résultats, il apparaît donc logique de proposer une méthode permettant de déterminer la LUF d’une CRBM à partir de l’étude du nombre d’échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur et de la réalisation de tests d’ajustement permettant de comparer la distribution du champ EM par rapport au modèle de Hill. Cependant, étant donné que ces 2 critères n’évoluent pas dans le même sens lors de l’ajout d’absorbants ou de la modification de la géométrie du brasseur de modes, il est donc nécessaire de trouver un compromis entre ces 2 critères en essayant de déterminer les valeurs seuils pertinentes pour chacun de ces critères. Ainsi, chaque critère permettra d’indiquer la fréquence à partir de laquelle le résultat obtenu respectera toujours la valeur seuil.

Ainsi, une fois que les valeurs seuil appropriées auront été déterminées, la deuxième étape consiste à déterminer la LUF en fonction des 2 fréquences déterminées à l’aide de

chacun des 2 critères. La proposition consiste à prendre la valeur maximale de ces 2 fréquences afin de s’assurer du bon respect de chacun des 2 critères.

5.2.1 Choix de valeurs seuils pertinentes

Pour tenter de définir des valeurs seuils appropriées pour le coefficient d’autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ et le taux de rejet aux lois du modèle idéal, les résultats expérimentaux et numériques présentés dans les 2 chapitres précédents sont analysés.

Ainsi, pour l’étude de $\langle r(1) \rangle$, une première fréquence f_1 est définie. Celle-ci correspond à la fréquence maximale au delà de laquelle le coefficient d’autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ reste toujours inférieur à une valeur seuil. Trois valeurs seuils différentes ont été considérées: 0,37 (valeur prise en compte dans les normes), 0,28 qui correspond à la valeur calculée par la méthode présentée dans [45] pour $N=50$ positions de brasseur et 0,2 (une valeur encore plus restrictive).

Pour l’étude du taux de rejet TR, une deuxième fréquence f_2 est définie. Celle-ci correspond à la fréquence maximale au delà de laquelle le taux de rejet reste toujours inférieur à une valeur seuil. Comme précédemment, trois valeurs seuils différentes ont été considérées: 70%, 50% et 30%.

La Figure 5-1 présente les fréquences f_1 et f_2 obtenues pour toutes les valeurs seuils définies précédemment à partir des résultats expérimentaux présentés dans le Chapitre 3 correspondant à une variation de la quantité d’absorbants pour le brasseur de 8 plaques. La Figure 5-2 présente les résultats obtenus lors des simulations numériques présentées dans ce même chapitre.

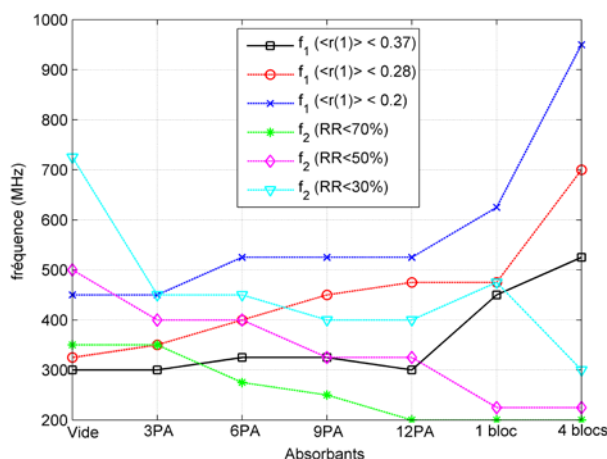


Figure 5-1 : Fréquences f_1 et f_2 calculées pour chacune des valeurs seuils en fonction de la quantité d’absorbants insérés dans la CRBM (Mesures pour le brasseur 8 plaques)

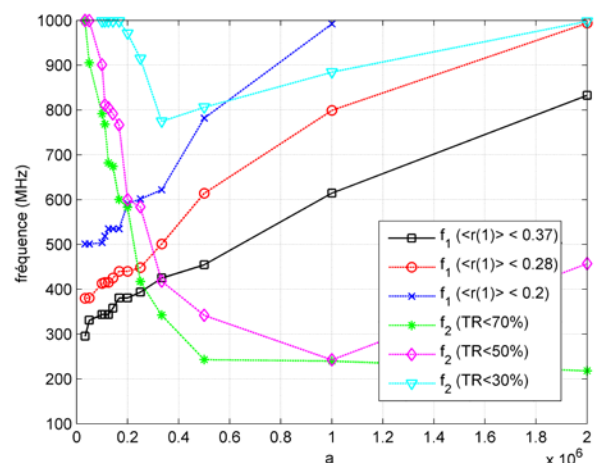


Figure 5-2 : Fréquences f_1 et f_2 calculées pour chacune des valeurs seuils en fonction du paramètre a (Simulation FDTD pour le brasseur 8 plaques)

Logiquement, la fréquence f_1 , quelle que soit la valeur seuil étudiée, augmente avec la quantité d’absorbants traduisant la diminution du nombre d’échantillons indépendants sur un tour de brasseur. De la même façon, la fréquence f_2 diminue fortement avec la quantité de charge.

De la même façon, les figures 5-3 à 5-6 présentent les fréquences f_1 et f_2 obtenues en mesures lors de la modification du nombre de plaques du brasseur de modes et les figures 5-7 à 5-10 les mêmes résultats obtenus en simulation pour les 4 valeurs de a .

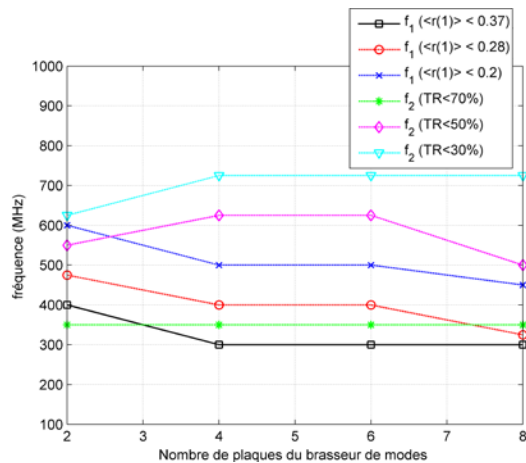


Figure 5-3 : Fréquences f_1 et f_2 calculées à partir des mesures en fonction du nombre de plaques du brasseur pour une CRBM sans absorbants et pour les valeurs seuils choisies

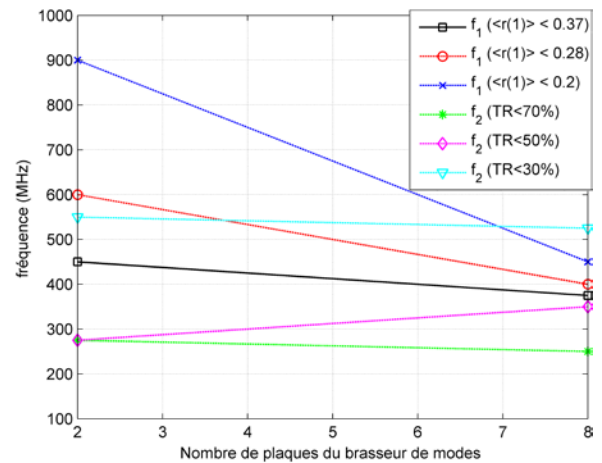


Figure 5-4 : Fréquences f_1 et f_2 calculées à partir des mesures en fonction du nombre de plaques du brasseur pour une CRBM contenant 6 PA et pour les valeurs seuils choisies

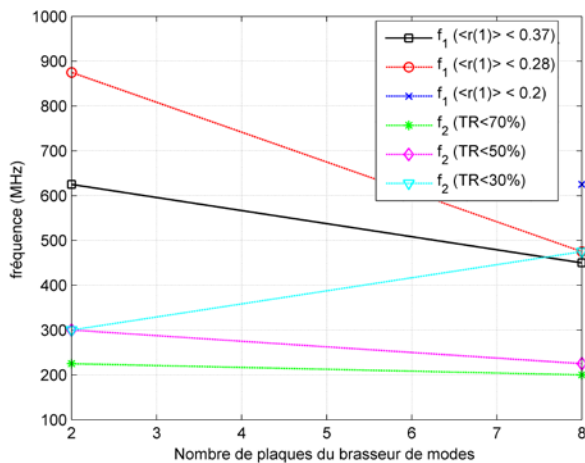


Figure 5-5 : Fréquences f_1 et f_2 calculées à partir des mesures en fonction du nombre de plaques du brasseur pour une CRBM contenant 1 bloc d’absorbants et pour les valeurs seuils choisies

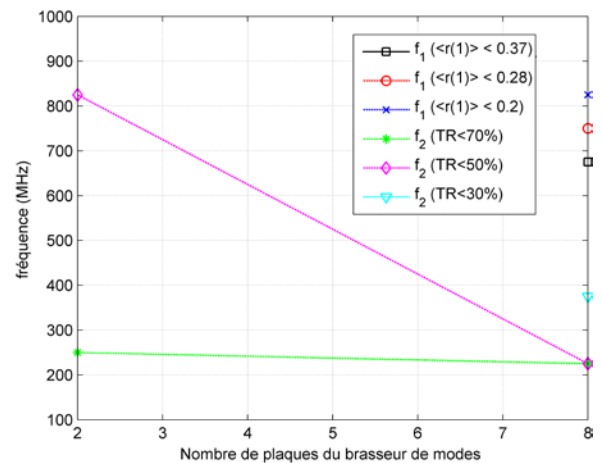


Figure 5-6 : Fréquences f_1 et f_2 calculées à partir des mesures en fonction du nombre de plaques du brasseur pour une CRBM contenant 4 blocs d’absorbants et pour les valeurs seuils choisies

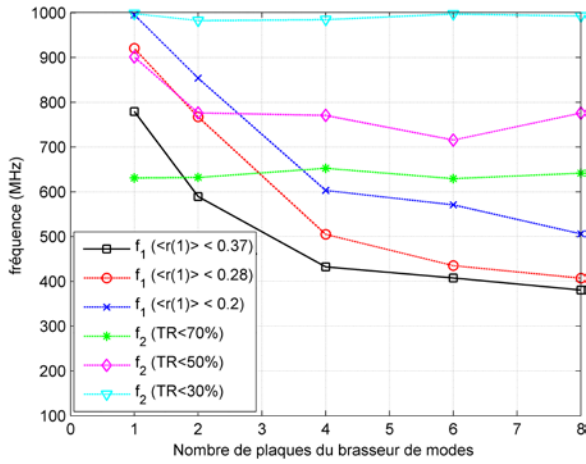


Figure 5-7 : Fréquences f_1 et f_2 calculées à partir des simulations FDTD en fonction du nombre de plaques du brasseur pour $a=10^5$

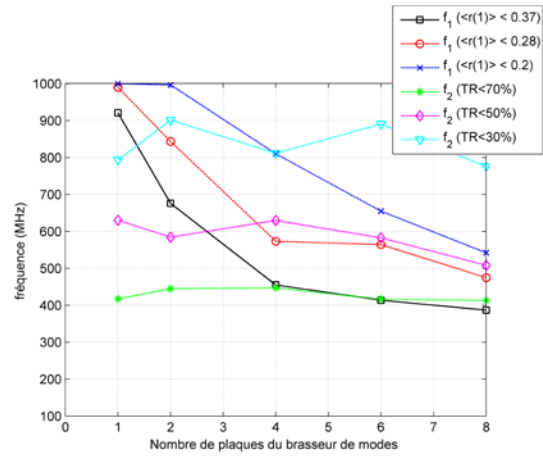


Figure 5-8 : Fréquences f_1 et f_2 calculées à partir des simulations FDTD en fonction du nombre de plaques du brasseur pour $a=2.10^5$

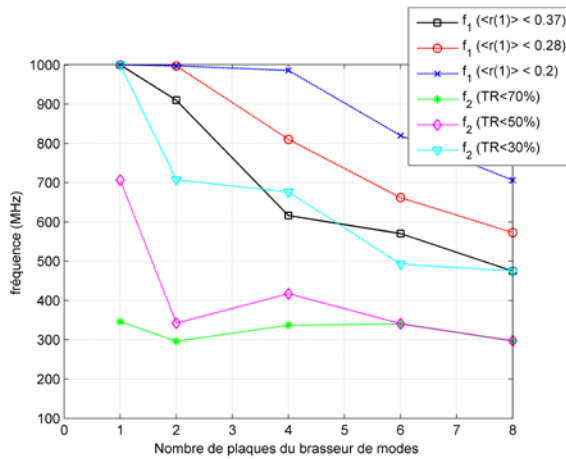


Figure 5-9 : Fréquences f_1 et f_2 calculées à partir des simulations FDTD en fonction du nombre de plaques du brasseur pour $a=5.10^5$

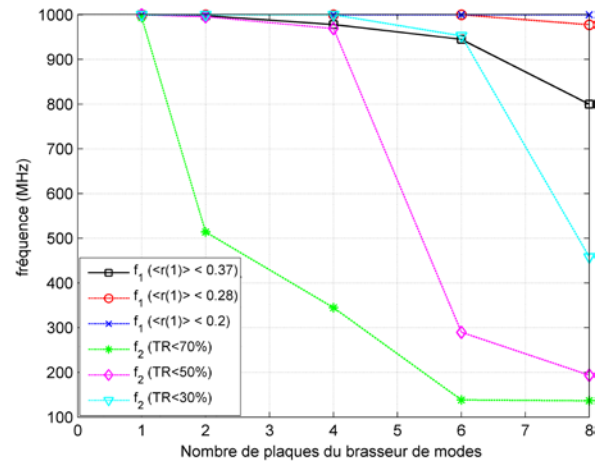


Figure 5-10 : Fréquences f_1 et f_2 calculées à partir des simulations FDTD en fonction du nombre de plaques du brasseur pour $a=2.10^6$

Pour ces résultats, la fréquence f_1 diminue logiquement quelle que soit la valeur seuil choisie lorsque le nombre de plaques de brasseur augmente, du fait de l’augmentation du nombre d’échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur. Au contraire, la fréquence f_2 est peu modifiée (hormis pour de fortes valeurs de charges), ce qui correspond à l’absence d’effet de l’augmentation de la complexité du brasseur sur les distributions statistiques du champ EM obtenues dans le volume de test par rapport au modèle idéal.

La première conclusion est donc que quelle que soit les valeurs seuil prises pour f_1 et f_2 , les mêmes tendances sont observées.

De plus, concernant f_1 , la valeur de 0,28 semble la plus adaptée. En effet, les valeurs 0,2 et 0,37 semblent respectivement trop restrictive et trop permissive. De plus, cette valeur (à

modifier si le nombre de positions de brasseur prises en compte est différent de 50) n’est pas empirique car elle s’appuie sur une démonstration théorique rigoureuse.

Enfin, concernant f_2 , la valeur qui nous semble la plus appropriée à la lecture des résultats est la valeur de 50%. Cette valeur seuil indique qu’au moins 12 des 24 tests effectués accepte une distribution de Rayleigh. Elle permet donc de s’assurer que les lois de distribution du champ EM à l’intérieur du volume s’approchent raisonnablement du modèle idéal sans être trop restrictives.

5.2.2 Détermination de la LUF

Pour chaque configuration de mesure ou de simulation, un couple de fréquences (f_1 , f_2) est obtenu (en prenant les valeurs seuils $\langle r(1) \rangle_{\max}=0,28$ et $TR_{\max}=50\%$). Comme cela a été précisé précédemment, la LUF déterminée par notre méthode correspond à la plus grande de ces 2 valeurs. Nous présentons donc ci-après la LUF obtenue par notre méthode à partir des résultats expérimentaux et numériques présentés précédemment.

5.2.2.1 Variation de la LUF obtenue en fonction de la quantité d’absorbants dans la CRBM

La LUF obtenue en mesures et en simulation en fonction de la quantité d’absorbants sont représentées sur les figures 5-11 et 5-12.

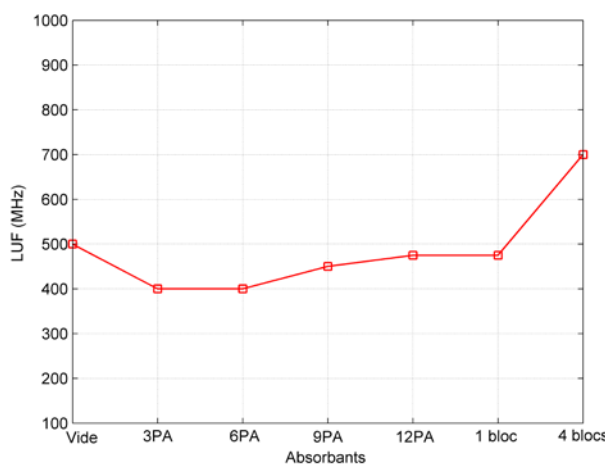


Figure 5-11 : LUF obtenues en mesures en fonction de la quantité d’absorbants insérés dans la CRBM

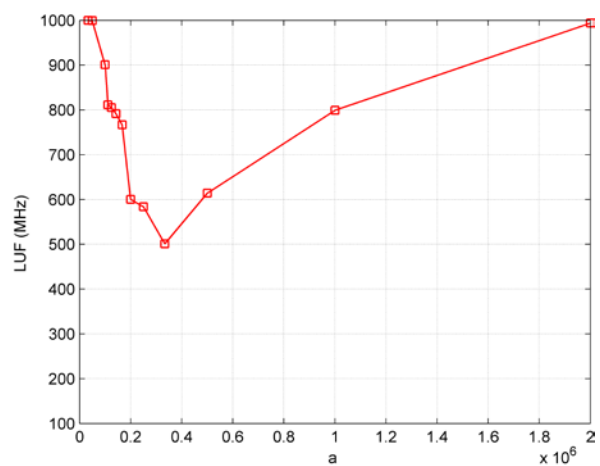


Figure 5-12 : LUF obtenues en simulations en fonction du paramètre a

Les résultats obtenus font très clairement apparaître l’effet des absorbants sur la LUF obtenue. En particulier, il apparaît clairement que la configuration sans absorbants n’est pas la configuration optimale rejoignant les conclusions de [27]. En mesures, la LUF minimale obtenue par la méthode proposée est égale à 400 MHz pour les quantités d’absorbants 3PA et 6 PA que l’on peut donc qualifier de « quantité optimale d’absorbants ». La LUF obtenue

pour la CRBM vide de tout absorbant étant égale à 500 MHz, la LUF se trouve donc réduite de 20%. Pour des quantités d’absorbants supérieurs, la LUF est dégradée.

Il est intéressant de constater que les « quantités optimales d’absorbants » déterminées dans ce travail correspondent à une faible quantité d’absorbants induisant une légère diminution du facteur de qualité de la CRBM. Par conséquent, la capacité de la CRBM à générer des champs EM de fort niveau avec une puissance injectée faible est maintenue.

Dans les simulations, la quantité d’absorbants optimale correspond à la valeur $a=3,33.105$ Hz conduit à une LUF de 501 MHz. Cette valeur de a correspond aux coefficients de qualité $Q=300$ à 100 MHz et $Q=3000$ à 1 GHz.

Il est intéressant de constater la corrélation des résultats obtenus entre la mesure et la simulation ($LUF_{min}=400$ MHz en mesures et $LUF_{min}=501$ MHz en simulation). En effet, la CRBM modélisée en simulation possède les mêmes dimensions et la même géométrie de brasseur. La différence de 100 MHz obtenue peut s’expliquer par le fait que les résultats de simulation sont calculées à de très nombreuses fréquences ($\Delta f= 75$ kHz), ce qui augmente les chances que les valeurs seuils soient dépassées pour une fréquence particulière, le pas fréquentiel étudié en mesures étant lui beaucoup plus faible ($\Delta f= 25$ MHz). Ces résultats prouvent en tout cas l’efficacité et la pertinence de l’approche utilisée en simulation FDTD consistant à modéliser la CRBM sans pertes puis à ajouter à posteriori l’effet d’un coefficient de qualité.

5.2.2.2 Variation de la LUF obtenue en fonction du nombre de plaques du brasseur de modes

La même démarche est également réalisée sur les résultats des mesures et simulations du chapitre 4. Ainsi, les valeurs de LUF obtenues en mesures et en simulation en fonction du nombre de plaques du brasseur de modes pour différentes quantités de charge sont présentées respectivement dans les tableaux 5-1 et 5-2.

	Nombre de plaques du brasseur de modes			
	2	4	6	8
Sans absorbants	550	625	625	500
6 PA	600			400
1 bloc de 36 PA	875			475
4 blocs de 36 PA	>1000			750

Tableau 5-1 : LUF obtenues en mesures en fonction du nombre de plaques de brasseur pour différentes configurations de charges

	Nombre de plaques du brasseur de modes				
	1	2	4	6	8
$a=10^5$	921	777	771	716	776
$a=2.10^5$	990	844	630	583	508
$a=5.10^5$	>1000	997	810	662	573
$a=2.10^6$	>1000	>1000	>1000	>1000	978

Tableau 5-2 : LUF obtenues en simulation en fonction du nombre de plaques de brasseur pour différentes valeurs de a

Il apparaît logiquement que la LUF obtenue diminue avec l’augmentation du nombre de plaques du brasseur de modes, et ce quelle que soit la configuration de charge. Ainsi, en mesures, la LUF diminue de 33% (de 600 à 400 MHz) lorsque le nombre de plaques est augmenté de 2 à 8 dans le cas de l’insertion de 6 pyramides absorbantes.

Concernant les simulations, l’augmentation du nombre de plaques de brasseur a une grande influence sur la LUF. Celle-ci est ainsi quasiment réduite de moitié (de 990 MHz à 508 MHz) en passant de 1 à 8 plaques pour $a=2.10^5$, une valeur proche de la valeur optimale.

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle méthode capable de déterminer la LUF d'une CRBM. Cette méthode rigoureuse est basée sur l'évaluation du nombre d'échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur et la comparaison de la distribution du champ EM obtenu par rapport aux lois de distribution définies par le modèle idéal de cavité surdimensionnée. Ainsi, la méthode proposée permet de s’assurer que la CRBM a atteint à la valeur de LUF déterminée par notre méthode un régime proche de celui d’une cavité surdimensionnée. Ainsi, l’hypothèse effectuée consiste donc à considérer que, pour la valeur de LUF obtenue, l’uniformité de champ obtenue sera satisfaisante.

Cette méthode rend parfaitement compte des modifications profondes des caractéristiques intrinsèques d’une CRBM engendrées par l’insertion d’absorbants ou la modification de la géométrie du brasseur de modes. Cette méthode rend donc désormais possible l’optimisation d’une CRBM en vue de disposer d’un moyen d’essai ayant la LUF la plus faible possible.

Il est intéressant de constater que la méthode proposée nécessite la réalisation de la même quantité de mesures requise lors du calcul des mesures d’uniformité de champ, méthode utilisée actuellement pour déterminer la LUF. Celle-ci requiert en effet la mesure des 3 composantes de champ électrique E_x , E_y et E_z en 8 points pour un certain nombre N de

positions de brasseur (généralement $N=50$ ou $N=60$). Il est donc possible, à titre indicatif, de vérifier l'uniformité de champ par rapport au gabarit proposé par la norme 61000-4-21. Cependant, à la différence des calculs d'écart-type où seules les valeurs maximales aboutissent à la détermination de la LUF, toutes les mesures sont utilisées dans notre méthode. En revanche, dans le cas où l'on cherche à déterminer la quantité optimale d'absorbants à insérer dans la CRBM, le même processus de mesure doit être répété pour chaque nouvelle quantité d'absorbants testée.

Chapitre 6. Modélisation numérique de chambres réverbérantes à parois mobiles ou à structures diffractantes

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'efficacité de 3 géométries différentes de CRBM sont étudiées à l'aide de simulations numériques de type FDTD réalisées avec le logiciel TEMSI-FD similaires à celles présentées dans les chapitres 3 et 4.

La première structure étudiée est une cavité métallique dépourvue de brasseur et dont une des parois peut bouger sur un axe afin d'agrandir la CRBM.

La deuxième possède également une paroi mobile. Cependant, au lieu d'être une paroi plate, la paroi mobile considérée est de forme complexe.

La troisième structure correspond à une CRBM munie d'un brasseur et ayant certaines parois recouvertes de structures métalliques diffractantes.

Chacune de ces 3 structures sera étudiée en comparaison avec la CRBM de référence présentée au chapitre 3 et composée d'un brasseur contenant 8 plaques métalliques à partir des observables pertinents présentés dans les chapitres précédents : le coefficient d'autocorrélation moyen et le taux de rejet des lois de Rayleigh.

6.2 Cas d'une CRBM contenant une paroi mobile

6.2.1 Principe

Dans de nombreuses publications, l'effet d'un brasseur de modes est assimilé à une variation fictive des dimensions de la cavité. Cette conclusion a été confirmée au chapitre 2 où il a été montré que chaque mode de cavité était excité à des fréquences différentes pour chaque position de brasseur. Le décalage en fréquence des modes de résonances vers les basses fréquences équivaut ainsi à un agrandissement de la taille de la CRBM.

L'objectif de cette section est donc de comparer les caractéristiques intrinsèques d'une CRBM munie d'un brasseur et une cavité sans brasseur dont l'une des parois serait mobile. Ainsi, en cas de résultats équivalents obtenus sur chacune des 2 structures, il serait possible de conclure que l'unique effet du brasseur serait donc de modifier fictivement les dimensions de

la cavité. En cas de différences significatives, il faudrait en conclure que l'effet d'un brasseur de modes ne peut se résumer à cette unique constatation.

Le principal intérêt de cette configuration de CRBM est qu'il permettrait de s'affranchir de l'utilisation d'un brasseur, ce qui permettrait d'optimiser la taille du volume utile à l'intérieur de la CRBM. En revanche, cette configuration nécessitant de faire varier une paroi de la CRBM resterait peu évidente à mettre en œuvre en pratique.

Les simulations ont été réalisées dans la bande de fréquences 100 - 500 MHz. Le même pas spatial de maillage $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2\text{cm}$ a été utilisé pour toutes les simulations présentées au cours de ce chapitre. La variation fréquentielle du facteur de qualité pris en compte dans les simulations FDTD est présentée sur la Figure 4-20. Il s'agit de valeurs correspondant à un coefficient de qualité proche des valeurs optimales déterminées au cours du chapitre 3.

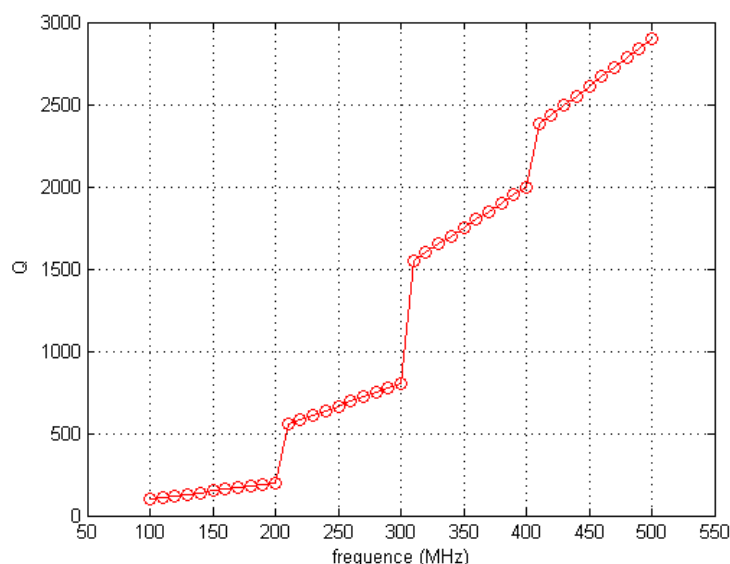


Figure 6-1 : Variation fréquentielle du facteur de qualité pris en compte dans les simulations

Le brasseur est donc remplacé par une paroi mobile. Il a été choisi de faire varier la longueur de la CRBM de façon uniforme : 50 longueurs de la cavité ont été considérées avec un espacement identique d entre toutes les positions de brasseur (Figure 6-2). On considère donc que ceci est équivalent à un pas de rotation angulaire fixe pour un brasseur de modes tournant autour d'un axe fixe.

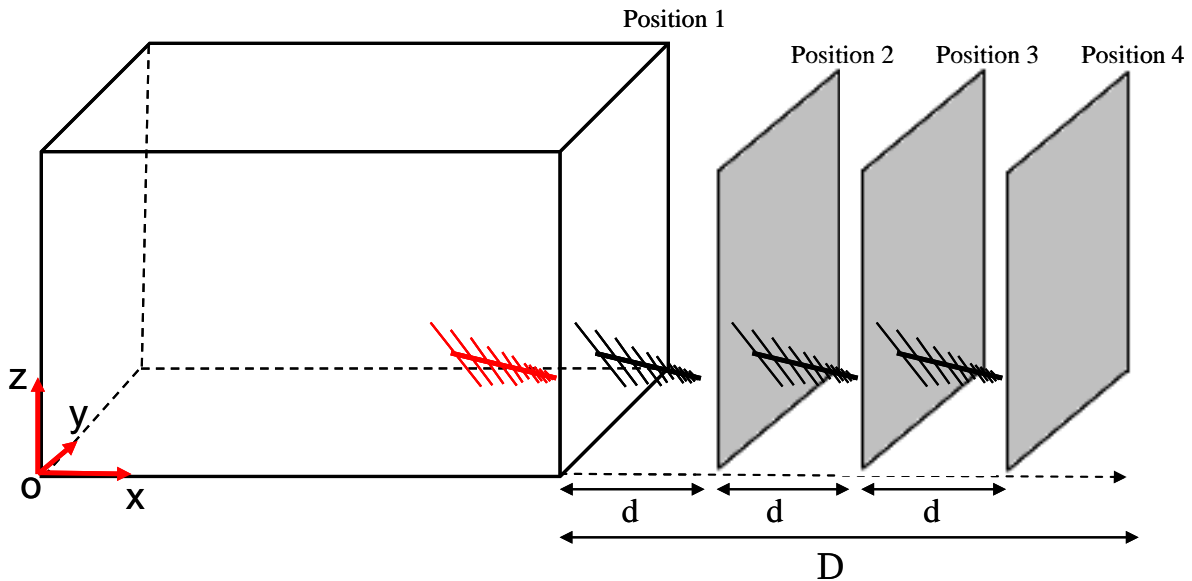


Figure 6-2 : Variation uniforme de la longueur de la CRBM suivant x

6.2.2 Evaluation du nombre d'échantillons indépendants sur un tour de brasseur

Plusieurs variations de longueurs ont été étudiées. Afin de ne pas multiplier le nombre de résultats présentés, nous avons choisi de représenter les résultats obtenus permettant d'obtenir un nombre d'échantillons indépendants similaires au cas de référence. Pour cela, la longueur de base de la CRBM étudiée suivant x étant de 3,57 m, cette longueur a été augmentée et diminuée suivant un pas spatial $d=3\text{cm}$, correspondant à une variation totale D de la longueur de la CRBM de 1,5 m ($a_{\text{max}}=5,07\text{ m}$ et $a_{\text{min}}=2,07\text{ m}$).

La Figure 6-3 présente le coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu pour la CRBM de référence munie d'un brasseur et pour la cavité à paroi mobile pour $D = 1,5\text{ m}$.

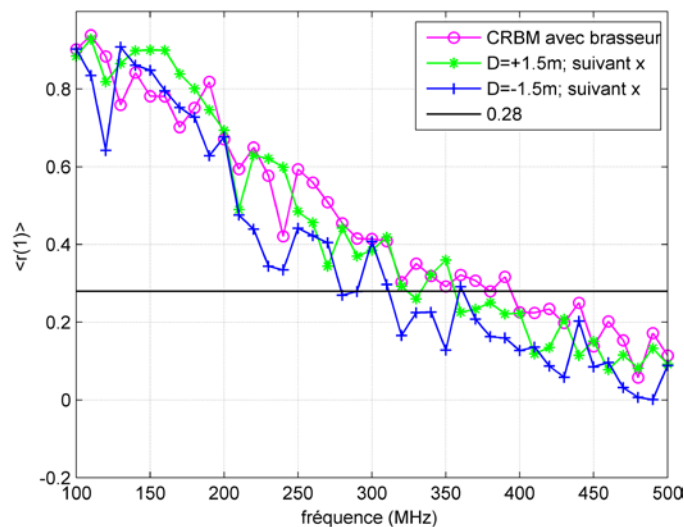


Figure 6-3 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu pour le cas de référence, pour une paroi mobile avec une variation D de +1,5m et pour une paroi mobile avec une variation D de -1,5m

La première remarque concerne la forte valeur de D en comparaison de la longueur initiale de la chambre permettant d'obtenir un coefficient d'autocorrélation moyen similaire au résultat obtenu pour une chambre munie d'un brasseur. Ainsi, la réalisation pratique d'une telle chambre apparaît difficile.

La deuxième remarque concerne le fait que ce coefficient $\langle r(1) \rangle$ est du même ordre de grandeur que la variation se fasse en diminuant ou en augmentant la longueur de la chambre bien que la densité modale soit plus faible lorsque la longueur de la cavité diminue, les modes étant déplacés vers les hautes fréquences.

6.2.3 Evaluation des lois de distribution du champ EM par le test Anderson-Darling

Après avoir étudié le nombre d'échantillons indépendants obtenus pour chacune des 3 configurations étudiées, nous vérifions les distributions du champ EM obtenues en comparaison de la loi de Rayleigh à l'aide du test d'Anderson-Darling. Les Figure 6-4 et Figure 6-5 présentent le taux de rejet et la statistique moyenne du test d'Anderson-Darling obtenue pour chacune des 3 configurations.

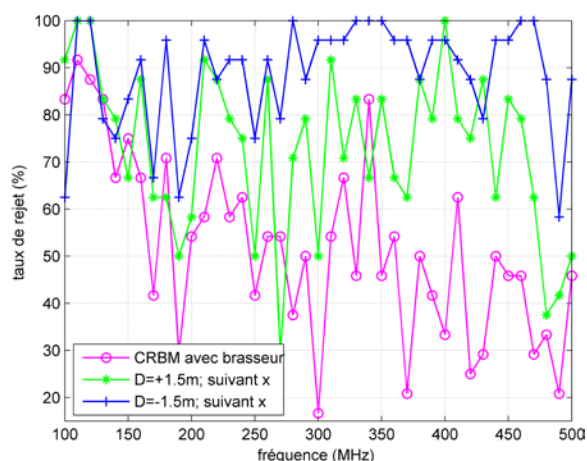


Figure 6-4 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling pour les 3 configurations étudiées

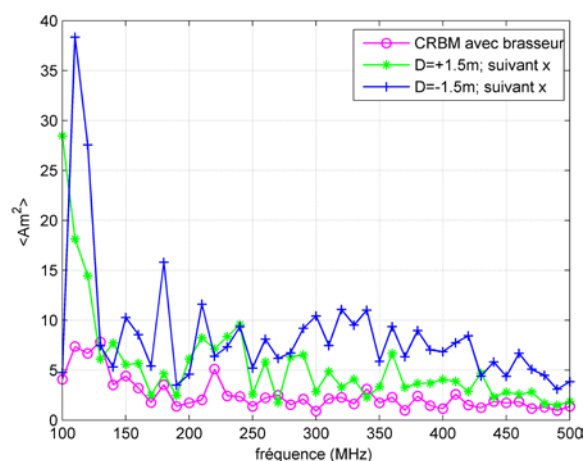


Figure 6-5 : Moyenne de la statistique A_{m2} du test d'Anderson-Darling pour les 3 configurations étudiées

Les résultats présentés ici montrent clairement que la CRBM contenant un brasseur présente un taux de rejet à la loi de Rayleigh largement inférieur aux configurations où la CRBM contient une paroi mobile. Ensuite, le taux de rejet est également inférieur dans le cas où la longueur de la CRBM augmente en comparaison avec le cas où la longueur de la CRBM diminue, du fait de la plus grande densité modale observée dans le cas.

Il est donc erroné de considérer que l'effet d'un brasseur de modes se limite à modifier fictivement les dimensions de la cavité, ce qui revient à décaler en fréquence les modes de

cavité. La modification des conditions aux limites, d'autant plus importante que le brasseur de modes a une géométrie complexe, permet également d'améliorer le brassage de modes et ainsi de permettre aux lois de distribution du champ EM de converger vers les lois de distribution du modèle idéal.

6.3 Cas d'une cavité contenant une paroi mobile de géométrie complexe

6.3.1 Introduction

Afin d'améliorer la configuration précédente, nous décidons d'étudier le cas d'une CRBM à paroi mobile de forme complexe. Ceci veut dire que la paroi n'est pas plate mais recouverte de structures diffractantes complexes. L'objectif est ainsi d'augmenter la modification des conditions aux limites d'une position de la paroi à la suivante.

6.3.2 Cas d'une paroi mobile sphérique

La première configuration concerne une CRBM de même dimension que la CRBM de référence (CRBM avec brasseur) en remplaçant la paroi plate par une paroi sphérique telle qu'illustré sur les figures (Figure 6-6 et Figure 6-7). Ainsi, deux configurations ont été envisagées : la paroi mobile étant une paroi verticale ou le plafond de la CRBM.

Pour chacun des cas étudiés, 50 simulations ont été réalisées avec un déplacement de la paroi sphérique de 3 cm dans le sens permettant un agrandissement de la CRBM. Il est à noter que la position de l'antenne d'émission reste fixe dans tous les cas.

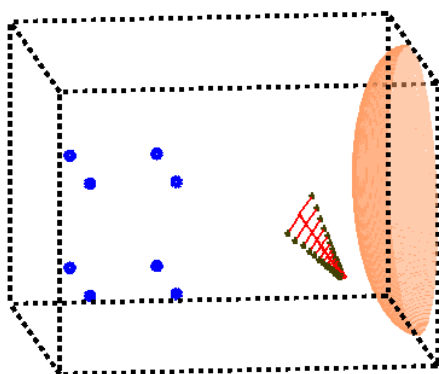


Figure 6-6 : Modélisation FDTD d'une CRBM contenant une paroi verticale de forme sphérique

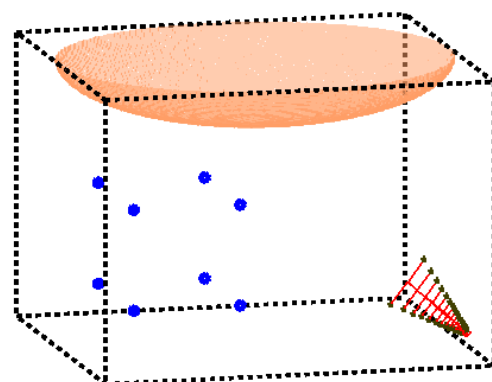


Figure 6-7 : Modélisation FDTD d'une CRBM contenant un plafond de forme sphérique

La Figure 6-8 présente une comparaison entre le cas de référence (CRBM avec brasseur), le cas d'une paroi plate suivant x et les deux cas présentés ci-dessus.

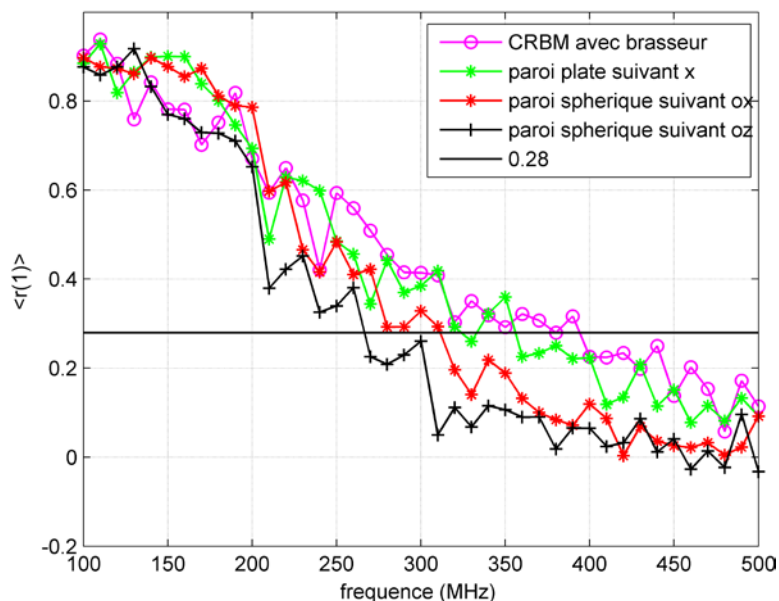


Figure 6-8 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$

Nous remarquons que le coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ est meilleur pour le cas où on utilise une paroi mobile sphérique par rapport au cas de référence.

Les figures (Figure 6-9 et Figure 6-10) présentent respectivement une comparaison du taux de rejet de la loi de Rayleigh par le test d'Anderson-Darling et de la statistique moyenne de ce test calculée pour les 4 configurations étudiées.

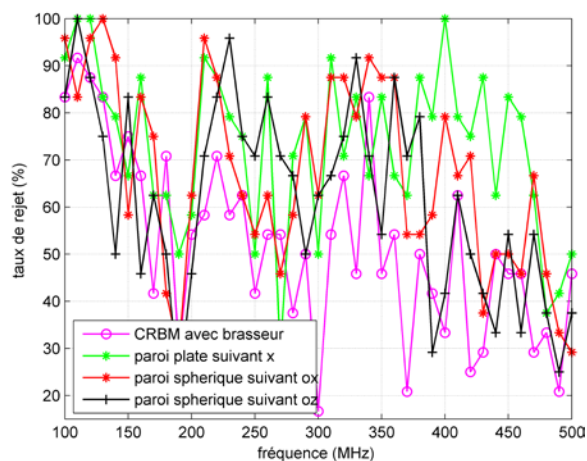


Figure 6-9 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling pour les 4 configurations étudiées

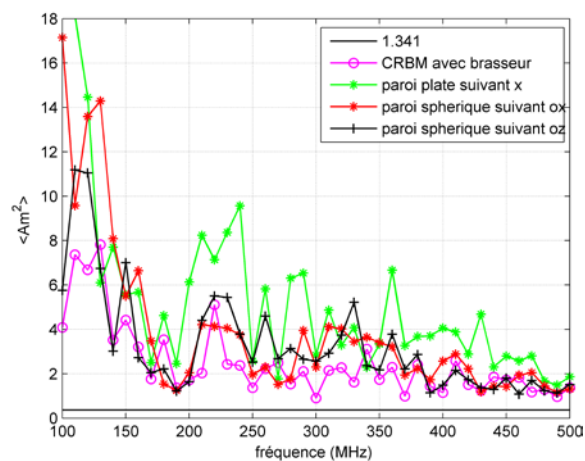


Figure 6-10 : Moyenne de la statistique A_m^2 du test d'Anderson-Darling pour les 4 configurations étudiées

Nous remarquons une nette diminution du taux de rejet de la loi de Rayleigh dans le cas des parois mobiles sphériques par rapport au cas des parois mobiles plates. Cependant, cette amélioration reste médiocre par rapport au cas de la CRBM avec brasseur.

6.3.3 Cas d'une paroi mobile recouverte de 4 cônes métalliques

Afin de confirmer les résultats précédents, nous testons une configuration où la paroi mobile a une géométrie encore plus complexe afin de vérifier si les résultats se rapprochent des résultats obtenus dans le cas de la CRBM munie d'un brasseur.

La deuxième configuration étudiée au cours de cette section correspond à une paroi mobile recouverte de 4 cônes métalliques (Figure 6-11). Afin d'éviter tout effet de symétrie, les cônes sont de hauteurs différentes : 0,9 m, 1 m, 1,2 m et 1,3 m.

Comme précédemment, 50 simulations sont réalisées pour chaque configuration avec un déplacement de la paroi mobile de 3 cm entre 2 positions successives. La position de l'antenne d'émission reste fixe pour toutes les simulations.

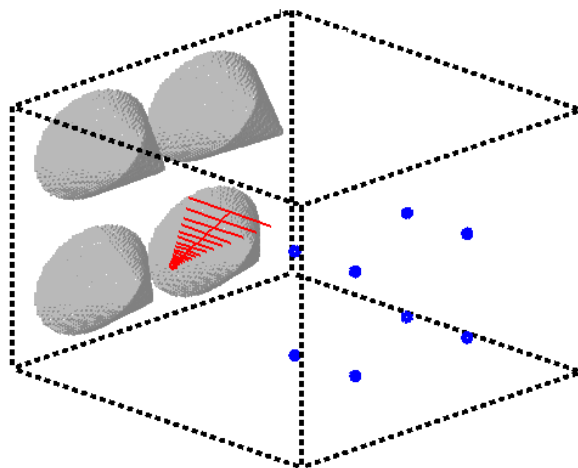


Figure 6-11 : Modélisation FDTD d'une CRBM contenant une paroi mobile recouverte de 4 cônes métalliques de taille différente

La Figure 6-12 présente une comparaison du coefficient d'autocorrélation moyen obtenu pour la CRBM de référence, CRBM à paroi mobile plate et la CRBM à paroi mobile recouverte de 4 cônes métalliques.

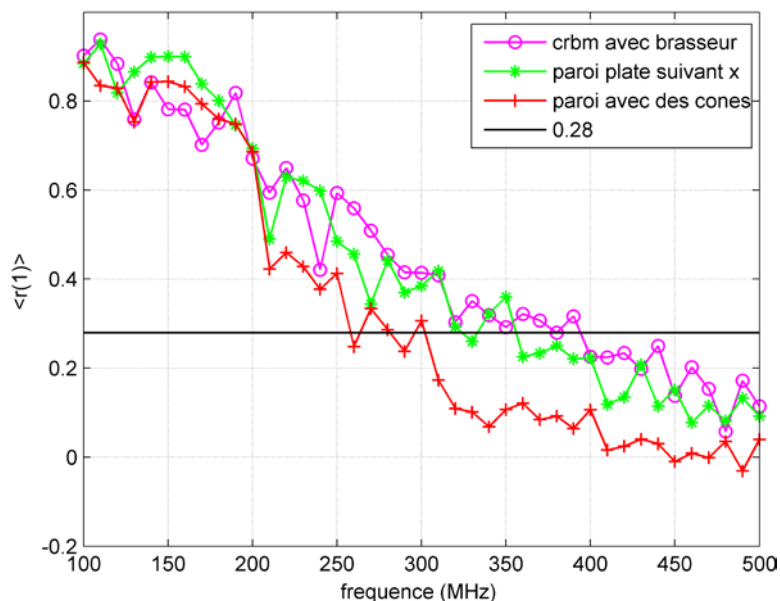


Figure 6-12 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$

Nous pouvons faire la même remarque que pour les parois sphérique. La moyenne $\langle r(1) \rangle$ du coefficient d'autocorrélation à l'ordre 1 est pratiquement identique entre 100-200 MHz et meilleur au-delà (200-500MHz) entre le cas de la paroi avec des cônes et le cas de la CRBM avec brasseur et la CRBM à paroi mobile plate.

Les figures (Figure 6-13 et Figure 6-14) présentent respectivement une comparaison de la moyenne $\langle A_m^2 \rangle$ et le taux de rejet (RR en %) calculées de la même façon qu'avant, entre le cas de la CRBM avec brasseur, la CRBM à paroi mobile plate, la CRBM à paroi mobile sphérique et le cas de la CRBM avec une paroi contenant des cônes.

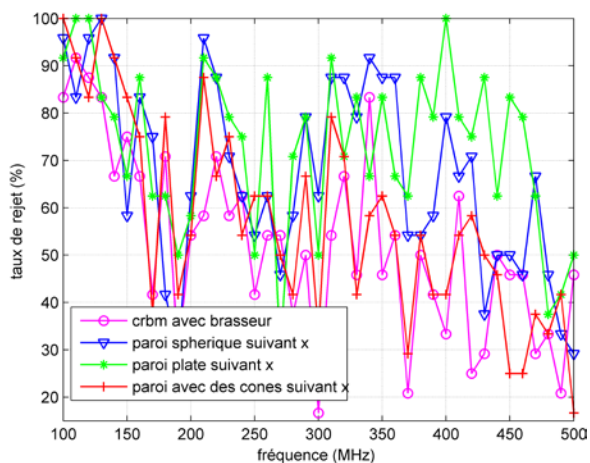


Figure 6-13 : Taux de rejet du test d'Anderson-Darling pour les 4 configurations étudiées

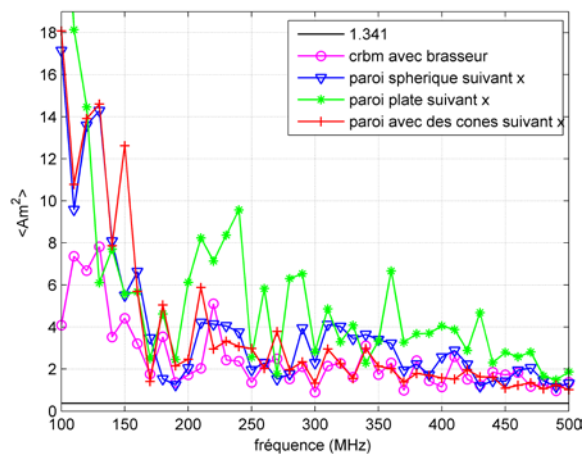


Figure 6-14 : Moyenne de la statistique $\langle A_m^2 \rangle$ du test d'Anderson-Darling pour les 4 configurations étudiées

Nous constatons une diminution du taux de rejet pour la paroi mobile recouverte de 4 cônes par rapport à la paroi mobile sphérique et à la paroi mobile plate. Le taux de rejet est alors comparable à celui obtenu pour la CRBM munie d'un brasseur.

Il est donc possible de conclure que plus la géométrie de la paroi mobile est complexe plus le brassage de modes sera efficace. Il s'agit d'une conclusion similaire à celle effectuée dans le chapitre 4 à propos de l'effet de la géométrie du brasseur.

Malheureusement, ce type de CRBM semble difficile à mettre en œuvre du fait de la complexité de construire une cavité métallique dont l'une des parois serait mobile.

6.4 Ajout de structures diffractantes sur les parois d'une CRBM munie d'un brasseur de modes

Dans cette section, un nouveau type de CRBM est étudiée. Une chambre réverbérante classique, munie d'un brasseur de modes, est modifiée par l'ajout de structures métalliques diffractantes de forme complexe sur certaines parois. Ce type de géométrie, censé améliorer le brassage de modes et donc l'efficacité des CRBM, a déjà été proposé par différents auteurs [46] [47] [48].

Dans [46], des diffuseurs utilisés en acoustique sont appliqués sur les parois. Les résultats obtenus montrent un faible effet positif sur l'uniformité du champ EM. Dans [47], des simulations TLM montrent que l'insertion de structures diffractantes a un effet positif sur la densité de modes en basse fréquence. Aucun autre résultat spécifique aux CRBM est présenté. Dans [48], des lignes passives sont connectées sur les parois des CRBM. Il est montré que ces lignes passives améliorent sensiblement l'uniformité du champ EM.

L'objectif de cette section est donc d'étudier si l'insertion de structures diffractantes non mobiles au sein d'une CRBM a un effet positif sur les caractéristiques intrinsèques de la CRBM. En effet, deux raisonnements contradictoires peuvent être proposés sur l'influence de ces structures métalliques fixes.

Un premier raisonnement consiste à considérer que l'insertion de structures diffractantes va permettre d'améliorer le brassage de modes. En effet, une densité de courant complexe est induite sur chaque structure diffractante. Le rayonnement EM dû à ces densités de courant complexes aurait donc pour effet d'améliorer le brassage par rapport à une CRBM classique. En raisonnant en termes d'ondes planes, il est également possible de considérer que chaque onde plane se propageant dans la CRBM aura un trajet plus complexe au sein de la CRBM du fait de l'ajout de ces structures diffractantes. Il en résulterait donc une plus faible influence des trajets directs par rapport aux trajets indirects améliorant ainsi les lois de

distribution du champ EM et une plus faible corrélation du champ EM obtenu entre 2 positions successives du brasseur de modes.

A l'inverse, un raisonnement opposé consiste à considérer que, malgré l'insertion de structures diffractantes sur les parois, les seules modifications apportées à la chambre entre 2 positions de brasseur successives correspondent justement à la rotation du brasseur lui-même, les structures diffractantes n'ayant alors aucun effet.

L'objectif de cette section est donc de déterminer quel est le raisonnement correct.

Par conséquent, deux géométries différentes de CRBM ont donc été comparées. Le cas de référence correspond à la CRBM étudiée dans les précédents chapitres contenant un brasseur de mode constitué de 8 plaques métalliques. La deuxième CRBM est identique au cas de référence en dehors du fait que des cônes métalliques de différentes dimensions ont été insérés sur 2 parois de la CRBM (Figure 6-15).

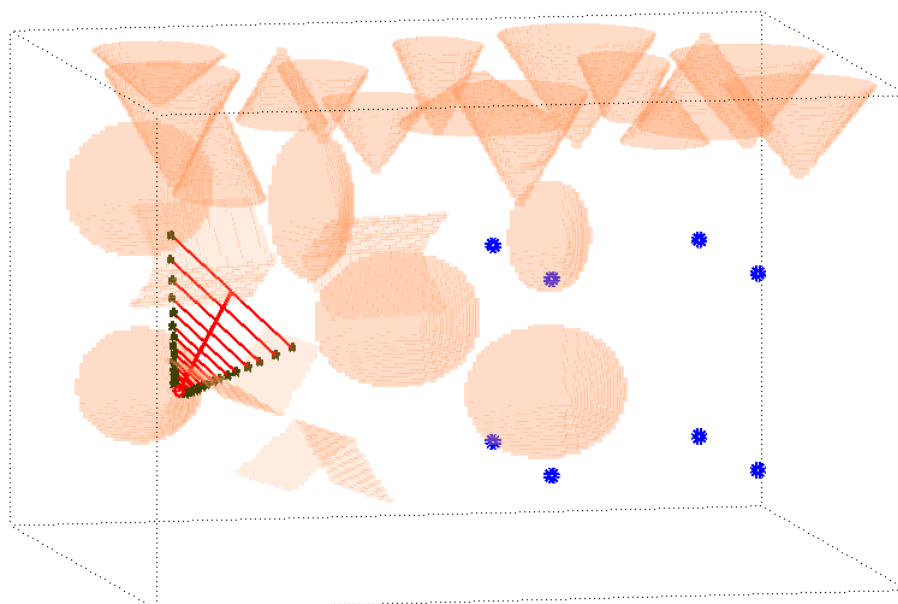


Figure 6-15 : Modélisation FDTD d'une CRBM dont 2 faces sont recouvertes de cônes métalliques de différentes tailles

Les résultats présentés sur les figures 6-16 et 6-17 montrent clairement que l'addition de structures métalliques fixes à l'intérieur de la CRBM n'a pas d'influence visible sur les caractéristiques de la CRBM. Cette conclusion étant valable quelles que soient les conditions de charge de la CRBM. Ce résultat induit que le premier raisonnement décrit précédemment n'est pas correct.

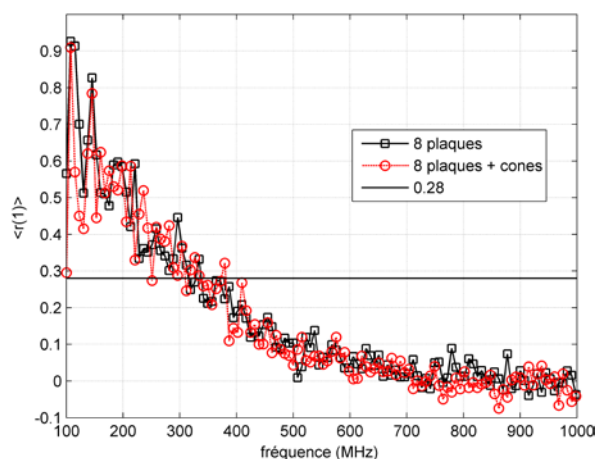


Figure 6-16 : Coefficient d'autocorrélation moyen $\langle r(1) \rangle$ obtenu pour le cas d'une CRBM avec et sans cônes fixes sur les parois pour $a=10^5$.

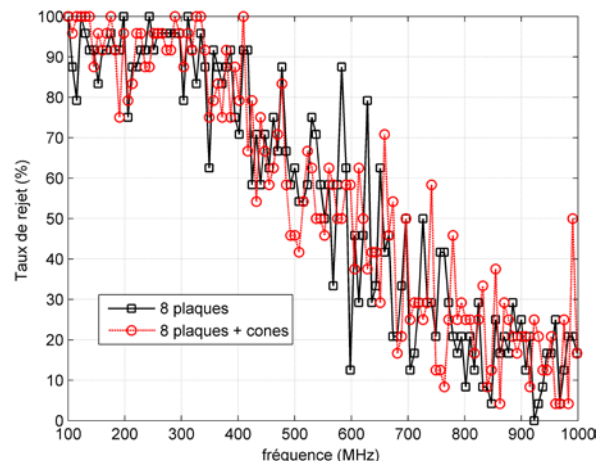


Figure 6-17 : Taux de rejet de la loi de Rayleigh obtenu pour le test Anderson-Darling pour le cas d'une CRBM avec et sans cônes fixes sur les parois pour $a=10^5$.

En conclusion, le fait de bénéficier d'observables pertinents permettant de juger de la qualité du fonctionnement d'une CRBM a permis de mettre très clairement en évidence que l'insertion de structures diffractantes fixes sur les parois d'une CRBM ne pouvaient pas constituer une piste d'amélioration.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, trois géométries différentes de la géométrie classique généralement utilisée pour la construction de la CRBM ont été étudiées à l'aide de simulations numériques FDTD.

L'étude d'une cavité dépourvue de brasseur mais à paroi mobile a montré que l'efficacité du brassage était insuffisante en comparaison d'une CRBM munie d'un brasseur. La convergence des lois de distribution s'améliore lorsque la paroi mobile a une géométrie complexe, un effet similaire à l'augmentation de la complexité d'un brasseur de modes (Chapitre 4). Ce type de CRBM à paroi mobile ne représente donc pas une solution par rapport à une CRBM classique à cause des performances médiocres obtenues et de la difficulté technique de réaliser de telles chambres.

Enfin, l'étude d'une chambre réverbérante munie d'un brasseur et dont certaines parois sont recouvertes de structures diffractantes fixes a montré un bénéfice nul par rapport à une CRBM classique.

En conclusion, les performances d'une CRBM ne peuvent être améliorées que lorsque l'objet mobile au sein de la chambre modifie plus profondément les conditions aux limites

entre 2 positions successives de l'objet, c'est-à-dire lorsque l'objet a une taille qui augmente ou une forme plus complexe.

Conclusion générale

Ce travail de thèse a concerné l'étude du fonctionnement des chambres réverbérantes à brassage de modes aux basses fréquences, fréquences où le brassage de modes est critique. L'analyse de l'influence de la géométrie du brasseur de modes et de la valeur du coefficient de qualité sur les poids de modes de cavité ainsi que sur les caractéristiques intrinsèques d'une CRBM a permis de déterminer deux observables pertinents pour juger de la qualité du comportement EM d'une CRBM.

Le premier observable est le coefficient d'autocorrélation moyen qui permet d'évaluer le nombre d'échantillons indépendants obtenus sur un tour de brasseur. Le deuxième observable correspond au taux de rejet au test d'Anderson-Darling de la loi de Rayleigh pour le module des composantes rectangulaires du champ électrique.

Ainsi, il a été montré que les lois de distribution du champ électromagnétique au sein de la CRBM convergent beaucoup plus rapidement vers les lois de distribution du modèle idéal d'une cavité surdimensionnée lorsqu'une faible quantité d'absorbants est insérée dans la CRBM. Ceci implique que, contrairement à une idée fortement répandue, il n'est pas forcément bénéfique de travailler au coefficient de qualité le plus fort possible. En revanche, l'effet d'une augmentation de la complexité du brasseur de modes obtenu par exemple par l'ajout de plaques métalliques est sans effet sur les lois de distribution du champ EM si la CRBM présente un coefficient de qualité élevé.

Il a également été mis en évidence que le nombre d'échantillons non corrélés diminue légèrement lors de l'insertion d'une faible quantité d'absorbants mais augmente lorsque la complexité du brasseur de modes obtenu par exemple par l'ajout de plaques métalliques est accrue.

Parallèlement, il a également été mis en évidence que la procédure proposée par les normes pour déterminer la LUF d'une CRBM à partir de calculs d'uniformité de champ était peu pertinente du fait de l'insensibilité de ce critère à la variation du coefficient de qualité ou de la modification de la géométrie du brasseur.

Pour y remédier, une méthode permettant de déterminer la fréquence minimale d'utilisation à partir de l'analyse des deux observables mentionnés précédemment a été proposée. Cette méthode permet de déterminer le coefficient de qualité optimal de la CRBM à travers l'insertion de différentes quantités d'absorbants. Elle est basée sur un compromis à

trouver entre le nombre de positions indépendantes du brasseur de modes et le rejet des lois de Rayleigh. La méthode permet également de comparer la qualité du brassage induite par différents brasseurs de taille ou de géométrie différentes afin de déterminer le brasseur le plus efficace.

Perspectives

Ce travail de thèse ouvre de nombreuses perspectives de travail. Les principales sont mentionnées ci-dessous.

Vérification des hypothèses émises sur les poids de modes

Dans ce manuscrit, des hypothèses permettant d'expliquer les principaux résultats obtenus concernant l'influence du brasseur ou du coefficient de qualité ont été émises à partir des résultats obtenus lors du second chapitre concernant la variation des poids des modes au sein de la CRBM. Il serait intéressant d'aller plus avant sur ce sujet afin de valider ces hypothèses. Ce travail peut être réalisé à partir de l'analyse de simulations FDTD. Une seconde piste consiste à réaliser un modèle analytique permettant de construire la cartographie du champ EM au sein d'une CRBM en appliquant des poids de modes aléatoires.

Optimisation de la géométrie d'un brasseur de modes

La méthode de détermination de la LUF présentée dans ce manuscrit permet de comparer l'efficacité de différents brasseurs de modes. Il serait donc intéressant de réaliser une étude, s'appuyant sur cette méthode, permettant de déterminer des règles de construction de brasseur de modes optimisé en fonction de différents paramètres géométriques (plus grande longueur, rapport hauteur/largeur, volume brassé,...).

Etude de l'influence de l'antenne d'émission

Selon notre opinion, après le coefficient de qualité et la géométrie du brasseur, l'antenne d'émission est le troisième paramètre pouvant permettre d'optimiser le fonctionnement d'une CRBM en basses fréquences. Il faut tout d'abord s'intéresser à la meilleure façon de placer l'antenne au sein de la CRBM. Les normes encouragent les utilisateurs à l'orienter vers un coin de la cavité tandis que nous présentons que la position optimale consiste à orienter directement l'antenne sur le brasseur de modes afin de faciliter le brassage.

Tentative de réduction des trajets non brassés

La présence de trajets non brassés entre l'antenne d'émission et le volume utile explique souvent le rejet des lois de distribution du modèle idéal. Il serait intéressant de réfléchir à une stratégie permettant de réduire ces trajets non brassés. Par exemple, il serait intéressant de vérifier si l'insertion d'une plaque métallique entre l'antenne et le volume utile ou le placement du brasseur entre l'antenne et le volume utile représentent des solutions permettant de réduire le taux de rejet de la loi de Rayleigh par réduction des trajets directs.

Etude de l'influence de l'objet sous test

Un critère empirique proposé par les normes indique que l'objet sous test doit occuper un volume maximum correspondant à une fraction du volume total de la CRBM. Une campagne de mesures ou de simulations numériques serait utile afin de mettre en évidence l'influence d'un objet inséré dans la CRBM sur les caractéristiques de celle-ci. En effet, il est possible qu'au-delà d'une certaine taille, le fonctionnement propre de la chambre en tant que CRBM soit remis en cause. Il s'agit donc, à partir de l'insertion de différents objets de tailles différentes, d'arriver à établir une règle générale concernant la taille limite de l'objet sous test. Cette règle doit également prendre en compte les pertes engendrées par l'objet sous test.

Bibliographie

- [1] Hall W. “Heating apparatus”, U.S. Patent 2 618 735, 1947
- [2] Corona, P.; Latmiral, G.; Paolini, E.; Piccioli, L. “Use of a Reverberating Enclosure for Measurements of Radiated Power in the Microwave Range”, IEEE Trans. on EMC, VOL. EMC-18, NO.2, MAY 1976
- [3] De Vries-Venter, L.; Baker, D.C. “EMC: radiated immunity testing an overview of the reverberation chamber”, Communications and Signal Processing, 1998, COMSIG '98, Proceedings of the 1998 South African Symposium on, pp. 471–474, Sep 1998.
- [4] Hatfield, M.O. “Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches”, IEEE Trans. on EMC, Vol. 30, No. 3, August 1988, pgs 229-238
- [5] Lemoine, C. “Contribution à l’analyse statistique des mesures en chambre réverbérante à brassage de modes”, thèse, université de Rennes, 16 Juillet 2008.
- [6] Lemoine, C. “antenne size sensitivity on the statistic of received power measurements in a reverberation chamber” EMC Europe Workshop 2007, Paris, France, 5 pages, Jun. 2007.
- [7] Serra, R. “Introduction of Randomness in Deterministic, Physically-Consistent Descriptions of Reverberation Chambers and Experimental Verification”, thèse, Ecole polytechnique de Torino, 2009.
- [8] Voges, E.; Eisenburger, T. “Electrical Mode Stirring in Reverberating Chambers by Reactively Loaded Antennas”, IEEE Trans. on EMC, VOL. 49, NO. 4, NOVEMBER 2007
- [9] Démoulin, D.; Besnier, Ph. “Les chambres réverbérantes en électromagnétisme”, Institut Télécom et LAVOISIER, Paris, 2010.
- [10] Hill, D.A. “Electronic mode stirring for reverberation chambers”, IEEE Trans. on EMC, VOL. 36, NO. 4, NOVEMBER 1994.

-
- [11] Huang, Y.; Edwards, D. J. "AN INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD INSIDE A MOVING WALL MODE-STIRRED CHAMBER", in proc, EMC, Edinburgh, UK, 1992, pp 115-119
- [12] Nijenhuis, J.W. "A short investigation in the old wall stirring method for reverberating chambers ", General Assembly and Scientific Symposium, URSI, 2011 , Pages 1 - 4
- [13] Leferink, F. B. J. "High Field in a large volume: the intrinsic reverberation chamber", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol. 1, pp. 24-27, 1998.
- [14] Standard IEC 61000-4-21:2001.Reverberation Chamber Test Methods, Int. Electrotech. Commiss.
- [15] Lunden, O.; Backstrom, M. "Absorber loading study in FOI 36.7 m3 mode stirred reverberation chamber for pulsed power measurements", Proceedings of the IEEE Int. Symposium on EMC, Detroit, Aug. 2008.
- [16] Lemoine, C.; Besnier, P.; Drissi, M. "Investigation of reverberation chamber measurements through high-power goodness-of-fit tests", IEEE Trans. on EMC, vol. 49, no. 4, pp. 745-755, Nov. 2007
- [17] Stephens, M.A. "EDF statistics for goodness of fit and some comparisons", Journal of the American Statistical Association, vol. 69, no. 347, pp. 730-737, Sep.1974
- [18] Hill, D.A.; Ladbury, J.M. "Spatial-correlation functions of fields and energy density in a reverberation chamber", IEEE Trans. on EMC, vol.44, no. 1, pp. 95-101, Feb. 2002
- [19] Lemoine, C.; Besnier, P.; Drissi, M. "Investigation of reverberation chamber measurements through high-power goodness-of-fit tests", IEEE Trans. on EMC, vol. 49, no. 4, pp. 745-755, Nov. 2007.
- [20] Orjubin, G.; Richalot, E.; Mengue, S.; Picon, O. "Statistical model of an undermoded chamber", IEEE Trans. on EMC, vol. 48, no. 1, pp. 248-251, Feb. 2006.
- [21] Arnaut, L.R. "Limit distributions for imperfect electromagnetic reverberation", IEEE Trans. on EMC, vol. 45, no. 2, pp. 357-377, May 2003.

-
- [22] Serra, R.; Canavero, F. “Bivariate statistical approach for “good-but-imperfect” electromagnetic reverberation”, *IEEE Trans. on EMC*, vol. 53, no. 3, pp. 554-561, Aug. 2011.
- [23] Orjubin, G.; Richalot, E.; Picon, O.; Legrand, O. “ Chaoticity of a Reverberation Chamber Assessed From the Analysis of Modal Distributions Obtained by FEM ” *IEEE Trans. on EMC*, vol 49, no 4, pp 762-761, Nov 2007.
- [24] Petit, F. “Modélisation et simulation d’une chambre réverbérante à brassage de modes à l’aide de la méthode des différences finies dans le domaine temporel”, thèse, Université de Marne-La-Vallée, 2002
- [25] Orjubin, G.; Richalot, E.; Picon, O.; Legrand, O. “Mode perturbation induced by the stirrer rotation in a reverberating chamber”, in *Proc. EMC Zurich 2005*, Zurich, Switzerland, Feb., pp. 39–42.
- [26] Orjubin, G. “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”, thèse, université de marne-la-vallée, 25 mai 2005.
- [27] Cozza, A. “The Role of Losses in the Definition of the Overmoded Condition for Reverberation Chambers and Their Statistics”, *IEEE Trans. on EMC*, vol. 53, no. 2, pp. 296-307, May 2011.
- [28] Gustavsen, B.; Semlyen, A. "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061, July 1999.
- [29] Holloway, C.L.; Hill, D.A.; Ladbury, J.M.; Koepke, G. “Requirements for an effective reverberation chamber : unloaded or loaded”, *IEEE Trans. on EMC*, vol. 48, no. 1, pp. 187-194, Feb. 2006.
- [30] Ladbury J.M.; Wilson P.F.; Koepke, G.H.; Lammers, T. “Reverberation chamber : an evaluation for possible use as a RF exposure system for animal studies”, in *Proc. Bio-Electromagnetics Society 25th Annual Meeting*, Maui, HI, Jun. 22-27, 2003.

-
- [31] Lammers, T. M.; Holloway, C. L.; Ladbury, J. “The effects of loading configurations on the performance of reverberation chambers”, in EMC Europe, Eindhoven, The Netherlands, Sept. 2004, pp. 727-732.
- [32] Pocai, M.; Dotto, I.; D'Abreu, G.; Festa, D. “Experimental definition of the lowest usable frequency (LUF) of an aluminum made reverberation chamber with reference to the IEC 61000-4-21 standard”, In IEEE International Symposium on EMC, vol. 3, Portland, Oregon, Aug. 2006, pp. 849_852
- [33] Lemoine, C. ; Sol, J. Besnier, Ph. ; Rosnarho, J.F. ; Dorgan, C. “Effet de la charge sur la statistique des mesures en chambre réverbérante”, CEM 2010, Limoges, Apr. 2010.
- [34] Asander, H.-J.; Eriksson, G.; Jansson, L.; Akermark, H. “Field uniformity analysis of a mode stirred reverberation chamber using high resolution computational modelling”, Proceedings of the IEEE Int. Symposium on EMC, pp. 285-290, 2002.
- [35] Hill, D.A., “Plane Wave Integral Representation for Fields in Reverberation Chambers”, IEEE Trans. on EMC, vol. 40, pp. 209-217, Aug. 1998
- [36] Moglie, F.; Primiani, V.M. “Analysis of the Independent Positions of Reverberation Chamber Stirrers as a Function of Their Operating Conditions”, IEEE Trans. on EMC, vol. 53, no. 2, pp. 288-295, May 2011.
- [37] Andrieu, G.; Tristant, F.; Reineix, A. “Investigations about the use of aeronautical metallic halls containing apertures as mode stirred reverberation chambers”, IEEE Trans. on EMC, accepted for publication
- [38] Guiffaut, Ch. “Guide de l'utilisateur de TEMSI-FD”, Mars 2007.
- [39] Clegg, J.; Marvin, A.C.; Dawson, J.F.; Porter, S.J. “Optimization of Stirrer Designs in a Reverberation Chamber”, IEEE Trans. on EMC, vol. 47, no.4 pp. 824 – 832, Nov. 2005
- [40] Moglie, F.; Primiani, V.M. “Numerical analysis of a new location for the working volume inside a reverberation chamber”, IEEE Trans. on EMC, vol. 54, no. 2, pp. 238-245, Apr. 2012.

-
- [41] Moglie, F.; Primiani, V.M. "Evaluation of uncorrelation and statistics inside a reverberation chamber in presence of two independent stirrers", Proceedings of the IEEE Int. Symposium on EMC, Austin, pp. 515-519, Aug. 2010.
- [42] Corona, P.; Ferrara, G.; Migliaccio, M. "Reverberating chambers as sources of stochastic electromagnetic fields", IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 38, no. 3, pp. 348_356, Aug. 1996
- [43] Boyes, S.J.; Huang, Y.; Khiabani, N. "Improved Rayleigh field statistic in reverberation chambers from modified mechanical stirring paddles", Proceedings of the Antennas and Propagation Conference (LAPC), Loughborough, 2011
- [44] Yi Huang; Jie Tao Zhang; Ping Liu. "A novel method to examine the effectiveness of a stirrer", Proceedings of the IEEE Int. Symposium on EMC, Chicago, pp. 556-561, 2005.
- [45] Lunden, O.; Backstrom, M. "Stirrer efficiency in FOA reverberation chambers. Evaluation of correlation coefficients and chi-squared tests", IEEE Int. Symposium on EMC, vol. 1, Washington D.C., Août 2000, pp 11-16
- [46] Clegg, J.; Marvin, A.C.; Angus, J.A.S.; Dawson, J.F. "Method for increasing the mode density in a reverberant screened room", Science Measurement and technology, IEE Proceedings, vol 143, n°4, pp. 216-220, Jul. 1996.
- [47] Petirsch, W.; Schwab, A.J. "Investigation of the field uniformity of a mode-stirred chamber using diffusers based on acoustic theory", IEEE Trans. on EMC, vol. 41, no. 4, pp. 446-451, Nov. 1999.
- [48] Démoulin, B. ; Albu, C. ; Leman, S. ; Koné, L. Baranowski, S. "Utilisation Conjointe du Brassage Mécanique et du Brassage Fréquentiel de Modes pour Localiser la « Starting Frequency » d'une Chambre Réverbérante", TELECOM 2009, Agadir, MAROC

Liste des publications de l'auteur

Communications internationales avec actes et à comité de lecture

(1) A. Adardour, G. Andrieu, A. Reineix, “*Influence of a Stirrer on the Cavity Modes Within a Reverberation Chamber*”, EMC europe 2012, septembre 2012, Rome, Italie.

(2) M. El Haffar, A. Reineix, C. Guiffaut, A. Adardour. “*Reverberation Chamber Modeling Using The FDTD Method*”, ACTEA 2009, Liban.

Communication nationale avec actes et à comité de lecture

(3) A. Adardour, G. Andrieu, A. Reineix, “*Influence de la géométrie du brasseur de modes sur l'établissement des modes au sein d'une chambre réverbérante à brassage de modes*”, Congrès CEM 2012, Avril 2012, Rouen, France.

Optimisation des performances des Chambres Réverbérantes à Brassage de Modes aux basses fréquences - Proposition d'une nouvelle définition de la fréquence minimale d'utilisation

Résumé : Le fonctionnement des chambres réverbérantes à brassage de modes (CRBM) est encore mal connu sous bien des aspects. Ce travail de thèse a pour but d'améliorer la compréhension physique des CRBM afin d'optimiser leurs fonctionnements aux basses fréquences et ainsi diminuer la fréquence minimale d'utilisation (LUF). Des résultats expérimentaux et numériques ont montré que le facteur de qualité de la CRBM le plus élevé ne correspond pas au cas optimal tandis qu'une augmentation de la complexité du brasseur de modes améliore le fonctionnement des CRBM. A la lumière de ces résultats, une méthode, ainsi que les valeurs seuil associées, permettant de déterminer la LUF d'une CRBM a été proposée. Cette méthode permet de déterminer le facteur de qualité optimal d'une CRBM à travers l'insertion de différentes quantités d'absorbants et permet également de comparer la qualité du brassage induite par différents brasseurs de géométries différentes.

Mots-clés : chambre réverbérante à brassage de modes, brasseur de modes, compatibilité électromagnétique, simulation électromagnétique, facteur de qualité, autocorrélation.

Low frequency optimization of Mode Stirred Reverberation Chambers – Proposal of a new Lowest Usable Frequency Definition

Abstract: Mode stirred reverberation chamber (MSRC) functioning is not fully known on numerous issues. The aim of this Ph.D. work is the improvement of the physical knowledge of MSRC in order to optimize these facilities at low frequencies and in particular to decrease the lowest usable frequency (LUF). Experimental and numerical results show that the highest quality factor of a MSRC is not the optimal case and that an increase of the mode stirrer geometry complexity improves the MSRC functioning. Thanks to these results, a new method (with its associated threshold values) determining the LUF has been proposed. This method allows determining the optimal quality factor of a MSRC by adding different quantities of absorbers and comparing the efficiency of mode stirrers having different geometries.

Keywords : mode stirred reverberation chamber, mode stirrer, electromagnetic compatibility, electromagnetic modelling, quality factor, autocorrélation.
