



HAL
open science

Caractérisation non biaisée de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante : apport du brassage et mise en place d'une méthode sans contact

Wafa Krouka

► To cite this version:

Wafa Krouka. Caractérisation non biaisée de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante : apport du brassage et mise en place d'une méthode sans contact. Electronique. Université Gustave Eiffel, 2021. Français. NNT : 2021UEFL2028 . tel-03697252

HAL Id: tel-03697252

<https://theses.hal.science/tel-03697252v1>

Submitted on 16 Jun 2022

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

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



UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

Ecole Doctorale Mathématiques, Sciences et Technologies de
l'Information et de la Communication

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'Université Gustave Eiffel

Spécialité : Electronique, Optronique et Systèmes (CNU 63)

présentée et soutenue par :

Wafa KROUKA

**Caractérisation non biaisée de l'efficacité d'antenne
en chambre réverbérante : apport du brassage et mise en
place d'une méthode sans contact**

Dirigée par : **Mme Elodie Richalot**
Encadrée par : **M. François Sarrazin**

Pour une soutenance le 16 Décembre 2021 devant le jury composé de :

M ^{me} Françoise Paladian	Professeure, Institut Pascal/Université Clermont Auvergne	Rapporteur
M. Guillaume Andrieu	Maître de Conférences, XLIM/Université de Limoges	Rapporteur
M. Julien De Rosny	Directeur de Recherche, CNRS/Institut Langevin/ESPCI Paris	Examineur
M. Philippe Besnier	Directeur de Recherche, CNRS/IETR/INSA Rennes	Examineur
M. Christophe Delaveaud	Ingénieur de recherche, CEA-Leti Grenoble	Examineur
M. François Sarrazin	Maître de Conférences, ESYCOM/Université Gustave Eiffel	Encadrant
M ^{me} Elodie Richalot	Professeure, ESYCOM/Université Gustave Eiffel	Directrice

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Françoise Paladian, Guillaume Andrieu et Christophe Delaveaud qui ont accepté de participer à mon jury de thèse. Leurs retours et leurs commentaires ont été très constructifs. Mes remerciements s'adressent également à Philippe Besnier et Julien De Rosny pour leur collaboration et échanges scientifiques fructueux. Ce fut un plaisir de travailler avec vous.

Un grand merci à Elodie Richalot et à François Sarrazin pour leur encadrement, leur suivi ainsi que leur soutien et conseils le long de cette thèse. Votre disponibilité et vos encouragements m'ont vraiment marqués.

Mes remerciements vont également aux membres du laboratoire ESYCOM, spécialement les doctorants : Ayichatou, Miyassa, Meriem, Aymen, Ariston, Imad, Duc, Jafar, Amine...etc.

Je ne saurais terminer sans remercier ma famille : mes parents qui ont toujours cru en moi, qui m'ont toujours soutenu et qui ont fait de moi la personne que je suis aujourd'hui, ma soeur Sihem, mes frères Moncef et Adel pour leur soutien et leurs encouragements.

Je remercie particulièrement mon mari Arezki qui a fait tout pour que cette thèse se déroule parfaitement, merci pour ta présence, ton soutien et ta patience. Pour finir je remercie ma fille Ines de m'avoir accompagné dans la dernière étape de ma thèse, tu étais et tu es ma source de motivation.

Table des matières

Remerciement	ii
Introduction générale	1
Contexte et motivation	1
Objectifs	3
Organisation de la thèse	4
1 État de l’art sur la mesure de l’efficacité d’antenne en chambre réverbérante	7
1.1 Introduction	7
1.2 Antennes	7
1.2.1 Définition et caractéristiques	8
1.2.1.1 Coefficient de réflexion	8
1.2.1.2 Gain et directivité	8
1.2.1.3 Diagramme de rayonnement	9
1.2.1.4 Efficacité de rayonnement	9
1.2.1.5 Antennes électriquement petites	10
1.2.2 Techniques de mesure de l’efficacité d’antenne	11
1.2.2.1 Chambre anéchoïque	11
1.2.2.2 Wheeler cap	13
1.2.2.3 Chambre réverbérante	15
1.3 Généralités sur les chambres réverbérantes et leurs propriétés	16
1.3.1 Introduction	16
1.3.2 Propriétés statistiques des champs en CR idéale	16
1.3.2.1 Lois statistiques du champ électromagnétique	16
1.3.2.2 Homogénéité spatiale du champ en CR	19
1.3.2.3 Isotropie du champ en CR	20
1.3.3 Caractéristiques intrinsèques d’une CR réelle	20
1.3.3.1 LUF	20
1.3.3.2 Coefficient de rétro-diffusion e_b	21
1.3.3.3 Facteur de qualité	22
1.3.3.4 Coefficient de corrélation et nombre d’échantillons décorrélés	24
1.3.3.5 Bande de cohérence	25

1.3.4	Techniques de brassage	26
1.3.4.1	Brassage mécanique	26
1.3.4.2	Brassage fréquentiel	26
1.3.4.3	Brassage de source	28
1.4	Techniques de mesure de l'efficacité d'antenne en CR	29
1.4.1	Méthodes avec antenne de référence	29
1.4.1.1	Méthode de substitution	29
1.4.1.2	Méthode du facteur de qualité	30
1.4.2	Méthodes sans antenne de référence	31
1.4.2.1	Approche avec une antenne de mesure	32
1.4.2.2	Approche avec deux antennes de mesure	34
1.4.2.3	Approche avec trois antennes de mesure	35
1.4.2.4	Conclusions et limitations	37
1.5	Caractérisation d'antenne sans contact	37
1.5.1	Introduction	37
1.5.2	Principe de la mesure par rétro-diffusion de l'antenne	38
1.5.3	Mesure en CA	39
1.5.4	Mesure en CR	40
1.6	Conclusion	40
2	Contributions originales aux mesures d'efficacité d'antenne existantes en CR	43
2.1	Introduction	43
2.2	Présentation de l'environnement de mesure et des antennes utilisées	44
2.2.1	Environnements de mesure	44
2.2.1.1	Chambre réverbérante de l'IETR	44
2.2.1.2	Chambre réverbérante de l'ESYCOM	45
2.2.2	Antennes de mesure	45
2.3	Comparaison entre deux méthodes d'estimation de l'efficacité d'antenne (méthodes avec deux antennes)	47
2.3.1	Technique de mesure avec antenne de référence	47
2.3.2	Technique de mesure sans antenne de référence	48
2.3.3	Configuration de mesure	48
2.3.4	Résultats et comparaison	50
2.4	Impact de composantes de champ non brassées sur l'estimation de l'efficacité d'antenne en CR	53
2.4.1	Nouvelle formulation des coefficients de réflexion et de transmission de l'antenne	54
2.4.2	Configuration de mesure	56
2.4.3	Résultats de mesure	57
2.4.3.1	Brassage avec l'antenne patch	58
2.4.3.2	Brassage avec l'antenne log-périodique	63

2.4.3.3	Brassage combiné de l'antenne patch et de l'antenne log-périodique	64
2.4.3.4	Comparaison entre les coefficients de réflexion des antennes dans les différents cas de brassage d'antenne	66
2.4.3.5	Comparaison entre les efficacités de rayonnement dans les différents cas de brassage d'antenne	68
2.5	Mesure à des fréquences basses (proches de la LUF)	70
2.5.1	Banc de mesure	71
2.5.2	Résultats de mesure	72
3	Caractérisation d'antenne sans contact en chambre réverbérante	78
3.1	Introduction	78
3.2	Caractérisation d'objets en CR	79
3.2.1	Surface équivalente d'absorption	79
3.2.2	Surface équivalente de diffusion	79
3.2.3	Cas particulier des antennes	81
3.3	Nouvelle méthode proposée	85
3.4	Validation expérimentale (CR ESYCOM)	89
3.4.1	Configuration de mesure	89
3.4.2	Résultats	93
3.4.3	Approximations appliquées sur le coefficient de réflexion	94
3.4.4	Effet du brassage	95
3.4.5	Etude de l'effet de la présence de plusieurs AUTs en CR sur le facteur de qualité	98
3.5	Validation expérimentale (CR Langevin)	99
3.5.1	Configuration de mesure	99
3.5.2	Mesure conventionnelle	102
3.5.3	Mesure sans contact	106
	Conclusion générale	113
	Annexe A	119
	Annexe B	121
	Bibliographie	134
	Liste des publications	135
	Résumé	137
	Abstract	137

Table des figures

1.1	Bilan de puissance.	10
1.2	Chambre anéchoïque du laboratoire ESYCOM.	12
1.3	Set-up d'une mesure appliquant la technique Wheeler cap.	14
1.4	Chambre réverbérante du laboratoire ESYCOM.	15
1.5	Représentation polaire de la composante d'onde plane \vec{F} [27].	17
1.6	Illustration du phénomène de rétro-diffusion du champ vers l'antenne de transmission en CR [27].	21
1.7	Exemples de brasseur de mode mécanique pour CR (a,b) fonctionne en rotation, (c) fonctionne en translation. (a) brasseur de la CR de l'IETR de Rennes, (b) brasseur de la CR du laboratoire ESYCOM et (c) brasseur de la CR du fabricant COMTEST Engineering.	27
1.8	Exemple de VIRC présent dans le centre de recherche CAERCEM en Argentine [66].	27
1.9	Configuration de mesure de la méthode de "substitution" pour la mesure de l'efficacité d'antenne avec antenne de référence.	30
1.10	Configuration de mesure de la méthode du "facteur de qualité" pour la mesure de l'efficacité d'antenne avec antenne de référence.	31
1.11	Configuration de la méthode de mesure de l'efficacité d'antenne sans antenne de référence (approche avec une seule antenne) [46].	33
1.12	Configuration de la méthode de mesure de l'efficacité d'antenne sans antenne de référence (approche avec deux antennes) [46].	34
1.13	Configuration de la méthode de mesure de l'efficacité d'antenne sans antenne de référence (approche avec trois antennes) [46].	36
1.14	Champ diffusé par une antenne : mode d'antenne (en gris foncé) et mode de structure (en gris clair).	39
2.1	Chambre réverbérante de l'IETR.	44
2.2	Chambre réverbérante du laboratoire ESYCOM.	45
2.3	Antenne patch caractérisée. A gauche, vue de dessus et vue de dessous de la structure de l'antenne sous HFSS. A droite, vue de dessus de l'antenne patch imprimée.	46
2.4	Antenne log-périodique (antenne de référence).	47

2.5	Setup de mesure de l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch en CR ESYCOM.	49
2.6	Facteur de qualité de la CR ESYCOM estimé en temporel (à droite) et celui des antennes patch et log-périodique (à gauche).	50
2.7	Efficacité de rayonnement de l'antenne patch en utilisant les techniques de mesure avec et sans antenne de référence.	51
2.8	Efficacité de rayonnement de l'antenne log-périodique (Ant_{ref}) comparée à sa valeur supposée fixe et égale à 90%.	51
2.9	Résultats de mesure et de modélisation de l'efficacité de rayonnement de l' Ant_{ref} dans les deux CRs comparés à l'interpolation linéaire.	52
2.10	Efficacité de rayonnement de l'antenne patch en utilisant la méthode sans Ant_{ref} et la méthode avec Ant_{ref} pour les deux valeurs de l'efficacité de référence.	53
2.11	Setup de mesure en CR ESYCOM. 12 positions sont considérées pour l'antenne log-périodique (A1) et 12 positions également pour l'antenne patch (A2).	57
2.12	Efficacité de rayonnement des antennes log-périodique (a) et patch (b) avec et sans le brassage de l'antenne patch.	58
2.13	Facteur de qualité estimé en temporel en fonction de la fréquence avec et sans le brassage de l'antenne patch.	60
2.14	Coefficients de réflexion des antennes log-périodique (a) et patch (b), avec et sans le brassage de l'antenne patch. Résultat lissé sur une fenêtre glissante de 30 MHz.	60
2.15	Moyenne du module au carré des composantes brassées des paramètres $S_{11}(a)$, $S_{22}(b)$ et $S_{21}(c)$ en fonction de la fréquence avec et sans brassage de l'antenne patch.	61
2.16	Erreur entre les coefficients de réflexion moyens S_{11} (a) et S_{22} (b), mesurés dans la CR et ceux mesurés dans le CA en fonction de fréquence, avec et sans brassage de l'antenne patch.	62
2.17	Efficacité de rayonnement des antennes log-périodique (a) et patch (b) avec et sans le brassage de l'antenne log-périodique.	65
2.18	Erreur entre les coefficients de réflexion moyens S_{11} (a) et S_{22} (b) mesurés dans la CR et ceux mesurés dans le CA, en fonction de la fréquence, avec et sans brassage de l'antenne log-périodique.	66
2.19	Efficacité de rayonnement des antennes patch et log-périodique avec et sans le brassage combiné.	67
2.20	Erreur entre les coefficients de réflexion moyens S_{11} (a) et S_{22} (b), mesurés dans la CR et ceux mesurés dans le CA, en fonction de la fréquence, avec et sans le brassage combiné.	67
2.21	Efficacité de rayonnement de l'antenne log-périodique avec et sans les différentes approches de brassage.	69
2.22	Efficacité de rayonnement de l'antenne patch avec et sans les différentes approches de brassage.	69

2.23	Antennes de mesure : antenne patch sous-test (à gauche), antenne log-périodique (à droite).	71
2.24	Coefficient de réflexion de l'antenne patch.	72
2.25	Efficacité de rayonnement de l'antenne patch lorsque le brassage mécanique et le brassage de source sont appliqués.	73
2.26	Efficacité de rayonnement de l'antenne patch lorsque les différents types de brassage sont appliqués en CR ESYCOM, en plus du brassage mécanique appliqué dans chaque cas.	74
2.27	Comparaison entre l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch obtenue lorsque les différents types de brassage sont appliqués dans les deux CRs.	75
2.28	L'impact de la décimation des mesures sur le résultat de l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch en CR IETR.	76
3.1	Configuration de la mesure de la surface équivalente de diffusion d'une cible [120].	80
3.2	Trois phénomènes de dissipation de puissance par une antenne de charge en CR. Puissance reçue en bleu, puissance re-rayonnée en CR en rouge (figure extraite de [122]).	83
3.3	Efficacité de rayonnement estimée avec le nouveau modèle proposée dans [122].	85
3.4	Configuration de mesure de la nouvelle méthode sans contact	86
3.5	Pente calculée à partir du rapport des intensités de puissance (à gauche) et à partir du Power Delay Profile (à droite).	88
3.6	Setup de la mesure sans contact en CR du laboratoire ESYCOM.	89
3.7	Switchs et charges utilisées pour la modulation d'impédance lors de la mesure chargée.	90
3.8	Plan de calibrage pour la mesure de Γ_a et des Γ_c	91
3.9	Le coefficient de réflexion des impédances de charge et de l'AUT.	92
3.10	Facteur de qualité de la CR dans le cas des différentes charges.	92
3.11	Efficacité de rayonnement de l'antenne patch mesurée en CR en utilisant la méthode classique (invasive) et les approches sans contact en fonction de la fréquence. Les résultats sont lissés sur une fenêtre fréquentielle de 30 MHz.	94
3.12	Efficacité de rayonnement de l'antenne patch mesurée en CR en utilisant la méthode classique (invasive), l'approche sans contact basée sur (3.24) ainsi que les deux approximations proposées pour les coefficients de réflexion.	95
3.13	N_{eff} estimée pour une configuration particulière (une position de source, une position d'AUT).	97
3.14	Facteur de qualité de la CR ESYCOM dans deux cas de mesures : à gauche, le cas où 1 AUT est utilisée, à droite, le cas où 4 AUT sont utilisées.	99
3.15	Variations relatives entre les facteurs de qualité lorsque les AUTs sont chargées par un circuit ouvert et une charge adaptée, dans les cas de 1 AUT et 4 AUTs dans la CR ESYCOM.	100
3.16	CR du laboratoire de l'Institut Langevin et son brasseur.	101

3.17	Configuration de la mesure sans contact dans la CR de l'Institut Langevin.	102
3.18	Module du coefficient de réflexion des antennes de transmission pour les 9 configurations ainsi qu'en tirant profit des 9 configurations (à gauche : patch 1, à droite : patch 2).	103
3.19	Moyenne du coefficient de réflexion des deux antennes patch calculée sur les 9 configurations (à gauche : le module, à droite : la phase).	103
3.20	Module du coefficient de réflexion de référence de l'antenne patch Γ_a .	104
3.21	Phase du coefficient de réflexion de référence de l'antenne patch Γ_a .	104
3.22	Facteur de qualité de la CR à vide.	105
3.23	Efficacité de rayonnement des antennes patch à vide avec et sans brassage de source en plus du brassage mécanique (à gauche : patch 1, à droite : patch 2).	105
3.24	Efficacité de rayonnement de référence à vide (en utilisant la méthode conventionnelle), et comparaison avec l'efficacité simulée.	106
3.25	Module du coefficient de réflexion des charges Γ_c connectées aux deux switches.	107
3.26	Phase du coefficient de réflexion des charges Γ_c connectées aux deux switches (à gauche : switch 1, à droite : switch 2).	107
3.27	Module du coefficient de réflexion des charges vues par l'antenne ($\Gamma_{a,c}$).	108
3.28	Facteurs de qualité de la CR dans les deux cas de charge comparés au cas à vide.	108
3.29	Efficacité de rayonnement de l'antenne patch mesurée en CR en utilisant la méthode conventionnelle (invasive), l'approche sans contact (3.23) et l'approche sans contact (3.24) avec les approximations proposées pour les coefficients de réflexion.	109
A.1	Facteur de qualité de la CR IETR estimé en temporel (axe de droite) et celui des antennes patch et log-périodique (axe de gauche)	119
B.1	Schéma équivalent d'une antenne connectée à une charge Z_L .	122
B.2	Schéma équivalent de l'antenne AUT connectée au VNA.	123
B.3	Schéma équivalent de la charge Z_L connectée au VNA.	123

Liste des tableaux

2.1	Dimensions de l'antenne patch (en mm).	46
2.2	Modélisation linéaire de l'efficacité de rayonnement de l'Ant _{ref}	52
2.3	Coefficients R dans le cas des différents brassages.	63
2.4	Module de la différence moyenne entre les coefficients de réflexion mesurés en CR (moyennés selon le processus de brassage) et ceux mesurés en CA.	63
2.5	Configurations de mesure dans les deux CRs.	72
2.6	Différences relatives moyennes, sur la bande [350 GHz; 450 GHz], entre la mesure de l'efficacité en CR ESYCOM et en CR IETR.	75
3.1	Moyenne, variance et écart type de l'efficacité de rayonnement de l'AUT en CR ESYCOM.	93
3.2	Les valeurs du coefficient $ \Gamma_{a,c} $ dans le cas des deux approximations proposées.	95
3.3	Moyenne, variance et écart type de l'efficacité de rayonnement de l'AUT en CR ESYCOM calculés sur la bande fréquentielle de mesure.	96
3.4	Moyenne et écart-type normalisé de l'efficacité de rayonnement en CR ESYCOM.	97
3.5	Paramètres caractéristiques de la CR de l'Institut Langevin.	100
3.6	Paramètres de la mesure sans contact en CR de l'Institut Langevin.	102
3.7	Moyenne, variance et écart-type de l'efficacité de rayonnement des AUTs en CR de l'Institut Langevin.	109

Liste des abréviations

AUT	Antenna Under Test
CA	Chambre Anéchoïque
CEM	Compatibilité ElectroMagnétique
CO	Circuit ouvert
CRBM	Chambre Réverbérante à brassage de modes
ESYCOM	Electronique, SYstèmes de COmmunication et Microsystèmes
HFSS	High Frequency Structure Simulator
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETR	Institut d'Electronique et des Technologies du numéRique
IFBW	Intermediate Frequency BandWidth
IFT	Inverse Fourier Transform
IoT	Internet of Things
LOS	Line Of Sight
LUF	Lowest Usable Frequency
MVG	Microwave Vision Groupe
NB-IoT	Narrow-Band Internet of Things
PDP	Power Delay Profile
PIFA	Planar Inverted-F Antenna
SER	Surface Equivalente Radar
TE	Transverse électrique
TM	Transverse magnétique
ULB	Ultra Large Bande
VIRC	Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber
VNA	Vector Network Analyser
WSNs	Wireless Sensor Networks

Introduction générale

Contexte et motivation

L'internet des objets (IoT pour *Internet of Things*) permet de rendre "connecté" l'ensemble des objets du quotidien afin de leur donner une nouvelle existence numérique. L'IoT couvre un large panel d'applications telles que la domotique avec la gestion à distance des équipements de la maison y compris l'électroménager, la santé connectée [1] afin d'assurer le suivi en continu de la santé des patients, les villes intelligentes (*smart cities*) [2] permettant l'optimisation des ressources disponibles (gestion de l'eau, gestion du trafic routier...) ou encore le suivi de la santé des infrastructures (bâtiments, ponts...). Ces applications nécessitent la mise en place de réseaux de capteurs communicants (WSNs pour *Wireless Sensor Networks*) permettant d'assurer le suivi en temps-réel de diverses grandeurs physiques (distance, température, humidité, pression...). L'essor de l'IoT est rendu possible par le déploiement actuel de la 5G, qui permet une meilleure prise en charge de ces technologies bas-débit et faible puissance. En effet, les WSNs transmettent généralement une faible quantité d'information mais doivent avoir une durée de vie importante. Dans ce cadre, la gestion de l'énergie devient l'élément clé du développement de ces capteurs. Un capteur communicant est composé d'une partie capteur généralement peu énergivore, et d'un module radio, à l'origine d'une consommation énergétique significative. C'est donc sur l'optimisation de l'efficacité de ce module radio que les efforts de recherche se concentrent.

Les capteurs communicants subissent pleinement la miniaturisation imposée à des fins de facilité d'intégration et de coût. Plus précisément, les performances des antennes qui assurent la conversion de l'énergie électrique en énergie électromagnétique (et vice-versa) sont particulièrement affectées par cette miniaturisation. En effet, lorsque les antennes sont électriquement petites (taille inférieure à un dixième de la longueur d'onde), des limitations physiques imposent un compromis entre bande passante et efficacité [3], cette dernière étant définie comme le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance acceptée par l'antenne (rendement énergétique) [4]. Dans le cas de l'IoT bas-débit et faible puissance, aussi appelé *Narrow-Band Iot* (NB-IoT) [5], la bande passante des antennes est souvent sacrifiée afin de maximiser leur efficacité. Le diagramme de rayonnement des antennes miniatures étant naturellement omni-directionnel, l'efficacité de rayonnement devient le paramètre le plus important de l'antenne. Ainsi, la demande d'optimisation de l'efficacité de rayonnement des antennes nécessite des moyens de caractérisation de cette dernière à la fois fiables et rapides. Ce travail s'inscrit dans le cadre de cette recherche de méthode de

caractérisation de l'efficacité de rayonnement d'antenne adaptée aux nouveaux dispositifs développés.

Dans le domaine des mesures d'antennes, on trouve différentes techniques dédiées à la caractérisation de l'efficacité de rayonnement, les plus classiques étant celles fondées sur l'utilisation de la Wheeler Cap et de la chambre anéchoïque (CA). Néanmoins, ces techniques présentent des limitations. Concernant la mesure en CA, la mesure est notamment complexe à mettre en oeuvre. En effet, cette dernière nécessite de mesurer le diagramme de rayonnement 3D de l'antenne sous test (AUT pour *Antenna Under Test*) pour appliquer la technique de l'intégration du gain. Cela implique la rotation de l'AUT tout en gardant l'antenne de mesure et l'antenne sous test strictement alignées au cours de la mesure, ce qui, en pratique, rend la méthode délicate à appliquer et surtout chronophage. De plus, la chambre anéchoïque représente un environnement de mesure onéreux en raison des panneaux absorbants dont ses parois sont recouvertes. Concernant les mesures en Wheeler cap, fondées sur deux mesures du coefficient de réflexion de l'AUT avec et sans le cap, les principales limitations sont liées à la taille de l'AUT ainsi qu'à la nécessité d'avoir une Wheeler cap de différentes dimensions selon la fréquence considérée. Toutes ces raisons ont motivé la recherche d'alternatives.

Initialement destinées à des mesures de compatibilité électromagnétique (CEM), les chambres réverbérantes (CRs) à brassage de modes sont utilisées dans le domaine de la mesure d'antennes depuis maintenant un peu plus de vingt ans. Moins onéreuses que les CAs car dépourvues d'absorbants, les CRs ont été étudiées pour l'évaluation de différents paramètres d'antennes, tels que l'impédance d'entrée [6], l'efficacité de rayonnement [7], le gain [8] ainsi que la surface équivalente radar (SER) [9]. Parmi tous ces paramètres, l'efficacité de rayonnement est sans aucun doute celui dont l'estimation en CR est la plus courante. En effet, les propriétés électromagnétiques particulières du champ au sein de ces cavités complètement métalliques (isotropie et homogénéité) en font un environnement de mesure particulièrement adapté à l'estimation de l'efficacité.

Une CR est une cavité métallique dans laquelle est placée une structure métallique de forme complexe appelée brasseur de modes. Cette structure, en effectuant une rotation ou une translation, permet de modifier les conditions aux limites du champ au sein de la CR et donc de fournir des configurations différentes (idéalement indépendantes) de la CR. Ceci permet d'avoir un ensemble de mesures décorréelées constituant un échantillon statistique à partir duquel les paramètres d'antennes seront estimés. En plus du brassage mécanique apporté par le brasseur de modes, il existe d'autres types de brassage. On peut notamment citer le brassage de source, consistant à modifier la position de l'antenne source ; le brassage de polarisation, qui consiste à modifier la polarisation de l'antenne source ; le brassage de plateforme, consistant à modifier la position de l'AUT ou encore le brassage fréquentiel qui revient à faire des moyennes sur une petite plage fréquentielle. Plusieurs techniques de brassage sont généralement combinées lors d'une mesure afin de générer davantage de configurations décorréelées de la CR et ainsi diminuer l'incertitude de mesure.

La précision des mesures en CR repose sur l'hypothèse d'un champ "bien" brassé (*well-stirred field*). Un nombre "suffisant" de configurations décorréelées de la CR est généralement

le critère utilisé pour vérifier cette hypothèse. Néanmoins, tous les procédés de brassage n'ont pas la même faculté à éliminer les trajets non brassés, même s'ils permettent effectivement d'obtenir un nombre de configurations décorréliées suffisant. La présence de trajets non brassés résiduels peut être à l'origine de la présence d'un biais dans la mesure de l'efficacité de rayonnement.

L'ensemble des méthodes de mesure d'efficacité d'antenne, que ce soit en CA ou en CR reposent sur des mesures de coefficient de transmission ou de réflexion de ces antennes. Cela implique de relier l'AUT à un analyseur via l'intermédiaire de câbles. Or, la présence de ces câbles conduit à des interactions non désirées entre l'AUT et ces derniers [10,11]. Les câbles sont situés dans la zone de champ proche de l'AUT et modifient les propriétés d'impédance et de rayonnement de cette dernière. De plus, les câbles eux-mêmes rayonnent en raison de la présence de courant de fuite sur les blindages extérieurs [12, 13]. Ces effets deviennent critiques lorsque l'AUT est une antenne électriquement petite [14, 15] et peuvent être à l'origine d'un biais dans l'estimation de l'efficacité de rayonnement.

Objectifs

L'objectif de ce travail de thèse consiste à proposer des solutions visant à supprimer les potentiels biais d'estimation de l'efficacité de rayonnement d'antenne obtenus avec les techniques existantes de mesures en CR. D'abord, dans le cas des techniques basées sur l'utilisation d'une antenne de référence, nous proposerons une solution fondée sur l'estimation préalable par la mesure de l'efficacité de rayonnement de l'antenne de référence. Cette mesure, faite également en CR, permet d'avoir une estimation réelle de l'efficacité de cette antenne considérée comme référence par la suite et dont l'hypothèse classique stipule qu'elle possède une efficacité constante sur la bande fréquentielle de mesure, une hypothèse difficile à vérifier en pratique.

On considère généralement que plus le nombre de configurations décorréliées de la CR est important, meilleure est l'estimation de l'efficacité de rayonnement de l'antenne. Cela est donc directement lié à la qualité de brassage du champ au sein de la CR. Ainsi, ce travail a aussi pour objectif de mettre en lumière, grâce à une étude approfondie, le lien entre la qualité de différents processus de brassage, notamment le brassage de source, et le biais d'estimation de l'efficacité de rayonnement d'antenne en CR. En effet, l'apport de chaque processus de brassage diffère selon son impact sur les composantes du champ au sein de la CR. Des solutions basées sur les processus de brassage sont ensuite proposées afin d'améliorer l'estimation de l'efficacité de rayonnement d'antenne. En outre, nous proposons dans ce travail d'exploiter l'apport des différents processus de brassage afin de compenser la faible densité modale observée proche de la fréquence minimale d'utilisation de la CR. Cela permet d'élargir la bande de fréquence de mesure possible avec la CR tout en assurant une bonne précision des mesures.

Enfin, les méthodes de mesures actuelles ne sont pas adaptées à la mesure d'antennes miniatures de par la présence de câbles pour alimenter les AUTs. C'est pourquoi, un autre objectif de cette thèse est de proposer une méthode de mesure originale sans contact pour

l'estimation de l'efficacité de rayonnement d'antennes en CR. Cette méthode permettra une estimation non invasive de l'efficacité de rayonnement et est donc principalement dédiée aux antennes miniatures. Inspirée des méthodes de caractérisation par rétrodiffusion en CA, le principe sera transposé à la mesure en champ diffus proposée par la CR. Enfin, nous comparerons le résultat de l'efficacité de rayonnement obtenu avec cette nouvelle méthode de mesure sans contact avec celui obtenu en utilisant les méthodes invasives conventionnelles.

Organisation de la thèse

Le travail mené tout au long de cette thèse a été regroupé dans ce manuscrit qui s'organise autour de trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à la présentation de l'état de l'art sur la mesure de l'efficacité d'antenne en CR. D'abord, on rappelle les propriétés électriques et électromagnétiques des antennes dont l'efficacité de rayonnement, le paramètre auquel on s'intéresse particulièrement dans ce travail. Les techniques de mesure de l'efficacité d'antenne sont donc exposées, à la fois en CA, en Wheeler cap ainsi qu'en CR. Cette dernière étant particulièrement prometteuse, elle est présentée en détails par la suite. Ainsi la troisième partie du premier chapitre est dédiée à la présentation des propriétés statistiques des champs dans une CR idéale, et les caractéristiques intrinsèques d'une CR réelle sont ensuite présentés. Ceci est suivi par la présentation des principaux processus de brassage utilisés en CR dont le brassage de source sur lequel se basera l'étude du deuxième chapitre. Dans la partie suivante du chapitre, nous présenterons les différentes techniques de mesure de l'efficacité d'antenne en CR en les regroupant sous deux catégories : avec et sans antenne de référence. Quant à la dernière partie, elle sera consacrée à la caractérisation d'antenne sans contact, le principe de cette technique de mesure par rétro-diffusion d'antenne sera donc présenté suivi d'une synthèse des mesures fondées sur le même principe de mesure sans contact en CA ainsi qu'en CR.

Le deuxième chapitre de cette thèse sera dédié à la mesure de l'efficacité d'antenne en CR. D'abord, nous présenterons les environnements de mesures ainsi que les antennes utilisées dans ces mesures. Ensuite, nous comparerons dans un premier temps les résultats de mesure de l'efficacité d'une antenne obtenus avec deux techniques différentes ; une basée sur l'utilisation d'une antenne de référence et l'autre ne le nécessitant pas. Une solution est proposée par la suite pour réduire le biais de l'estimation résultant de l'hypothèse d'une efficacité constante en fréquence pour l'antenne de référence. La partie suivante, quant à elle, présentera les résultats de l'étude approfondie que nous avons menée sur l'apport des processus de brassage sur la précision de l'estimation de l'efficacité d'antenne en CR. Nous présenterons dans cette partie également le nouveau modèle analytique décrivant les coefficients de réflexion et de transmission de l'antenne mettant en valeur la partie non brassée du champ qui est à l'origine du biais dans l'estimation de l'efficacité d'antenne. Ceci est suivi des résultats de mesures obtenus avec les différents types de brassage d'antenne (brassage avec une seule antenne alors que la seconde est fixe et brassage combiné avec les deux antennes). Finalement, la dernière partie du chapitre traite une étude de l'apport du

brassage lorsque la mesure est menée à des fréquences proches de la fréquence minimale d'utilisation de la CR.

Le troisième et dernier chapitre de cette thèse, est consacré à la mesure de l'efficacité d'antenne sans contact en CR. D'abord nous présenterons deux paramètres importants décrivant l'interaction d'un objet avec les ondes électromagnétiques, à savoir, la surface équivalente d'absorption et la surface équivalente de diffusion. Ceci sera une introduction au cas particulier des antennes sur lequel portera le reste de ce chapitre. En se basant sur un modèle récent du facteur de qualité d'antenne en CR, nous proposerons une nouvelle méthode permettant de s'affranchir des câbles d'alimentation des antennes. Ainsi, la partie qui suit sera dédiée à la validation expérimentale de cette nouvelle méthode dans la CR du laboratoire ESYCOM. D'abord la configuration de mesure ainsi que les résultats obtenus seront présentés et suivront les résultats obtenus en appliquant une approximation sur les coefficients de réflexion de l'antenne et des impédances de charges utilisées. Dans la partie d'après, l'effet du brassage sur l'estimation de l'efficacité de rayonnement dans le cas de cette méthode est étudié. Ceci est suivi de l'étude de la présence de plusieurs AUTs en CR sur le facteur de qualité. La même méthode est ensuite validée dans une CR commerciale de taille plus petite et les résultats seront comparés à ceux obtenus avec la méthode conventionnelle (invasive).

Nous achèverons ce manuscrit par une conclusion récapitulant le travail qui a été fait et les résultats obtenus, son apport et ses limitations mais aussi les perspectives envisagées.

Chapitre 1

État de l'art sur la mesure de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante

1.1 Introduction

Le fonctionnement des antennes est décrit à l'aide de plusieurs indicateurs que sont l'adaptation, le diagramme de rayonnement, l'efficacité, etc... Un des paramètres importants pour optimiser le bilan de liaison dans le contexte des antennes miniatures est l'efficacité de rayonnement.

Les antennes peuvent être caractérisées en utilisant différentes méthodes de mesure. Il existe des méthodes classiques fondées sur la mesure du rayonnement en CA, des mesures basées sur la mesure de l'impédance d'entrée de l'antenne, notamment la méthode Wheeler cap pour déterminer l'efficacité de rayonnement de l'antenne, mais aussi des mesures d'antennes en CR. Ce dernier environnement est devenu la référence pour la caractérisation de l'efficacité de rayonnement en raison de ses avantages, par rapport à la CA, notamment sa facilité d'utilisation et sa précision. Dans la deuxième partie de ce chapitre on présentera les propriétés de ces chambres ainsi que leurs caractéristiques. On s'intéressera par la suite aux techniques de mesure de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à l'état de l'art des mesures sans contact en chambre anéchoïque et en chambre réverbérante.

1.2 Antennes

C'est en 1888, que Heinrich Hertz utilisa pour la première fois des antennes, confirmant ainsi les prédictions de la théorie de Maxwell. Depuis, la diversité des antennes n'a cessé de croître afin de s'adapter au mieux aux applications et environnements variés. En particulier, dans tout système de communication sans fil, l'antenne est considérée comme un élément fondamental de la chaîne de transmission.

1.2.1 Définition et caractéristiques

Une antenne est définie comme un élément passif transducteur qui assure la conversion des grandeurs électriques en grandeurs électromagnétiques et vice versa ; elle peut être utilisée en émission ainsi qu'en réception. Dans le cas de l'émission, on fournit à l'antenne un courant électrique dont l'énergie est ensuite rayonnée sous forme d'onde électromagnétique. En réception, l'antenne intercepte l'énergie électromagnétique dans le but de générer un courant électrique qui sera amplifié par la suite. Une caractéristique remarquable des antennes est leur réciprocité. Ainsi, les différentes caractéristiques électriques et de rayonnement sont les mêmes lorsque l'antenne est utilisée en émission ou en réception. On détaille dans la partie suivante quelques-unes de ces caractéristiques.

1.2.1.1 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui décrit la quantité d'onde électromagnétique réfléchi par une discontinuité d'impédance dans le milieu de transmission. Ce paramètre est très utile dans l'étude de la désadaptation entre un générateur et une charge par exemple. Dans le cas des antennes, ce paramètre peut être défini comme le rapport entre les amplitudes complexes de l'onde réfléchi et de l'onde incidente.

$$\Gamma_a = \frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{in}}} \quad (1.1)$$

V_{ref} étant l'amplitude de la tension réfléchi et V_{in} l'amplitude de la tension incidente. Ce coefficient peut également être exprimé en fonction de l'impédance d'entrée de l'antenne notée Z_a et de l'impédance caractéristique notée Z_0 .

$$\Gamma_a = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (1.2)$$

Pour les antennes, ce paramètre est généralement exprimé en décibels sous forme d'un paramètre S_{11}

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log_{10}(\Gamma_a) \quad (1.3)$$

On cherche en général à transmettre le maximum de puissance, ce qui nécessite une bonne adaptation et donc une utilisation de l'antenne sur sa bande passante. Celle-ci est définie, dans la plupart des applications, comme la plage fréquentielle sur laquelle le coefficient de réflexion de l'antenne est inférieur à un seuil fixé à -10 dB.

1.2.1.2 Gain et directivité

La directivité d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) notée $D(\theta, \phi)$ est le rapport entre l'intensité de rayonnement $U(\theta, \phi)$ de cette antenne dans cette direction spécifique et l'intensité de rayonnement moyennée sur toutes les directions. Cette dernière est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne et notée P_{ray} divisée par 4π . La directivité

d'une antenne isotrope est donc égale à l'unité. La directivité ne prend pas en compte l'efficacité de rayonnement de l'antenne et peut être exprimée comme suit

$$D(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{ray}}} \quad (1.4)$$

Le gain est défini de manière similaire mais en considérant la puissance fournie à l'antenne et non la puissance totale rayonnée. Cela signifie que les pertes (ohmiques et diélectriques) sont prises en considération. Le gain d'une antenne est donc égal à sa directivité à un facteur multiplicatif près, à savoir son efficacité de rayonnement. Il peut donc être exprimé par l'expression suivante

$$G(\theta, \phi) = \eta_{\text{ray}} D(\theta, \phi) \quad (1.5)$$

où η_{ray} est l'efficacité de rayonnement de l'antenne qui sera définie par la suite.

1.2.1.3 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est une représentation spatiale de la distribution de la puissance rayonnée par cette antenne en fonction de la direction. Il est généralement représenté en échelle logarithmique et en coordonnées sphériques dans le cas d'un diagramme de rayonnement en 3D. La représentation en 2D en utilisant les coordonnées polaires est également utilisée, et dans ce cas les deux plans de polarisation E et H sont considérés. En dehors du cas des antennes isotropes, la puissance rayonnée par une antenne n'est pas uniforme dans toutes les directions de l'espace. Il y a en général, une direction de rayonnement maximal autour de laquelle se trouve concentrée une grande partie de la puissance rayonnée, des directions de rayonnement secondaires autour desquelles se répartit la fraction de la puissance restante et des directions où la puissance rayonnée est presque nulle. Même si chaque antenne a son propre diagramme de rayonnement, ces diagrammes sont regroupés en trois catégories relatives à des formes typiques : isotrope, omnidirectionnel (rayonnement uniforme dans un plan donné) et directif (rayonnement concentré dans une direction donnée).

1.2.1.4 Efficacité de rayonnement

Lors de son fonctionnement, une antenne ne transmet pas la totalité de la puissance qui lui est fournie par l'alimentation. En effet, une partie de cette puissance est perdue sous forme de pertes par réflexion et de pertes ohmiques et diélectriques. Selon la norme IEEE 145-1993 [16], [17], on définit l'efficacité de rayonnement d'une antenne notée η_{ray} par le rapport entre la puissance rayonnée par l'antenne P_{ray} et la puissance acceptée par l'antenne P_a . Par ailleurs, l'efficacité totale d'une antenne (η_{tot}) est définie par le rapport entre la puissance totale rayonnée par l'antenne P_{ray} et la puissance fournie au niveau de son entrée P_{in} et qui inclue donc la puissance dissipée dans l'antenne et celle liée à sa désadaptation comme présenté sur la Figure 1.1.

L'efficacité de rayonnement peut donc être exprimée comme suit

$$\eta_{\text{ray}} = \frac{P_{\text{ray}}}{P_a} = \frac{P_{\text{ray}}}{(1 - |\Gamma_a|^2)P_{\text{in}}} \quad (1.6)$$

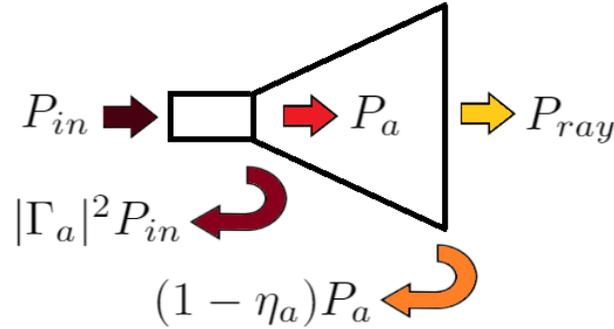


FIGURE 1.1 – Bilan de puissance.

Donc

$$\eta_{\text{ray}} = \frac{\eta_{\text{tot}}}{(1 - |\Gamma_a|^2)} \quad (1.7)$$

où $|\Gamma_a|$ et le module du coefficient de réflexion de l'antenne à caractériser mesuré en espace libre. Comme présenté dans l'équation (1.5), l'efficacité de rayonnement d'une antenne relie son gain à sa directivité.

1.2.1.5 Antennes électriquement petites

Une antenne électriquement petite peut être définie comme une antenne dont la longueur est très inférieure à la longueur d'onde du signal qu'elle transmet. Ces antennes se caractérisent généralement par une faible efficacité (elles stockent une grande partie de l'énergie qui leur est fournie et n'en rayonnent qu'une partie) [3]. Néanmoins, leur utilisation est très répandue en raison de leur volume compact et de leur faible coup de fabrication. Dans la littérature, la définition donnée par Wheeler est la plus répandue [18]. Il définit l'antenne électriquement petite comme étant une antenne dont la plus grande dimension est plus petite que $\frac{\lambda}{2\pi}$ où λ est la longueur d'onde. Cette plus grande dimension est le diamètre de la sphère minimale contenant l'antenne, souvent appelée la sphère de Wheeler ou la sphère de Chu. La sphère définie par le rayon $\frac{\lambda}{2\pi}$ correspond donc à la limite entre la zone où l'énergie est emmagasinée dans l'antenne et celle où l'énergie est rayonnée.

Par ailleurs, la miniaturisation d'antenne nécessite de faire des compromis entre les dimensions de l'antenne, sa bande passante et son efficacité. Wheeler fut parmi les premiers à travailler sur les limites théoriques de la miniaturisation des antennes et le lien entre la taille de l'antenne et son facteur de qualité (donc sa bande passante) ainsi que son efficacité. Des études ont été faites par la suite dans la même optique en proposant des relations plus générales que celles proposées dans les premiers travaux sachant que ces premières études supposaient que l'antenne ne supportait qu'un seul mode caractéristique TE (transverse électrique) ou TM (transverse magnétique). Dans [19], McLean propose une relation entre

la limite basse du facteur de qualité de l'antenne, son efficacité de rayonnement et ses dimensions. Cette relation est exprimée comme suit

$$Q_{lb} = \eta_{ray} \left(\frac{1}{ka} + \frac{1}{(ka)^3} \right) \quad (1.8)$$

avec η_{ray} : l'efficacité de rayonnement de l'antenne, k : le nombre d'onde et a : le rayon de la sphère contenant l'antenne. Cette formule montre bien que la miniaturisation des antennes est conditionnée par la limite basse du facteur de qualité de l'antenne.

Les antennes miniatures ne sont généralement pas très efficaces, et leur taille rend leur caractérisation plus délicate. En effet, la présence d'un câble connecté à l'antenne lors de sa mesure avec une taille comparable à celle de l'antenne peut modifier son rayonnement [12], [15]. Le câble ne peut donc être considéré comme étant transparent vis-à-vis des mesures effectuées et pour l'efficacité de l'antenne en particulier. Ainsi, une mesure sans contact (non-invasive) est requise afin de pallier ce problème.

1.2.2 Techniques de mesure de l'efficacité d'antenne

L'efficacité d'une antenne est une caractéristique très importante en raison de son effet significatif sur les performances et l'efficacité globale des systèmes de communication sans fils. Elle a été déjà définie selon [17] dans la section 1.2.1.4. Il existe plusieurs techniques pour déterminer l'efficacité d'une antenne : la mesure en chambre anéchoïque (CA), la technique Wheeler Cap ainsi que la mesure en chambre réverbérante (CR).

1.2.2.1 Chambre anéchoïque

Une chambre anéchoïque (CA) est une cavité métallique (cage de Faraday) permettant de se prémunir contre les ondes extérieures. Ses parois sont recouvertes d'absorbants. Cette matière absorbante est généralement en forme de cônes, minimisant ainsi les réflexions des ondes électromagnétiques sur les parois de la chambre (Figure 1.2). Ceci permet à la CA de simuler des mesures de transmission et de réflexion en espace libre. La mesure de l'efficacité d'une antenne en chambre anéchoïque se base sur la mesure du gain et de la directivité de l'AUT en CA, l'efficacité de l'AUT est alors obtenue en calculant le rapport entre son gain et sa directivité dans la direction du rayonnement maximum (θ', ϕ') [4]. L'efficacité est donc exprimée par l'équation suivante

$$\eta_{ray}^{CA} = \frac{G(\theta', \phi')}{D(\theta', \phi')} \quad (1.9)$$

Ainsi, il est nécessaire de mesurer le gain et la directivité de l'AUT. Il existe plusieurs techniques de mesure du gain d'une antenne en CA, notamment la méthode de mesure du gain absolu et la méthode de mesure du gain par substitution. La méthode de mesure du gain absolu est basée sur la formule de Friis et ne nécessite pas une connaissance préalable du gain des antennes utilisées pour la mesure. Lorsque l'AUT et l'antenne de

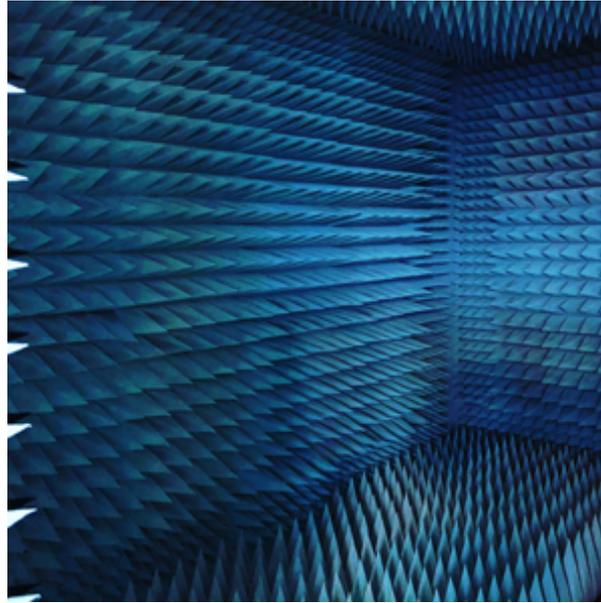


FIGURE 1.2 – Chambre anéchoïque du laboratoire ESYCOM.

transmission sont identiques, une seule mesure suffit pour obtenir le gain de l'AUT. Le bilan de puissance est donc exprimé comme suit

$$G_t(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (1.10)$$

où G_t est le gain de l'antenne de transmission, G_r le gain de l'antenne de réception, P_t la puissance transmise, P_r la puissance reçue, R la distance séparant les deux antennes et λ la longueur d'onde. Par ailleurs, lorsque les antennes sont différentes, 3 mesures sont nécessaires afin d'obtenir 3 équations à 3 inconnues basées également sur la formule de Friis. Ainsi, la solution de ce système d'équations (1.11) représente les gains des trois antennes $\{a, b, c\}$ dont l'AUT.

$$\begin{aligned} G_a(\text{dB}) + G_b(\text{dB}) &= 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_{r,b}}{P_{t,a}} \right) \\ G_a(\text{dB}) + G_c(\text{dB}) &= 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_{r,c}}{P_{t,a}} \right) \\ G_b(\text{dB}) + G_c(\text{dB}) &= 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_{r,c}}{P_{t,b}} \right) \end{aligned} \quad (1.11)$$

Parmi les autres méthodes de mesure du gain d'antenne on trouve la méthode de substitution. Cette méthode est basée sur le calcul du bilan de puissance (formule de Friis) et nécessite l'utilisation d'une antenne de référence (dont le gain est connu) et elle se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, on calcule le bilan de puissance

entre l'antenne de transmission et l'antenne de référence. Ensuite, ce bilan de puissance est calculé lorsque l'antenne de référence est remplacée par l'AUT sans aucune autre modification de la configuration de mesure. A partir des deux bilans de puissance, le gain de l'AUT peut être déterminé comme suit

$$G_{\text{AUT}}(\text{dB}) = G_{\text{Ref}}(\text{dB}) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{AUT}}}{P_{\text{Ref}}} \right) \quad (1.12)$$

avec G_{AUT} le gain de l'antenne sous test, G_{Ref} le gain de l'antenne de référence et P_{AUT} et P_{Ref} respectivement la puissance reçue par l'AUT et l'antenne de référence.

Concernant la directivité, elle peut être déterminée en CA à partir de la mesure du diagramme de rayonnement de l'antenne sous test [20] en 3D. Elle est donnée par l'équation suivante [4]

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi} \quad (1.13)$$

avec $F(\theta, \phi)$ l'intensité de rayonnement dans la direction (θ, ϕ) , θ et ϕ les coordonnées sphériques. La valeur maximum de la directivité est donc égale à la valeur maximum de l'intensité de rayonnement divisée par la valeur moyenne de l'intensité de rayonnement. Cette dernière multipliée par 4π est la puissance totale rayonnée. Une fois que le gain et la directivité sont obtenus, l'efficacité de l'antenne sous test peut être calculée selon (1.9) Par ailleurs, d'un point de vue pratique, cette mesure (basée sur le diagramme de rayonnement de l'antenne AUT) reste difficile car elle nécessite un alignement très précis entre l'antenne de transmission et l'AUT ce qui est d'autant plus critique que l'antenne sous test est petite.

1.2.2.2 Wheeler cap

Cette technique est fondée sur une approche différente de celle utilisée pour la mesure en CA (basée sur la mesure du diagramme de rayonnement de l'antenne). Elle est généralement utilisée pour la mesure des petites antennes. Proposée par Wheeler [21] pour la première fois, cette technique nécessite uniquement une mesure du coefficient de réflexion de l'AUT ce qui peut être obtenu avec une très bonne précision à l'aide d'un analyseur de réseau. Ainsi, cette technique est considérée comme l'une des méthodes les plus simples pour la mesure de l'efficacité des petites antennes.

Le principe de la mesure d'efficacité avec cette technique consiste à mesurer l'antenne sur un plan de masse en l'entourant complètement par un hémisphère métallique (cap) [22]. Cet hémisphère de rayon $a = \lambda/2\pi$ est physiquement situé au niveau de la zone de transition entre le champ proche (l'intérieur de l'hémisphère) et le champ lointain (l'extérieur de l'hémisphère). L'impédance d'entrée de l'antenne est mesurée à la fréquence de résonance avec et sans l'hémisphère métallique. Le rôle de l'hémisphère métallique est donc de court-circuiter la résistance de rayonnement de l'antenne permettant ainsi de dissocier la résistance de rayonnement de celle liée aux pertes dans l'AUT. L'efficacité

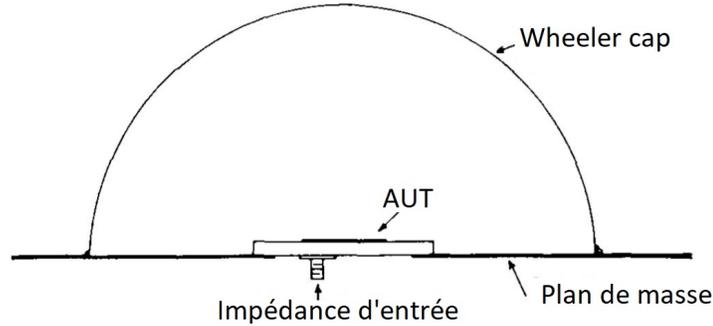


FIGURE 1.3 – Set-up d'une mesure appliquant la technique Wheeler cap.

peut être exprimée ainsi

$$\eta_{\text{ray}}^{\text{Wheeler}} = \frac{R_1 - R_2}{R_1} = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (1.14)$$

avec R_1 la partie réelle de l'impédance d'entrée de l'AUT sans l'hémisphère métallique, R_2 la partie réelle de l'impédance d'entrée de l'AUT avec l'hémisphère métallique, R_r résistance de rayonnement dans le circuit équivalent de l'antenne, R_p résistance modélisant les pertes de l'antenne.

Wheeler suppose que l'impédance d'entrée de l'AUT peut être modélisée par un circuit RLC en série ou en parallèle. Par ailleurs, il est possible qu'une antenne donnée présente un mécanisme de pertes plus compliqué et ne peut donc pas être modélisée par un circuit RLC série ni parallèle. Afin de remédier à ce problème, on propose dans [23] une technique fondée sur la Wheeler cap en appliquant une rotation du coefficient de réflexion de l'AUT sur l'abaque de Smith. Cette modification permet d'avoir une représentation rigoureuse de l'impédance d'entrée de l'AUT (par un circuit RLC parallèle ou série) pour les fréquences proches de la résonance. En 2002, Schantz [24] a introduit une nouvelle méthode basée sur Wheeler Cap et qui est valable pour les antennes ULB (Ultra Large Bande). Dans le cas de sa méthode, l'antenne à mesurer est toujours placée à l'intérieur du cap dont le rayon n'est plus exactement égal à $a = \lambda/2\pi$ mais $a \geq \lambda/2\pi$ à la place. Pour de telles dimensions, l'antenne rayonne librement à l'intérieur de la cavité. Les réflexions qui se produisent sur la cavité reviennent à l'antenne qui rayonne à nouveau, selon son efficacité de rayonnement et impédance d'entrée. Enfin, l'efficacité de rayonnement peut être exprimée comme

$$\eta_{\text{ray}} = \sqrt{(1 - |S_{11\text{FS}}|^2)(|S_{11\text{WC}}|^2 - |S_{11\text{FS}}|^2)} \quad (1.15)$$

avec $|S_{11\text{FS}}|^2$ le module du coefficient de réflexion de l'antenne mesuré en espace libre et $|S_{11\text{WC}}|^2$ le module du coefficient de réflexion de l'antenne mesuré lorsque elle est placée sous le cap. Dans sa thèse, Huynh [25] introduit une extension de la méthode de Wheeler permettant non seulement de l'appliquer sur une large bande de fréquences mais également de lever les contraintes sur la dimension de la sphère métallique. Cependant, les incertitudes sur ce type d'approche restent difficile à maîtriser [26]. Par ailleurs, l'efficacité d'antenne

peut être mesurée par d'autres méthodes fondées sur des techniques différentes, notamment la mesure en chambre réverbérante.

1.2.2.3 Chambre réverbérante



FIGURE 1.4 – Chambre réverbérante du laboratoire ESYCOM.

La mesure de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante (CR) a été proposée comme une alternative à la mesure en CA. Contrairement à la CA, la CR est une cage de Faraday qui n'a pas d'absorbants sur ses parois intérieures, elles sont donc de nature métallique favorisant ainsi la réflexion du champ à l'intérieur de la chambre. Aussi, elle est généralement équipée d'un brasseur de modes métallique comme présenté dans la Figure 1.4. Cette structure en rotation permet de modifier les conditions aux limites du système. Ainsi, plusieurs configurations de champ décorrélées sont obtenues. Des outils d'analyse statistique peuvent donc être appliqués. Ainsi, les propriétés particulières du champ diffus à l'intérieur de la CR permet de ne pas être dépendant de la position de l'antenne dans le volume de travail de la chambre, et on se sert de cette propriété pour réaliser des mesures d'antennes, notamment de l'efficacité.

Le volume de travail dans une CR est défini par le volume de la CR où les propriétés d'isotropie et d'homogénéité du champs sont vérifiées, ce qui doit exclure la région près des parois de la chambre [27], [28]. L'avantage de la mesure en CR comparée à la mesure en CA est la simplicité de la mise en place du set-up de mesure. La mesure de l'efficacité d'antenne est particulièrement adaptée à la CR puisqu'elle ne nécessite pas d'aligner l'AUT et l'antenne de transmission, ni de faire tourner l'AUT. Le mouvement de l'antenne en CA est donc remplacé par celui, beaucoup moins contraignant, du brasseur en CR. La mesure est alors plus rapide et moins coûteuse. Aussi, relativement à la méthode de mesure basée

sur Wheeler Cap et comme a été indiqué dans [26], la mesure en CR permet une meilleure maîtrise des incertitudes. Dans la section suivante, on présentera avec plus de détails les propriétés des CRs ainsi que leurs caractéristiques.

Il existe également d'autres techniques de mesure de l'efficacité d'antenne basées sur des mesures en champ proche. L'une de ces techniques est proposée par MVG (*Le Groupe Microwave Vision*) par exemple et propose une intégration rapide du champ.

1.3 Généralités sur les chambres réverbérantes et leurs propriétés

1.3.1 Introduction

Les CRs ont initialement été consacrées aux mesures de compatibilité électromagnétique (CEM) dont la mesure initiale a été proposée par Mendes en 1968 [29], [30]. Leur utilisation a connu une grande accélération dans la dernière décennie. La norme internationale (IEC 61000-4-21) sur l'utilisation de la chambre réverbérante pour les tests de CEM [17] a vu le jour en 2003 et a été révisée en 2011. Plusieurs chercheurs ont permis des avancées significatives dans la compréhension des CRs pour les mesures de CEM ; tel est le cas de P. Corona [31] qui était l'un des pionniers dans la caractérisation des CRs et leur application pour les tests CEM. Ses travaux ont contribué à façonner la compréhension moderne des RCs pour la communauté CEM. D. A. Hill [32] de son côté a présenté la théorie électromagnétique des CRs avec des développements mathématiques et des explications physiques aidant à mieux comprendre le fonctionnement des CRs. Il a proposé une représentation intégrale des champs dans la CR sous forme d'ondes planes. Les équations de Hill décrivent les lois de transmission dans un environnement à trajets multiples et c'est ainsi que la théorie décrivant le comportement idéal d'une CR a été développée. Lorsque la CR ne présente pas un fonctionnement idéal, son comportement statistique dévie des distributions attendues. Nous présentons dans la partie suivante les différentes propriétés et caractéristiques des CRs qui font qu'elles sont aujourd'hui des outils de mesure très intéressants.

1.3.2 Propriétés statistiques des champs en CR idéale

1.3.2.1 Lois statistiques du champ électromagnétique

Le modèle statistique proposé par Hill pour le champ électromagnétique à l'intérieur de la CR part du principe que ce champ doit satisfaire les équations de Maxwell en tout point de la CR. Selon Hill, les champs électrique et magnétique peuvent être représentés par une somme infinie d'ondes planes vérifiant les équations de Maxwell et les propriétés statistiques d'un champ bien brassé. La nature statistique des champs est introduite par les coefficients de pondération des ondes planes représentés par une variable aléatoire $\vec{F}(\Omega)$. Comme déjà mentionné auparavant, la CR est équipée d'un brasseur qui, en tournant,

génère, idéalement, un champ statistiquement uniforme et isotrope dans le volume de travail de la CR. Les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} observés en un point \vec{r} sont donc représentés par les deux équations suivantes [27]

$$\vec{E}(\vec{r}) = \iint_{4\pi} \vec{F}(\Omega) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) d\Omega. \quad (1.16)$$

En utilisant les équations de Maxwell, \vec{H} peut être exprimé comme suit

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{i\omega\mu} \nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{\eta} \iint_{4\pi} \hat{k} \times \vec{F}(\Omega) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) d\Omega \quad (1.17)$$

où le coefficient \vec{F} est une variable aléatoire décrivant l'amplitude et la polarisation de l'onde plane représentée sur la Figure 1.5, ∇ est l'opérateur rotationnel, Ω est l'angle solide et \vec{k} est le vecteur du nombre d'onde.

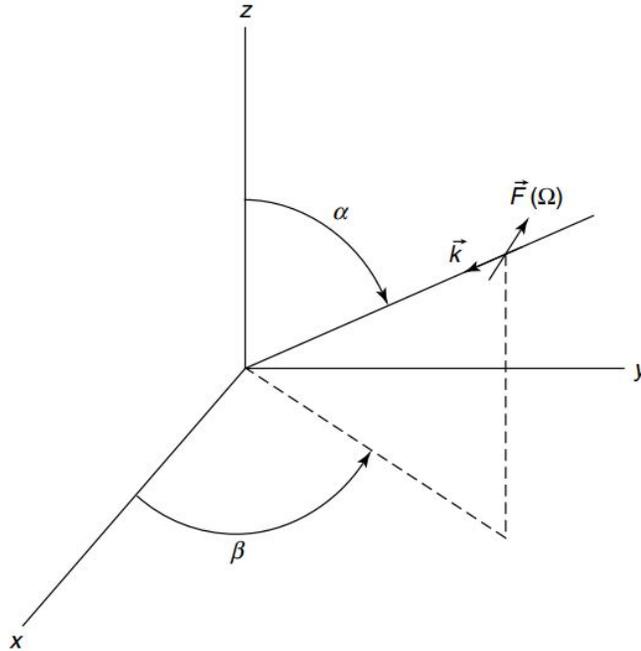


FIGURE 1.5 – Représentation polaire de la composante d'onde plane \vec{F} [27].

\vec{F} peut être décomposé en deux composantes (F_α et F_β) suivant les vecteurs unitaires orthogonaux $\hat{\alpha}$ et $\hat{\beta}$. Ces deux composantes comprennent une partie réelle et une partie imaginaire.

$$\vec{F}(\Omega) = F_\alpha(\Omega)\hat{\alpha} + F_\beta(\Omega)\hat{\beta} \quad (1.18)$$

où

$$\begin{aligned} F_\alpha(\Omega) &= F_{\alpha r}(\Omega) + iF_{\alpha i}(\Omega) \\ F_\beta(\Omega) &= F_{\beta r}(\Omega) + iF_{\beta i}(\Omega) \end{aligned} \quad (1.19)$$

Hill a donc montré que dans des conditions idéales (antennes adaptées et sans pertes, chambre réverbérante idéale, pas de couplage direct), les composantes réelles et imaginaires des champs sont indépendantes et sont distribuées suivant des lois normales de moyennes nulles et de variances identiques. Les composantes du champ électrique (et par analogie du champ magnétique) peuvent être donc exprimées comme suit

$$\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z} \quad (1.20)$$

Avec

$$\begin{aligned} E_x &= E_{xr} + iE_{xi} \\ E_y &= E_{yr} + iE_{yi} \\ E_z &= E_{zr} + iE_{zi} \end{aligned} \quad (1.21)$$

Dans une CR bien brassée, la valeur moyenne d'un champ électrique tend vers une valeur nulle. Ce résultat est attendu pour un champ résultant de la somme d'un nombre important de trajets multiples de phases aléatoires. A partir de l'expression du champ présenté dans 1.16, la valeur de sa moyenne statistique peut être exprimée comme suit

$$\langle \vec{E}(\vec{r}) \rangle = \iint_{4\pi} \langle \vec{F}(\Omega) \rangle \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) d\Omega \quad (1.22)$$

Un champ électrique nul revient à des valeurs moyennes nulles pour les parties réelles et imaginaires des composantes du champ E_x , E_y et E_z . Les variances de ces composantes réelles et imaginaires sont égales. La valeur de cette variance notée σ^2 est égale à la moitié de la variance des composantes complexes (E_x , E_y et E_z) notée σ_0^2 et est égale à $\frac{E_0^2}{6}$

$$\langle E_{xr} \rangle = \langle E_{yr} \rangle = \langle E_{zr} \rangle = \langle E_{xi} \rangle = \langle E_{yi} \rangle = \langle E_{zi} \rangle = 0 \quad (1.23)$$

$$\langle E_{xr}^2 \rangle = \langle E_{yr}^2 \rangle = \langle E_{zr}^2 \rangle = \langle E_{xi}^2 \rangle = \langle E_{yi}^2 \rangle = \langle E_{zi}^2 \rangle = \frac{\sigma_0^2}{2} = \sigma^2 = \frac{E_0^2}{6} \quad (1.24)$$

avec E_0 la moyenne du module du champ électrique au carré. Ainsi, les parties réelles et imaginaires des composantes cartésiennes du champ suivent une loi normale. La densité de probabilité (PDF) de la partie réelle de la composante E_{xr} du champ par exemple peut être exprimée comme suit

$$f(E_{xr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{E_{xr}^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1.25)$$

Cette PDF est valable pour les autres parties réelles et imaginaires des composantes du champ (E_{xi} , E_{yr} , E_{yi} , E_{zr} , E_{zi} , E_{zr}). En utilisant les équations 1.16 et 1.19 et en se basant sur le développement présenté dans [27], on peut montrer que les parties réelles et imaginaires des composantes du champ sont décorréelées. Lorsqu'on considère l'exemple de la composante E_x , la corrélation de ses parties réelle et imaginaire est donc nulle

$$\langle E_{xr}(\hat{r}) E_{xi}(\hat{r}) \rangle = 0 \quad (1.26)$$

Ce résultat est aussi valable pour les autres composantes du champ E_y et E_z . On a vu précédemment que la distribution de ces parties réelles et imaginaires suit une loi normale. Elles sont donc indépendantes. Les PDF des modules des trois composantes du champ $|E_x|$, $|E_y|$ et $|E_z|$ et du carré de ces modules ($|E_x|^2$, $|E_y|^2$ et $|E_z|^2$) sont respectivement une loi de type χ et χ^2 à deux degrés de liberté.

$$f(|E_x|) = \frac{|E_x|}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{|E_x|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1.27)$$

$$f(|E_x|^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp \left[-\frac{|E_x|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1.28)$$

La distribution du module du champ global suit une loi de χ avec six degrés de liberté. Par ailleurs, le carré du module du champ global suit une loi de χ^2 avec aussi six degrés de liberté. Les deux PDF sont présentées dans l'équation (1.29).

$$\begin{aligned} f(|\vec{E}|) &= \frac{|\vec{E}|^5}{8\sigma^6} \exp \left[-\frac{|\vec{E}|^2}{2\sigma^2} \right] \\ f(|\vec{E}|^2) &= \frac{|\vec{E}|^4}{16\sigma^6} \exp \left[-\frac{|\vec{E}|^2}{2\sigma^2} \right] \end{aligned} \quad (1.29)$$

1.3.2.2 Homogénéité spatiale du champ en CR

Selon sa définition dans [33], l'homogénéité spatiale du champ est une mesure de la variabilité attendue d'une mesure en fonction de l'emplacement en CR. Numériquement, elle est égale à l'incertitude associée à la prédiction d'un paramètre donné, en un point donné de la chambre. Cette définition est basée sur un nombre infini de mesures du même paramètre prélevées à des endroits différents et indépendants de la CR en supposant une instrumentation parfaite.

L'homogénéité du champ est une propriété intrinsèque à la CR et qui permet d'évaluer sa qualité de fonctionnement. Elle peut être évaluée à partir du calcul de l'écart type des valeurs maximales du champ normalisé par la racine carrée de la puissance moyenne d'entrée [17]. L'écart-type est directement lié aux incertitudes de mesure. Un écart type faible signifie qu'il y a un nombre suffisant de modes dans la CR et que le brasseur est suffisamment efficace pour interagir avec ces modes et fournir un champ statistiquement homogène. Dans [17], on précise bien qu'une CR est destinée à générer un environnement statistiquement uniforme en tous les emplacements du volume de travail défini. Le processus de mesure pour l'évaluation de l'homogénéité du champ en CR consiste à faire des mesures de champ (idéalement avec une sonde triaxiale) en 8 points situés aux sommets du volume de travail de la CR en considérant les trois composantes de champ. Le champ est considéré homogène lorsque cet écart type est inférieur à la limite de tolérance spécifiée [17], [34] (exemple : 3 dB à partir de 400 MHz).

Un autre moyen pour évaluer l'homogénéité du champ en CR repose sur l'évaluation du coefficient de rétrodiffusion ' e_b ' [35] expliqué en détails dans la prochaine section. Il existe plusieurs solutions pour améliorer l'homogénéité du champ en CR lorsque celle-ci est dégradée. Cela est possible grâce à l'amélioration des techniques de brassage de modes en CR (directement lié à l'augmentation du nombre d'échantillons indépendants en CR). Ceci est possible via l'amélioration de la géométrie du brasseur [36], de la chambre [37] ou en combinant différentes techniques de brassages. Ces différentes techniques de brassages seront précisées dans la partie 1.3.4.

1.3.2.3 Isotropie du champ en CR

Dans une CR de fonctionnement idéal, le champ présente les mêmes propriétés suivant toutes les directions. Dans ce cas, le champ est dit isotrope. Cette propriété est valable pour le champ électrique et magnétique et elle se traduit par les équations suivantes

$$\begin{aligned}\langle |E_x|^2 \rangle &= \langle |E_y|^2 \rangle = \langle |E_z|^2 \rangle \\ \langle |H_x|^2 \rangle &= \langle |H_y|^2 \rangle = \langle |H_z|^2 \rangle\end{aligned}\tag{1.30}$$

où x , y et z représentent trois orientations orthogonales quelconques. La moyenne est calculée sur tous les échantillons de mesure. Ainsi, les propriétés statistiques des composantes du champ ne changent pas en fonction de l'orientation. Dans [38], on présente les résultats d'évaluation de l'isotropie du spectre d'ondes planes en CR. Il a été montré que le critère d'isotropie peut ne pas être vérifié en présence de trajets non brassés et/ou de trajets issus de réflexions spéculaires. Dans ce cas, il est nécessaire d'améliorer la qualité du brassage utilisé en ajoutant des diffuseurs au brasseur par exemple [39] et en limitant la charge de la CR [40].

1.3.3 Caractéristiques intrinsèques d'une CR réelle

1.3.3.1 LUF

La fréquence minimale d'utilisation LUF (en anglais : *Lowest Usable Frequency*) est définie dans [17] comme étant la fréquence à partir de laquelle le champ dans la CR est considéré comme diffus, ce qui signifie qu'il satisfait les conditions d'un champ homogène et isotrope. La vérification expérimentale des propriétés d'homogénéité et d'isotropie étant longue et complexes, des critères alternatifs ont été proposés. Ainsi, ces propriétés nécessitant une densité modale suffisamment importante, certains auteurs ont proposé pour estimer la valeur de la LUF de considérer la fréquence à partir de laquelle la densité modale est d'au moins 1.5 modes/MHz [41]. D'autres auteurs ont proposé de prendre pour LUF la fréquence égale à 3 à 6 fois la fréquence du premier mode résonant dans la CR [42]. Quelle que soit l'approche adoptée, il est établi que pour pouvoir effectuer des mesures en basses fréquences, il faut utiliser une CR assez grande pour assurer une LUF suffisamment faible par rapport à la bande fréquentielle visée. Pour pallier ce problème, des solutions

ont été proposées dans le but de réduire la LUF sans augmenter le volume d'une CR. Dans [43] et [44] des métasurfaces ont été disposées sur les parois de la CR. La présence de ces métasurfaces modifie les conditions aux limites du champ sur les parois de la CR. L'écart-type du champ ainsi que le nombre de modes autour de la LUF ont été évalués en présence ou absence de ces métasurfaces, et les résultats obtenus montrent que l'homogénéité du champ est sensiblement améliorée par leur présence, de sorte que la LUF est en effet réduite.

1.3.3.2 Coefficient de rétro-diffusion e_b

Le coefficient de rétro-diffusion e_b (en anglais : *enhanced backscatter coefficient*) est une quantité qui caractérise l'homogénéité spatiale du champ en CR. Il est analogue au coefficient de rétro-diffusion connu en milieux aléatoires. Il a été présenté pour la première fois par Ladbury et Hill dans [45]. Ce coefficient peut donc être utilisé comme technique de caractérisation des CRs. Un champ bien homogène se traduit par un bon comportement de la CR. Cela assure une bonne précision de mesure et des incertitudes réduites.

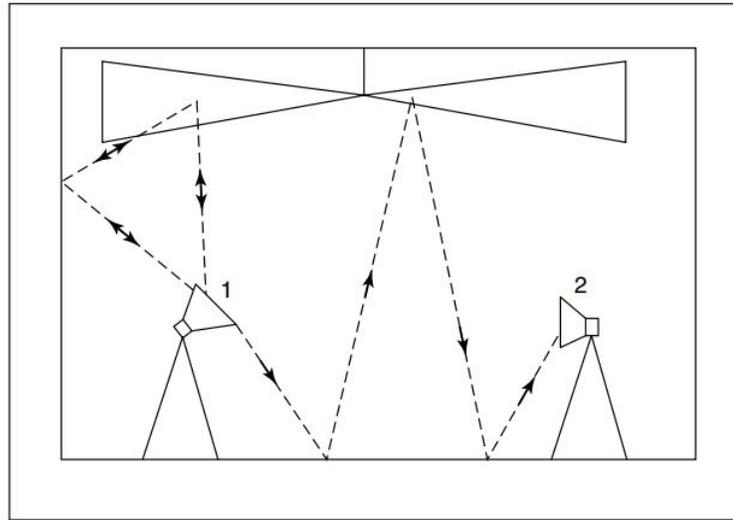


FIGURE 1.6 – Illustration du phénomène de rétro-diffusion du champ vers l'antenne de transmission en CR [27].

Il existe d'autres méthodes pour évaluer l'homogénéité du champ en CR, néanmoins, ces méthodes nécessitent une mesure avec plusieurs configurations (différentes positions d'antenne) ce qui n'est pas le cas pour le coefficient e_b dont l'évaluation ne nécessite qu'une seule configuration. Il est défini comme suit

$$e_b = \frac{\langle P_{R1} \rangle}{\langle P_{R2} \rangle} \quad (1.31)$$

où P_{R1} est la puissance incidente sur l'antenne de transmission et P_{R2} est la puissance incidente sur l'antenne de réception.

En théorie, lorsque le modèle de Hill (modèle d'ondes planes) est vérifié et en utilisant un raisonnement basé sur l'optique géométrique, on a idéalement $e_b = 2$ dans le cas d'une CR bien brassée avec une densité modale suffisante. Cela signifie que la puissance moyenne réfléchie vers l'antenne d'émission est deux fois plus importante que la puissance moyenne acceptée par l'antenne de réception. La Figure 1.6 illustre bien les rayons de champ réfléchis reçus par l'antenne émettrice (antenne 1) ainsi que ceux reçus par l'antenne réceptrice (antenne 2). Dans le cas réel, lorsque le coefficient de rétro-diffusion e_b s'approche de sa valeur idéale (égale à 2), la CR s'approche d'un comportement idéal et vice-versa. Ceci a été montré dans [35] où une CR a été caractérisée en se basant sur l'évaluation du e_b dans le cas de différentes antennes de transmission et différentes conditions de charge. Par ailleurs, il existe des techniques de mesure de l'efficacité d'antenne qui dépendent du calcul du coefficient e_b [46]. Ces mesures d'efficacité sont effectuées à des fréquences suffisamment hautes pour assurer un bon fonctionnement de la CR et donc une bonne précision de mesure. Néanmoins, les mesures ont montré que le e_b présente des valeurs qui s'éloignent de sa valeur idéale 2 en hautes fréquences. Ce résultat a suscité des interrogations et des études plus poussées ont été menées sur le coefficient en hautes fréquences. Dans [47], une comparaison est faite entre le coefficient e_b mesuré en basses fréquences et en hautes fréquences, les résultats du e_b mesuré en hautes fréquences ont présenté un biais. Ce biais a été justifié par la non uniformité du champ en CR à ces fréquences hautes résultant d'une interaction très faible entre la puissance en CR et le brasseur. Dans [48] est présentée une étude similaire portant sur l'impact du biais du e_b sur l'efficacité des antennes. Ce biais est aussi trouvé lors de l'évaluation de l'efficacité d'une antenne par des techniques basée sur une et deux antennes. Il a été montré que l'origine de ce biais (dans les valeurs du coefficient e_b et donc de l'efficacité) est liée au fait que l'une des antennes est, dans ce cas d'étude, dirigée vers le brasseur en forme de mur mobile. Une étude plus récente [49] a quantifié et analysé l'effet des pertes dans les câbles (erreurs de calibrage) sur la valeur du coefficient e_b . Aussi, en plus du temps de mesure qui peut être long en raison d'un nombre d'échantillons important, lorsque le coefficient de réflexion est trop faible (ex : < -40 dB), sa valeur mesurée risque de ne pas être précise. C'est pourquoi, la même étude propose d'identifier une limite fréquentielle supérieure à partir de laquelle les valeurs des paramètres S (noyés dans le bruit) deviendront inférieures au seuil mesurable par l'analyseur de réseau vectoriel VNA (en anglais : *Vector Network Analyzer*).

1.3.3.3 Facteur de qualité

Le facteur de qualité d'une CR est défini comme étant le rapport entre l'énergie moyenne emmagasinée dans la CR et la puissance dissipée. Il est exprimé comme suit [27]

$$Q = \frac{\omega U}{P_d} \quad (1.32)$$

où $\omega = 2\pi f$ avec f la fréquence, U l'énergie emmagasinée dans la CR et P_d la puissance dissipée. L'énergie emmagasinée peut être exprimée en fonction de la densité d'énergie

moyenne $\langle W \rangle$ et du volume V de la CR.

$$U = \langle W \rangle V = \epsilon_0 E_0^2 V \quad (1.33)$$

où ϵ_0 la permittivité du vide et E_0^2 le carré de la moyenne du champ électrique.

Le facteur de qualité présenté dans (1.32) est dit "composite" car il est composé de plusieurs mécanismes de pertes détaillés par Hill dans [27]. La puissance totale dissipée est donc la somme des différentes puissances : dissipée dans les parois (P_{d1}), absorbée par les objets (charges) présents dans la CR (P_{d2}), perdue via les fuites d'ouverture (P_{d3}) et aussi dissipée dans les antennes de transmission (P_{d4}). Ainsi, P_d peut être exprimée comme suit [27], [50]

$$P_d = P_{d1} + P_{d2} + P_{d3} + P_{d4} \quad (1.34)$$

En remplaçant les P_{di} par leurs expressions dans (1.32) en fonction du facteur de qualité, on obtient

$$Q^{-1} = Q_1^{-1} + Q_2^{-1} + Q_3^{-1} + Q_4^{-1} \quad (1.35)$$

où

$$Q_1 = \frac{\omega U}{P_{d1}} = \frac{3V}{2\mu_r \delta A} \quad (1.36)$$

avec V le volume de la CR, μ_r la perméabilité magnétique relative des parois, δ l'épaisseur de peau du matériau dont les parois de la CR sont conçues, A la surface intérieure de la CR ;

$$Q_2 = \frac{\omega U}{P_{d2}} = \frac{2\pi V}{\lambda \langle \sigma_a \rangle} \quad (1.37)$$

avec $\langle \sigma_a \rangle$ la surface équivalente d'absorption moyennée sur tous les angles d'incidence et les polarisations TE et TM ;

$$Q_3 = \frac{\omega U}{P_{d3}} = \frac{4\pi V}{\lambda \langle \sigma_t \rangle} \quad (1.38)$$

avec $\langle \sigma_t \rangle$ la surface équivalente de transmission des ouvertures moyennée sur tous les angles d'incidence et les deux polarisations TE et TM.

$$Q_4 = \frac{\omega U}{P_{d4}} = \frac{16\pi^2 V}{m\lambda^3} \quad (1.39)$$

avec m le facteur de désadaptation de l'antenne qui est exprimé par : $m = 1 - |\Gamma|^2$ où Γ est le coefficient de réflexion de l'antenne ($m=1$ pour une antenne parfaitement adaptée).

Le facteur de qualité de la CR peut être calculé en temporel ou en fréquentiel [27], [46]. Le facteur de qualité déterminé dans le domaine fréquentiel Q_{DF} est défini pour une chambre équipée d'antennes idéales. Il est obtenu à travers des mesures de puissances en CR et exprimé comme suit

$$Q_{DF} = C_{CR} \langle |S_{21}|^2 \rangle \quad (1.40)$$

où $C_{CR} = \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3}$ est une constante de la CR, V le volume de la CR et λ la longueur d'onde.

Par ailleurs, le facteur de qualité de la CR en temporel Q_{DT} est déterminé en calculant la constante de temps de la CR notée τ_{CR} . Celle-ci représente la constante de décroissance de la puissance dans la chambre réverbérante. Ainsi, le facteur de qualité est exprimé comme suit

$$Q_{DT} = \omega\tau_{CR} \quad (1.41)$$

Il y a un décalage systématique entre Q_{DF} et Q_{DT} . Les valeurs du facteur de qualité estimées en temporel sont plus importantes que celles obtenues pour le facteur de qualité estimé en fréquentiel. Cette différence est principalement due aux pertes ohmiques dans les parois de la chambre ainsi que dans les antennes. En se plaçant dans le cas des fréquences suffisamment hautes et des conditions de pertes importantes en CR, la constante de temps et donc le facteur de qualité présentés dans (1.41) sont dominés par les pertes dans les parois de la CR, cela signifie qu'on peut approximativement lier l'offset entre les facteurs de qualité Q_{DF} et Q_{DT} aux pertes dans les antennes uniquement.

1.3.3.4 Coefficient de corrélation et nombre d'échantillons décorrés

L'aspect statistique des traitements effectués sur les mesures en CR donne beaucoup d'importance au nombre d'échantillons (mesures) décorrés fournis par la CR. En effet, cette quantité est un indicateur de l'efficacité de brassage et doit également être pris en compte dans l'évaluation du fonctionnement de la CR [51]. Des mesures décorrées (dans différentes configurations de la CR) peuvent être obtenues grâce aux différents types de brassage qu'on présentera par la suite. Afin de mesurer le degré de corrélation entre deux mesures X et Y , plusieurs méthodes ont été utilisées. La méthode la plus classique est basée sur le calcul du coefficient de corrélation ρ en utilisant la formule suivante [50]

$$\rho(\alpha) = \text{corr}(X, Y_\alpha) = \frac{\sum_i^n (x_i - u_x)(y_{\alpha,i} - u_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - u_x)^2 \sum_{i=1}^n (y_{\alpha,i} - u_y)^2}} \quad (1.42)$$

Dans le cas de mesures effectuées en CR sur un tour complet du brasseur, n est le nombre total de positions du brasseur sur un tour complet, x_i la mesure prélevée pour une position i du brasseur, le vecteur $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ contient les mesures prélevées sur toutes les positions du brasseur, Y_α est la version décalée de α échantillons du vecteur X et u_x, u_y sont les moyennes respectives des vecteurs X et Y_α . Comme X et Y_α représentent la même distribution, on a $u_x = u_y$.

$$\begin{aligned} Y_0 &= X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \\ Y_{\alpha_1} &= [x_n, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}] \\ Y_{\alpha_2} &= [x_{n-1}, x_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-2}] \\ &\dots \\ Y_{\alpha_{(n-1)}} &= [x_2, x_3, x_4, \dots, x_n, x_1] \end{aligned} \quad (1.43)$$

Pour un pas angulaire de rotation du brasseur θ , le nombre total de positions obtenu est $n = 360/\theta$ (pour θ exprimé en degrés). Lorsqu'un analyseur de réseau est utilisé, le coefficient de corrélation peut être calculé en prenant pour x_i les grandeurs $|S_{21}|^2$, $|S_{21}|$ ou même la partie réelle et imaginaire de S_{21} [52]. Dans le cas des résultats de mesure présentés dans les chapitres 2 et 3, le coefficient de corrélation est calculé en considérant x_i comme étant le carré du module du coefficient de transmission ($x_i = |S_{21}|^2$). Les valeurs obtenues pour le coefficient de corrélation sont ensuite comparées à un seuil afin de déterminer l'angle de décorrélation (à partir duquel on considère que deux mesures sont décorrélatées). Dans [17], [53], un seuil de $e^{-1} = 0,37$ a été fixé afin de déterminer l'angle de décorrélation du brasseur ; ainsi, les mesures sont considérées décorrélatées lorsque le coefficient de corrélation est inférieur à ce seuil. Classiquement, la première valeur du décalage α vérifiant cette condition est considérée comme angle de décorrélation. Par ailleurs, dans [53], une interpolation linéaire est proposée afin d'évaluer plus précisément la valeur de θ et donc le nombre de positions de brasseur décorrélatées. Toutefois, cette valeur seuil est valable uniquement dans le cas d'un nombre infini d'échantillons ' n ' [54], [17]. Dans un cas réel, le nombre de mesures ' n ' ne peut pas être infini, c'est pourquoi, et pour un nombre d'échantillon inférieur à 100 ($n < 100$), un seuil de décorrélation réduit est défini en fonction du nombre de mesures (échantillons) comme suit

$$\rho_{seuil} = 0.37 \times \left(1 - \frac{7.22}{n^{0.64}}\right) \quad (1.44)$$

Il existe d'autres méthodes pour déterminer le nombre d'échantillons indépendants en CR. Dans [55], une méthode plus simple et comparable en terme de précision à la méthode classique est proposée. Le nombre d'échantillons décorrélatés est calculé à partir de la séquence des différences entre les échantillons de mesure voisins. Dans [54], une autre méthode basée sur un modèle autoregressif est aussi proposée. La notion de la taille effective d'échantillons indépendants parmi le nombre total des échantillons de mesure est ainsi introduite.

Il a été montré dans [52], [56] que de nombreux paramètres de mesure tels que les dimensions de la chambre, les géométries du brasseur [57], [58], le diagramme de l'antenne d'excitation, son orientation et sa polarisation, ou les pertes dans la CR [59], affectent la corrélation des mesures en CR. La précision des mesures de corrélation a été étudiée dans [60] en utilisant le calcul classique du coefficient de corrélation.

1.3.3.5 Bande de cohérence

La bande de cohérence (B_c) en CR peut être définie comme étant une mesure statistique de la gamme fréquentielle sur laquelle le champ en CR est corrélé [61]. Cela signifie que les modes excités dans cette bande de fréquence sont aussi corrélés. La B_c est inversement proportionnelle au facteur de qualité comme le présente l'équation suivante

$$B_c = \frac{f}{Q} \quad (1.45)$$

avec f la fréquence et Q le facteur de qualité de la CR. Elle peut être calculée à partir du coefficient de corrélation de la réponse fréquentielle de la CR [61] (voir section précédente) où elle correspond à la largeur fréquentielle minimale de décorrélation. Cette dernière est définie par le premier passage du coefficient de corrélation en dessous du seuil de décorrélation défini. La B_c est ainsi considérée comme une quantité caractéristique de la chambre réverbérante [62]. Dans [61], on montre qu'il existe un lien entre la bande de cohérence et les moyennes des surfaces équivalentes d'absorption des matériaux avec lesquels la chambre a été chargée. Ainsi, il est possible d'estimer la charge nécessaire pour arriver à une bande de cohérence souhaitée, associée à un canal de propagation spécifique.

1.3.4 Techniques de brassage

La nature statistique du champ en CR est générée grâce aux différentes techniques de brassage. Leur objectif est de rendre le champ statistiquement homogène et isotrope. Il existe différentes techniques de brassage principalement regroupées sous les catégories suivantes : brassage mécanique, brassage fréquentiel, brassage de source.

1.3.4.1 Brassage mécanique

Le brassage mécanique est le type de brassage le plus commun. Il est réalisé grâce à un brasseur de modes présent à l'intérieur de la CR. Ce brasseur de modes est une structure métallique qui possède une forme arbitraire non symétrique. Il est commandé par un moteur et peut donc effectuer soit une rotation sur 360° [33], [17], [46] comme présenté dans la Figure 1.7 soit une translation comme détaillé dans [63] et [64] et illustré dans la Figure 1.7. Cette rotation ou translation modifie les conditions aux limites du champ, de sorte que chaque position du brasseur représente une configuration différente de la précédente (idéalement indépendante). Un ou plusieurs brasseurs peuvent être utilisés afin d'assurer le maximum de configurations indépendantes de champ en CR. Il existe par ailleurs un autre type de brassage mécanique basé non pas sur un brasseur de modes mais sur des parois vibrantes comme présenté en détails dans [65], [66] et illustré dans la Figure 1.8. Ces parois sont conçues avec un tissu métallisé assurant ainsi des courbures complexes et donc une bonne diffusion du champ. Ce type de chambre est connu sous le nom de *Vibrating Intrinsic Reverberation Chambers* (VIRC). Une simulation et une évaluation du comportement de ce type de chambre sont présentés dans [67], [66] et [68]. Par ailleurs, le brassage mécanique peut être lent en raison du nombre important de mesures à prélever correspondant à chaque position du brasseur. C'est pourquoi, d'autres types de brassage, moins chronophages, ont été proposés, notamment le brassage fréquentiel détaillé dans la partie suivante.

1.3.4.2 Brassage fréquentiel

Le but du brassage fréquentiel est d'obtenir une uniformité spatiale du champ en appliquant un balayage fréquentiel à la source sur une fenêtre fréquentielle étroite. La puissance mesurée aux différentes fréquences est donc moyennée et la moyenne calculée

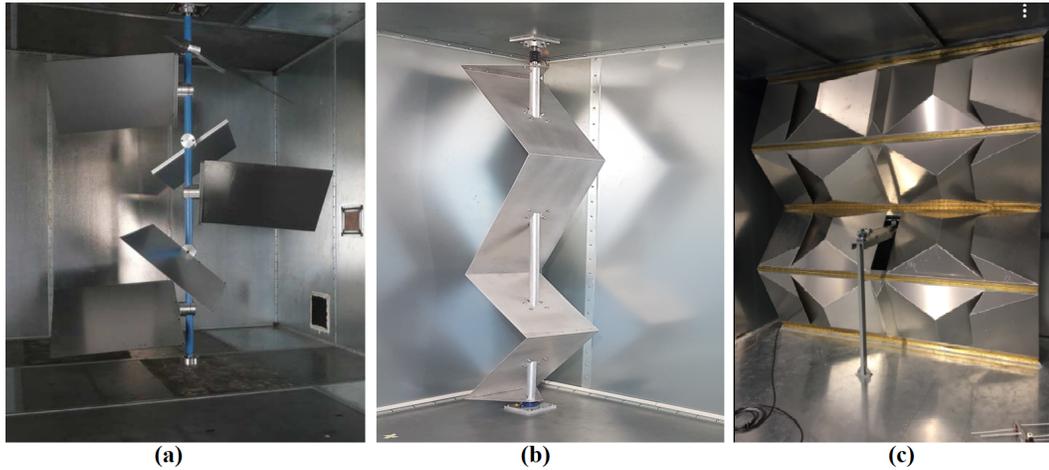


FIGURE 1.7 – Exemples de brasseur de mode mécanique pour CR (a,b) fonctionne en rotation, (c) fonctionne en translation. (a) brasseur de la CR de l'IETR de Rennes, (b) brasseur de la CR du laboratoire ESYCOM et (c) brasseur de la CR du fabricant COM-TEST Engineering.

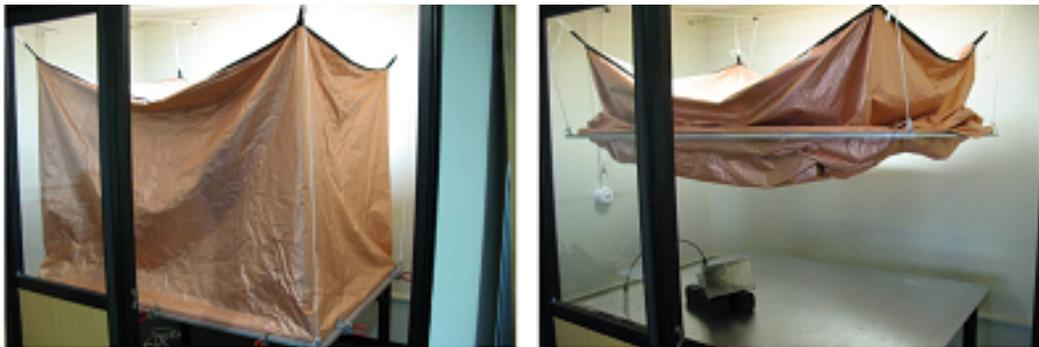


FIGURE 1.8 – Exemple de VIRC présent dans le centre de recherche CAERCEM en Argentine [66].

sur une bande fréquentielle est associée ensuite à sa fréquence centrale. En faisant glisser cette fenêtre fréquentielle, le brassage est ainsi appliqué sur toute la bande de mesure [69]. Le changement de fréquence est en fait équivalent au changement de la taille électrique de la chambre. Dans [70], l'homogénéité du champ a été étudiée dans une CR idéale en 2D en appliquant un brassage fréquentiel ; une bonne homogénéité du champ est obtenue avec une fenêtre de 10 MHz centrée sur la fréquence 4 GHz. Dans [71], le brassage fréquentiel a été étudié en terme de nombre d'échantillons décorrélés calculés pour des échantillons fréquentiels. Aussi, dans [72], il a été étudié en utilisant une nouvelle méthode basée sur un modèle autoregressif. Il est important d'indiquer que la largeur de la bande fréquentielle choisie pour le brassage doit être soigneusement fixée [73] : elle doit être suffisamment large pour effectuer un brassage fréquentiel efficace (plus d'échantillons décorrélés) mais aussi suffisamment petite pour que le paramètre qu'on cherche à estimer ne varie pas trop

dans la bande de fréquence choisie. Le brassage fréquentiel est une technique similaire au lissage sur des échantillons fréquentiels (utilisé sur les résultats présentés dans ce travail), la différence étant que la première est appliquée sur les mesures brutes (en complexe) alors que la seconde est appliquée sur le résultat final obtenu pour le paramètre désiré.

1.3.4.3 Brassage de source

Le brassage de source consiste à déplacer ou à réorienter la source d'excitation et à appliquer ensuite la moyenne sur ces différents emplacements ou orientations. Comparé au brassage mécanique classique (avec le brasseur de modes), ce type de brassage est nettement moins encombrant et permet donc d'avoir un volume de travail plus important. Le brassage de source a été proposé pour la première fois par Y. Huang et D. J. Edwards en 1992 [74], où ils ont montré qu'il permet aussi la génération d'un champ homogène et isotrope dans la CR. Avec des avantages similaires à ceux fournis par le brassage mécanique, le brassage de source améliore la précision des mesures. Ceci a été aussi montré dans [75] où le brassage de source a amélioré la précision des résultats de mesure de l'efficacité d'antenne d'un facteur compris entre 4 et 6. Le brassage dit de plate-forme a été également suggéré pour la mesure de l'efficacité de rayonnement d'antenne [75]. Il vise à faire tourner l'AUT sur une plate-forme afin d'éviter le couplage direct avec l'antenne source [76]. Le brassage de plate-forme a été également utilisé avec succès pour la mesure du coefficient de réflexion d'antenne en CR [6].

Si les différentes sources en CR sont orientés d'une manière orthogonale les unes aux autres, différentes polarisations sont considérés et cette technique est donc appelée brassage de polarisation [77], [78]. Par ailleurs, dans [79] et [80], des métasurfaces sont utilisées pour générer de nouvelles configurations de champ en CR, les résultats obtenus montrent une amélioration de l'homogénéité du champ lorsque ces métasurfaces sont installés en CR.

Dans cette section, on a présenté les principaux types de brassage appliqués au champ en CR. Le choix de l'un des types de brassage parmi d'autres n'est pas systématique. Dans [81], une multitude de choix de type de brassage ont été clairement présentés et illustrés. Dans [69], les différents types de brassage (brassage mécanique, fréquentiel et brassage de source et leurs combinaisons) ont été étudiés. [82] (lorsqu'en ajoute le brassage fréquentiel au brassage mécanique, le nombre d'échantillons décorrélés obtenu est le produit du nombre d'échantillons décorrélés obtenu dans le cas de chaque type de brassage), [78] (le brassage de polarisation a éliminé la différence de 8 % à 10 % entre la mesure de l'efficacité d'une même antenne conduite dans deux CRs différentes). Une solution qui permet donc d'exploiter les avantages de plusieurs techniques de brassage en même temps est de combiner ces dernières. Le travail présenté dans [69] compare les performances des types de brassage les plus communs appliqués dans la même CR. Ces comparaisons permettent de faire le choix de la technique de brassage la mieux adéquate selon les contraintes (dimensions de la CR, complexité du processus de brassage, temps de mesure...etc). Une combinaison de plusieurs types de brassage permet d'augmenter le nombre d'échantillons décorrélés.

1.4 Techniques de mesure de l'efficacité d'antenne en CR

Comme cela a déjà été présenté dans la section 1.2.1.4, l'efficacité de rayonnement d'une antenne est définie comme étant le rapport entre la puissance totale rayonnée par l'antenne et la puissance acceptée par l'antenne. Dans la littérature, on trouve différentes méthodes de mesure de l'efficacité d'antenne en CR qu'on peut regrouper sous deux catégories suivant qu'une antenne de référence est ou non nécessaire.

1.4.1 Méthodes avec antenne de référence

Considérées parmi les méthodes classiques de mesure de l'efficacité d'antenne, elles sont fondées sur l'utilisation d'une antenne de référence avec une efficacité de rayonnement connue et supposée constante sur la bande fréquentielle de mesure. Généralement, cette efficacité est égale à 0,75 pour une antenne log-périodique et 0,9 pour une antenne cornet [83]. Dans [84], des mesures en réflexion ont été effectuées pour plusieurs antennes afin d'évaluer les différentes pertes ainsi que leurs efficacités de rayonnement en CR. Par ailleurs, dans [83], [85] et [86], des mesures en transmission sont effectuées et deux techniques de mesure sont utilisées dans ce cas.

1.4.1.1 Méthode de substitution

La méthode de substitution est la méthode la plus classique, elle consiste à utiliser trois antennes dont l'antenne de référence. Elle s'organise en deux étapes car elle nécessite deux mesures différentes. D'abord, comme présenté sur la Figure 1.9, une première mesure est effectuée en transmission avec l'antenne de référence (à efficacité connue et supposée constante) connectée sur le port 1 du VNA par exemple et une autre antenne de mesure (elles peuvent être identiques) connectée sur le port 2 du VNA. Ensuite, une deuxième mesure en transmission est faite en remplaçant l'antenne de référence par l'antenne sous test (AUT) (sur le port 1) et en gardant toujours l'antenne utilisée précédemment sur le port 2 du VNA [86]. Dans les deux cas, les mesures sont effectuées sur un tour complet du brasseur. L'efficacité de l'AUT est donc exprimée par l'expression suivante

$$\eta_{\text{AUT}} = \eta_{\text{Ref}} \frac{\langle |S_{21_{\text{AUT}}}|^2 \rangle (1 - |\langle S_{11_{\text{Ref}}} \rangle|^2) (1 - |\langle S_{22_{\text{Ref}}} \rangle|^2)}{\langle |S_{21_{\text{Ref}}}|^2 \rangle (1 - |\langle S_{11_{\text{AUT}}} \rangle|^2) (1 - |\langle S_{22_{\text{AUT}}} \rangle|^2)} \quad (1.46)$$

avec η_{Ref} : efficacité de rayonnement connue de l'antenne de référence, η_{AUT} : efficacité de rayonnement inconnue de l'antenne sous test, $S_{ij_{\text{Ref}}}$: paramètre S mesuré avec l'antenne de référence. $S_{ij_{\text{AUT}}}$: paramètre S mesuré avec l'antenne AUT. Dans cette méthode, on suppose que le facteur de qualité est le même dans les deux mesures (en utilisant l'antenne de référence et en utilisant l'AUT).

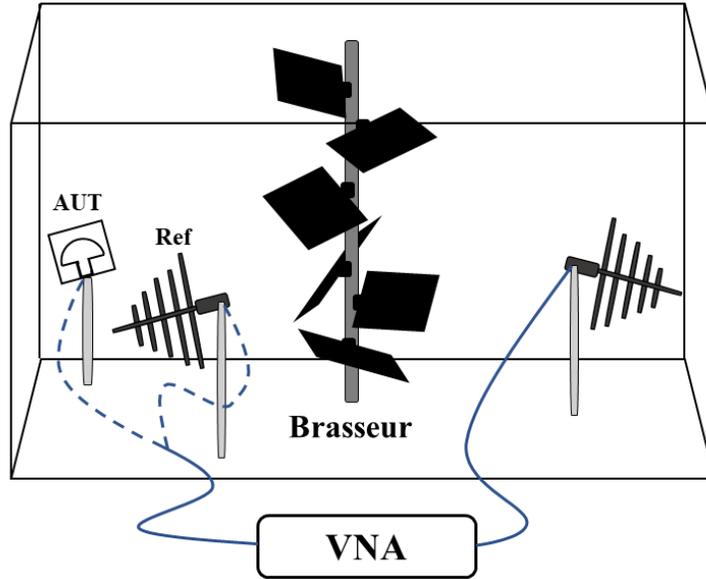


FIGURE 1.9 – Configuration de mesure de la méthode de "substitution" pour la mesure de l'efficacité d'antenne avec antenne de référence.

1.4.1.2 Méthode du facteur de qualité

La deuxième méthode, bien détaillée dans [86], propose une autre technique avec des mesures en transmission en tirant profit des propriétés du facteur de qualité composite. Deux antennes seulement sont utilisées pour cette mesure (antenne de référence et AUT) et une seule configuration de mesure est nécessaire comme illustré dans la Figure 1.10. Le facteur de qualité composite (qui tient compte de l'ensemble des pertes liées à la chambre et celles liées aux deux antennes) vu par les antennes 1 et 2 est le même ($Q_1 = Q_2$) et il peut être exprimé comme suit

$$Q_i = \langle |S_{ii} - \langle S_{ii} \rangle|^2 \rangle \frac{Z_0 \omega \epsilon V}{(\lambda^2 / 4\pi)(1 - |\langle S_{ii} \rangle|^2)^2 \eta_{\text{ray},i}^2}, \quad i = 1, 2 \quad (1.47)$$

avec Z_0 : impédance d'onde, ω : pulsation, ϵ : permittivité, V : le volume de la CR. En se basant sur l'équation (1.47) et en admettant que l'antenne 1 est l'antenne de référence avec une efficacité ' $\eta_{\text{ray},1}$ ' connue, on peut obtenir l'efficacité de la seconde antenne (AUT) ' $\eta_{\text{ray},2}$ '

$$\eta_{\text{ray},AUT} = \eta_{\text{ray},2} = \sqrt{\frac{Q'_2}{Q_1}} \quad (1.48)$$

Avec

$$Q'_2 = \langle |S_{22} - \langle S_{22} \rangle|^2 \rangle \frac{Z_0 \omega \epsilon V}{(\lambda^2 / 4\pi)(1 - |\langle S_{22} \rangle|^2)^2} \quad (1.49)$$

Dans [86], une comparaison entre ces deux techniques de mesure a montré que le

résultat de l'efficacité obtenu avec la deuxième technique présente moins de fluctuations. Ceci peut être lié au fait que dans la première technique, la mesure est effectuée en deux étapes (deux configurations de la CR) en considérant une conservation implicite du facteur de qualité.

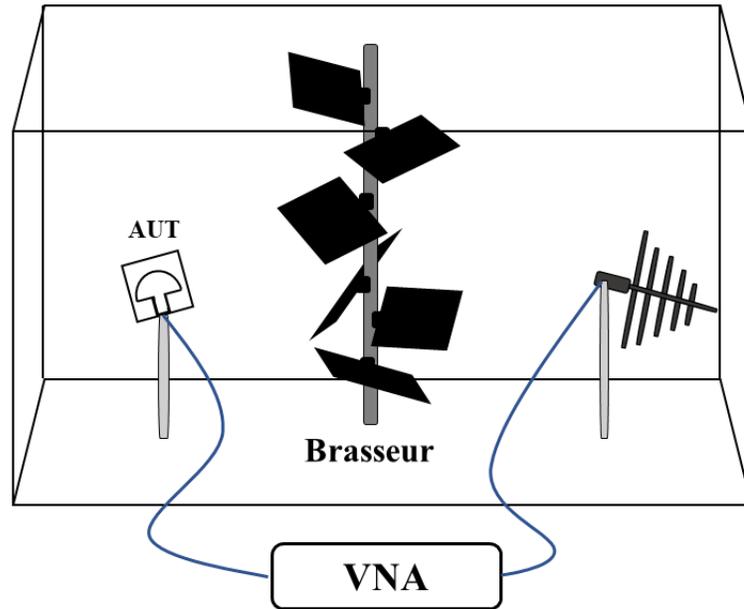


FIGURE 1.10 – Configuration de mesure de la méthode du "facteur de qualité" pour la mesure de l'efficacité d'antenne avec antenne de référence.

1.4.2 Méthodes sans antenne de référence

Une antenne de référence avec une efficacité de rayonnement connue et constante sur une bande fréquentielle donnée n'est pas toujours facile à trouver en pratique. En 2012, Holloway a proposé dans [46] une nouvelle méthode de mesure de l'efficacité d'antenne sans avoir recours à l'utilisation d'une antenne de référence contrairement aux méthodes présentées dans la partie précédente. Sa méthode est basée sur le facteur de qualité Q estimé en temporel et en fréquentiel. Il explique dans son travail que la différence entre les deux estimations de Q est directement liée aux efficacités des antennes utilisées dans la mesure. Une seconde hypothèse émise dans le cas de cette méthode consiste à considérer que le facteur de qualité Q estimé en temporel représente le facteur de qualité composite de la CR sous l'hypothèse que les pertes introduites par les antennes sont négligeables relativement aux autres pertes en CR. En effet, Q estimé en fréquentiel est légèrement inférieur au Q estimé en temporel, en raison du fait que les antennes ne sont pas idéales. Pour le calcul de l'efficacité de rayonnement avec la méthode sans antenne de référence, il faut d'abord déterminer un paramètre important qui est la constante de temps de la chambre réverbérante τ_{CR} , liée aux pertes dans la chambre et qui représente le temps

de réverbération de l'énergie dans la CR avant son évanouissement. Mathématiquement, il représente l'inverse de la pente de la décroissance temporelle du power delay profile (PDP(t)) dans une représentation logarithmique. Ce dernier est calculé à partir de la fonction de transfert de la chambre réverbérante S_{21} pour différentes positions du brasseur ' θ '.

$$\text{PDP}(t) = \langle |\text{IFT}[S_{21}(f, \theta)]|^2 \rangle \quad (1.50)$$

où IFT représente la transformée de Fourier inverse, et le symbole $\langle . \rangle$ représente la moyenne sur un tour du brasseur. Il est également possible de calculer PDP en utilisant les coefficients de réflexion des antennes de mesure. Néanmoins, la pente devient difficile à extraire si l'antenne utilisée présente de fortes pertes [87]. Le facteur de qualité de la CR dans le domaine temporel est donc calculé à partir de la constante de temps de la chambre τ_{CR} suivant

$$Q_{\text{CR}} = \omega \tau_{\text{CR}} \quad (1.51)$$

avec ω la pulsation. Selon la configuration de mesure considérée, il existe trois approches pour le calcul de l'efficacité de rayonnement suivant la méthode présentée dans [46] : approche avec une seule antenne, deux antennes et trois antennes de mesure.

1.4.2.1 Approche avec une antenne de mesure

Dans cette configuration, une seule antenne est utilisée (Figure 1.11). L'efficacité est déterminée à partir du coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne. Cette dernière est installée dans la CR et sert à coupler l'énergie qui lui est transmise à la CR. Une partie de cette énergie est dissipée dans les parois de la CR alors qu'une autre partie est réfléchi sur les parois et le brasseur pour finir par être captée par l'antenne. Par ailleurs, il existe une autre partie de cette énergie qui n'a pas été en interaction avec le brasseur (énergie non brassée). De ce fait, le paramètre S_{11} peut être décomposé comme suit

$$S_{11} = S_{11,\text{uns}} + S_{11,\text{s}} \quad (1.52)$$

$S_{11,\text{s}}$ est la composante brassée du paramètre S_{11} mesuré en CR et elle représente la partie de l'énergie (contribution de S_{11}) en interaction avec le brasseur. $S_{11,\text{uns}}$ est la composante non brassée du paramètre S_{11} et elle englobe les réflexions spéculaires et les trajets directs sans interaction avec le brasseur et aussi le S_{11} en espace libre. Cette décomposition est valable de la même manière pour les différents coefficients de transmission et de réflexion S_{ij} mesurés en CR. Une correction est souvent appliquée aux mesures en CR afin d'éliminer la contribution de la partie d'énergie non brassée en CR. Elle consiste à remplacer le paramètre S_{ij} par $S_{ij,\text{s}}$. Ce dernier est calculé comme suit

$$S_{ij,\text{s}} = S_{ij} - \langle S_{ij} \rangle \quad (1.53)$$

$\langle . \rangle$ représente la moyenne sur un tour de brasseur. Dans le cas où la CR présente un bon fonctionnement (champ bien brassé), le terme $\langle S_{ij} \rangle$ s'approche beaucoup du S_{ij} mesuré en chambre anéchoïque et idéalement les deux termes sont égaux [88].

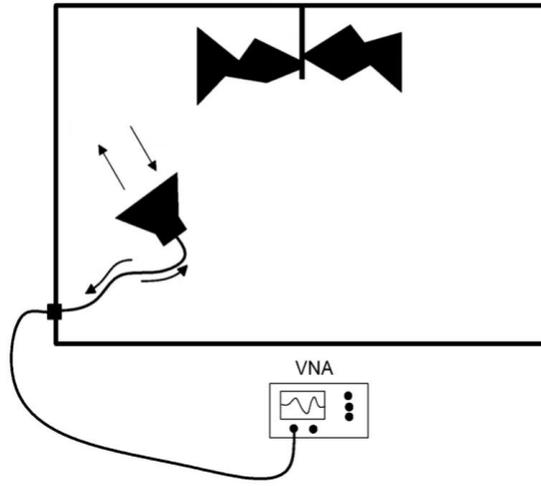


FIGURE 1.11 – Configuration de la méthode de mesure de l'efficacité d'antenne sans antenne de référence (approche avec une seule antenne) [46].

Les étapes de calcul de l'efficacité de l'antenne en utilisant la configuration de mesure présentée dans la Figure 1.11 sont détaillées dans [46]. Le résultat final obtenu pour l'efficacité totale est donné par l'expression suivante

$$\eta_{tot,1} = \sqrt{\frac{\langle |S_{11,s}|^2 \rangle C_{CR}}{\tau_{CR} 2\omega}} \quad (1.54)$$

avec : $C_{CR} = \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3}$ où V : volume de la CR, λ : la longueur d'onde, τ_{CR} : constante de temps de la CR, $S_{11,s}$ la composante brassée du coefficient de réflexion S_{11} de l'antenne sous test, l'indice '1' fait référence à la méthode appliquée qui est basée sur l'utilisation d'une seule antenne. Afin d'obtenir l'efficacité de rayonnement de l'antenne, il est nécessaire d'appliquer une correction sur le paramètre $S_{11,s}$ afin de compenser les pertes par désadaptation de l'antenne. On obtient ainsi l'équation suivante

$$\eta_{ray,1} = \sqrt{\frac{\langle |S_{11,s}|^2 \rangle_{cor} C_{CR}}{\tau_{CR} 2\omega}} \quad (1.55)$$

Avec

$$\langle |S_{11,s}|^2 \rangle_{cor} = \frac{\langle |S_{11,s}|^2 \rangle}{(1 - \langle |S_{11}|^2 \rangle)^2} \quad (1.56)$$

Dans les équations (1.54) et (1.55), la valeur 2 au dénominateur résulte de l'hypothèse stipulant qu'on a une CR avec un fonctionnement idéal. Cela se traduit par le fait qu'une antenne de transmission en CR reçoit deux fois l'énergie reçue par une autre antenne se trouvant dans la même CR. Cette notion a été présentée dans [27] et [45], et est analogue au coefficient de rétro-diffusion.

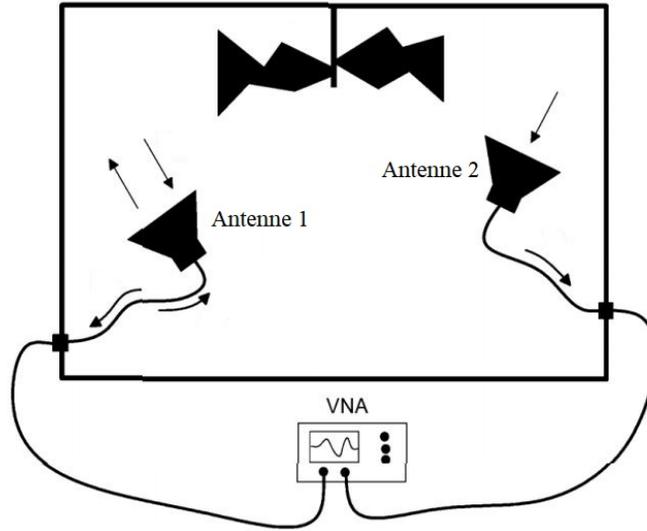


FIGURE 1.12 – Configuration de la méthode de mesure de l'efficacité d'antenne sans antenne de référence (approche avec deux antennes) [46].

1.4.2.2 Approche avec deux antennes de mesure

L'approche précédente basée sur l'utilisation d'une seule antenne a été proposée en supposant que le coefficient de rétrodiffusion $e_b = 2$. Lorsque cette supposition n'est pas faite, l'efficacité de l'antenne peut être obtenue avec l'approche des deux antennes dont le set-up de mesure est présenté dans la Figure 1.12. Dans ce cas, e_b est estimé à partir de la relation suivante

$$e_b = \frac{\sqrt{\langle |S_{11,s}|^2 \rangle \langle |S_{22,s}|^2 \rangle}}{\langle |S_{21,s}|^2 \rangle} \quad (1.57)$$

où il est calculé à partir des paramètres de réflexion et de transmission des antennes de mesure. Les efficacités totales des deux antennes sont donc données par les expressions suivantes

$$\begin{aligned} \eta_{\text{tot},2}^{\text{ant1}} &= \sqrt{\frac{\langle |S_{11,s}|^2 \rangle C_{\text{CR}}}{\tau_{\text{CR}} \omega \cdot e_b}} \\ \eta_{\text{tot},2}^{\text{ant2}} &= \sqrt{\frac{\langle |S_{22,s}|^2 \rangle C_{\text{CR}}}{\tau_{\text{CR}} \omega \cdot e_b}} \end{aligned} \quad (1.58)$$

Les indices 'ant1' et 'ant2' font référence aux deux antennes utilisées dans la mesure. L'indice '2' fait référence à la méthode appliquée qui est basée sur l'utilisation de deux antennes. Afin d'avoir les efficacités de rayonnement des deux antennes, on applique la même correction que précédemment (en utilisant l'équation (1.56)) sur les paramètres

$S_{11,s}$ et $S_{22,s}$. On obtient donc les expressions suivantes

$$\begin{aligned}\eta_{\text{ray},2}^{\text{ant1}} &= \sqrt{\frac{\langle |S_{11,s}|^2 \rangle_{\text{cor}} C_{\text{CR}}}{\tau_{\text{CR}} \omega \cdot e_b}} \\ \eta_{\text{ray},2}^{\text{ant2}} &= \sqrt{\frac{\langle |S_{22,s}|^2 \rangle_{\text{cor}} C_{\text{CR}}}{\tau_{\text{CR}} \omega \cdot e_b}}\end{aligned}\tag{1.59}$$

Cette deuxième approche a été appliquée dans [78] où l'efficacité de deux antennes (une antenne log-périodique et une antenne biconique) a été évaluée dans deux chambres différentes.

1.4.2.3 Approche avec trois antennes de mesure

Dans les deux dernières approches, des suppositions ont été faites concernant le coefficient e_b . Il a été supposé égal à '2' dans la première approche (basée sur une seule antenne) alors que dans la deuxième approche, sa valeur n'était pas fixée mais calculée. Par ailleurs, la deuxième approche suppose qu'on a la même valeur de e_b pour les différentes positions des deux antennes dans la CR (e_b ne dépend pas de l'emplacement des antennes de mesure).

L'avantage de la troisième approche est qu'elle ne fait aucune supposition concernant la valeur de e_b . Elle est similaire à l'approche utilisée dans la détermination du gain absolu d'une antenne en utilisant trois antennes de mesure sans connaissance a priori de leurs gains. On présente sur la Figure 1.13, le set-up de mesure utilisé dans cette approche. D'abord les deux antennes 'ant1' et 'ant2' sont connectées aux ports 1 et 2 du VNA respectivement et des mesures de paramètres S_{ij} sont effectuées sur un tour de brasseur. La deuxième configuration consiste à faire la même mesure (sur un tour de brasseur) en utilisant la première et la troisième antenne ('ant1' et 'ant3') connectées respectivement aux ports 1 et 2 du VNA, l'antenne restante étant toujours connectée sur 50 Ω . Une troisième et dernière configuration consiste à faire la même mesure que dans les deux premières configurations avec, dans ce cas, la deuxième et la troisième antenne ('ant2' et 'ant3') connectées aux deux ports du VNA.

Ces mesures nous permettent d'exprimer les efficacités totales des trois antennes en fonction des paramètres M_{ij} (où i et j peuvent prendre les valeurs 1, 2, 3) présentés dans [46]. Ces derniers dépendent des paramètres S_{ij} mesurés et du τ_{CR} estimé dans chaque configuration d'antenne. Les efficacités totales des trois antennes sont

$$\begin{aligned}\eta_{\text{tot},3}^{\text{ant1}} &= \sqrt{\frac{C_{\text{CR}}}{\omega}} \sqrt{\frac{M_{12}M_{13}}{M_{23}}} \\ \eta_{\text{tot},3}^{\text{ant2}} &= \sqrt{\frac{C_{\text{CR}}}{\omega}} \sqrt{\frac{M_{23}M_{12}}{M_{13}}} \\ \eta_{\text{tot},3}^{\text{ant3}} &= \sqrt{\frac{C_{\text{CR}}}{\omega}} \sqrt{\frac{M_{13}M_{23}}{M_{12}}}\end{aligned}\tag{1.60}$$

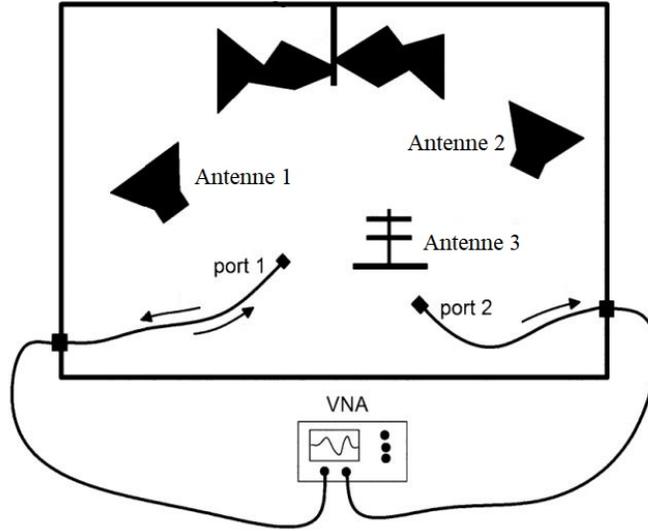


FIGURE 1.13 – Configuration de la méthode de mesure de l'efficacité d'antenne sans antenne de référence (approche avec trois antennes) [46].

avec

$$M_{ij} = \frac{\langle |S_{21,s}|^2 \rangle_{ij}}{\tau_{CR,ij}} \quad (1.61)$$

où les indices 'ant1', 'ant2' et 'ant3' font référence aux trois antennes utilisées dans la mesure. L'indice '3' quant à lui, fait référence à la méthode appliquée qui est basée sur l'utilisation de trois antennes. Les efficacités de rayonnement des trois antennes peuvent être déduites en introduisant la correction présentée dans (1.56). Les paramètres M_{ij} corrigés sont donc donnés par l'expression suivante

$$M_{ij,cor} = \frac{\langle |S_{21,s}|^2 \rangle_{ij,cor}}{\tau_{CR,ij}} = \frac{1}{\tau_{CR,ij}} \frac{\langle |S_{21,s}|^2 \rangle_{ij}}{(1 - \langle |S_{11}|^2 \rangle)(1 - \langle |S_{22}|^2 \rangle)} \quad (1.62)$$

où i et j peuvent prendre les valeurs 1,2,3. Les efficacités de rayonnement des trois antennes sont ainsi données par les expressions suivantes

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ray},3}^{\text{ant1}} &= \sqrt{\frac{C_{CR}}{\omega}} \sqrt{\frac{M_{12,cor} M_{13,cor}}{M_{23,cor}}} \\ \eta_{\text{ray},3}^{\text{ant2}} &= \sqrt{\frac{C_{CR}}{\omega}} \sqrt{\frac{M_{23,cor} M_{12,cor}}{M_{13,cor}}} \\ \eta_{\text{ray},3}^{\text{ant3}} &= \sqrt{\frac{C_{CR}}{\omega}} \sqrt{\frac{M_{13,cor} M_{23,cor}}{M_{12,cor}}} \end{aligned} \quad (1.63)$$

Cette approche présentée dans [46] ne fait aucune supposition concernant le paramètre e_b , il n'y a donc pas d'incertitude lié à ce paramètre. Les seules incertitudes dans ce cas sont liées aux mesures des paramètres S_{ij} et à l'estimation de la constante de temps τ_{CR} de la CR.

1.4.2.4 Conclusions et limitations

Les méthodes de mesure de l'efficacité d'antenne présentées dans la section précédente de ce chapitre sont toutes des méthodes considérées comme invasives. Ceci est dû au fait que les antennes de mesure (qui peuvent notamment être des antennes électriquement petites) sont connectées à des câbles relativement grands lors des mesures. Bien que l'effet des pertes introduites par ces câbles soit pris en compte lors de la mesure (calibrage effectuée aux extrémités des câbles de mesure), lorsque ces câbles sont connectés à des antennes de taille comparable, ils peuvent perturber leurs propriétés électriques et de rayonnement. Dans la dernière section de ce chapitre, on décrit le principe de la solution proposée pour pallier ce problème et pouvoir effectuer des mesures d'antenne non-invasives.

1.5 Caractérisation d'antenne sans contact

1.5.1 Introduction

Les antennes électriquement petites occupent une part importante dans l'ingénierie des télécommunications. Par ailleurs, cette miniaturisation doit tenir compte de la taille souhaitée pour l'antenne en question ainsi que ses performances qui doivent rester acceptables avec sa taille réduite, ce qui implique un compromis entre taille électrique et performances [4]. La miniaturisation consiste à modifier la géométrie de l'antenne, en ajoutant des composants, ou en modifiant les caractéristiques des matériaux avec lesquels l'antenne est conçue. Dans [89], différents essais de miniaturisation d'antenne ont été détaillés, dont ceux appliqués sur les antennes dipôles et monopôles et qui consistent à ajouter des éléments d'impédance localisée [90], à entourer l'antenne avec un matériau diélectrique [91], [92] ou encore à plier l'antenne dans une forme plus compacte. Quant aux antennes patch, la technique basée sur le mur court-circuit est l'une des premières méthodes étudiées pour réduire la taille d'une antenne patch demi-onde rectangulaire classique, il s'agit de l'antenne PIFA (en anglais : *Planar Inverted-F Antenna*) [93]. Aussi, le fait d'ajouter des fentes à la structure de l'antenne permet de créer de multiples résonances, l'antenne patch peut donc résonner à des fréquences plus faibles [94]. Par ailleurs, des diélectriques à haute permittivité peuvent être utilisés pour miniaturiser une antenne patch en réduisant la longueur d'onde, augmentant ainsi sa taille électrique [95]. Aussi, dans [89], la technique fondée sur l'utilisation des méta-matériaux, qui est considérée parmi les techniques de miniaturisation les plus récentes, a été présentée en détails.

Cependant, la miniaturisation exacerbe la sensibilité des antennes aux dispositifs de mesure. En effet, plus la taille de l'antenne est petite, plus sa mesure risque d'être perturbée

par les connecteurs, les câbles ainsi que les différents éléments constitutifs du banc de mesure. Dans le but de pallier ce problème, des techniques de mesure non-invasives d'antenne ont été proposées. Dans la section suivante on détaillera le principe de cette mesure en chambre anéchoïque ainsi qu'en chambre réverbérante.

1.5.2 Principe de la mesure par rétro-diffusion de l'antenne

Afin de caractériser une antenne en s'affranchissant des perturbations induites par la connectique vers les dispositifs de mesure, différentes techniques de mesure d'antenne dites non-invasives ont été développées. Ces techniques sont basées sur l'étude du champ rétro-diffusé par une antenne. Ce champ est composé d'un mode de structure, lié à l'antenne en tant qu'objet, indépendamment de ses propriétés de rayonnement, et d'un mode de rayonnement, lié uniquement aux propriétés de rayonnement de l'antenne. Afin de remonter aux propriétés de rayonnement de l'antenne, il est donc nécessaire de dissocier les deux modes présents dans le champ rétro-diffusé total. Plusieurs techniques ont été proposées dans la littérature, d'abord en CA, puis très récemment en CR. Lorsqu'une antenne est éclairée par une onde incidente, sa rétro-diffusion peut être décomposée en deux composantes associées au mode d'antenne et au mode de structure [96], [97]. En effet, lorsque l'onde électromagnétique atteint l'antenne, des courants sont induits sur la structure de l'antenne et ils sont ainsi rayonnés ; une partie de l'énergie électromagnétique éclairant l'antenne est alors diffractée [97]. Par ailleurs, une partie de cette onde est transmise à la charge de l'antenne et induit une tension à ses bornes ; cette énergie admise puis en partie réfléchiée par la charge (selon son coefficient de réflexion) est re-rayonnée à son tour. Ainsi, le mode d'antenne est lié au re-rayonnement par l'antenne de l'énergie réfléchiée par la charge vers son accès d'excitation, il dépend donc des propriétés de rayonnement de l'antenne ainsi que de son impédance de charge. En revanche, le mode de structure, associé à l'interaction entre le champ incident et la structure de l'antenne, est lié à sa forme et à sa taille indépendamment de son fonctionnement en tant qu'émetteur ou récepteur électromagnétique [98]. La décomposition du champ diffusé par une antenne en mode d'antenne et mode de structure est illustrée sur la Figure 1.14.

En tirant profit de cette décomposition, on peut extraire les différents paramètres caractéristiques de l'antenne sous-test. Deux approches sont alors possibles. La première consiste à caractériser le champ rétrodiffusé par l'antenne via la mesure de sa Surface Equivalente Radar (SER) qui représente un paramètre permettant de quantifier la quantité d'énergie captée et rétro-diffusée par une cible, pour une onde incidente donnée. La modification de la valeur de la charge reliée à l'antenne permet de modifier la contribution des deux modes et ainsi de les distinguer [98], notamment lorsque l'antenne est reliée à une charge adaptée. Dans ce cas, l'énergie acceptée par l'antenne est totalement absorbée et seule la contribution du mode de structure est alors obtenue. Cette première approche est celle retenue pour les mesures en chambre anéchoïque et peut également être adoptée en chambre réverbérante. La deuxième approche se base sur des considérations énergétiques. Ainsi, tout objet (éventuellement une antenne) peut être caractérisé par sa surface équivalente d'absorption, qui représente les pertes introduites par la présence de cet ob-

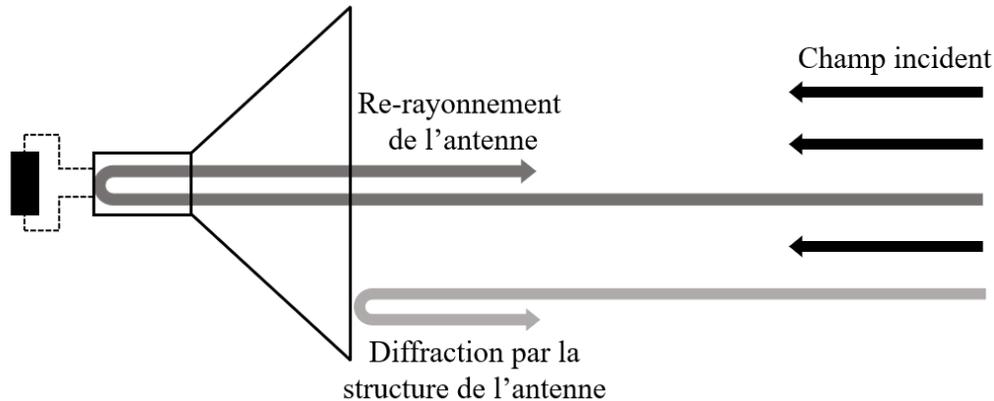


FIGURE 1.14 – Champ diffusé par une antenne : mode d'antenne (en gris foncé) et mode de structure (en gris clair).

jet dans un milieu de propagation électromagnétique. La modulation de l'impédance de charge de l'antenne permet de modifier les pertes subies par le mode d'antenne. Dans le cas d'une charge adaptée, l'énergie transmise à la charge est totalement absorbée et donc aucune puissance n'est re-rayonnée par l'antenne. Cette deuxième approche est particulièrement bien adaptée à la CR puisque les pertes dans cette dernière peuvent facilement être évaluées.

1.5.3 Mesure en CA

Plusieurs approches ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques d'une antenne à partir de la mesure de sa SER. Les premières mesures, en 1979 [99] utilisent une modulation d'impédance fondée sur une ligne de longueur variable. Dans [100], une méthode de mesure basée sur la mesure de la SER et de la matrice de diffusion est développée. Cette méthode permet d'obtenir le gain, les caractéristiques de diffusion de structure de l'antenne ainsi que son impédance d'entrée. Aucun câble n'est connecté à l'antenne sous test dans ce cas. Par ailleurs, dans [101], une nouvelle méthode plus simple a été proposée. Elle combine la mesure de la SER et la technique de mesure avec 3 antennes afin de déterminer le gain et les caractéristiques de diffusion de structure de l'antenne. Cette approche ne nécessite ni câble connecté à l'AUT ni antenne de référence. Ces méthodes sont notamment intéressantes pour les mesures d'antennes miniatures. Des variantes de ces méthodes ont été proposées et étudiées particulièrement pour les antennes miniatures. Dans [102], une méthode basée sur la mesure de la SER et la modulation de l'impédance chargeant l'antenne a été proposée, les résultats obtenus pour le coefficient de réflexion de trois antennes différentes étaient en cohérence avec les mesures obtenues lorsque ces antennes sont connectées à un VNA. Les mesures effectuées en connectant des charges différentes à l'antenne sous test, par exemple un circuit ouvert, un court circuit, ou une charge adaptée, permettent d'extraire les paramètres caractéristiques de l'antenne sous

test (paramètres S, gain,...). Dans [103], une méthode de caractérisation d'antenne intégrée a été proposée en se basant sur le principe de rétro-diffusion mais sans avoir besoin d'extraire la SER de l'antenne. Dans le cas de cette mesure, le coefficient de réflexion peut être déterminé sans calibrage du système de mesure. Cette méthode représente donc une extension de celle présentée dans [102] pour les antennes millimétriques. Par ailleurs, une étude plus récente [104] de la sensibilité des méthodes de caractérisation d'antenne sans contact a montré qu'un petit déplacement de l'antenne sous test entre les mesures peut engendrer des erreurs importantes sur la détermination de son impédance d'entrée. De plus, une bonne connaissance des charges utilisées est essentielle pour une bonne précision des paramètres extraits. Par ailleurs, cette étude a également montré qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser un environnement anéchoïque dans cette méthode de caractérisation sans contact ; c'est pourquoi son utilisation peut être envisagée en CR.

1.5.4 Mesure en CR

Des études prometteuses ont montré que la détermination de la SER d'un objet métallique est aussi possible en CR. En raison de son prix plus modique, la CR représente une alternative intéressante à la CA pour ce type de mesure. Dans [105], la SER d'une cible canonique (plaque métallique) est estimée en CR via l'extraction de l'onde balistique entre l'antenne de mesure et la cible, et ce à partir de la mesure du coefficient de réflexion de l'unique antenne. Cette méthode a été complétée dans [106] en tirant profit du brassage de modes pour augmenter la précision des résultats, cette dernière étant alors liée à l'efficacité du brasseur. Cette approche s'est montrée pertinente pour extraire la SER de cibles métalliques canoniques (plaque et dièdre), avec une bonne concordance entre les mesures effectuées en deux CR différentes et en CA [107]. La même approche a également été utilisée pour réaliser des mesures de gain d'antenne en CR à partir du coefficient de rétro-diffusion [9]. Deux mesures pour des charges différentes (CO et 50Ω) sont réalisées afin d'isoler le mode de rayonnement d'une antenne Vivaldi et d'une antenne log-périodique. Le lobe principal de ces deux antennes mesurées en CR est en très bon accord avec les mesures en transmission réalisées en CA (erreur inférieure à 0.7 dB).

1.6 Conclusion

Le premier chapitre de cette thèse a été dédié à la présentation des propriétés électriques et de rayonnement des antennes. L'efficacité de rayonnement étant l'un des paramètres importants dans le bilan énergétique d'une transmission, on s'est focalisé sur sa présentation ainsi que ses différentes techniques de mesure notamment en CA, en appliquant la méthode Wheeler cap et en CR. Les CRs sur lesquelles se basent les mesures dans ce travail sont présentées dans la deuxième section. Le principe de fonctionnement des CRs diffère des CAs, c'est pourquoi, les traitements des mesures en chambre réverbérante ont été détaillés dans la même section. Les différentes approches pour la détermination de l'efficacité de rayonnement des antennes en CR se regroupent sous deux catégories : approches avec

et sans antenne de référence. Les méthodes qui existent dans la littérature, bien qu'elles soient efficaces et précises, ne tiennent pas compte des perturbations introduites par les câbles et les connecteurs lors de la mesure, alors que celles-ci sont notamment importantes dans le cas des mesures d'antennes électriquement petites en raison des tailles importantes de ces objets devant celle de l'antenne. La dernière partie de ce chapitre a donc été dédiée aux solutions proposées dans la littérature pour surmonter ce problème que ce soit en CA ou en CR.

Chapitre 2

Contributions originales aux mesures d'efficacité d'antenne existantes en CR

2.1 Introduction

La caractérisation d'antenne en chambre réverbérante représente une nouvelle orientation dans le domaine des mesures d'antenne. Ce travail s'intéresse à la caractérisation d'antenne en CR et se focalise principalement sur la mesure de l'efficacité de rayonnement d'antenne. Ainsi, ce chapitre regroupe les résultats obtenus suite à trois études détaillées relatives à la mesure de l'efficacité d'antenne en CR. Dans la première partie de ce chapitre, nous comparons deux méthodes de mesure d'efficacité d'antenne en CR, à savoir une première approche basée sur l'utilisation d'une antenne de référence et une seconde approche ne nécessitant pas d'antenne d'efficacité connue. Ces méthodes sont appliquées à la détermination de l'efficacité de rayonnement d'une antenne patch et d'une antenne log-périodique. Après comparaison des précisions atteintes par ces deux approches, une solution est proposée afin d'améliorer l'estimation de l'efficacité d'antenne avec la méthode présentant plus d'incertitudes de mesure. Dans la deuxième partie de ce chapitre et toujours dans le but d'améliorer l'estimation de l'efficacité d'antenne en CR, une seconde étude met en évidence le lien entre la bonne qualité du brassage du champ en CR et la précision des résultats de mesure. Étant donné que l'estimation de l'efficacité de rayonnement d'antenne dépend principalement de la mesure des composantes non brassées des paramètres S d'antenne, le lien entre une bonne estimation de ces paramètres et donc de l'efficacité d'antenne et la qualité du processus de brassage est validée. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, nous explorons les limites des approches classiques lorsque les mesures sont effectuées à des fréquences proches de la LUF, et proposons une méthode pour améliorer la précision de l'estimation.

2.2 Présentation de l'environnement de mesure et des antennes utilisées

Les toutes premières méthodes proposées pour la caractérisation d'antenne en CR reposaient sur l'utilisation d'une antenne de référence d'efficacité connue a priori, en plus de l'AUT [84], [86]. Détaillé précédemment dans la section 1.4.1, une nouvelle méthode a été proposée [46] permettant de s'affranchir de l'utilisation de l'antenne de référence Ant_{ref} . Il s'agit d'une avancée importante car une antenne de référence n'est pas toujours disponible. La plupart des antennes de référence utilisées sont des antennes large bande avec une efficacité considérée constante en l'absence d'informations plus précises (par exemple 90% pour une antenne log-périodique sur la bande fréquentielle où elle est adaptée). Les mesures présentées dans ce chapitre ont été principalement conduites dans deux CRs différentes à savoir la chambre réverbérante du laboratoire IETR à Rennes et la chambre réverbérante du laboratoire ESYCOM qu'on notera par la suite "CR IETR" et "CR ESYCOM" respectivement. L'AUT qu'on souhaite caractériser est une antenne patch. Une antenne log-périodique est aussi utilisée, elle est considérée soit comme antenne de référence (Ant_{ref}) soit simplement comme une deuxième antenne de mesure selon la méthode appliquée.

2.2.1 Environnements de mesure

Les mesures qui seront présentées dans ce chapitre ont été conduites dans deux chambres réverbérantes différentes :

2.2.1.1 Chambre réverbérante de l'IETR



FIGURE 2.1 – Chambre réverbérante de l'IETR.

La CR de l'IETR présentée dans la Figure 2.1 est pourvue d'un système mécanique de brassage de modes, ainsi que d'un ensemble d'équipements de mesures permettant la mise

en place et/ou le développement de protocoles de mesures. Elle possède les caractéristiques techniques suivantes [108] :

- Fréquence minimale d'utilisation estimée à 200 MHz
- Dimensions : 8,7 m x 3,7 m x 2,9 m ce qui fait un volume de 93,35 m³.
- Équipée d'un brasseur mécanique constitué de pales de forme plane articulées autour d'un axe vertical en rotation.

2.2.1.2 Chambre réverbérante de l'ESYCOM



FIGURE 2.2 – Chambre réverbérante du laboratoire ESYCOM.

La CR du laboratoire ESYCOM présentée dans la Figure 2.2 est équipée d'un brasseur de mode mécanique connecté à un moteur pas à pas et commandé de l'extérieur par un ordinateur. Elle se caractérise par :

- Fréquence minimale d'utilisation estimée à 400 MHz
- Dimensions : 2,75 m x 2,95 m x 2,35 m ce qui fait un volume de 19,11 m³.
- Équipée d'un brasseur mécanique vertical en forme de Z non symétrique placé dans un coin de la chambre.

2.2.2 Antennes de mesure

L'antenne que l'on souhaite caractériser est une antenne patch large bande (Figure 2.3) adaptée entre 1,75 et 2,7 GHz (coefficient de réflexion inférieur à -6 dB). Elle est constituée d'une fente en forme de demi-disque excitée par un monopôle. Cette antenne a été modélisée et simulée sous le logiciel de simulation électromagnétique 3D ANSYS HFSS (Figure 2.3). L'antenne patch a été aussi réalisée au sein du laboratoire ESYCOM. Les dimensions de l'antenne sont résumées dans la Table 2.1, h et e étant les épaisseurs du substrat (époxy FR4) et du métal (cuivre) respectivement.

La deuxième antenne de mesure utilisée est une antenne log-périodique Schwarzbeck VUSLP 9111-400, directive, large bande, caractérisée par une bande fréquentielle d'utilisa-

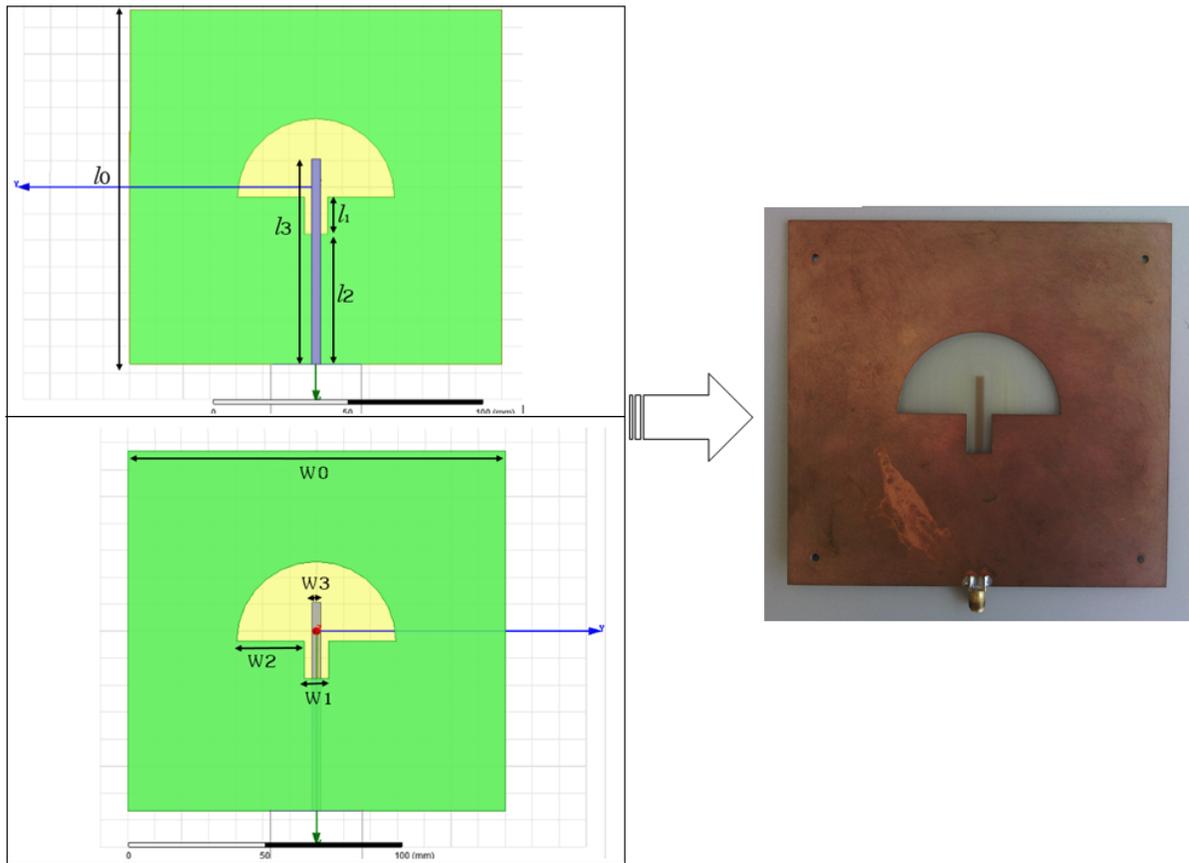


FIGURE 2.3 – Antenne patch caractérisée. A gauche, vue de dessus et vue de dessous de la structure de l'antenne sous HFSS. A droite, vue de dessus de l'antenne patch imprimée.

w_0	w_1	w_2	w_2	l_0	l_1	l_2	l_3	h	e
140	9	25	3,3	133,5	14	49	77,25	1,25	0,2

TABLE 2.1 – Dimensions de l'antenne patch (en mm).

tion de 340 MHz à 4 GHz et présentée dans la Figure 2.4. Cette antenne est utilisée comme une antenne de référence (Ant_{ref}) lorsque la méthode de mesure de l'efficacité utilisée le nécessite. Dans ce cas, on considère qu'elle possède une efficacité constante sur la bande fréquentielle de mesure $\leq 90\%$. Dans la section suivante, on présentera deux méthodes de mesure de l'efficacité d'antenne. La première méthode est fondée sur l'utilisation d'une antenne de référence ; cette même antenne est ensuite caractérisée conjointement à la seconde antenne via une méthode (la deuxième méthode) ne considérant pas d'antenne de référence.

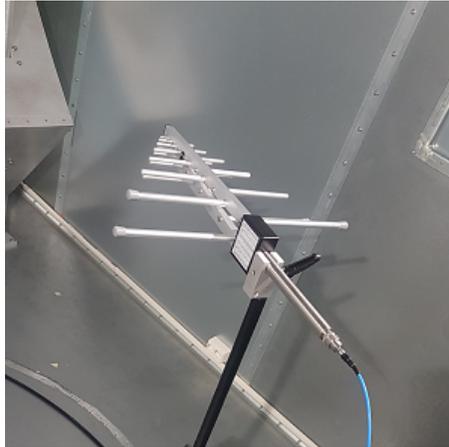


FIGURE 2.4 – Antenne log-périodique (antenne de référence).

2.3 Comparaison entre deux méthodes d'estimation de l'efficacité d'antenne (méthodes avec deux antennes)

2.3.1 Technique de mesure avec antenne de référence

Cette technique a été détaillée dans la section 1.4.1 du premier chapitre. Deux antennes, dont l'antenne de référence, sont utilisées dans notre cas. Cette méthode est fondée sur l'hypothèse stipulant que l'Ant_{ref} a une efficacité connue sur toute la bande fréquentielle de mesure. Le facteur de qualité composite de la CR peut être exprimé comme suit [84]

$$Q_i = \langle |S_{ii,s}|^2 \rangle \frac{Z_0 \omega \epsilon V}{(\lambda^2 / 4\pi)(1 - \langle |S_{ii}|^2 \rangle)^2 \eta_i^2} \quad (2.1)$$

avec $\langle \cdot \rangle$ la moyenne d'ensemble sur toutes les positions du brasseur, Z_0 l'impédance caractéristique du vide, $\omega = 2\pi.f$ avec f la fréquence, ϵ la permittivité du milieu (dans notre cas le vide), V : le volume de la CR, η_i l'efficacité de rayonnement de l'antenne i et $S_{ii,s}$ la composante brassée du paramètre S_{ii} définie comme suit

$$S_{ii,s} = S_{ii} - \langle |S_{ii}|^2 \rangle \quad (2.2)$$

Dans l'équation (2.1), les coefficients de réflexion des deux antennes peuvent être utilisés pour déterminer le facteur de qualité Q . Dans la mesure où le facteur de qualité de la CR (2.1) ne dépend pas du coefficient de qualité des antennes, il est considéré identique qu'il soit calculé à partir du paramètre S_{ii} de la première antenne ou bien de la seconde. On peut donc écrire : $Q_1 = Q_2$ puisque les deux antennes se trouvent dans le même milieu de mesure. Si on considère que l'antenne 1 est l'antenne de référence avec une efficacité

connue $\eta_1 = \eta_{\text{ref}}$, alors on peut écrire :

$$\eta_{\text{ray}}^{\text{Patch}} = \sqrt{\frac{Q'_2}{Q_1}} \quad , \quad Q'_2 = \langle |S_{22,s}|^2 \rangle \frac{Z_0 \omega \epsilon V}{(\lambda^2/4\pi)(1 - \langle |S_{22}|^2 \rangle)^2} \quad (2.3)$$

2.3.2 Technique de mesure sans antenne de référence

Cette technique a été présentée dans la section 1.4.2.2 du premier chapitre. Elle ne nécessite pas l'utilisation d'une Ant_{ref} et est fondée sur la différence entre l'estimation de Q de la CR dans le domaine temporel et son estimation dans le domaine fréquentiel. Cette méthode est uniquement applicable dans l'hypothèse où les pertes au niveau des ports d'antenne sont négligeables comparées aux pertes dans les parois de la CR. L'estimation de Q est réalisée à partir de l'évaluation de la constante de temps de la chambre dans le domaine temporel τ_{CR} qui ne dépend pas des antennes. Cette valeur estimée est donc légèrement supérieure à celle extraite en régime harmonique en raison de la non-idéalité des antennes. Puisque que l'on souhaite utiliser la même configuration de mesure et donc les mêmes antennes qu'avec la méthode précédente, on appliquera l'approche avec deux antennes (voir section (1.4.2.2)).

Dans ce cas, deux paramètres importants doivent être déterminés : la constante de temps τ_{CR} et le coefficient de rétrodiffusion e_b . La constante de temps de la chambre τ_{CR} est calculée à partir de la pente extraite de la représentation logarithmique du profil de retard de puissance (power delay profile) et qui a déjà était introduite dans (1.50). On rappelle aussi que le e_b est calculé à partir des composantes non brassées des coefficients de réflexion des deux antennes ainsi que celle du coefficient de transmission (1.57). Dans le cas où l'antenne patch est connectée au port 1 du VNA et l'antenne log-périodique au port 2 du VNA, leurs efficacités de rayonnement seront exprimées comme suit (voir les détails dans la section 1.4.2.2)

$$\eta_{\text{ray}}^{\text{Patch}} = \sqrt{\frac{\langle |S_{11,s}|^2 \rangle_{\text{cor}}}{\tau_{\text{CR}}} \frac{C_{\text{CR}}}{\omega \cdot e_b}} \quad (2.4)$$

$$\eta_{\text{ray}}^{\text{LogPer}} = \sqrt{\frac{\langle |S_{22,s}|^2 \rangle_{\text{cor}}}{\tau_{\text{CR}}} \frac{C_{\text{CR}}}{\omega \cdot e_b}}$$

2.3.3 Configuration de mesure

Dans un premier temps, les mesures ont été effectuées dans la CR du laboratoire ESY-COM présentée dans la section 2.2.1.2. Le but est de déterminer l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch présentée dans la section 2.2.2 en utilisant deux techniques de mesure différentes, ainsi que celle de l'antenne log-périodique. Le setup de mesure utilisé est le même dans les deux cas et son schéma synoptique est présenté dans la Figure 2.5

Les mesures sont prélevées en utilisant un analyseur de réseau Rohde&Schwarz ZNB8 sur 10.001 points fréquentiels uniformément espacés. La mesure est effectuée sur la bande

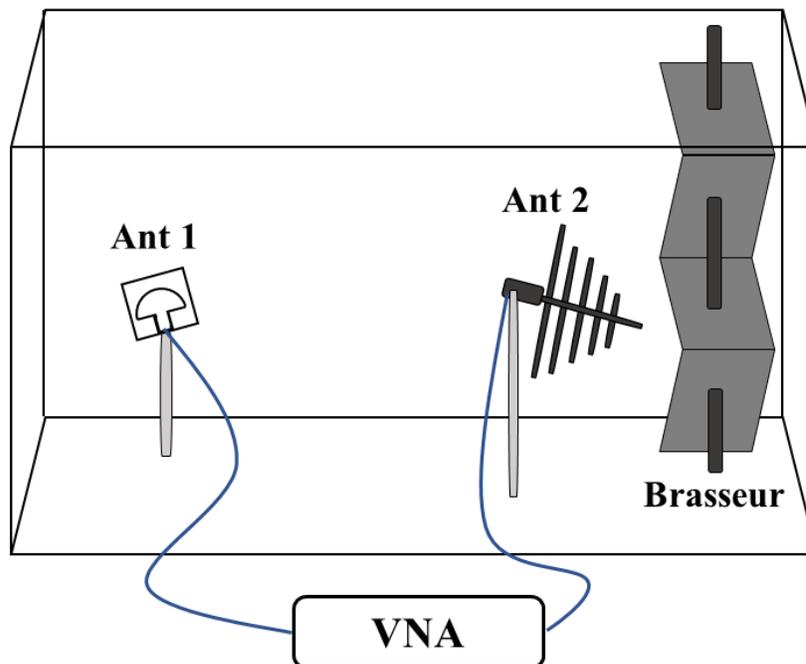


FIGURE 2.5 – Setup de mesure de l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch en CR ESYCOM.

fréquentielle [1,2 GHz - 3,2 GHz]. Le brasseur tourne avec un pas angulaire de 5° en fournissant 72 mesures sur un tour complet du brasseur. Une partie du post-traitement est la même pour les deux méthodes de mesure : la moyenne est calculée en utilisant les mesures prélevées en 72 positions du brasseur. Cependant, en raison des fluctuations statistiques importantes propres aux mesures en CR compte tenu du nombre limité d'états de la CR issus du brassage, le résultat final de l'efficacité de rayonnement obtenu est lissé sur une fenêtre glissante de 20 MHz. Concernant la méthode fondée sur l'utilisation d'une Ant_{ref} , l'efficacité de rayonnement de cette dernière est considérée constante et égale à 90 % sur toute la bande fréquentielle. Concernant la seconde méthode (sans Ant_{ref}), la constante de temps de la CR est calculée sur une fenêtre fréquentielle glissante de 100 MHz et le résultat obtenu est associé à la fréquence centrale de cette fenêtre.

Dans le but de vérifier l'hypothèse relative au coefficient de qualité des antennes sur laquelle reposent les deux méthodes, on calcule le facteur de qualité des antennes patch et log-périodique [32]. Sur la Figure 2.6, on présente le facteur de qualité des deux antennes que l'on compare au facteur de qualité de la CR ESYCOM estimé en temporel. On remarque que le facteur de qualité des deux antennes est beaucoup plus important que le facteur de qualité de la CR calculé en temporel. Par conséquent, on peut considérer que les antennes ont une faible contribution dans le facteur de qualité composite. Ce résultat confirme que l'hypothèse sur laquelle les deux méthodes d'estimation de l'efficacité reposent est bien vérifiée. Un résultat similaire est obtenu lorsque les facteurs de qualités

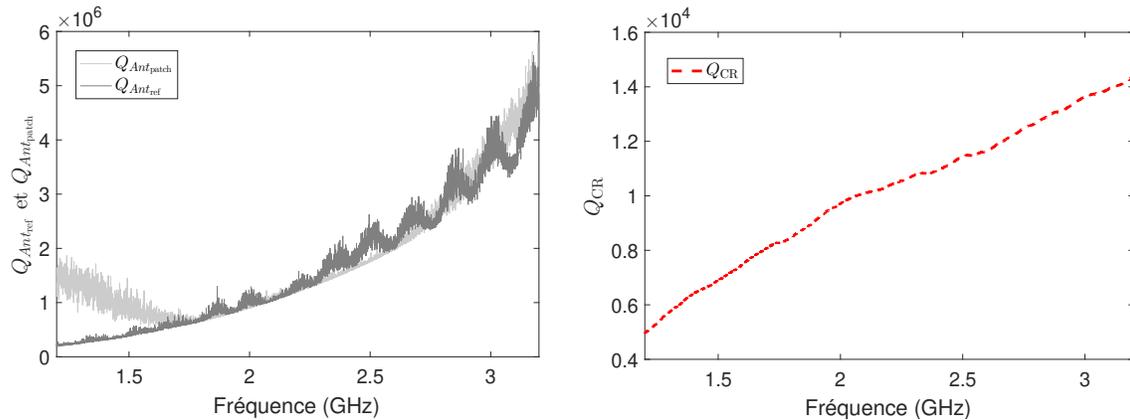


FIGURE 2.6 – Facteur de qualité de la CR ESYCOM estimé en temporel (à droite) et celui des antennes patch et log-périodique (à gauche).

des deux antennes sont comparés à celui de la CR IETR (voir l'annexe A).

2.3.4 Résultats et comparaison

Les deux méthodes présentées précédemment ont été appliquées afin de déterminer l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch. Par ailleurs, la méthode ne nécessitant pas d'antenne de référence nous permet aussi de retrouver l'efficacité de rayonnement de l'antenne log-périodique qui, dans le cas de cette technique, est considérée comme une antenne sous test et non une antenne de référence. On présente dans la Figure 2.7 l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch obtenue en utilisant ces deux techniques (avec et sans antenne de référence)

Nous remarquons qu'à partir de 2.1 GHz, le résultat obtenu par la méthode sans Ant_{ref} présente des valeurs inférieures à celles obtenues selon la méthode avec Ant_{ref} . À 3,2 GHz, l'efficacité estimée par la première méthode est de 67,8 % contre 75,7 % par la seconde. Le même comportement est observé pour les résultats d'efficacité de rayonnement de l'antenne log-périodique (Ant_{ref}) présentés dans la Figure 2.8 par rapport à sa valeur hypothétiquement fixée de 90 %.

Ces résultats montrent que le fait de considérer l'efficacité de rayonnement de l' Ant_{ref} comme constante sur toute la bande fréquentielle de mesure est non seulement incorrect mais que cette hypothèse réductrice entraîne un biais d'estimation significatif comme l'atteste le résultat obtenu avec Ant_{ref} . Cela a été aussi mentionné dans [84] où des erreurs importantes ont été enregistrées. Ceci montre l'importance d'une bonne connaissance de l'efficacité de l'antenne de référence pour caractériser l'antenne sous test. L'efficacité estimée de l' Ant_{ref} (Figure 2.8) présente toutefois des fluctuations qui ne semblent pas représentatives du fonctionnement de l'antenne (liées à l'environnement de mesure). Dans le but de corriger cette erreur et d'améliorer l'estimation de l'efficacité de rayonnement de l' Ant_{ref} nous proposons de faire une mesure dans une autre CR. Cette chambre est la CR de l'IETR, présentée dans la section 2.2.1.1. Le résultat de cette deuxième mesure

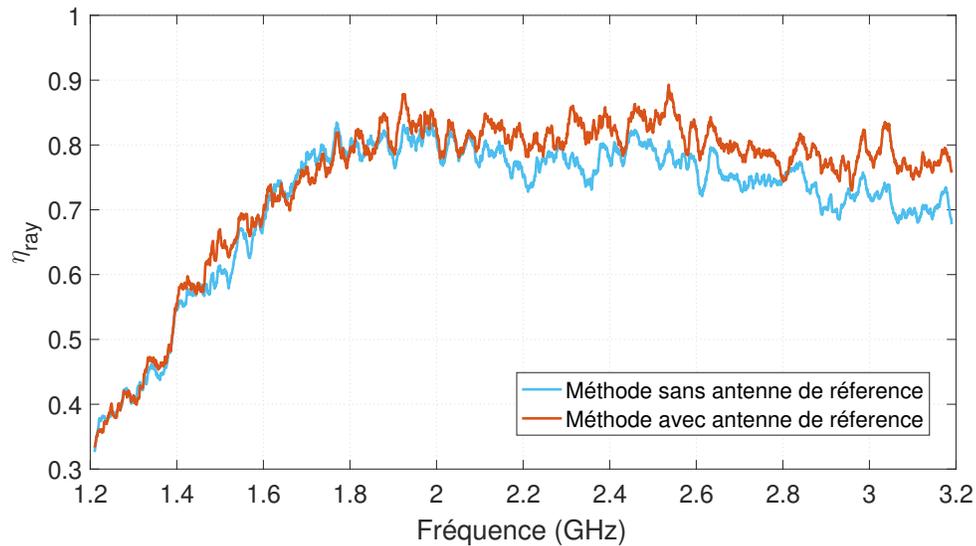


FIGURE 2.7 – Efficacité de rayonnement de l’antenne patch en utilisant les techniques de mesure avec et sans antenne de référence.

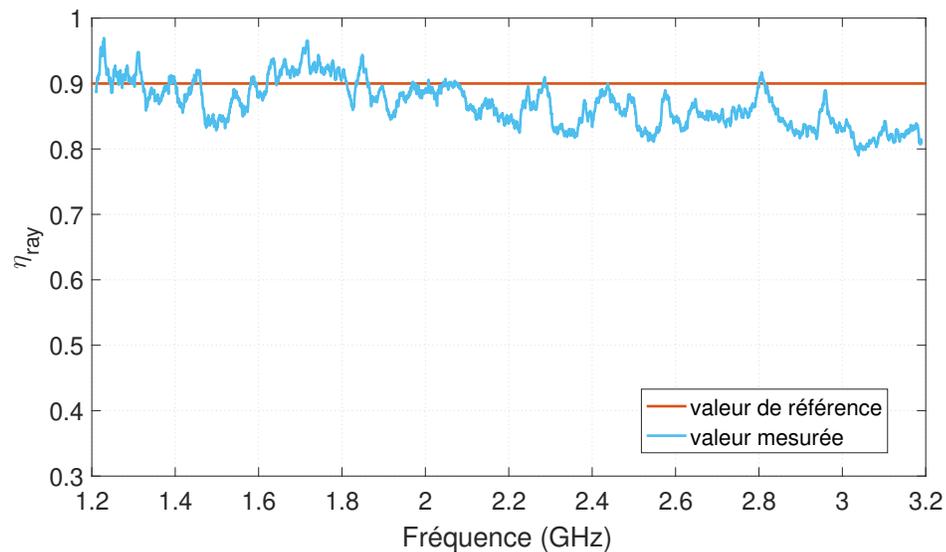


FIGURE 2.8 – Efficacité de rayonnement de l’antenne log-périodique (Ant_{ref}) comparée à sa valeur supposée fixe et égale à 90%.

présenté sur la Figure 2.9 montre des fluctuations fréquentielles différentes de celles obtenues dans la première mesure (CR ESYCOM, Figure 2.8). Cette différence est donc bien liée aux propriétés de l’environnement de mesure (CR) et non pas à l’antenne elle-même. En exploitant les résultats obtenus dans les deux CRs, nous proposons un modèle linéaire pour décrire l’efficacité de rayonnement de l’antenne log-périodique (Ant_{ref}) qui sera fondé sur une régression linéaire de la moyenne des deux efficacités mesurées. L’efficacité de

rayonnement de l'antenne log-périodique ainsi obtenue est présentée dans la Table 2.2. Les résultats de mesure de l'efficacité de rayonnement de l'Ant_{ref} ainsi que son modèle linéaire sont présentés sur la Figure 2.9

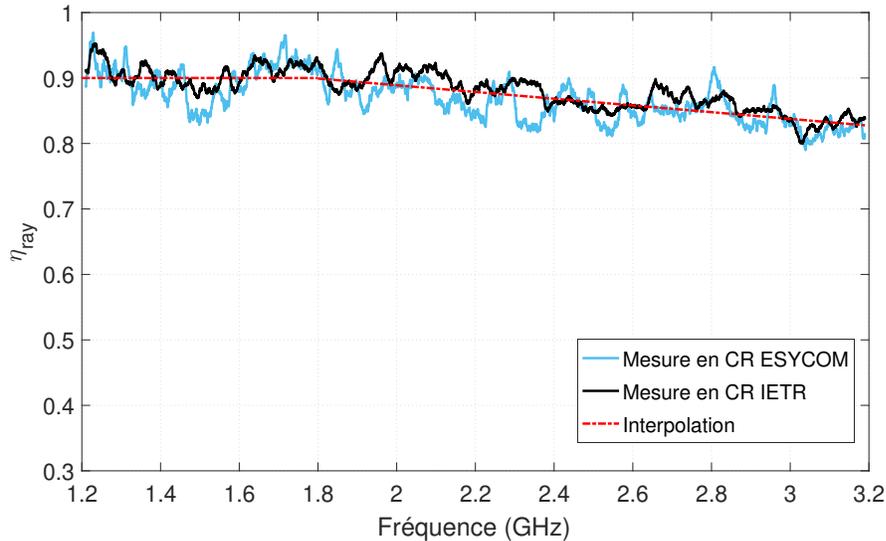


FIGURE 2.9 – Résultats de mesure et de modélisation de l'efficacité de rayonnement de l'Ant_{ref} dans les deux CRs comparés à l'interpolation linéaire.

Fréquence (f)	$\eta_{\text{Ant}_{\text{ref}}}$
[1,2 GHz - 1,8 GHz]	0,9
[1,8 GHz - 3,2 GHz]	$-0,051f + 0,99$

TABLE 2.2 – Modélisation linéaire de l'efficacité de rayonnement de l'Ant_{ref}.

Le résultat obtenu avec le modèle proposé est utilisé dans la méthode de mesure fondée sur une Ant_{ref} afin de calculer l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch. Le résultat obtenu pour la méthode avec Ant_{ref} en considérant la nouvelle estimation de son efficacité est très similaire au résultat obtenu avec la méthode sans Ant_{ref}. Le résultat (Figure 2.10) montre bien qu'une estimation plus réaliste de l'efficacité de l'antenne de référence permet l'obtention de résultats similaires par l'une ou l'autre des méthodes.

Les résultats obtenus dans cette partie du deuxième chapitre démontrent donc que l'hypothèse classiquement retenue d'une efficacité de rayonnement constante pour l'antenne de référence sur une très large bande est trop imprécise. Dans le contexte de la caractérisation de l'antenne patch large bande, cette erreur d'estimation, lorsqu'elle n'est pas corrigée, génère des résultats erronés pour l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch (AUT) avec la méthode de mesure nécessitant une antenne de référence. Grâce aux

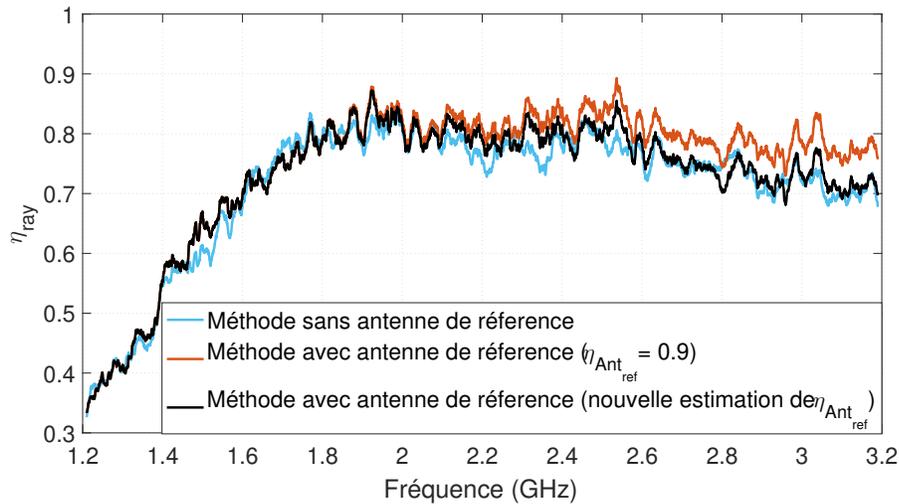


FIGURE 2.10 – Efficacité de rayonnement de l'antenne patch en utilisant la méthode sans Ant_{ref} et la méthode avec Ant_{ref} pour les deux valeurs de l'efficacité de référence.

résultats de la méthode sans Ant_{ref} , nous avons pu proposer une estimation plus précise de cette efficacité de référence (sous la forme d'un modèle linéaire, construit à partir de la mesure dans deux CRs). La similitude des résultats obtenus par les deux méthodes confirme que nous disposons désormais d'une référence suffisamment précise pour l'application de la méthode avec Ant_{ref} .

Dans la partie suivante de ce chapitre un autre paramètre ayant un impact sur la mesure de l'efficacité d'antenne en CR est étudié. Il s'agit de l'efficacité du brassage utilisé lors de la mesure en CR. Une étude est ainsi menée sur la qualité du brassage en se basant sur l'évaluation de la composante non brassée du champ en CR, et l'effet d'un défaut de brassage sur l'efficacité estimée sera mis en évidence.

2.4 Impact de composantes de champ non brassées sur l'estimation de l'efficacité d'antenne en CR

La plupart des méthodes de mesure de l'efficacité d'antenne en CR sont basées sur la mesure des composantes brassées des coefficients de réflexion et de transmission des antennes utilisées (antennes de mesure et/ou AUT). Dans cette partie du deuxième chapitre on étudiera l'impact des différents types de brassage utilisés lors de la mesure sur l'estimation de l'énergie non brassée et par conséquent de l'efficacité de l'AUT. Les incertitudes de mesure dépendent principalement du processus de brassage utilisé, qui vise à assurer un nombre suffisant de configurations décorréliées de la CR. On a vu dans le premier chapitre que le brassage de mode au sein d'une CR assuré généralement par un ou deux brasseurs métalliques n'est pas le seul type de brassage appliqué en CR. Les CRs utilisant le brassage de source ont été largement étudiées et leur principe basé sur la variation de la source

est réalisé soit en la déplaçant dans la CR, manuellement [74] ou à l'aide d'un bras robotisé [109], soit en utilisant des réseaux d'antennes alimentées successivement [110]. Il a été montré que le brassage de source peut être une bonne alternative au brassage mécanique classique [111].

La méthode de mesure avec deux antennes proposée dans [46] et détaillée dans 1.4.2.2 est celle qui a été choisie pour la détermination de l'efficacité de rayonnement de l'AUT dans cette partie du chapitre. Ce choix est fondé sur un compromis entre la précision (cette approche étant plus précise que celle avec une seule antenne) et le temps de mesure (cette approche étant moins chronophage que celle avec trois antennes). Les résultats de mesure présentés dans la section 2.3.4 ont montré une estimation précise de l'efficacité d'antenne en utilisant la méthode des deux antennes. Par ailleurs, on montrera dans cette partie que cette méthode est sensible à l'évaluation des composantes brassées des paramètres S . Les paramètres S mesurés en CR dépendent à la fois des antennes considérées et de l'environnement diffus fourni par la CR. Ils combinent les contributions de l'énergie brassée (c'est-à-dire l'énergie qui interagit avec le brasseur de mode) et l'énergie non brassée (l'énergie qui n'interagit pas avec le brasseur de mode, qu'il s'agisse de trajets directs "*Line of sight*" (LOS) ou de réflexions spéculaires (non-LOS)). Comme a été déjà montré dans l'équation (1.52) dans le cas du S_{11} , les paramètres S_{ii} peuvent être exprimés en fonction des composantes brassée et non brassée du paramètre S_{ii} . On admet souvent que pour un nombre infini de configurations décorréelées de la CR, la moyenne du coefficient de réflexion calculée en utilisant le processus de brassage choisi ($\langle S_{ii} \rangle$) converge vers la valeur du coefficient de réflexion mesuré en espace libre et notée ici $S_{ii,FS}$ qui représente la mesure obtenue en CA [88]. Cependant, l'énergie non brassée mesurée n'est pas due uniquement à la composante $S_{ii,FS}$ du coefficient de réflexion mais elle provient également des trajets directs entre l'antenne et les murs de la CR qui n'entrent pas en interaction avec le brasseur de modes. Dans la section suivante, on tiendra compte des différentes origines du champ non brassé en CR dans la formulation des coefficients de réflexion. Par la suite, on verra que cette énergie non brassée (qui peut être faible dans le cas des antennes très directives orientées vers le brasseur, mais significative dans le cas des antennes omnidirectionnelles) introduit un biais d'estimation vis-à-vis de l'efficacité de rayonnement de l'antenne. C'est pourquoi on détaillera par la suite l'étude approfondie menée sur l'impact de la composante non brassée de l'énergie en CR sur l'estimation de l'efficacité d'antenne. Cette étude s'appuiera sur les résultats obtenus en effectuant un brassage de source, et nous verrons l'intérêt présenté par ce type de brassage pour s'affranchir de l'effet des trajets non brassés indésirables sur l'estimation de l'efficacité d'antenne.

2.4.1 Nouvelle formulation des coefficients de réflexion et de transmission de l'antenne

Un modèle analytique décrivant le coefficient de réflexion d'une antenne en CR a été proposé dans [105] sous la forme

$$S_{ii}(\alpha, p_i) = S_{ii,FS} + (1 - |S_{ii,FS}|^2) \eta_{\text{ray},i} H_{ii}(\alpha, p_i) \quad (2.5)$$

avec α la position angulaire du brasseur de modes, p_i la position de l'antenne i , $S_{ii,FS}$ la composante de S_{ii} mesurée en espace libre, $\eta_{\text{ray},i}$ l'efficacité de rayonnement de l'antenne i , $H_{ii}(\alpha, p_i)$ la fonction de transfert complexe de la CR. En supposant un champ parfaitement diffus, les parties réelle et imaginaire de $H_{ii}(\alpha, p_i)$ peuvent être décrites par des variables aléatoires suivant une distribution gaussienne centrée. Cette distribution étant centrée, pour un nombre infini de configurations décorrélatées, on peut supposer que $\langle H_{ii}(\alpha, p_i) \rangle_\alpha = 0$ et donc $\langle S_{ii}(\alpha, p_i) \rangle_\alpha = S_{ii,FS}$. Cependant, dans une CR réelle, la composante non brassée n'est pas strictement équivalente à $S_{ii,FS}$ en raison des réflexions spéculaires sur les murs qui n'interagissent pas avec le brasseur de modes et ne sont donc pas brassées. Par conséquent, l'équation précédente doit être réécrite sous la forme suivante [112], [9]

$$S_{ii}(\alpha, p_i) = S_{ii,FS} + (1 - |S_{ii,FS}|^2) \eta_{\text{rad},i} \times [H_{ii}(\alpha, p_i) + h_{ii}(p_i)] \quad (2.6)$$

où $h_{ii}(p_i)$ est la fonction de transfert de la CR relative aux trajets issus de réflexions spéculaires sur les murs de la chambre ou sur d'autres objets présents dans la CR et qui n'interagissent pas avec le brasseur avant d'être interceptés par l'antenne. Cette fonction $h_{ii}(p_i)$ dépend uniquement de la position de l'antenne et est indépendante de la position du brasseur. Par conséquent, un brassage mécanique conventionnel avec un brasseur de modes n'est efficace que pour réduire la contribution de $H_{ii}(\alpha, p_i)$ mais ne permet pas d'éliminer l'effet de $h_{ii}(p_i)$. Ainsi, la composante non brassée du coefficient de réflexion introduite en (2.2) peut être exprimée comme suit, lorsqu'un brasseur mécanique est utilisé :

$$S_{ii,us}(p_i) = S_{ii,FS} + (1 - |S_{ii,FS}|^2) \eta_{\text{rad},i} \times h_{ii}(p_i) \quad (2.7)$$

Cette dernière équation (2.7) met en évidence la nécessité d'effectuer un autre type de brassage en plus du brassage mécanique afin d'éliminer $h_{ii}(p_i)$ et estimer ainsi correctement le coefficient de réflexion intrinsèque de l'antenne. Cette fonction de transfert n'étant dépendante que de la position de l'antenne, le brassage de source semble alors adapté. Dans la suite de cette étude, nous nous baserons sur ce nouveau modèle du coefficient de réflexion pour étudier l'impact des différents types de brassage utilisés sur les composantes du champ non brassé. Par ailleurs, l'équation (2.2) peut être généralisée au coefficient de transmission entre les antennes i et j comme suit

$$S_{ij}(\alpha, p_i, p_j) = S_{ij,FS} + \sqrt{(1 - |S_{ii,FS}|^2)(1 - |S_{jj,FS}|^2)} \times \sqrt{\eta_{\text{rad},i}} \sqrt{\eta_{\text{rad},j}} \times [H_{ij}(\alpha, p_i, p_j) + h_{ij}(p_i, p_j)] \quad (2.8)$$

où $h_{ij}(p_i, p_j)$ est la fonction de transfert de la CR qui tient compte à la fois du trajet direct entre les deux antennes (trajet LOS) et des trajets entre les deux antennes subissant des réflexions mais sans interagir avec le brasseur de modes.

Dans la section suivante, on présentera la configuration de mesure qui permettra d'étudier le lien entre l'efficacité de rayonnement d'antenne et le type de brassage utilisé dans la mesure.

2.4.2 Configuration de mesure

Dans le but d'étudier le lien de dépendance entre l'estimation de l'énergie non brassée en CR, en fonction du processus de brassage choisi, et l'estimation de l'efficacité de rayonnement de l'AUT, une campagne de mesure a été réalisée en CR ESYCOM présentée dans la Figure 2.2 et dont les propriétés sont détaillées dans la section (2.2.1.2). Comme mentionné précédemment et détaillé dans (1.4.2.2), on a choisi d'utiliser la technique basée sur deux antennes afin d'évaluer l'efficacité de l'antenne AUT. Ce choix est fondé sur un compromis entre la précision et le temps de mesure comparé aux techniques avec une antenne et trois antennes.

Les efficacités de rayonnement des deux antennes utilisées dont l'AUT, données dans l'équation (2.4), peuvent s'écrire d'une manière générale sous la forme de l'expression suivante

$$\eta_{\text{ray},i} = \sqrt{\frac{\langle |S_{ii,s}|^2 \rangle}{(1 - |\langle S_{ii} \rangle|^2)^2} \frac{C_{\text{CR}}}{\tau_{\text{CR}} \omega \cdot e_b}} \quad (2.9)$$

avec $i = 1, 2$ pour faire référence à l'antenne 1 et l'antenne 2.

Lorsqu'on remplace e_b par son expression donnée en (1.57), on obtient l'expression suivante

$$\eta_{\text{ray},i} = \sqrt{\frac{\langle |S_{ij,s}|^2 \rangle}{(1 - |\langle S_{ii} \rangle|^2)^2} \sqrt{\frac{\langle |S_{ii,s}|^2 \rangle C_{\text{CR}}}{\langle |S_{jj,s}|^2 \rangle Q_{\text{DT}}}}} \quad (2.10)$$

avec $i = 1, 2$, $j = 1, 2$ et $i \neq j$. L'estimation de l'efficacité de rayonnement de l'antenne i est donc basée sur l'estimation de cinq paramètres :

- L'énergie de la composante brassée du paramètre S_{ii} ,
- L'énergie de la composante brassée du paramètre S_{jj} ,
- L'énergie de la composante brassée du paramètre S_{ij} ,
- Le facteur de qualité de la CR calculé dans le domaine temporel à partir de la constante de temps de la CR : $Q_{\text{DT}} = \tau_{\text{CR}} \omega$
- Le carré du module de la moyenne du coefficient de réflexion de l'antenne i : $|\langle S_{ii} \rangle|^2$.

Cette étude se focalisera donc principalement sur les composantes non brassées des paramètres S des antennes utilisées en CR. Les deux antennes utilisées pour cette campagne de mesure sont les mêmes antennes que précédemment : l'antenne patch et l'antenne log-périodique présentées dans la section 2.2.2. Dans ce qui suit l'indice 1 fera référence à l'antenne log-périodique et l'indice 2 à l'antenne patch. Le setup de mesure est présenté dans la Figure 2.11.

Le VNA utilisé pour cette mesure est un Rhode&Schwarz ZNB20 avec une IFBW de 1 kHz et un pas fréquentiel de 100 kHz, les paramètres S sont mesurés sur la bande fréquentielle [1,6 GHz - 3 GHz] où les deux antennes sont bien adaptées.

Les types de brassage appliqués seront les suivants :

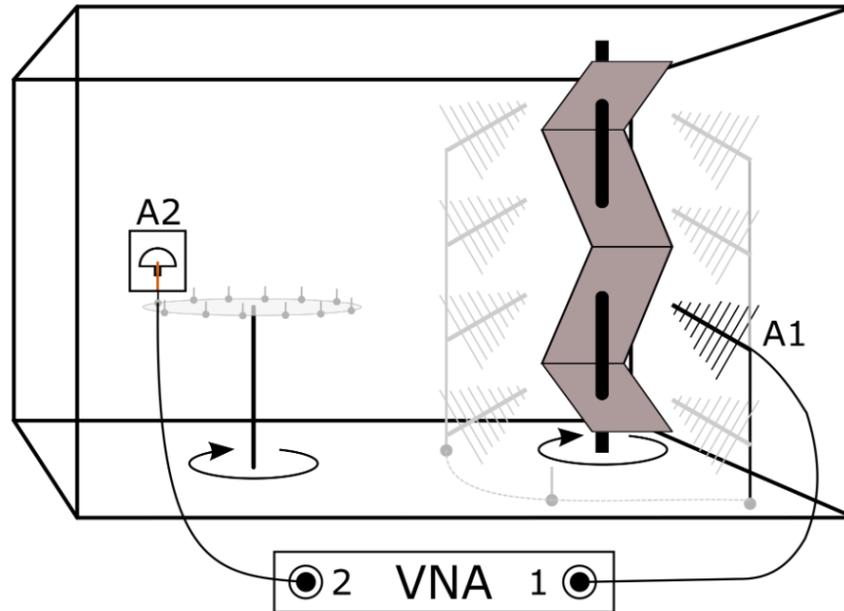


FIGURE 2.11 – Setup de mesure en CR ESYCOM. 12 positions sont considérées pour l'antenne log-périodique (A1) et 12 positions également pour l'antenne patch (A2).

- Le brassage mécanique : assuré par le brasseur de modes fournissant 72 positions sur un tour complet (avec un pas de rotation de 5°).
- Le brassage avec l'antenne log-périodique : il correspond à un brassage de source lorsque l'antenne patch est considérée comme AUT. L'antenne log-périodique est déplacée manuellement sur 3 emplacements et 4 hauteurs différentes pour chaque emplacement (12 configurations au total).
- Le brassage avec l'antenne patch : il est effectué en plaçant l'antenne patch, considérée comme AUT, sur une plate-forme en rotation grâce à un mât tournant. L'antenne est à une distance de 70 cm du centre de rotation, 12 positions angulaires uniformément distribuées sont considérées (12 configurations).

Dans toutes les configurations de mesure, l'antenne log-périodique est orientée vers le brasseur afin d'éviter tout couplage direct entre les deux antennes. En appliquant la méthode présentée dans [54], le nombre effectif de configurations décorréllés N_{eff} fournies par le brasseur mécanique est estimé à 25 autour de la fréquence centrale (2,3 GHz).

2.4.3 Résultats de mesure

Les efficacités des antennes patch et log-périodique ont été évaluées en utilisant trois processus différents de brassage d'antenne en complément du brassage mécanique classique (avec le brasseur de modes). Par conséquent, les résultats seront présentés pour chaque processus de brassage : brassage avec l'antenne patch, brassage avec l'antenne log-périodique et brassage combiné avec les deux antennes en même temps.

2.4.3.1 Brassage avec l'antenne patch

Dans ce premier cas de brassage, l'antenne log-périodique est placée dans une position fixe alors que l'antenne patch est déplacée sur les 12 positions considérées (sur la plate-forme tournante). Les efficacités de rayonnement des deux antennes (patch et log-périodique) sont ensuite calculées en utilisant la méthode à deux antennes, et présentées dans la Figure 2.12 en fonction de la fréquence. Deux cas ont été examinés lors du calcul des paramètres S :

1. Sans brassage de l'antenne patch : les paramètres S sont moyennés sur toutes les positions du brasseur mécanique et sont calculés pour chaque position p_2 de l'antenne patch (courbes continues grises) ; ces 12 résultats sont ensuite moyennés (courbe rouge en pointillés).
2. Avec brassage de l'antenne patch : les paramètres S sont moyennés sur toutes les positions du brasseur et toutes les positions de l'antenne patch (courbe bleue en pointillés)

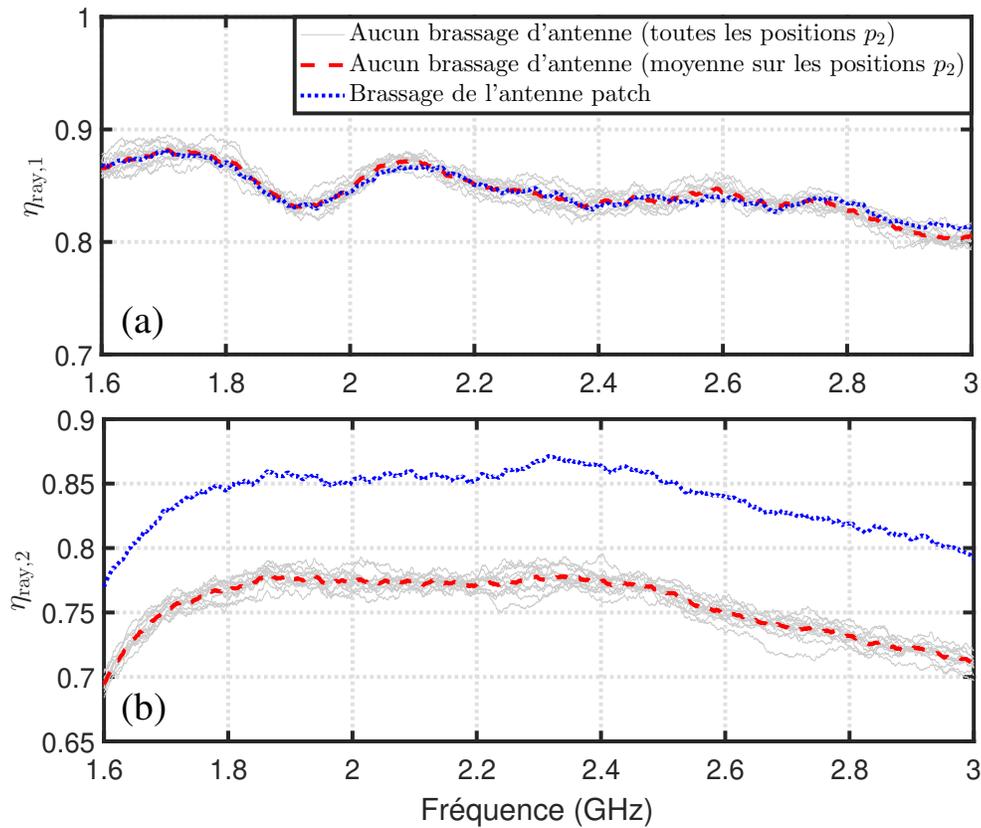


FIGURE 2.12 – Efficacité de rayonnement des antennes log-périodique (a) et patch (b) avec et sans le brassage de l'antenne patch.

L'efficacité de l'antenne log-périodique (Figure 2.12(a)) est estimée à $85 \pm 5 \%$ sur la bande fréquentielle de mesure. Les estimations obtenues pour toutes les positions p_2 sont très cohérentes (écart-type normalisé de 78×10^{-4}) et la valeur moyenne est très similaire à celle obtenue en utilisant à la fois le brassage mécanique et le brassage de l'antenne patch. Cela montre que le brassage de l'antenne patch n'a quasiment aucun impact sur $\eta_{\text{ray},1}$. En revanche, l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch présente un tout autre comportement vis-à-vis du processus de brassage (Figure 2.12(b)). Sans le brassage de l'antenne patch, l'efficacité de rayonnement est estimée jusqu'à 78% dans la gamme de fréquences de 1,8 GHz à 2,4 GHz, et toutes les estimations sont cohérentes (écart-type normalisé de 90×10^{-4}). Cependant, une fois le brassage de l'antenne patch effectué, l'efficacité de rayonnement augmente de 8% en moyenne.

Dans le but de déterminer l'origine de cette augmentation, différents paramètres de l'équation (2.10) sont analysés. De la même manière que pour l'efficacité de rayonnement, chaque paramètre est calculé avec et sans application du brassage de l'antenne patch. Le facteur de qualité est présenté sur la Figure 2.13. Sa valeur augmente de 6800 à 11000 sur la bande fréquentielle de mesure et on voit que le brassage supplémentaire apporté par le mouvement de l'antenne patch n'induit pas de changement significatif sur le facteur de qualité estimé. Nous définissons R_Q comme étant le rapport, moyenné sur la bande fréquentielle de mesure, entre le facteur de qualité estimé en utilisant $\langle \langle |S_{21}(\alpha, p_2) - \langle S_{21}(\alpha, p_2) \rangle_\alpha |^2 \rangle_\alpha \rangle_{p_2}$ (i.e. en considérant les brassages mécanique et de source) et celui en utilisant $\langle \langle |S_{21}(\alpha, p_2) - \langle S_{21}(\alpha, p_2) \rangle_\alpha |^2 \rangle_\alpha \rangle_{p_2}$ (i.e. avec uniquement le brassage mécanique). Il est égal à 1,000 dans ce cas (table 2.3), confirmant l'impact quasi nul du brassage de l'antenne patch sur l'estimation de ce paramètre. Les moyennes des coefficients de réflexion des deux antennes, obtenus avec et sans brassage de l'antenne patch, sont présentés sur la Figure 2.14. Les rapports entre les amplitudes des coefficients S_{ii} avec et sans brassage de l'antenne patch (courbe bleue en pointillés et courbe rouge en pointillés respectivement), moyennés sur la bande fréquentielle de mesure, sont présentés dans la Table 2.3 et sont notés $R_{S_{ii}}$. Ils sont proches de l'unité de sorte que l'impact de ces variations sur l'efficacité estimée est négligeable.

Le module au carré des composantes brassées des paramètres S moyenné sur les positions du brasseur avec et sans le brassage de l'antenne patch est présenté sur la Figure 2.15(a) pour $\langle |S_{11,s}|^2 \rangle$, la Figure 2.15(b) pour $\langle |S_{22,s}|^2 \rangle$ et la Figure 2.15(c) pour $\langle |S_{21,s}|^2 \rangle$. Les coefficients R sont calculés en utilisant le même raisonnement que précédemment, de sorte que

$$R_{ij,s} = \frac{\left\langle \left\langle \left| S_{ij}(\alpha, p_2) - \langle S_{ij}(\alpha, p_2) \rangle_\alpha \right|^2 \right\rangle_\alpha \right\rangle_{p_2}}{\left\langle \left\langle |S_{ij}(\alpha, p_2) - \langle S_{ij}(\alpha, p_2) \rangle_\alpha|^2 \right\rangle_\alpha \right\rangle_{p_2}}. \quad (2.11)$$

On observe d'une part que l'estimation de $\langle |S_{11,s}|^2 \rangle$ n'est pas modifiée par le brassage supplémentaire de l'antenne patch. En effet, toutes les estimations sont très similaires. Cela indique que la composante non brassée de S_{11} (Figure 2.15(a)) n'est pas modifiée par

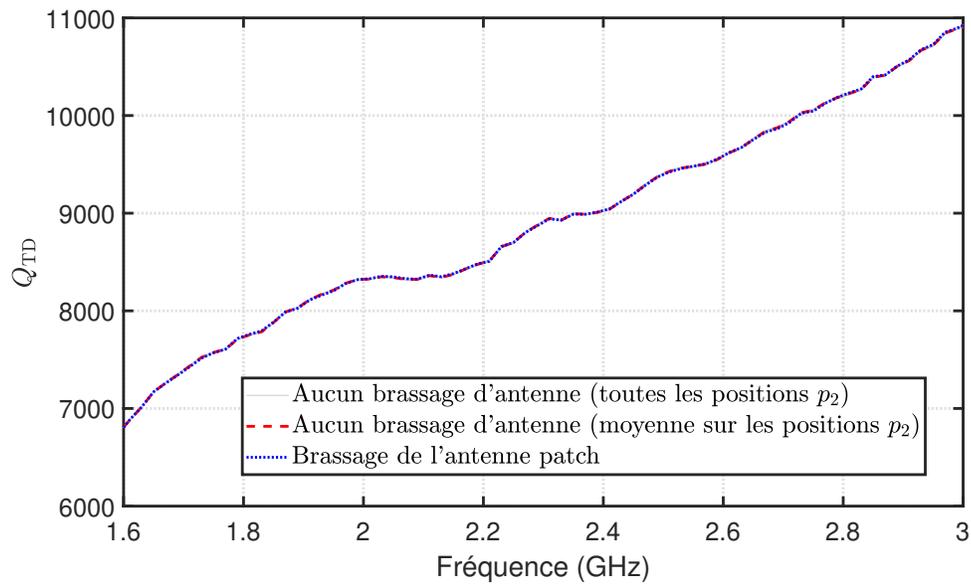


FIGURE 2.13 – Facteur de qualité estimé en temporel en fonction de la fréquence avec et sans le brassage de l'antenne patch.

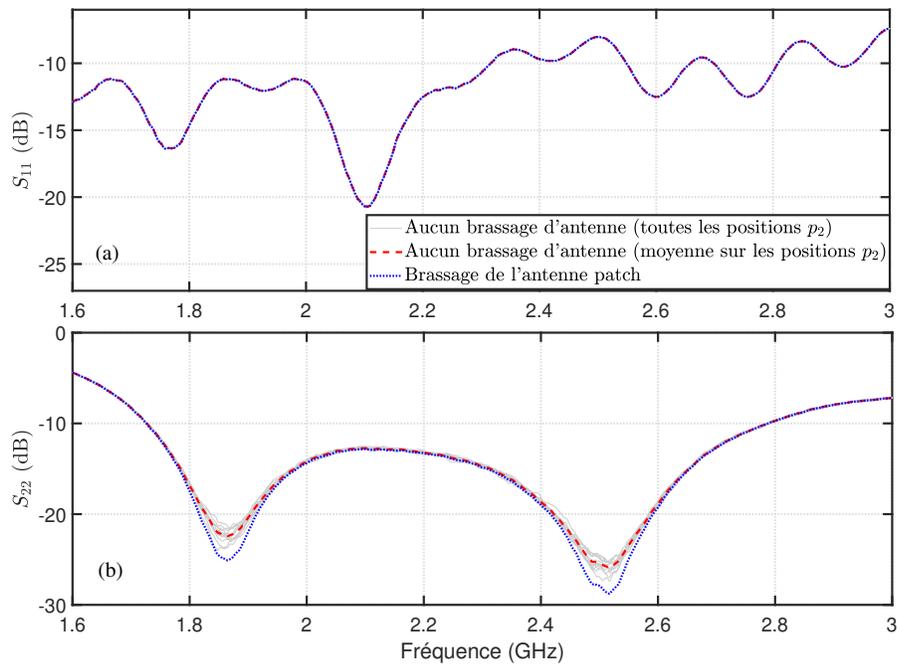


FIGURE 2.14 – Coefficients de réflexion des antennes log-périodique (a) et patch (b), avec et sans le brassage de l'antenne patch. Résultat lissé sur une fenêtre glissante de 30 MHz.

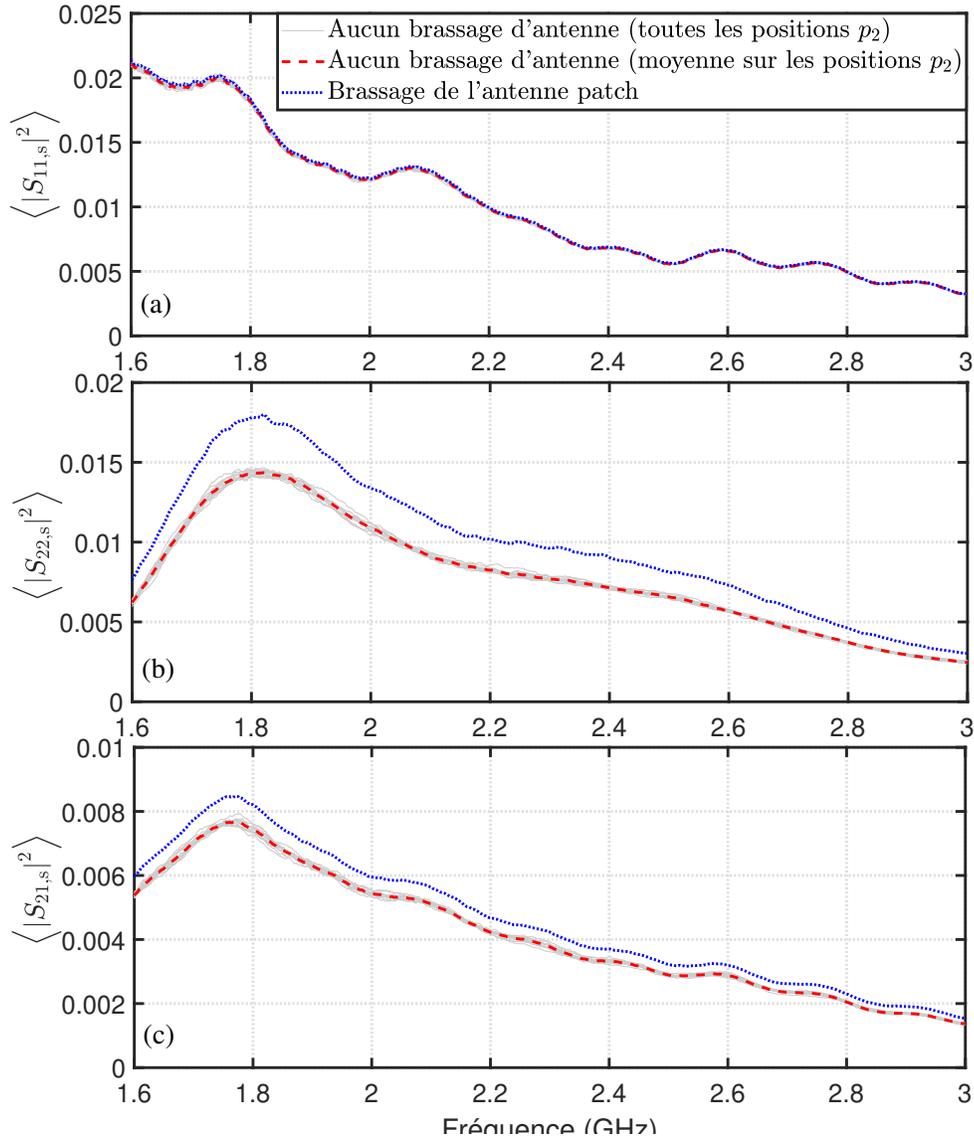


FIGURE 2.15 – Moyenne du module au carré des composantes brassées des paramètres S_{11} (a), S_{22} (b) et S_{21} (c) en fonction de la fréquence avec et sans brassage de l'antenne patch.

le brassage de l'antenne patch, c'est-à-dire que h_{11} dans (2.6) ne change pas. Cela était prévu car l'antenne log-périodique n'est pas orientée vers l'antenne patch qui, de plus, a une petite taille et modifie donc très peu la réponse de la CR. En revanche, on observe que l'estimation de $\langle |S_{22,s}|^2 \rangle$ (Figure 2.15(b)) est fortement modifiée par le brassage de l'antenne patch. En effet, cela conduit à une augmentation relative moyenne de 24 % sur la bande fréquentielle de mesure. Cela peut s'expliquer puisque h_{22} varie pour chaque position p_2 et sa contribution est ainsi réduite lors du calcul de la moyenne sur les positions de l'antenne patch. L'énergie associée à la composante h_{22} dans (2.6) est désormais prise

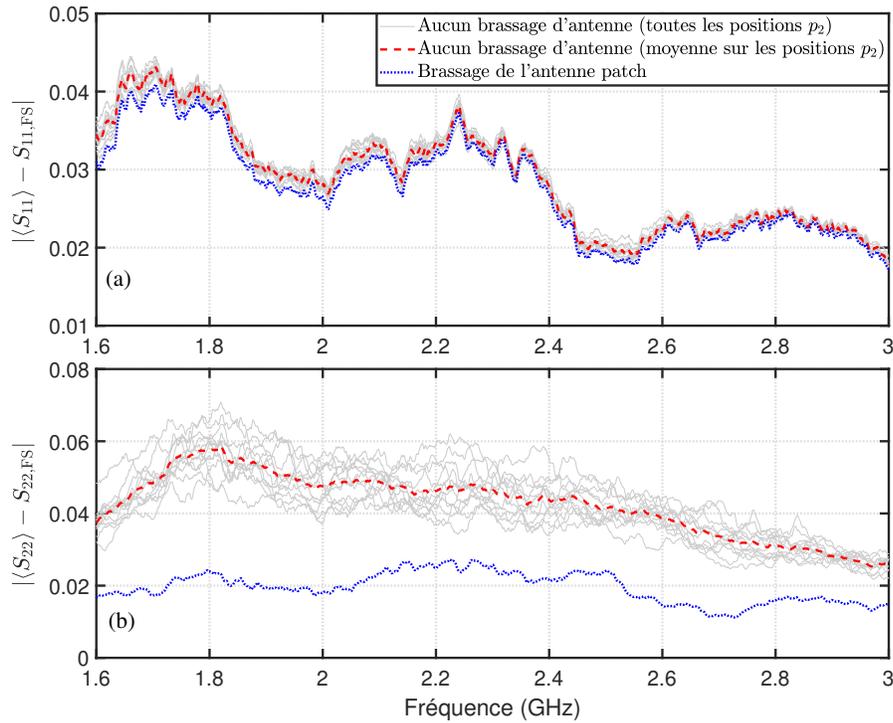


FIGURE 2.16 – Erreur entre les coefficients de réflexion moyens S_{11} (a) et S_{22} (b), mesurés dans la CR et ceux mesurés dans le CA en fonction de fréquence, avec et sans brassage de l'antenne patch.

en compte dans l'évaluation de l'énergie de la composante brassée, si bien que cette dernière augmente considérablement. Enfin, le même comportement est également observé sur $\langle |S_{21,s}|^2 \rangle$ (Figure 2.15(c)) mais dans une moindre mesure. Le brassage de l'antenne patch conduit à une augmentation moyenne d'environ 11 % sur la bande fréquentielle de mesure. En effet, le coefficient de transmission dépend des positions des deux antennes, et la fonction de transfert de la chambre h_{21} change dès qu'une antenne est déplacée.

Comme indiqué dans la section 2.4.1, il est classiquement supposé qu'un coefficient de réflexion mesuré dans une CR et moyenné sur les différentes positions du brasseur mécanique est équivalent à celui mesuré en espace libre (qui serait mesuré dans une AC), c'est-à-dire que $\langle S_{ii}(\alpha, p_i) \rangle_\alpha = S_{ii,FS}$. Pour évaluer la validité de cette hypothèse, nous avons mesuré le coefficient de réflexion des deux antennes, log-périodique et patch, dans la CA du laboratoire ESYCOM. Ensuite, le module de la différence entre les mesures en CR et en CA est calculé en fonction de la fréquence et présenté sur la Figure 2.16(a) pour le S_{11} et sur la Figure 2.16(b) pour le S_{22} , avec et sans le brassage de l'antenne patch. Leurs valeurs moyennes sont présentées dans la Table 2.4. Concernant le S_{11} , sa différence moyenne avec celui mesuré en CA est égal à 0,029, et est légèrement inférieur de 5 % lorsque le brassage de l'antenne patch est effectué. D'autre part, la même différence calculée dans le cas de S_{22} est égale à 0,043 en moyenne lorsque le brassage d'antenne n'est pas appliqué, mais diminue fortement grâce au brassage de l'antenne patch. Cet effet plus important

TABLE 2.3 – Coefficients R dans le cas des différents brassages.

	Brassage de l'antenne patch	Brassage de l'antenne log-périodique	Brassage combiné des deux antennes
R_Q	1,000	1,000	1,000
$R_{S_{11}}$	1,001	1,007	1,006
$R_{S_{22}}$	1,016	1,004	1,015
$R_{S_{11,s}}$	1,011	1,122	1,103
$R_{S_{22,s}}$	1,241	1,076	1,251
$R_{S_{21,s}}$	1,110	1,111	1,111

TABLE 2.4 – Module de la différence moyenne entre les coefficients de réflexion mesurés en CR (moyennés selon le processus de brassage) et ceux mesurés en CA.

	Brassage de l'antenne patch	Brassage de l'antenne log-périodique	Brassage combiné des deux antennes
$ \langle S_{11} \rangle - S_{11,FS} $	Sans : 0,029	Sans : 0,034	Sans : 0,029
	Avec : 0,028	Avec : 0,017	Avec : 0,011
$ \langle S_{22} \rangle - S_{22,FS} $	Sans : 0,043	Sans : 0,044	Sans : 0,042
	Avec : 0,020	Avec : 0,039	Avec : 0,020

du brassage de l'antenne patch sur le paramètre S_{22} est concordant avec les observations précédentes sur les énergies brassées. Cela démontre la nécessité d'effectuer un brassage d'antenne afin de réduire la composante non brassée des paramètres S mesurés au sein de la CR, et ainsi mieux évaluer le coefficient de réflexion de l'antenne.

2.4.3.2 Brassage avec l'antenne log-périodique

Dans cette partie est étudiée l'influence du brassage de l'antenne log-périodique sur les efficacités de rayonnement estimées. L'antenne patch est ainsi placée dans une position fixe pendant le processus de mesure tandis que l'antenne log-périodique est déplacée aux 12 positions choisies. L'efficacité de rayonnement de l'antenne log-périodique est présentée dans la Figure 2.17(a) alors que celle de l'antenne patch est présentée sur la Figure 2.17(b) en fonction de la fréquence. On voit que le brassage de l'antenne log-périodique a un fort impact sur son efficacité de rayonnement, qui augmente de 5,6 % en moyenne. Ce résultat est cohérent avec celui obtenu avec $\eta_{\text{ray},2}$ dans le cas du brassage de l'antenne patch. Cependant, contrairement aux résultats de la section précédente où le brassage de l'antenne patch n'avait aucun impact sur $\eta_{\text{ray},1}$, le brassage de l'antenne log-périodique a également

un impact sur $\eta_{\text{ray},2}$. En effet, il augmente de 3,2 % en moyenne. Par conséquent, on procède à l'analyse de l'évolution de chaque élément de l'équation (2.10) par rapport au brassage de l'antenne patch. Les coefficients R dans le cas du brassage de l'antenne log-périodique sont présentés dans la deuxième colonne de la table 2.3. Tout d'abord, R_Q est à nouveau égal à l'unité, et $R_{S_{11}}$ et $R_{S_{22}}$ sont également suffisamment petits pour être négligées (1,007 et 1,004 respectivement). $R_{S_{11,s}}$ est égal à 1,122 ce qui est inférieur à $R_{S_{22,s}}$ dans le cas du brassage de l'antenne patch. En effet, la contribution des trajets n'interagissant pas avec le brasseur est plus faible pour l'antenne log-périodique, antenne directive orientée vers le brasseur de modes mécanique, que pour l'antenne patch quasi-omnidirectionnelle ; ceci explique pourquoi l'augmentation de l'énergie non brassée est moins importante pour l'antenne log-périodique. $R_{S_{22,s}}$ est assez faible (1,076) mais beaucoup plus élevé que $R_{S_{11,s}}$ dans le cas du brassage de l'antenne patch. Cela signifie que le brassage de l'antenne log-périodique diminue également de manière significative la composante non brassée de l'antenne patch. En effet, cette dernière étant omnidirectionnelle, le mouvement de l'antenne log-périodique de grande taille agit comme un brasseur de mode secondaire pour l'antenne patch et modifie donc la réponse de la CR vue par l'antenne patch. En outre, un second phénomène se produit grâce au brassage de l'antenne log-périodique ; en effet, le mouvement de ce "brasseur secondaire" engendre une augmentation du nombre de configurations décorréliées de la CR. Cela améliore l'estimation de la moyenne du S_{22} entraînant ainsi une augmentation de l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch [113]. Enfin, $R_{S_{21,s}}$ est très similaire à celui obtenu avec le brassage de l'antenne patch confirmant ainsi que le mouvement d'une antenne ou d'une autre fournit un brassage similaire pour le S_{21} puisqu'il permet de modifier la composante h_{21} .

La différence entre les coefficients de réflexion mesurés dans la CR et dans la CA sont présentés dans la Figure 2.18(a) pour S_{11} et dans la Figure 2.18(b) pour S_{22} . Les valeurs moyennes sur la bande fréquentielle de mesure sont indiquées dans la Table 2.4. L'erreur sur le paramètre S_{11} a diminué d'un facteur 2 grâce au brassage de l'antenne log-périodique, alors que celle sur S_{22} a légèrement diminué (environ 13 %). Ces résultats confirment les conclusions précédentes.

Le mouvement de chaque antenne, individuellement, permet de réduire de manière significative la composante non brassée du coefficient de réflexion pour l'antenne mobile uniquement. Cependant, les composantes brassées des deux coefficients de réflexion doivent être précisément estimées pour déterminer avec précision l'efficacité de rayonnement de chaque antenne. On peut en conclure que le mouvement des deux antennes patch et log-périodique est nécessaire pour réduire la composante non brassée de tous les paramètres S et ainsi mieux estimer l'efficacité de rayonnement des deux antennes. Une campagne de mesure validant cette idée est menée dans la section suivante.

2.4.3.3 Brassage combiné de l'antenne patch et de l'antenne log-périodique

Dans cette partie, nous considérons que les deux antennes sont déplacées simultanément aux 12 positions indiquées. Afin de garder le nombre de mesures identique avec le cas du brassage utilisant une seule antenne, les deux antennes sont déplacées simultanément.

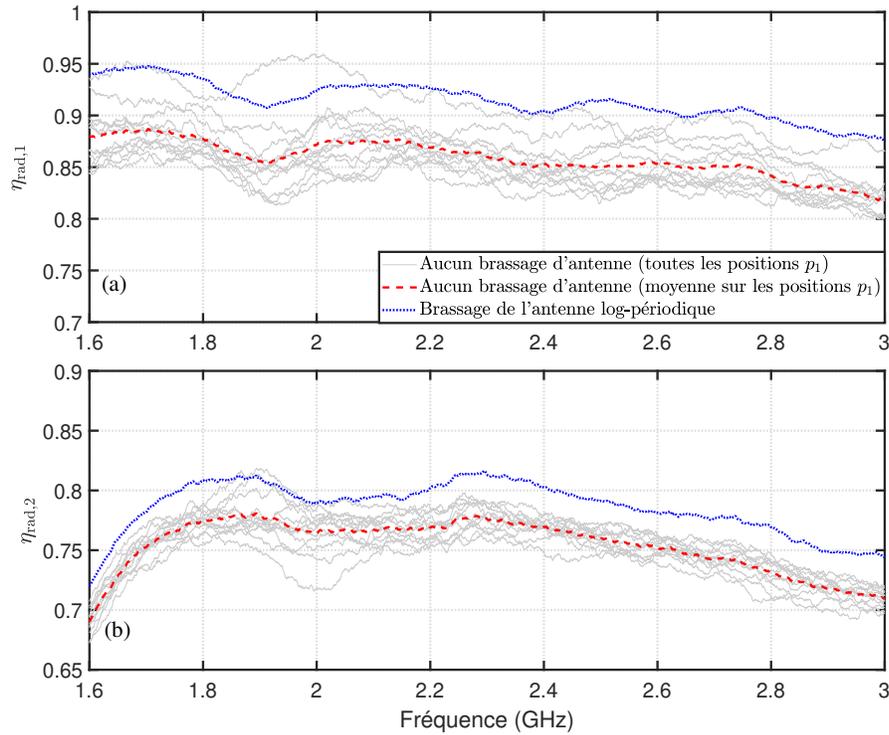


FIGURE 2.17 – Efficacité de rayonnement des antennes log-périodique (a) et patch (b) avec et sans le brassage de l'antenne log-périodique.

ment dans chaque mesure, ce qui conduit à 12 configurations (et 72 positions de brasseur pour chacune). L'efficacité de rayonnement de l'antenne log-périodique est présentée sur la Figure 2.19(a) alors que celle de l'antenne patch est présentée sur la Figure 2.19(b) en fonction de la fréquence. Le brassage combiné des antennes patch et log-périodique entraîne une augmentation des deux efficacités de rayonnement estimées. $\eta_{rad,1}$ augmente de 3,8 % en moyenne alors que $\eta_{rad,2}$ augmente de 6,5 % en moyenne. Les coefficients R sont présentés dans la troisième colonne de la Table 2.3. Dans le cas de ce brassage aussi, R_Q est égal à l'unité, et $R_{S_{11}}$ et $R_{S_{22}}$ sont proches de l'unité ; par conséquent, ils ont un impact négligeable sur l'augmentation de l'efficacité du rayonnement. Aussi, $R_{S_{11,s}}$ est égal à 1,103 ce qui est similaire à la valeur obtenue dans le cas du brassage de l'antenne log-périodique. De la même manière, $R_{S_{22,s}}$ est égal à 1,251 ce qui est très similaire à la valeur obtenue dans le cas du brassage de l'antenne patch. Enfin $R_{S_{21,s}}$ est égal à 1,111 ce qui est presque identique aux deux cas précédents (brassage de l'antenne patch et brassage de l'antenne log-périodique). Le module de la différence entre les coefficients de réflexion mesurés dans la CR et dans le CA est présenté sur la Figure 2.20(a) pour S_{11} et sur la Figure 2.20(b) pour S_{22} . Les différences moyennes sur la bande fréquentielle de mesure sont présentées dans la dernière colonne de la Table 2.4. Le brassage combiné des deux antennes patch et log-périodique permet d'obtenir une différence plus faible par rapport aux deux autres cas de brassage avec une seule antenne en mouvement.

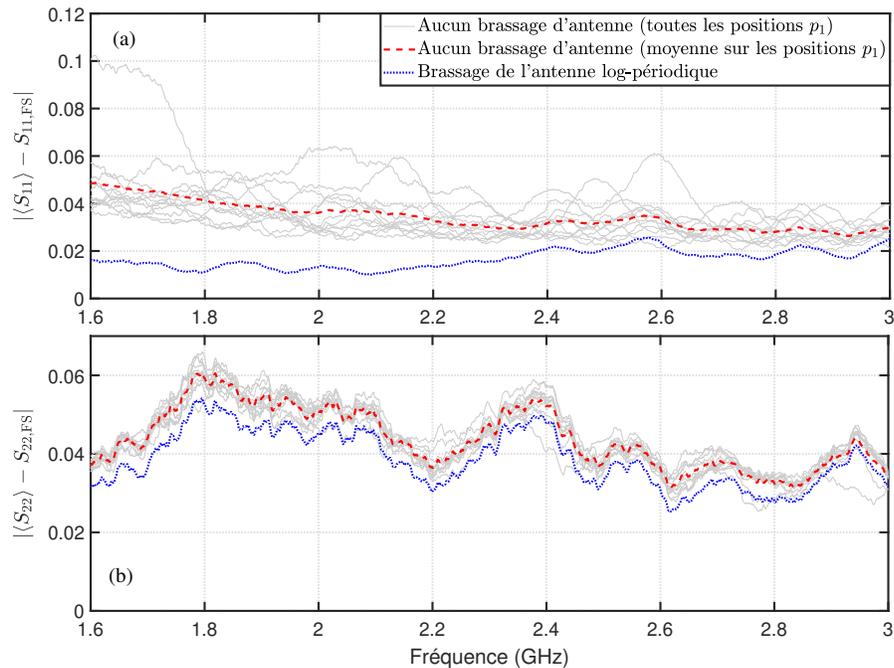


FIGURE 2.18 – Erreur entre les coefficients de réflexion moyens S_{11} (a) et S_{22} (b) mesurés dans la CR et ceux mesurés dans le CA, en fonction de la fréquence, avec et sans brassage de l'antenne log-périodique.

Afin de résumer les interprétations des principaux résultats que nous avons obtenus dans les sections précédentes, une comparaison entre les coefficients de réflexion des antennes utilisées ainsi que leurs efficacités de rayonnement est présentée dans les deux sections suivantes.

2.4.3.4 Comparaison entre les coefficients de réflexion des antennes dans les différents cas de brassage d'antenne

La comparaison porte ici sur l'erreur entre les coefficients mesurés en CA et les valeurs moyennes de ces mêmes coefficients obtenus en CR (Table 2.4). Sans aucun brassage d'antenne, l'erreur est plus faible pour l'antenne log-périodique car il s'agit d'une antenne directionnelle orientée vers le brasseur mécanique, présentant ainsi une composante non brassée plus faible. Le brassage de l'antenne patch a un impact important sur l'antenne patch elle-même et un impact négligeable sur l'antenne log-périodique. En effet, l'antenne log-périodique n'est pas orientée vers l'antenne patch, par conséquent, cette dernière ne modifie pas son coefficient de réflexion. Par ailleurs, le brassage de l'antenne log-périodique a un impact important sur l'antenne elle-même et un impact moindre, mais non négligeable, sur l'antenne patch. En effet, l'antenne patch étant omnidirectionnelle, elle est sensible à la position de l'antenne log-périodique qui agit comme un diffuseur mobile. Enfin, la combinaison du brassage des deux antennes permet de réduire les deux erreurs d'un

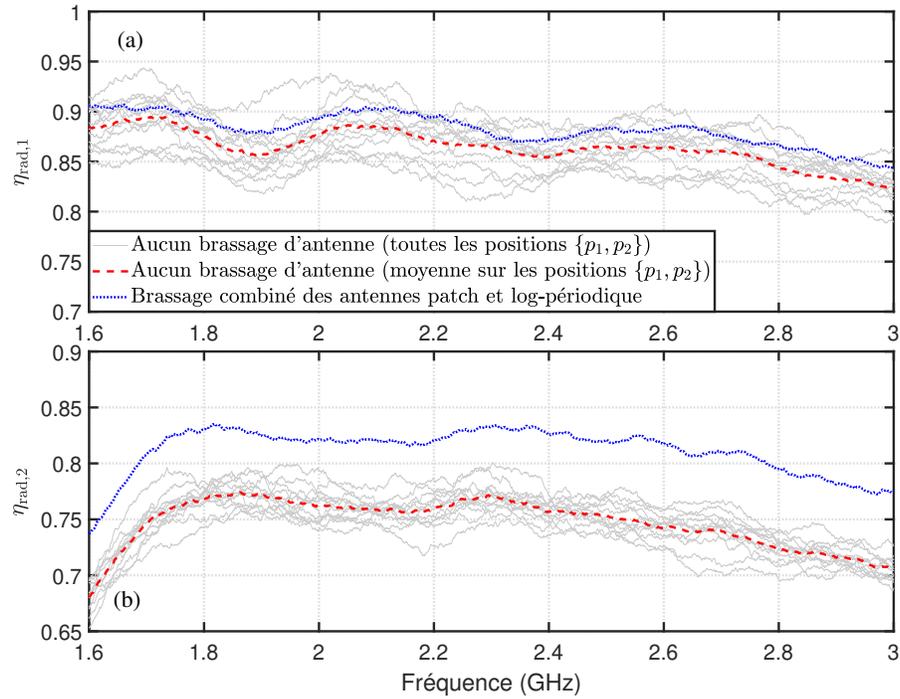


FIGURE 2.19 – Efficacité de rayonnement des antennes patch et log-périodique avec et sans le brassage combiné.

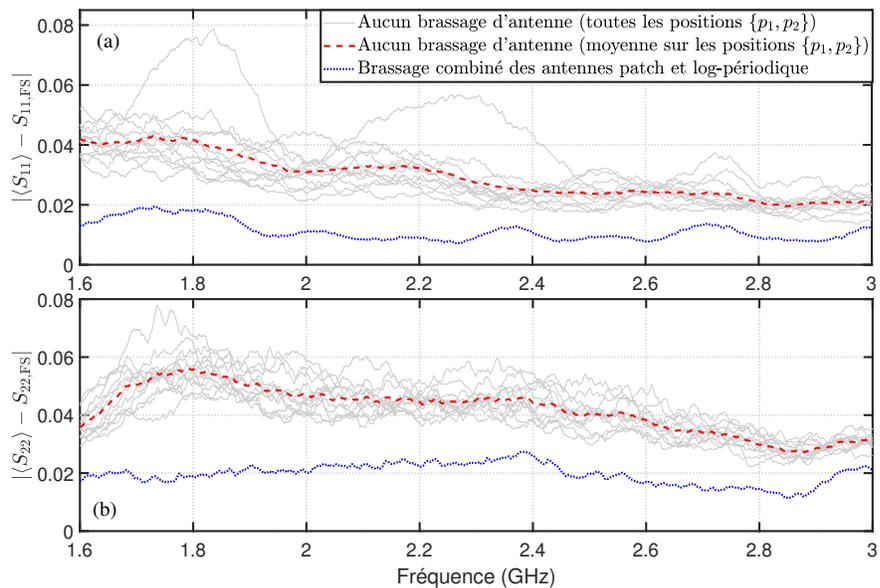


FIGURE 2.20 – Erreur entre les coefficients de réflexion moyens S_{11} (a) et S_{22} (b), mesurés dans la CR et ceux mesurés dans le CA, en fonction de la fréquence, avec et sans le brassage combiné.

facteur 3 pour l'antenne log-périodique et un facteur 2 pour l'antenne patch.

2.4.3.5 Comparaison entre les efficacités de rayonnement dans les différents cas de brassage d'antenne

Pour résumer les résultats relatifs aux efficacité présentés dans les parties précédentes, nous comparons les efficacités de rayonnement des deux antennes obtenus dans les quatre cas suivant : 1) aucun brassage d'antenne 2) brassage de l'antenne log-périodique, 3) brassage de l'antenne patch et 4) brassage combiné des antennes patch et log-périodique. Les différentes efficacités de rayonnement estimées pour l'antenne log-périodique sont présentées dans la Figure 2.21 en fonction de la fréquence. On observe que le brassage de l'antenne patch n'a aucun impact sur $\eta_{\text{ray},1}$, puisque l'efficacité estimée est presque identique à celle trouvée sans brassage d'antenne. Cela peut s'expliquer par le fait que la composante non brassée du S_{11} reste la même (l'antenne log-périodique n'est jamais orientée vers l'antenne patch), alors que les augmentations des valeurs estimées des composantes non brassées de S_{22} et S_{21} se compensent dans (2.10). Le brassage de l'antenne log-périodique conduit à une augmentation de l'efficacité de cette même antenne de 7,0 % en moyenne. Dans ce cas, la composante non brassée du S_{11} est fortement réduite (ainsi, la composante brassée du S_{11} est fortement augmentée), tandis que celle du S_{22} reste inchangée. Enfin, le brassage combiné des deux antennes patch et log-périodique conduit à une augmentation modérée de l'efficacité de l'antenne log-périodique de 3,8 % en moyenne. Dans ce cas, l'effet sur l'estimation du $S_{21,s}$ est similaire aux deux cas précédents car la composante non brassée de S_{21} est fortement réduite une fois que la position d'au moins une antenne est modifiée. Cependant, les composantes non brassées des deux coefficients de réflexion sont fortement réduites. L'hypothèse que les paramètres S moyennés selon le processus de brassage sont égaux au paramètres S estimés en espace libre (FS) est mieux vérifiée dans le cas du brassage combiné (voir Table 2.4).

Des conclusions similaires peuvent être tirées de l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch présentée sur la Figure 2.22 en fonction de la fréquence. Cependant, dans ce cas, même le brassage de l'antenne log-périodique a un impact sur $\eta_{\text{ray},2}$, ce qui conduit à une augmentation de 3,2 % de cette efficacité. En effet, l'antenne patch est omnidirectionnelle et son coefficient de réflexion est donc sensible à l'emplacement de l'antenne log-périodique (qui est par ailleurs d'une taille importante). Par conséquent, et comme cela a déjà été mentionné précédemment, cette dernière agit comme un diffuseur au sein de la CR et contribue à la réduction de la composante non brassée du S_{22} (environ 13 %) en plus de générer des configurations décorréliées supplémentaires de la CR. L'estimation la moins biaisée, obtenue avec le brassage combinée entre antenne patch et log-périodique, correspond à une augmentation de 5,8 % en moyenne par rapport à la valeur obtenue lorsqu'aucun brassage d'antenne n'est appliqué. Le brassage de l'antenne patch conduit à une surestimation de l'efficacité de rayonnement de 2,8 % alors que le brassage de l'antenne log-périodique mène à une sous-estimation de l'efficacité de rayonnement de 2,6 %.

Les résultats que nous avons obtenus suite à l'étude menée dans cette partie ont montré, que dans le cas de la méthode de mesure d'efficacité d'antenne avec deux antennes

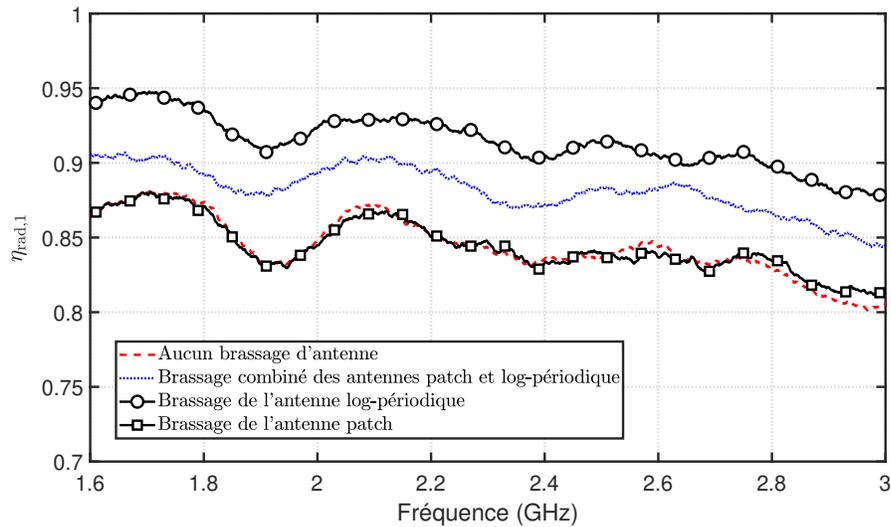


FIGURE 2.21 – Efficacité de rayonnement de l’antenne log-périodique avec et sans les différentes approches de brassage.

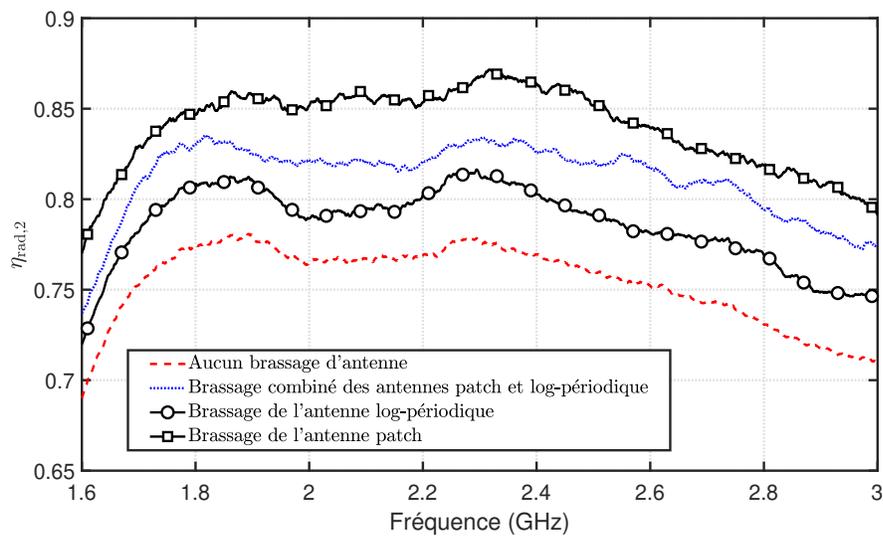


FIGURE 2.22 – Efficacité de rayonnement de l’antenne patch avec et sans les différentes approches de brassage.

en CR, il est nécessaire d’appliquer un brassage avec les deux antennes afin d’obtenir une estimation non biaisée de l’efficacité de rayonnement. En effet, le brassage mécanique est indispensable pour assurer suffisamment de configurations décorréées de la CR, mais il ne parvient pas à éliminer les composantes non brassées des paramètres S qui sont dues aux réflexions directes entre les antennes et les murs ou tout objet présent dans la CR. En conséquence, les composantes brassées des paramètres S , dont l’évaluation est fondamentale pour extraire l’efficacité de rayonnement de l’antenne, sont sous-estimés. Cela

conduit soit à une surestimation de l'efficacité de rayonnement de l'antenne 2 (antenne 1) si seulement le brassage de l'antenne 2 (brassage de l'antenne 1) est effectué, ou une sous-estimation du rayonnement de l'antenne 2 (antenne 1) si seule un brassage de l'antenne 1 (antenne 2) est réalisé. Nous avons souligné que l'évaluation de la composante brassée du coefficient de transmission bénéficie, de la même manière, des deux brassages d'antenne, puisque la composante non brassée est modifiée dès qu'une antenne est déplacée. Cependant, l'évaluation des composantes brassées des coefficients de réflexion des deux antennes doit être correctement estimée, ce qui nécessite le mouvement des deux antennes. Il est également démontré que, si elles sont orientées vers le brasseur de modes, les antennes directionnelles sont moins sensibles au brassage d'antenne que les antennes omnidirectionnelles. En effet, orienter leur rayonnement vers le brasseur de modes ou d'autres objets de forme complexe permet de rendre la composante non brassée négligeable. Dans notre étude, l'erreur sur l'efficacité de rayonnement a atteint 7 % pour l'antenne directionnelle et 9 % pour l'antenne omnidirectionnelle. Bien que les résultats actuels soient obtenus en utilisant l'approche à deux antennes, la plupart des techniques de mesure de l'efficacité d'antenne en CR sont basées sur l'évaluation des composantes brassées des paramètres S . Ainsi, ces techniques sont également concernées par les avantages du brassage d'antenne combiné.

Concernant le temps des mesures, dans les trois cas de brassage, le nombre de configurations de mesure est identique : 12 positions d'antenne et 72 positions de brasseur. Pour chaque position d'antenne, 10 minutes sont nécessaires pour effectuer les 72 mesures correspondant aux 72 positions du brasseur. Il faut donc 2 heures pour effectuer les 12 positions d'antenne dans le cas de ces mesures.

Il faut rappeler que les mesures présentées dans ce deuxième chapitre ont été conduites en CR à des fréquences suffisamment loin de sa LUF, ce qui nous permet d'admettre que les propriétés attendues pour le champ (homogénéité et isotropie) sont vérifiées. Dans la section suivante, l'efficacité de différents processus de brassage est étudiée lorsque la mesure est effectuée à des fréquences proches de la LUF.

2.5 Mesure à des fréquences basses (proches de la LUF)

Dans les parties précédentes de ce chapitre, les différents résultats présentés sont obtenus pour des mesures à des fréquences bien supérieures à la LUF des CR utilisées. En effet, dans ce cas, on s'attend à une bonne estimation des résultats de mesure et donc à une bonne précision. En revanche, pour des fréquences proches de la LUF d'une CR, les propriétés statistiques idéales du champ (homogénéité et isotropie) ne sont plus vérifiées. Cette partie, dédiée à une mesure d'efficacité d'antenne en CR à des fréquences proches de la LUF, permet de mieux comprendre les limitations fréquentielles des différentes méthodes de mesure d'efficacité d'antenne ainsi que leur impact sur la précision des résultats de mesure. Deux antennes sont utilisées pour ces mesures, une antenne log-périodique et une antenne patch (l'antenne sous-test). La structure de l'antenne sous-test s'inspire des

travaux présentés dans [114] et a été optimisée par simulation sous ANSYS HFSS afin de résonner à 400 MHz. Il s'agit d'une antenne imprimée sur de l'Arlon 25N avec un plan de masse (Figure 2.23). La seconde antenne utilisée dans cette mesure est une antenne log-périodique classique de bande fréquentielle de fonctionnement [340 MHz - 4 GHz].

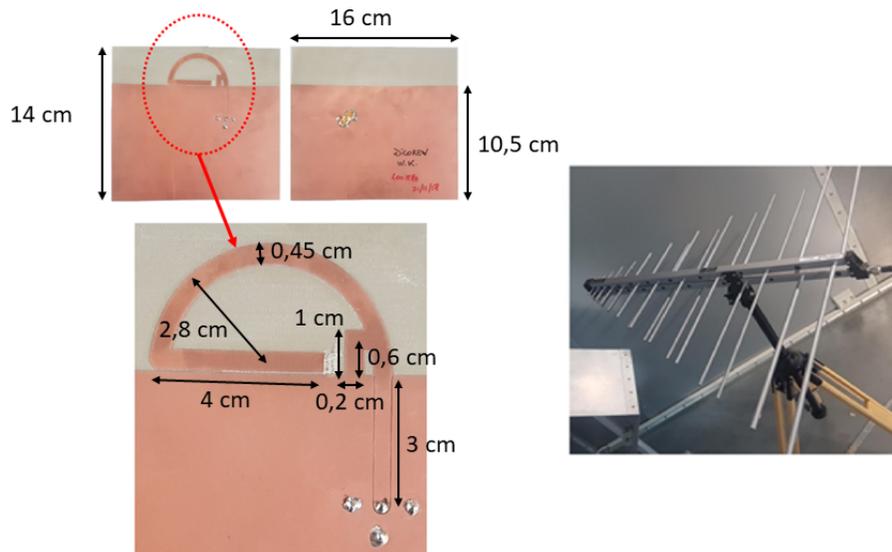


FIGURE 2.23 – Antennes de mesure : antenne patch sous-test (à gauche), antenne log-périodique (à droite).

La mesure a été effectuée dans les deux chambres réverbérantes présentées précédemment : la chambre réverbérante du laboratoire ESYCOM et la chambre réverbérante de l'IETR (Figure 2.2 et Figure 2.1 respectivement) en utilisant les mêmes antennes de mesure.

2.5.1 Banc de mesure

La bande fréquentielle de mesure est la même dans les deux chambres : [300 MHz - 500 MHz] et elle a été soigneusement choisie pour que la mesure soit autour de la LUF de la CR du laboratoire ESYCOM (estimée à 400 MHz) et loin de la LUF de la CR de l'IETR (estimée à 200 MHz). Les mesures sont prélevées en 10.001 points fréquentiels équidistants. Les deux antennes sont connectées à un VNA et les mesures sont effectuées à chaque position du brasseur. On résume dans la Table suivante les différentes configurations de mesure dans les deux CRs.

La méthode de calcul de l'efficacité d'antenne appliquée ici est la technique dite à deux antennes (déjà détaillée dans la section 1.4.2.2), qui ne nécessite pas la connaissance préalable de l'efficacité de l'antenne log-périodique.

TABLE 2.5 – Configurations de mesure dans les deux CRs.

	CR ESYCOM	CR IETR
LUF	400 MHz	200 MHz
Volume de la CR	19,11 m^3	93,35 m^3
Nombre de positions de brasseur	200	100
Nombre de positions décorréélées du brasseur à 400 MHz	16	56
Facteur de qualité estimé à 400 MHz	1463	4573
Largeur de cohérence à 400 MHz	273,4 kHz	87,5 MHz
Types de brassage appliqués	1/ brassage mécanique 2/ brassage fréquentiel 3/ brassage de source avec 5 configurations	1/ brassage mécanique seulement

2.5.2 Résultats de mesure

Dans une première mesure, seul le brassage mécanique est utilisé dans les deux CRs. La CR ESYCOM présente un nombre de positions de brasseur decorréélées plus faible que la CR IETR (Table 2.5). C'est pourquoi, afin de disposer d'un nombre de configurations de mesure décorréélées comparable dans les deux RCs, un brassage de source est mis en oeuvre dans la CR ESYCOM en complément au brassage mécanique. Les coefficients de réflexion obtenus pour l'antenne patch dans ces différentes configurations de mesure sont présentés sur la Figure 2.24.

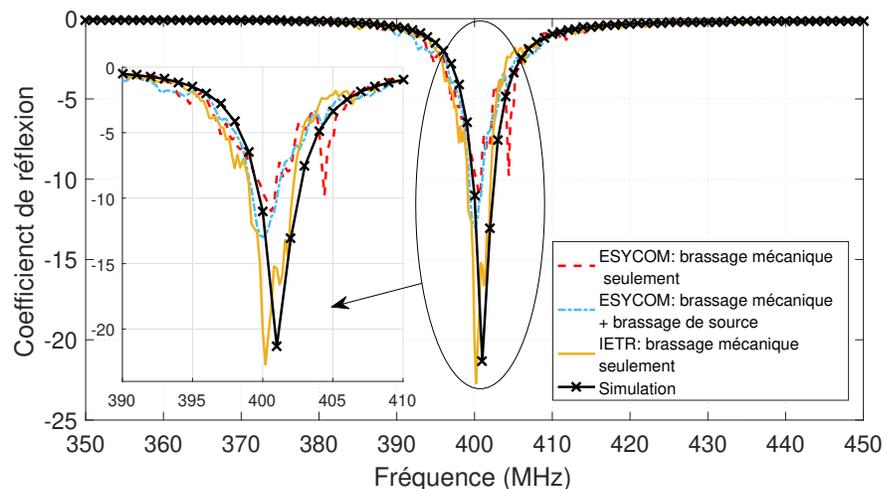


FIGURE 2.24 – Coefficient de réflexion de l'antenne patch.

Les résultats de mesures du coefficient de réflexion en CR présentent des allures cohérentes et similaires au résultat de simulation. Par ailleurs, les résultats en CR ESYCOM montrent que l'application du brassage de source combiné au brassage mécanique (courbe bleue) conduit à un résultat plus proche de celui obtenu en CR IETR (courbe orange). Aussi, en CR IETR, on montre que le brassage mécanique appliqué seul est suffisant pour avoir un coefficient de réflexion proche de celui obtenu en simulation.

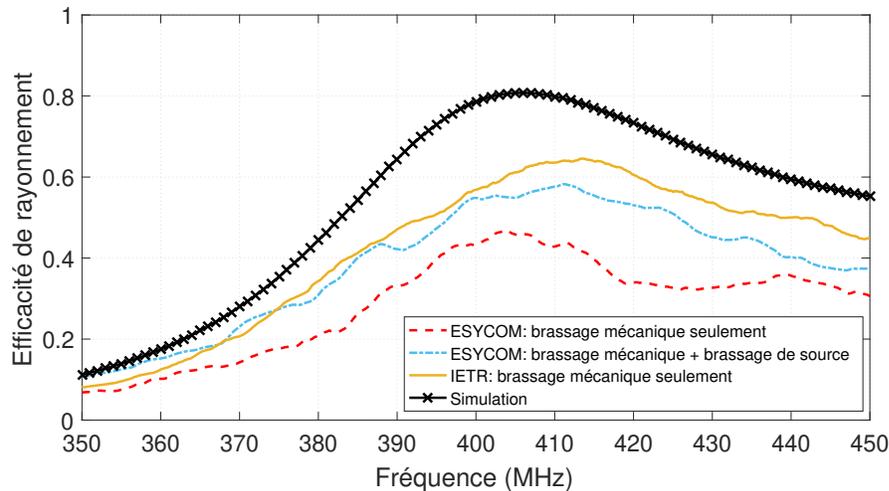


FIGURE 2.25 – Efficacité de rayonnement de l'antenne patch lorsque le brassage mécanique et le brassage de source sont appliqués.

L'efficacité d'antenne obtenue en simulation et en mesure est présentée sur la Figure 2.25. Les courbes présentant les mesures en CR sont lissées sur une fenêtre glissante de 20 MHz. Les observations sont similaires à celles faites sur le coefficient de réflexion. En effet, lorsque seul le brassage mécanique est appliqué sur les mesures en CR ESYCOM, l'efficacité obtenue présente des valeurs inférieures à celles obtenues lorsque le brassage mécanique est combiné au brassage de source. On calcule dans ce cas une différence relative de 30,9 % par rapport à la mesure en CR IETR. Cependant, cette différence est réduite à 12,7 % lorsque les deux types de brassage sont combinés (courbe bleue). En CR IETR, on obtient des valeurs plus importantes pour l'efficacité et plus proches des résultats de simulation en appliquant seulement le brassage mécanique. Ces résultats montrent l'intérêt du brassage de source pour améliorer l'estimation de l'efficacité d'antenne lorsqu'elle est calculée proche de la LUF de la CR. L'ampleur de l'amélioration dans l'estimation de l'efficacité d'antenne avec le brassage de source est beaucoup plus importante lorsque la mesure est effectuée proche de la LUF qu'à des fréquences plus élevées.

Dans une seconde étape, on applique un brassage fréquentiel en complément au brassage mécanique sur la mesure en CR ESYCOM dans le but d'étudier son impact sur l'efficacité estimée. Dans un premier temps, on détermine la largeur optimale de la fenêtre fréquentielle de brassage, qui correspond à la fenêtre fréquentielle pour laquelle on obtient un écart maximum entre la mesure faite uniquement avec le brassage mécanique et la

mesure effectuée en ajoutant le brassage fréquentiel. Pour la mesure en CR ESYCOM, la largeur fréquentielle optimale obtenue est égale à 6 MHz ce qui correspond à 22 fois la largeur de cohérence autour de 400 MHz en CR ESYCOM. L'efficacité obtenue est présentée sur la Figure 2.26 et est comparée aux résultats précédents relatifs aux autres types de brassage. On s'aperçoit que l'application du brassage fréquentiel allié au brassage mécanique améliore l'estimation de l'efficacité (courbe verte) par rapport au brassage mécanique appliqué seul. Ainsi, une différence relative moyenne, sur la bande de fréquence, de 19,4 % est calculée entre l'efficacité dans ce cas (brassage fréquentiel et brassage mécanique en CR ESYCOM) et le résultat obtenu en CR IETR. Afin de compléter cette étude, on combine maintenant les trois types de brassage (brassage mécanique, fréquentiel et de source). En appliquant cette combinaison de brassages sur les mesures effectuées en CR ESYCOM, on obtient le résultat présenté sur la Figure 2.26 (courbe rose). Une différence relative de 12,18 % est calculée entre l'efficacité estimée dans ce cas et le résultat obtenu en CR IETR. Cette différence est inférieure à celle obtenue en combinant le brassage fréquentiel ou le brassage de source au brassage mécanique. On résume dans la Table ci-dessous les différences relatives entre l'efficacité obtenue en CR ESYCOM en appliquant les différents types de brassage et celle obtenue en CR IETR avec un brassage mécanique uniquement.

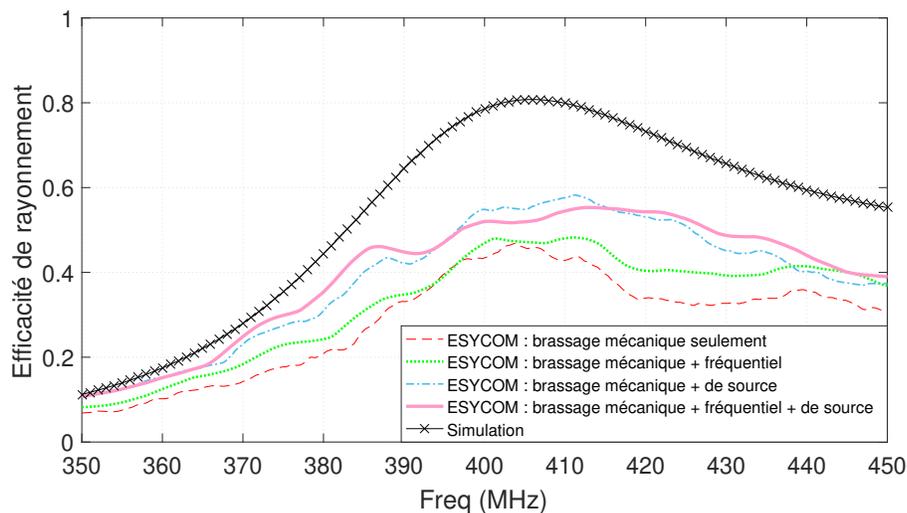


FIGURE 2.26 – Efficacité de rayonnement de l'antenne patch lorsque les différents types de brassage sont appliqués en CR ESYCOM, en plus du brassage mécanique appliqué dans chaque cas.

Dans la Figure 2.27 on présente les résultats obtenus pour les différents types de brassage. La combinaison des trois types de brassage : fréquentiel, brassage de source et brassage mécanique dans le cas des mesures en CR ESYCOM permet une meilleure estimation de l'efficacité. D'après la Table 2.5, le nombre de positions de brasseur décorréliées en CR ESYCOM est plus faible que celui en CR IETR (16 positions décorréliées contre 56 positions respectivement). Ce faible nombre de configurations décorréliées en CR ESYCOM

TABLE 2.6 – Différences relatives moyennes, sur la bande [350 GHz ; 450 GHz], entre la mesure de l'efficacité en CR ESYCOM et en CR IETR.

CR ESYCOM \ CR IETR	Brassage mécanique uniquement
Brassage mécanique uniquement	30,88 %
Brassage de source et brassage mécanique	12,72 %
Brassage fréquentiel et brassage mécanique	19,39 %
Brassage de source, fréquentiel et mécanique	12,18 %

lorsque seul le brassage mécanique est considéré explique l'amélioration de l'estimation de l'efficacité d'antenne lorsque d'autres types de brassage y sont ajoutés.

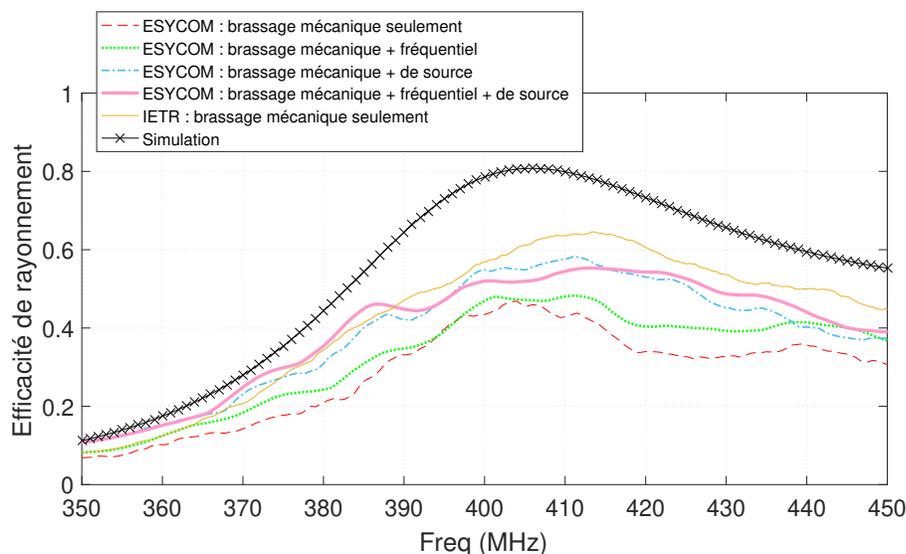


FIGURE 2.27 – Comparaison entre l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch obtenue lorsque les différents types de brassage sont appliqués dans les deux CRs.

En effet, appliquer un ou deux autres types de brassage en plus du brassage mécanique permet d'augmenter le nombre d'échantillons décorrélés. Aussi, on s'aperçoit que la CR IETR ayant plus de positions de brasseur décorrélés avec le brassage mécanique uniquement (56 contre 16 pour la CR ESYCOM) présente des résultats plus proches de la simulation. Afin de confirmer ces hypothèses, on étudie ici l'impact du nombre de positions de brasseur sur l'estimation de l'efficacité à partir des mesures en CR IETR. Pour cela, à partir de l'ensemble des résultats de mesure sur les 100 positions de brasseur, on décime artificiellement le nombre de positions de brasseur et on calcule l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch pour chaque cas de décimation. On considère deux cas différents :

- Premier cas : on considère 50 positions équidistantes du brasseur parmi les 100 positions, ce qui représente la moitié du nombre global des positions de brasseur en CR IETR.
- Deuxième cas : on considère 25 positions équidistantes du brasseur parmi les 100 positions, ce qui représente un quart du nombre global des positions de brasseur en CR IETR.

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 2.28. Lorsque seulement 50 positions de brasseur sont considérées, le résultat de l'efficacité est réduit de 0,98 %, dans le deuxième cas où 25 positions de brasseur sont considérées cette réduction s'élève à 12,65 %. Cette décimation artificielle des mesures nous a permis de réduire le nombre d'échantillons décorrélés pour une mesure loin de la LUF et de calculer l'efficacité d'antenne correspondante. Lorsque 50 positions de brasseur sont considérées, le nombre de positions décorrélés, estimé à 56 parmi 100 positions de brasseur, est peu modifié, ce qui explique le faible impact de cette décimation sur l'efficacité de rayonnement estimée. En revanche, avec 25 positions de brasseur, l'efficacité de rayonnement est fortement sous-estimée. Ces résultats sont en parfaite cohérence avec les hypothèses posées précédemment ainsi qu'avec les observations tirées des mesures à plus hautes fréquences.

Il est à noter que nous n'avons pas examiné ici si le nombre de positions de brasseur décorrélés dans la CR IETR était suffisant pour assurer une bonne estimation de l'efficacité. Ceci pourrait être fait de façon similaire à l'étude faite précédemment aux fréquences plus élevées. Nous nous sommes ici focalisés sur la spécificité d'une mesure à des fréquences proches de la LUF et avons montré qu'il était possible de ramener l'efficacité estimée à des niveaux similaires à ceux obtenus dans une CR de LUF beaucoup plus faible.

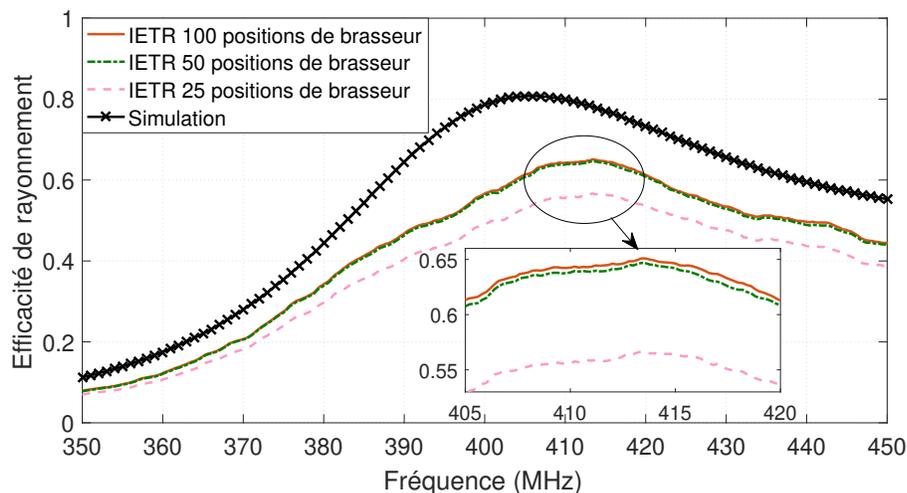


FIGURE 2.28 – L'impact de la décimation des mesures sur le résultat de l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch en CR IETR.

Ainsi, lorsqu'une CR fonctionne proche de sa LUF, le nombre d'échantillons décorrélés générés mécaniquement par le brasseur n'est pas suffisant pour avoir une estimation précise

de l'efficacité de rayonnement d'une antenne sous-test. Les phénomènes mis en relief au cours de l'étude sur une bande fréquentielle plus élevée sont ainsi exacerbés. C'est pourquoi, l'association d'un autre type de brassage semble requise dans le but d'améliorer la précision de l'efficacité estimée. L'obtention, avec ce processus de brassage amélioré, de résultats similaires à ceux obtenus dans une CR de LUF beaucoup plus faible, montre que l'approche proposée reste valide proche de la LUF.

Conclusion

Dans le deuxième chapitre de cette thèse nous avons présenté des résultats expérimentaux issus de mesures effectuées au sein de deux CRs. Ces mesures nous ont permis de valider certaines hypothèses posées sur les méthodes de mesure utilisées et de proposer des pistes d'amélioration de la précision de l'estimation de l'efficacité d'antenne en CR. Concernant les méthodes de mesure de l'efficacité d'antenne, nous avons montré que, dans les méthodes basées sur la mesure d'une antenne de référence, l'estimation précise de l'efficacité de l'antenne de référence utilisée est primordiale car l'estimation de l'efficacité de l'antenne sous test en découle. Ainsi, une estimation précise de l'efficacité de l'antenne de référence assure une bonne estimation (non biaisée) de l'efficacité de l'antenne sous test. Par ailleurs, nous avons validé, grâce à la deuxième étude, le lien entre l'estimation précise des composantes brassées des paramètres S et la bonne estimation de l'efficacité de rayonnement en CR. Cela a été montré à travers l'évaluation de la qualité du brassage d'antenne et de son influence sur l'estimation de la composante non brassée du champ en CR. Il a été prouvé que, dans le cas de la méthode de mesure avec deux antennes, le brassage d'antenne est plus efficace lorsque les deux antennes sont simultanément déplacées (brassage combiné). Cela permet d'éliminer les trajets directs et les réflexions spéculaires qui n'interagissent pas avec le brasseur de modes mécanique. Enfin, le cas particulier des mesures proches de la LUF a été abordé. Grâce à la combinaison de différents types de brassage et notamment le brassage de source et le brassage fréquentiel, les résultats de mesure dans la CR proche de sa LUF ont été améliorés, ce qui peut être vu comme une extension du domaine d'utilisation de la CR. Des mesures d'efficacité d'antenne ont ainsi été effectuées avec une précision comparable à celle des mesures conduites loin de la LUF (mesure en CR IETR) et cela grâce à la combinaison des différents types de brassage et donc à l'augmentation du nombre de configurations de mesure décorréelées.

Chapitre 3

Caractérisation d'antenne sans contact en chambre réverbérante

3.1 Introduction

La CR est un environnement de mesure particulièrement adapté à l'estimation de l'efficacité de rayonnement d'une antenne. Dans le chapitre 1, nous avons présenté plusieurs méthodes exploitant les propriétés d'homogénéité et d'isotropie du champ à l'intérieur de la cavité, permettant d'estimer cette efficacité. Ces méthodes présentent l'avantage de ne pas présenter de contraintes d'alignement et de rotation, généralement observées pour les mesures en CA. Dans le chapitre 2, nous avons mis en évidence l'existence d'un biais dans ce type de mesure dû à la présence de trajets non brassés entre les antennes et les murs de la CR. Nous avons ainsi proposé l'application de brassage d'antennes (combinaison de brassage de source et de brassage de plate-forme) afin d'estimer au mieux les composantes brassées des différents paramètres S , et par conséquent, l'efficacité de rayonnement. Néanmoins, la configuration de mesure utilisée dans les études précédentes reste invasive, c'est-à-dire qu'elle nécessite la connexion de l'antenne sous test à un analyseur de réseau. Dans le cas des antennes miniatures (électriquement petites), la présence des connecteurs et des câbles perturbent la mesure de leur impédance et de leurs propriétés de rayonnement.

Des méthodes de caractérisation sans contact (non invasives) ont déjà été proposées (cf section 1.5) afin d'estimer le gain d'une antenne ainsi que son diagramme de rayonnement. D'abord appliquées en CA [100], puis très récemment en CR [9], ces méthodes sont fondées sur la mesure du champ rétrodiffusé par l'antenne sous test dont les modes de structure et d'antenne sont dissociés à l'aide d'une variation d'impédance de charge. Bien que permettant la mesure du gain d'une antenne avec précision, l'utilisation de ces approches pour estimer l'efficacité de rayonnement nécessiterait une quantité de mesure très importante afin d'appliquer la méthode d'intégration du gain et conserverait les contraintes d'alignement et de rotation intrinsèques aux mesures de trajets directs.

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle méthode de caractérisation de l'efficacité de rayonnement d'antenne qui est d'une part sans contact (non invasive) et qui d'autre part

s'affranchit des contraintes d'alignement généralement rencontrées grâce à l'exploitation des propriétés statistiques de la CR, ce qui permet de plus une mesure plus rapide en raison de l'absence de rotation de l'antenne sous test. Après un état de l'art sur la caractérisation d'objets en CR, nous présentons la nouvelle méthode proposée. Celle-ci est ensuite validée par deux campagnes expérimentales réalisées dans deux CR différentes.

3.2 Caractérisation d'objets en CR

L'interaction d'un objet avec les ondes électromagnétiques peut être quantifiée par une surface équivalente de diffusion σ_s et une surface équivalente d'absorption σ_a . La définition et le principe de mesure de ces deux surfaces sont tout d'abord introduits avant de se focaliser sur le cas précis des antennes, présentant la particularité d'avoir un port d'excitation relié à une charge.

3.2.1 Surface équivalente d'absorption

La surface équivalente d'absorption σ_a [m²] est la grandeur qui permet de quantifier la capacité d'un objet à absorber de l'énergie. Elle est définie comme la puissance dissipée par un objet illuminé par une onde plane, divisée par la densité de puissance de cette onde incidente. Cette grandeur dépend donc de l'angle d'incidence et de la polarisation de l'onde sur l'objet. Lorsque cet objet est présent dans un milieu diffus, comme celui idéalement créé dans une CR, on s'intéresse alors à la surface équivalente moyennée sur l'ensemble des angles d'incidence et les deux polarisations.

La mesure de la surface équivalente d'absorption moyenne d'un objet peut se faire simplement à partir de la mesure du facteur de qualité en CR. En effet, D. Hill et al. [115] ont établi en 1994 la relation entre $\langle\sigma_a\rangle$ et son facteur de qualité en CR. Elle a été rappelée précédemment dans (1.37). A partir de la mesure différentielle du facteur de qualité de la CR avec et sans l'objet, il est donc possible de déterminer son facteur de qualité et d'en déduire $\langle\sigma_a\rangle$. Dans [116], U. Carlberg et al. présentent la mesure de $\langle\sigma_a\rangle$ pour des objets diélectriques à pertes tels que la sphère et le cylindre et les résultats sont en très bon accord avec les différents calculs numériques proposés. Ce type d'approche a également été appliqué sur des objets non canoniques tels que des modèles de corps humains [117] ou des véhicules [118]. Le modèle d'incertitudes introduit dans [116] a été raffiné dans [119] afin de tenir compte de l'impact de l'objet sous test sur la charge.

3.2.2 Surface équivalente de diffusion

La surface équivalente de diffusion σ_s [m²] est la grandeur qui permet de quantifier la capacité de diffusion d'un objet. En fonction de l'application visée, on cherche à minimiser ou bien maximiser cette grandeur. Par exemple, un brasseur de modes a pour vocation de brasser le mieux possible le champ dans la cavité et doit donc présenter une surface

équivalente de diffusion importante. En revanche, une sonde de champ non invasive doit présenter une surface équivalente de diffusion la plus faible possible.

Dans [120], une technique originale a été proposée pour la détermination de la surface équivalente de diffusion d'un objet présent en CR. Cette approche avait initialement été développée dans le domaine de l'acoustique [121]. Elle est dédiée à la mesure de la surface équivalente de diffusion moyennée sur tous les angles d'incidence. Dans le cas des mesures présentées dans [120], aucun brasseur n'est utilisé. Cependant, pour avoir plusieurs configurations de mesure, l'objet sous test (la cible) a été déplacé et le champ mesuré est moyenné sur ces différentes positions de la cible. Leur configuration de mesure est présentée dans la figure 3.1.

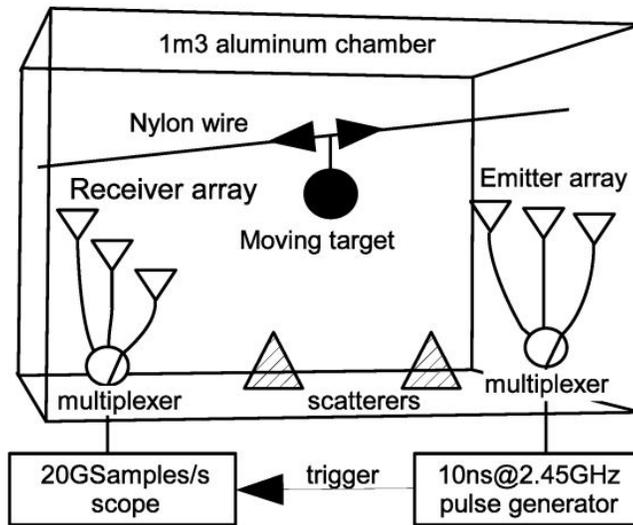


FIGURE 3.1 – Configuration de la mesure de la surface équivalente de diffusion d'une cible [120].

La décroissance de l'énergie à l'intérieur d'une CR est égale à la puissance dissipée multipliée par la durée de temps correspondant à cette décroissance [115] : $dU = -P_d dt$. Lorsque nous remplaçons la puissance dissipée P_d par son expression équivalente présentée dans le premier chapitre dans (1.32), nous obtenons la densité d'énergie électromagnétique moyenne exprimée par la relation suivante [115] :

$$\frac{d\langle u(t) \rangle}{dt} = -\frac{\omega}{Q} \langle u(t) \rangle \quad (3.1)$$

Aussi, nous avons vu dans le premier chapitre que $\tau = Q/\omega$ où τ est la constante de temps de la CR, Q est le facteur de qualité de la chambre qui dans ce cas est chargée par l'objet à caractériser et ω est la fréquence angulaire de pulsation. Le facteur de qualité Q peut être décomposé comme suit :

$$Q^{-1} = Q_o^{-1} + Q_r^{-1} \quad (3.2)$$

où Q_o est associé aux pertes liées à l'objet à caractériser et Q_r est associé aux autres sources de pertes (parois, réflecteurs, antennes... etc). Q_o est lié à la surface équivalente d'absorption σ_a de l'objet à caractériser par l'expression suivante

$$\frac{Q_o}{\omega} = \frac{V}{N\sigma_a c} \quad (3.3)$$

où V est le volume de la chambre, N le nombre d'objets à caractériser (cibles en mouvement dans le cas de l'étude [120]) et c est la vitesse de la lumière dans le vide. Lorsqu'on intègre (3.1), en considérant également la relation entre le champ électrique et la densité d'énergie, on obtient le résultat suivant [120]

$$\langle E_\eta^2(t) \rangle = \langle E_\eta^2(0) \rangle e^{-t\omega/Q} \quad (3.4)$$

Par conséquent, dans une CR l'énergie décroît d'une façon exponentielle. Selon [120], la décroissance de la densité d'énergie est non seulement due aux pertes par absorption dans la CR mais aussi à l'amortissement causé par la diffusion due au mouvement des cibles. On peut donc écrire

$$\langle \bar{E}_\eta^2(t) \rangle = \langle \bar{E}_\eta^2(0) \rangle e^{-t(\omega/Q+1/\tau_s)} \quad (3.5)$$

où $\langle \bar{E}_\eta^2(t) \rangle$ est le champ moyenné sur les différentes positions de cibles, τ_s est le temps d'amortissement par diffusion, il représente le temps caractéristique pour que les cibles en mouvement diffusent l'onde électromagnétique et peut être exprimé comme suit

$$\tau_s = \frac{V}{N\sigma_s c} \quad (3.6)$$

Le champ $\langle \bar{E}_\eta^2(t) \rangle$ décroît plus rapidement que $\langle E_\eta^2(t) \rangle$ à cause de la diffusion sur les cibles en mouvement. Plus la cible est grande plus la probabilité que l'onde soit diffusée au moins une fois est élevée. A l'instant $t = 0$, le champ à l'intérieur de la chambre n'est pas encore significativement diffusé par les cibles en mouvement, on peut donc considérer que $\langle E_\eta^2(0) \rangle = \langle \bar{E}_\eta^2(0) \rangle$. Lorsqu'on divise (3.5) par (3.4) on obtient le résultat suivant

$$\langle \bar{E}_\eta^2(t) \rangle / \langle E_\eta^2(t) \rangle = e^{-t/\tau_s} \quad (3.7)$$

Ce ratio dépend de la surface équivalente de diffusion (σ_s). Une fois le τ_s extrait, on peut en déduire facilement σ_s à partir de l'équation (3.6) indépendamment de σ_a .

3.2.3 Cas particulier des antennes

Comme tout objet, une antenne présente au sein d'une CR constitue une source de pertes. Comme une antenne se caractérise par sa réciprocité, la puissance qu'elle peut injecter en CR est aussi celle qu'elle peut absorber. La contribution de cette antenne peut être distinguée au niveau du facteur de qualité de la CR. Il existe dans la littérature [32] un modèle standard des pertes introduites par l'antenne, basé sur la modélisation de la

puissance dissipée dans la charge connectée à une antenne. Ce modèle évalue les pertes introduites par une ou plusieurs antennes présentes en CR en fonction de leurs efficacités et de leurs coefficients de réflexion. Par ailleurs, le travail présenté dans [122] étudie ce modèle et évalue sa précision. En effet, le modèle standard ne prend pas en considération la dissipation interne de puissance dans l'objet en question mais considère seulement la dissipation de puissance dans les charges connectées à l'antenne. Ceci rend cette méthode valable seulement pour les antennes à très faibles pertes (efficaces). En revanche, le nouveau modèle proposé dans [122] propose une amélioration du modèle standard afin de prendre en considération les pertes négligées précédemment.

Comme déjà présenté dans (1.39) dans le cas particulier d'une antenne parfaitement efficace, le facteur de qualité lié aux pertes d'antenne $Q_{a,c}$ dans un cas général est exprimé par l'expression suivante [122] :

$$Q_{a,c}(f) = \frac{Q_a^0(f)}{\eta_a(f)(1 - |\Gamma_{a,c}(f)|^2)} \quad (3.8)$$

avec $Q_a^0(f) = 16\pi^2 V_\lambda$ le facteur de qualité d'une antenne parfaitement adaptée et parfaitement efficace, $V_\lambda = V/\lambda^3$ le volume électrique de la CR avec λ la longueur d'onde, $\Gamma_{a,c}$ la désadaptation entre l'impédance de l'antenne et sa charge, η_a l'efficacité de rayonnement de l'antenne. Le modèle présenté dans (3.8) considère que l'antenne capte une partie de la puissance disponible dans la CR (représentée par le facteur de qualité d'une antenne idéale Q_a^0) et que cette puissance est ensuite dissipée dans la charge de l'antenne, à un facteur près correspondant à l'efficacité totale de l'antenne (produit de l'efficacité de rayonnement et de la désadaptation). Ce modèle ne tient donc pas compte de la puissance qui n'est pas dissipée par la charge mais qui est, au contraire, réfléchi par celle-ci puis re-rayonnée par l'antenne dans la CR. Ce mécanisme de re-rayonnement, qui a été introduit en 2018 dans [122], est illustré sur la Figure 3.2. Les pertes introduites par la présence d'une antenne en CR sont décrites par trois phénomènes de dissipation numérotés de 1 à 3.

On considère une puissance reçue moyenne $\langle P_r \rangle$ incidente sur l'antenne. La première portion de puissance notée 1 est dissipée dans l'antenne $\langle P_r \rangle (1 - \eta_a)$ laissant seulement $\langle P_r \rangle \eta_a$ atteindre la charge où la puissance $\langle P_r \rangle \eta_a (1 - |\Gamma_{a,c}|^2)$ est alors dissipée dans la charge 'c' (notée 2). Cette portion de puissance dissipée est la seule prise en considération dans le modèle standard (3.8). En réalité, une partie de la puissance qui atteint la charge de l'antenne est réfléchi par cette dernière et elle est transmise à l'accès de l'antenne. Cette puissance $\langle P_r \rangle \eta_a |\Gamma_{a,c}|^2$ est encore sujette à une dissipation dans l'antenne (notée 3) et la quantité $\langle P_r \rangle \eta_a |\Gamma_{a,c}|^2 (1 - \eta_a)$ est alors dissipée de sorte que seule la quantité $\langle P_r \rangle \eta_a^2 |\Gamma_{a,c}|^2$ est rayonnée par l'antenne dans la CR. Dans ce nouveau modèle proposé dans [122], la dissipation totale de puissance est donc la somme des trois quantités présentées dans la figure 3.2. Elle représente la portion de puissance qui n'a pas été re-rayonnée dans la CR. Ainsi, (3.8) doit être modifiée et le facteur de qualité associé à l'antenne chargé est donc

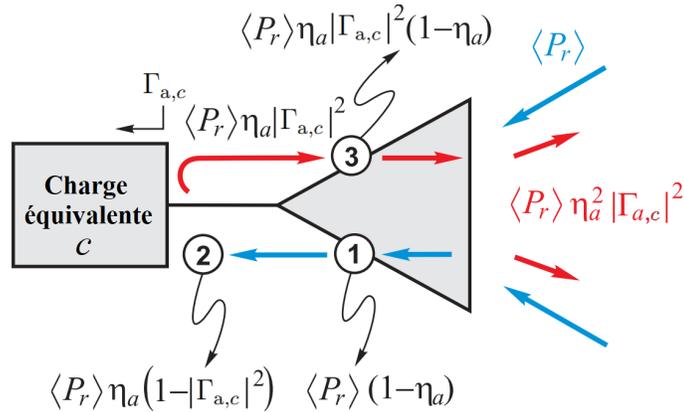


FIGURE 3.2 – Trois phénomènes de dissipation de puissance par une antenne de charge en CR. Puissance reçue en bleu, puissance re-rayonnée en CR en rouge (figure extraite de [122]).

exprimé comme suit

$$Q_{a,c}(f) = \frac{Q_a^0(f)}{1 - \eta_a^2(f) |\Gamma_{a,c}(f)|^2} \quad (3.9)$$

Un des avantages du nouveau modèle (3.9) relativement au modèle standard (3.8) est sa présentation symétrique des rôles de l'efficacité d'antenne et de son adaptation. Ainsi, lorsqu'on considère le cas extrême où l'antenne est très faiblement efficace ($\eta_a(f) \approx 0$), le nouveau modèle conduit à une dissipation totale de l'énergie alors que dans le cas du modèle standard ce cas extrême se traduit par une antenne transparente; ceci est plus conforme au comportement physique attendu. Dans le but de vérifier la validité de (3.9), l'auteur dans [122] effectue des mesures en chargeant la CR avec N antennes identiques aux antennes de transmission. Deux mesures sont effectuées, une première mesure à vide et une deuxième mesure chargée avec les N antennes. Le bilan du facteur de qualité est donc donné par l'équation suivante

$$Q_{CR}^{N-1}(f) = MQ_a^{-1}(f) + Q_{CR}^{-1}(f) + NQ_{a,c}^{-1}(f) \quad (3.10)$$

avec Q_{CR}^N le facteur de qualité de la CR en présence des N AUTs, Q_a le facteur de qualité des antennes de transmission (connectées à l'analyseur), M le nombre d'antennes d'excitation et de mesure qui doit être incrémenté de un pour tenir compte de la rétrodiffusion de l'antenne d'émission, Q_{CR} le facteur de qualité intrinsèque de la CR et $Q_{a,c}$ le facteur de qualité des N antennes de charge. Ces N antennes, non connectées à l'analyseur, sont terminées par des charges identiques (impliquant un coefficient de réflexion $\Gamma_{a,c}$) alors que les antennes de transmission sont supposées connectées à des charges de 50Ω (impédance d'entrée de l'analyseur). Lorsque l'on considère l'équation précédente dans le cas de la CR non chargée (représentée par Q_{CR}^0) on peut écrire

$$NQ_{a,c}^{-1}(f) = Q_{CR}^{N-1}(f) - Q_{CR}^0(f) \quad (3.11)$$

avec Q_{CR}^0 le facteur de qualité de la CR non chargée (sans les AUTs). En se basant ensuite sur les équations (1) et (2) dans [122] d'une part et d'autre part sur (3.8) et (3.9), on peut réécrire (3.11) dans le cas du modèle standard sous la forme suivante

$$\eta_a^2(f) = N \left[\frac{1 - |\Gamma_{a,c}(f)|^2}{(1 - |\Gamma_a(f)|^2)^2 \left(\langle |S_{21}^N(f)|^2 \rangle^{-1} - \langle |S_{21}^0(f)|^2 \rangle^{-1} \right)} \right] \quad (3.12)$$

et dans le cas du nouveau modèle sous la forme suivante

$$\eta_a^2(f) = N \left[(1 - |\Gamma_a(f)|^2)^2 \left(\langle |S_{21}^N(f)|^2 \rangle^{-1} - \langle |S_{21}^0(f)|^2 \rangle^{-1} \right) + N |\Gamma_{a,c}(f)|^2 \right]^{-1} \quad (3.13)$$

avec $\langle |S_{21}^N(f)|^2 \rangle$ la moyenne de la puissance transmise en présence des N AUTs dans la CR, $\langle |S_{21}^0(f)|^2 \rangle$ la moyenne de la puissance transmise en absence des AUTs dans la CR (mesure non chargée), $\Gamma_a(f)$ le coefficient de réflexion des antennes de transmission et $\Gamma_{a,c}(f)$ le coefficient de réflexion vu par l'antenne lorsqu'elle est connectée à une charge 'c' et exprimé comme suit¹

$$|\Gamma_{a,c}(f)| = \left| \frac{\Gamma_c(f) - \Gamma_a^*(f)}{1 - \Gamma_c(f)\Gamma_a(f)} \right| \quad (3.14)$$

où $\Gamma_c(f)$ est le coefficient de réflexion de la charge connectée à l'antenne, défini par rapport à une impédance caractéristique de 50Ω . Lorsque la charge est un circuit ouvert (CO), on a $\Gamma_c(f) = 1$ et donc $\Gamma_{a,\text{CO}}(f) = 1$. En revanche, lorsqu'il s'agit d'une charge adaptée de 50Ω ($c = 50$), $\Gamma_c(f) = 0$ et donc $\Gamma_{a,50}(f) = -\Gamma_a(f)$. Le développement mathématique aboutissant à l'expression de $\Gamma_{a,c}$ est détaillé dans l'annexe B.

Le travail présenté dans [122] vise à proposer une meilleure estimation des pertes introduites par une antenne présente en CR à l'aide d'un nouveau modèle. Les deux modèles ont été comparés indirectement en étudiant la stabilité de l'efficacité de rayonnement mesurée en fonction de la charge de l'antenne. Le nouveau modèle permet d'obtenir des résultats beaucoup moins fluctuants en fonction de la charge de l'antenne et évitent les valeurs d'efficacité aberrantes (supérieures à 1) que l'on retrouve avec l'ancien modèle (Figure 3.3). Cependant, plusieurs interrogations et limitations subsistent avant d'envisager l'estimation de l'efficacité de rayonnement d'une antenne de façon précise par une approche sans contact :

1. L'estimation de l'efficacité de rayonnement présente tout de même des fluctuations relativement importantes en fonction de la charge, surtout pour des fréquences inférieures à 2 GHz ;
2. L'efficacité de rayonnement mesurée par cette approche n'est pas confrontée à une autre estimation numérique ou expérimentale afin de valider les valeurs obtenues ;
3. Il est nécessaire que les deux antennes utilisées en transmission soient identiques aux antennes non connectées car une seule valeur d'efficacité est mesurée ;

1. Dans [122], la conjugaison au numérateur a été oubliée.

4. Cette approche requiert une mesure à vide (sans les antennes non connectées AUTs) afin de retrancher la contribution de la CR, ce qui implique d'ouvrir/refermer la CR entre les deux mesures. En plus des potentielles modifications des conditions de mesure apportées par cette manutention, les pertes introduites par les antennes de charge, indépendamment de leurs propriétés de rayonnement (mode de structure), ne sont pas prises en compte dans la mesure à vide.

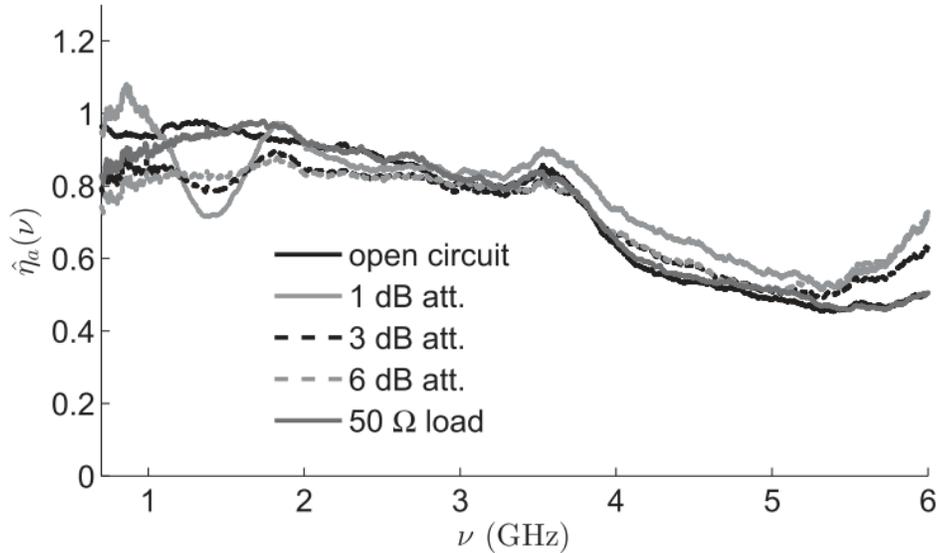


FIGURE 3.3 – Efficacité de rayonnement estimée avec le nouveau modèle proposée dans [122].

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons une nouvelle approche de mesure d'efficacité de rayonnement d'antenne. Elle est fondée sur l'estimation du facteur de qualité d'antenne (nouveau modèle) et permet de lever les différentes limitations évoquées précédemment.

3.3 Nouvelle méthode proposée

Dans la section précédente, nous avons présenté les phénomènes importants dans la caractérisation d'antenne sans contact en CR ; la diffusion électromagnétique produite par un objet ou une antenne présente en CR [120] et l'absorption introduite par la présence de cette antenne dans la cavité [122]. En s'inspirant de ces travaux ainsi que du principe de modulation d'impédance [99, 100] nous proposons ici une méthode originale de caractérisation d'antenne sans contact en CR visant à estimer son efficacité de rayonnement. Considérons une CR dans laquelle deux antennes, différentes ou non, sont placées afin d'estimer le facteur de qualité de la chambre à partir de la mesure du coefficient de transmission S_{21} . N antennes sous test (AUTs) sont disposées au sein du volume utile de la

CR. Chaque AUT est terminée par la même impédance de charge et deux impédances différentes, $c1$ et $c2$, sont considérées et le setup de mesure de cette méthode est présenté dans la Figure 3.4.

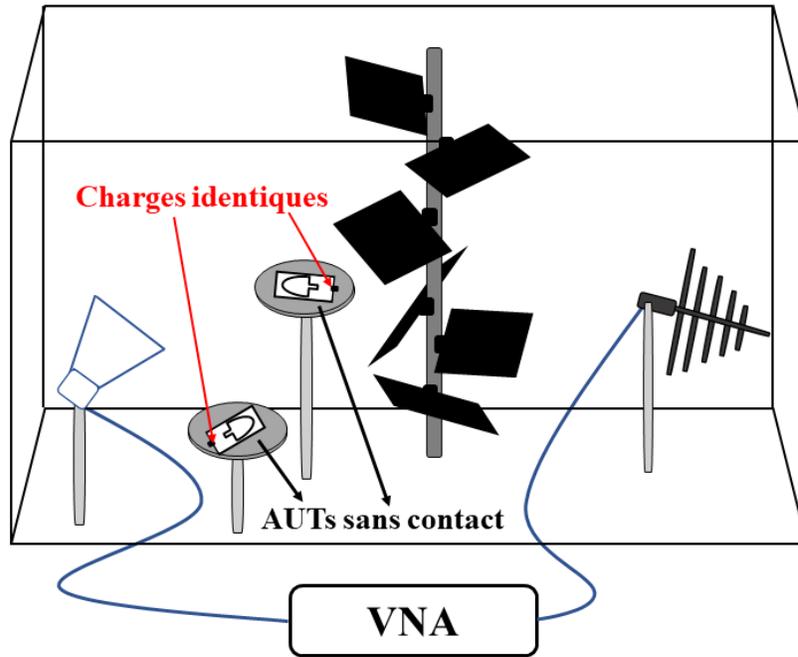


FIGURE 3.4 – Configuration de mesure de la nouvelle méthode sans contact

D'après le développement présenté dans [115, 122], le rapport entre les valeurs de la puissance moyenne transmise en CR dans les différents cas de charge peut être exprimé comme suit

$$\begin{aligned} \frac{\langle |S_{21,c1}^N(f)|^2 \rangle}{\langle |S_{21,c2}^N(f)|^2 \rangle} &= \left(\frac{Q_{CR,c1}^N(f)}{Q_a^0(f)} \right) \cdot \left(\frac{Q_{CR,c2}^N(f)}{Q_a^0(f)} \right)^{-1} \\ &= \frac{Q_{CR,c2}^{N-1}(f)}{Q_{CR,c1}^{N-1}(f)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

où $\langle |S_{21,c1}^N(f)|^2 \rangle$, $\langle |S_{21,c2}^N(f)|^2 \rangle$ et $Q_{CR,c1}^N(f)$, $Q_{CR,c2}^N(f)$ sont respectivement les puissances moyennes transmises en CR et les facteurs de qualité de la CR lorsque les charges $c1$ et $c2$ sont connectées à l'ensemble des N AUTs, $Q_a^0(f)$ le facteur de qualité d'une antenne parfaitement adaptée et parfaitement efficace. $Q_{CR,c1}^{N-1}(f)$ et $Q_{CR,c2}^{N-1}(f)$ peuvent être exprimés par leurs expressions équivalentes, on peut donc écrire dans le cas de N AUTs reliées successivement aux deux charges

$$\begin{aligned} Q_{CR,c1}^{N-1}(f) &= Q_{CR}^0(f) + NQ_{a,c1}^{-1}(f) \\ Q_{CR,c2}^{N-1}(f) &= Q_{CR}^0(f) + NQ_{a,c2}^{-1}(f) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$Q_{a,c1}^{-1}(f)$, $Q_{a,c2}^{-1}(f)$ sont les facteurs de qualités des AUTs lorsqu'elles sont connectées aux charges "c1" et "c2", Q_{CR}^0 le facteur de qualité de la CR sans les AUTs. D'après l'équation (3.8) (modèle standard présenté dans [122]), $Q_{a,c}^{-1}(f)$ peut être exprimé comme suit

$$Q_{a,c}^{-1}(f) = Q_a^{0-1}(f) \eta_a(f) \left(1 - |\Gamma_{a,c}(f)|^2\right) \quad (3.17)$$

Si on fait la différence entre les deux facteurs de qualité, on pourra donc écrire

$$Q_{a,c1}^{-1}(f) - Q_{a,c2}^{-1}(f) = \eta_a Q_a^{0-1} \left(|\Gamma_{a,c2}|^2 - |\Gamma_{a,c1}|^2 \right) \quad (3.18)$$

Ainsi, l'efficacité d'antenne peut être déterminée à partir des facteurs de qualité de la CR dans les deux cas de charge et des coefficients de réflexion $\Gamma_{a,c}$ vus par l'antenne connectée à la charge c1 (charge adaptée égale à 50 Ω par exemple) et c2 (circuit ouvert par exemple). L'un des avantages de cette méthode est de ne plus nécessiter de mesure à vide de la CR ce qui évite une modification de l'environnement de mesure lors du retrait/installation des AUTs. L'efficacité des antennes non connectées (AUTs) dans le cas où on considère le modèle standard peut être donc exprimée comme suit

$$\eta_a^{eq1}(f) = \frac{Q_{CR,c1}^N{}^{-1}(f) - Q_{CR,c2}^N{}^{-1}(f)}{NQ_a^{0-1}(f) \left(|\Gamma_{a,c2}(f)|^2 - |\Gamma_{a,c1}(f)|^2 \right)} \quad (3.19)$$

D'après l'équation (3.9) (nouveau modèle proposé dans [122]), $Q_{a,c}^{-1}(f)$ peut être exprimé comme suit

$$Q_{a,c}^{-1}(f) = Q_a^{0-1}(f) \left(1 - \eta_a^2(f) |\Gamma_{a,c}(f)|^2\right) \quad (3.20)$$

En suivant le même enchaînement que dans le cas précédent, l'efficacité des antennes non connectées (AUTs) dans le cas où on considère le nouveau modèle peut être donc exprimée comme suit

$$\eta_a^{eq2}(f) = \sqrt{\frac{Q_{CR,c1}^N{}^{-1}(f) - Q_{CR,c2}^N{}^{-1}(f)}{NQ_a^{0-1}(f) \left(|\Gamma_{a,c2}(f)|^2 - |\Gamma_{a,c1}(f)|^2 \right)}} \quad (3.21)$$

Par analogie avec les équations (3.1) et (3.5), le rapport entre les intensités de puissance calculées en CR dans les deux cas de charge c1 et c2 peut être exprimé comme suit

$$\frac{\langle |S_{21,c1}^N(t)|^2 \rangle}{\langle |S_{21,c2}^N(t)|^2 \rangle} = e^{(Q_{CR,c2}^N{}^{-1} - Q_{CR,c1}^N{}^{-1})\omega t} \quad (3.22)$$

Dans les équations (3.19) et (3.21), les paramètres du dénominateur sont simples à déterminer. Quant au numérateur, la différence $Q_{CR,c2}^N{}^{-1} - Q_{CR,c1}^N{}^{-1}$ peut être calculée de deux façons, que nous allons ici comparer. Dans le premier cas, elle est déterminée à partir de l'estimation dans le domaine temporel, à partir de la décroissance de (PDP(t)) (cf. Eq. (1.50)), des facteurs de qualité de la RC, ceci étant fait successivement dans les deux états de charge des AUTs avec c1 et c2. Dans le deuxième cas, la différence $Q_{CR,c2}^N{}^{-1} - Q_{CR,c1}^N{}^{-1}$

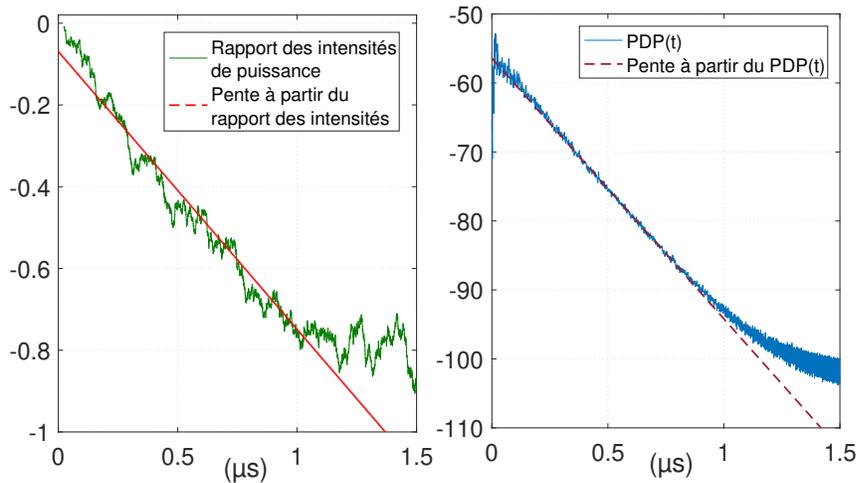


FIGURE 3.5 – Pente calculée à partir du rapport des intensités de puissance (à gauche) et à partir du Power Delay Profile (à droite).

est estimée à partir de la décroissance du rapport entre les intensités de puissance en CR dans les deux cas de charge des AUTs $c1$ et $c2$. Dans la Figure 3.5, on présente l'allure des pentes obtenues dans les deux cas.

Sur la figure de droite, on présente la pente à partir de laquelle le facteur de qualité de la CR de l'institut Langevin est estimé (cf. Section 2.3.2) en présence des AUTs non connectées chargées avec des charges adaptées dans le cas présenté ici. Sur la figure de gauche, on présente la pente calculée à partir du rapport des intensités de puissance entre le cas de cette même mesure et celui où les AUTs sont chargées avec des circuits ouverts. On note que la pente suit mieux la décroissance de la courbe dans le cas où elle est calculée à partir du PDP(t) (figure de droite). Ainsi, pour une meilleure estimation du numérateur $Q_{CR,c2}^N - 1 - Q_{CR,c1}^N - 1$ afin d'appliquer cette nouvelle méthode sans contact, son calcul dans (3.19) et (3.21) est effectué à partir de la différence entre les facteurs de qualité de la CR calculés à partir des PDP(t) dans les deux cas de charge des AUTs non connectées.

Après avoir présenté la théorie derrière la nouvelle méthode de mesure sans contact, nous présentons dans les sections suivantes une application expérimentale de cette méthode dans deux CRs différentes à savoir : la CR ESYCOM et la CR de l'institut Langevin.

Dans le but d'appliquer cette méthode de mesure d'efficacité d'antenne sans contact en CR, nous devons mesurer le coefficient de réflexion $\Gamma_{a,c}$. Pour le faire nous aurons besoin de mesurer le coefficient de réflexion de l'antenne Γ_a ainsi que celui des charges connectées aux AUTs (Γ_c). Cela peut être simplement fait en CA. Par ailleurs, cette nouvelle méthode nécessite deux mesures en présence des AUTs chargées en CR. Il est important de considérer deux types d'impédances de charge de valeurs assez différentes (ex : circuit ouvert et charge adaptée) afin d'avoir un effet suffisamment distinct de cette variation d'impédance sur les valeurs du coefficient de réflexion $\Gamma_{a,c}$ et sur le champ à l'intérieur de la CR et donc sur son facteur de qualité. Les deux mesures seront effectuées

sans aucune manipulation extérieur. Le procédé de mesure est détaillé dans la section suivante.

3.4 Validation expérimentale (CR ESYCOM)

3.4.1 Configuration de mesure

La méthode d'estimation sans contact de l'efficacité d'antenne décrite dans la section 3.3 a été appliquée dans un premier temps sur des mesures effectuées en CR du laboratoire ESYCOM. Le setup de mesure est présenté dans la Figure 3.6. La CR possède les dimen-

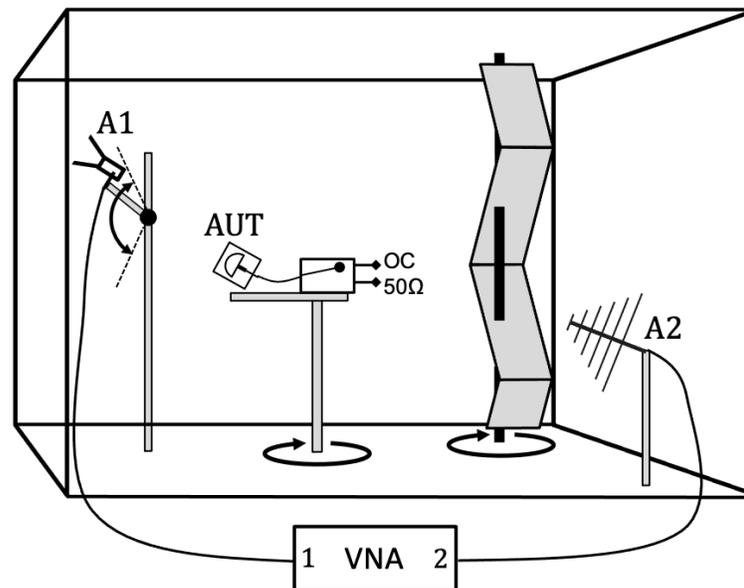


FIGURE 3.6 – Setup de la mesure sans contact en CR du laboratoire ESYCOM.

sions suivantes : 2.95 m × 2.75 m × 2.35 m et a été déjà présentée dans la Figure 2.2. Dans le cas de cette mesure, nous avons tourné le brasseur avec un pas angulaire de 5° (72 positions sur un tour complet du brasseur). Deux antennes connectées sont utilisées (A1 et A2). Elles sont connectées à un analyseur de réseau Rohde&Schwarz ZNB20 dans le but de mesurer leurs paramètres S dans la bande fréquentielle [1.8 GHz - 2.8 GHz] en 10.001 points fréquentiels. A1, qui est une antenne cornet, est orientée vers un coin de la CR, alors que l'antenne A2, qui est une antenne log-périodique, est dirigée vers le brasseur. Comme présenté dans la Figure 3.6, l'antenne A1 est positionnée sur un mât permettant de faire une rotation dans le plan vertical dans le but de faire du brassage de source. Les antennes sont soigneusement positionnées afin de limiter tout couplage direct et cela, pour toutes les configurations. L'AUT (non connectée au VNA) est une antenne patch large bande déjà présentée dans la Figure 2.3. Elle est connectée, à l'aide d'un câble coaxial

d'une longueur de 30 cm, à un switch mécanique contrôlé à distance. Le switch permet de changer l'impédance de charge de l'AUT tout en gardant les mêmes conditions de mesure (pas besoin de manutention humaine pouvant modifier les conditions de mesure). Étant donné que la technique de mesure de l'efficacité d'antenne que nous avons proposée est fondée sur le calcul du facteur de qualité de la CR, et comme cela a été mentionné avant, il est judicieux de choisir deux impédances de charges suffisamment différentes afin d'avoir deux facteurs de qualité distincts. Ainsi, une charge adaptée (50 Ω) et un circuit ouvert (CO) sont utilisés ; elles sont présentées ainsi que le switch dans la Figure 3.7 et elles sont notées Z_{c1} et Z_{c2} respectivement dans la Figure 3.8. Si on considère les deux expressions (3.8) et (3.9) pour le facteur de qualité lié aux pertes dans les antennes, et donc les deux expressions de l'efficacité de rayonnement pour l'AUT (3.19 et 3.21) on aura l'efficacité de rayonnement suivante pour l'antenne sous test

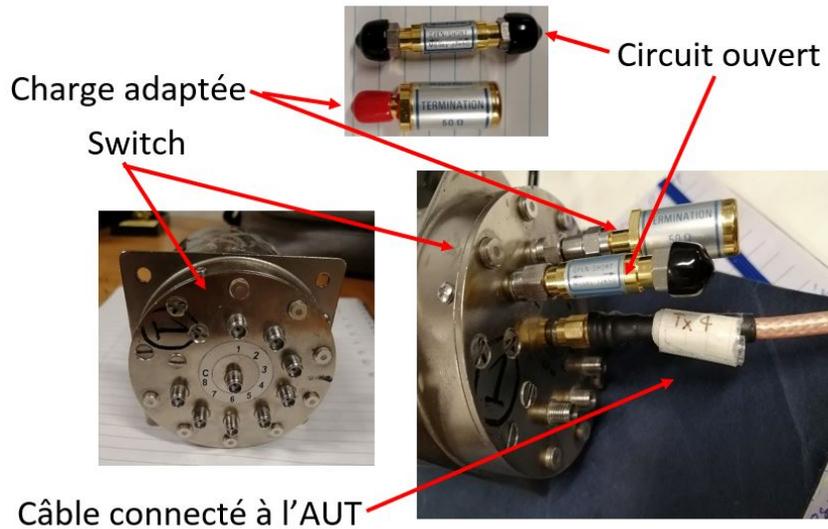


FIGURE 3.7 – Switchs et charges utilisées pour la modulation d'impédance lors de la mesure chargée.

$$\eta_a^{\text{eq1}} = \frac{Q_{\text{CR},50}^1 - Q_{\text{CR},\text{CO}}^1}{Q_a^{0-1} (|\Gamma_{a,\text{CO}}|^2 - |\Gamma_{a,50}|^2)} \quad \text{obtenu avec} \quad Q_{a,c}^{-1} = Q_a^{0-1} \eta_a (1 - |\Gamma_{a,c}|^2) \quad (3.23)$$

$$\eta_a^{\text{eq2}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{CR},50}^1 - Q_{\text{CR},\text{CO}}^1}{Q_a^{0-1} (|\Gamma_{a,\text{CO}}|^2 - |\Gamma_{a,50}|^2)}} \quad \text{obtenu avec} \quad Q_{a,c}^{-1} = Q_a^{0-1} (1 - \eta_a^2 |\Gamma_{a,c}|^2) \quad (3.24)$$

où les indices 'eq1' et 'eq2' font respectivement référence au modèle standard (conventionnel) et au modèle proposé dans [122]. $Q_{a,c}$ est le facteur de qualité lié aux pertes

dans l'AUT. $\Gamma_{a,c}$ représente le coefficient de réflexion vu par l'AUT lorsque celle-ci est connectée à la charge Z_c . Le nombre d'antennes sous test N est égal à 1 dans ce cas (une seule antenne AUT). Afin d'évaluer la validité des deux expressions dans (3.8) et (3.9), les résultats obtenus par η_a^{eq1} et η_a^{eq2} sont étudiés. D'abord, une mesure invasive (câblée) est effectuée pour les Γ_c afin de pouvoir calculer $|\Gamma_{a,c}|$ par la suite. A l'aide d'un VNA, on mesure le coefficient de réflexion de l'antenne Γ_a ainsi que celui des charges $\Gamma_{c1} = \Gamma_{CO}$ et $\Gamma_{c2} = \Gamma_{50}$ en CA. Lors de la mesure des charges, le câble de 30 cm connectant l'antenne au switch est pris en compte. Dans la Figure 3.8 on présente les plans de calibration considérés pour ces deux mesures.

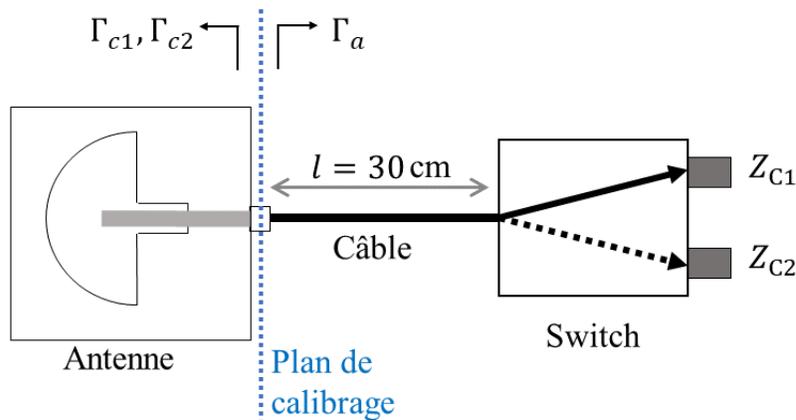


FIGURE 3.8 – Plan de calibration pour la mesure de Γ_a et des Γ_c .

En remplaçant les coefficients de réflexion mesurés Γ_a , Γ_{50} et Γ_{CO} dans (3.14), on obtient les résultats présentés dans la Figure 3.9 pour $\Gamma_{a,50}$ et $\Gamma_{a,OC}$ en fonction de la fréquence. Les Γ_a , Γ_{50} et Γ_{CO} sont aussi présentés dans la même figure.

On remarque que l'AUT est bien adaptée à 50Ω sur toute la plage fréquentielle ($|\Gamma_a|$ inférieur à -10 dB). Par ailleurs, $|\Gamma_{CO}|$ n'est pas égal à 0 (sa moyenne sur la bande fréquentielle de mesure est égale à -0,51 dB). Cela est dû aux pertes d'insertion liées au switch ainsi qu'aux pertes introduites par la présence du câble entre le switch et l'AUT. Concernant $|\Gamma_{50}|$, ses valeurs sont inférieures à -20 dB sur toute la bande fréquentielle de mesure, la charge utilisée représente bien une charge adaptée malgré la présence du switch et du câble le reliant à l'antenne sous test. Au niveau des fréquences où l'AUT est la mieux adaptée, les coefficients de réflexions de l'AUT connectée à une charge adaptée et à un circuit ouvert ($|\Gamma_{a,50}|$ et $|\Gamma_{a,CO}|$) présentent des comportements similaires aux $|\Gamma_{50}|$ et $|\Gamma_{CO}|$, respectivement. Le facteur de qualité de la CR est calculé dans les deux cas de charge de la CR à partir du coefficient de transmission S_{21} . On obtient les facteurs de qualité présentés dans la Figure 3.10. On remarque bien que la valeur du facteur de qualité lorsque la charge adaptée est connectée à l'AUT est inférieure à celle dans le cas où le circuit ouvert est connecté à l'AUT. Étant donné que les deux courbes sont très proches et afin d'avoir une meilleure évaluation de l'évolution de la différence entre le

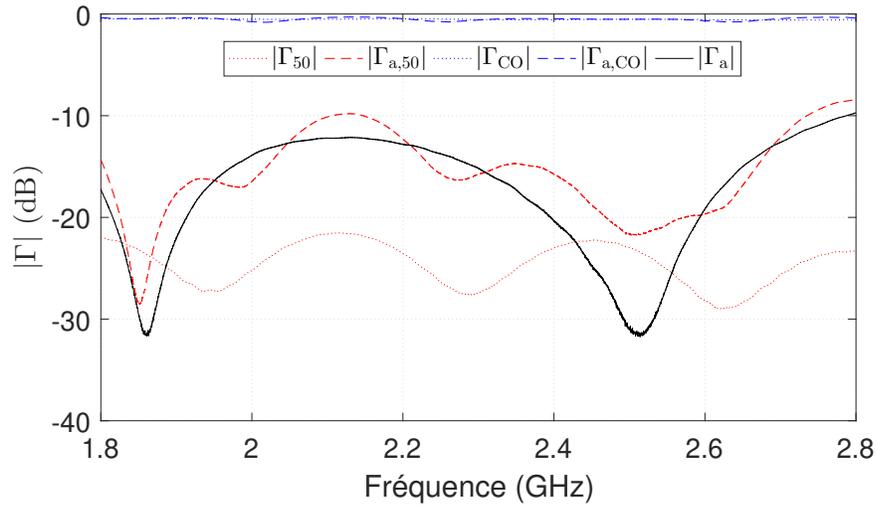


FIGURE 3.9 – Le coefficient de réflexion des impédances de charge et de l'AUT.

facteur de qualité dans les deux cas de charge, on trace la courbe représentant la quantité $\Delta Q_{CR,c}^{-1}/Q_{CR,c}^{-1} = 2(Q_{CR,50}^{-1} - Q_{CR,CO}^{-1}) / (Q_{CR,50}^{-1} + Q_{CR,CO}^{-1})$ sur la même Figure 3.10. Cette quantité est toujours positive sur toute la bande fréquentielle de mesure. Cela traduit le fait que $Q_{CR,CO}^{-1} < Q_{CR,50}^{-1}$, ce qui est cohérent puisque l'on s'attend à des pertes plus importantes avec la charge adaptée à 50 Ω qu'avec le circuit ouvert. Par ailleurs, cette différence diminue avec la fréquence et cela s'explique par le fait que l'effet de la présence de l'AUT devient plus faible en hautes fréquences.

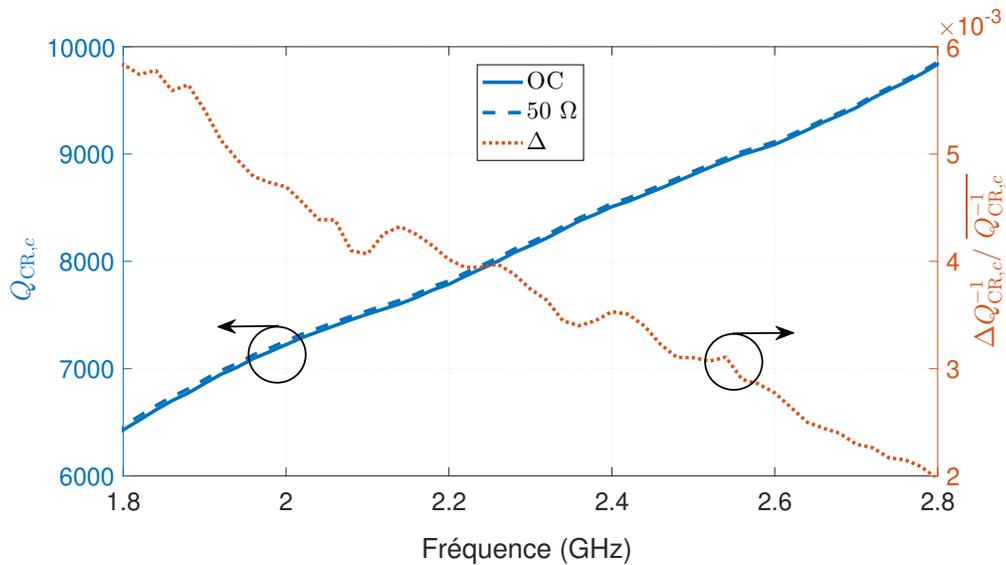


FIGURE 3.10 – Facteur de qualité de la CR dans le cas des différentes charges.

TABLE 3.1 – Moyenne, variance et écart type de l'efficacité de rayonnement de l'AUT en CR ESYCOM.

	Moyenne μ	Variance σ^2	Écart type σ
Conventionnelle	81,9 %	$1.05 \cdot 10^{-4}$	0,0102
Sans contact η_a^{eq1}	61,6 %	$5.18 \cdot 10^{-4}$	0.0228
Sans contact η_a^{eq2}	83,7 %	$2.67 \cdot 10^{-4}$	0.0463

3.4.2 Résultats

L'efficacité de rayonnement estimée en utilisant la méthode sans contact selon les équations (3.23) et (3.24) est présentée dans la Figure 3.11. Afin d'évaluer la précision des résultats, les résultats sont comparés au résultat obtenu avec la méthode classique où l'efficacité est mesurée lorsque l'antenne est connectée à un câble (invasive) (cf Section 2.3.4). Les résultats montrent que l'efficacité obtenue avec la méthode que nous avons proposée (notée η_a^{eq2} et définie dans (3.24)) sont plus proches des résultats obtenus avec la méthode conventionnelle appliquée dans la même CR et sous les mêmes conditions de mesure (même facteur de qualité, mêmes processus de brassage) que ceux obtenus avec le modèle conventionnel (η_a^{eq1}). L'erreur relative moyenne entre les efficacités obtenues par la méthode conventionnelle et la méthode proposée est de 2,3 % uniquement. L'efficacité étant quasiment constante sur la bande de fréquence, la moyenne, la variance et l'écart type des trois efficacités estimées sont présentées à titre de comparaison dans la Table 3.1.

La moyenne de l'efficacité de rayonnement calculée sur toute la bande fréquentielle de mesure est égale à 81,9% avec la méthode conventionnelle et 83,7% avec la méthode sans contact proposée (dans le cas de l'approche η_{ray}^{eq2}). Toutefois, l'écart type (donc la variance) est plus important dans le cas de cette dernière. On observe, comme attendu, que la méthode sans contact fondée sur l'approche η_{ray}^{eq1} (3.23) résulte en une sous estimation importante de l'efficacité de rayonnement de l'AUT (une moyenne de 61,6 % calculée sur toute la bande fréquentielle de mesure). Cela est dû au fait que le calcul de l'efficacité en utilisant (3.23) ne prend pas en considération la partie de la puissance re-rayonnée dans la CR à cause de la désadaptation. Cette puissance est donc considérée comme absorbée par l'antenne AUT ce qui réduit artificiellement son efficacité. Les résultats obtenus démontrent qu'il est possible d'estimer l'efficacité de rayonnement d'une antenne en utilisant une approche sans contact (sans connecter l'AUT à un VNA mais en mesurant le facteur de qualité de la CR dans deux cas de charge de l'AUT). Aussi, ces résultats confirment que la formule du facteur de qualité proposée dans [122] modélise mieux l'absorption d'une antenne présente en CR que celle précédemment proposée.

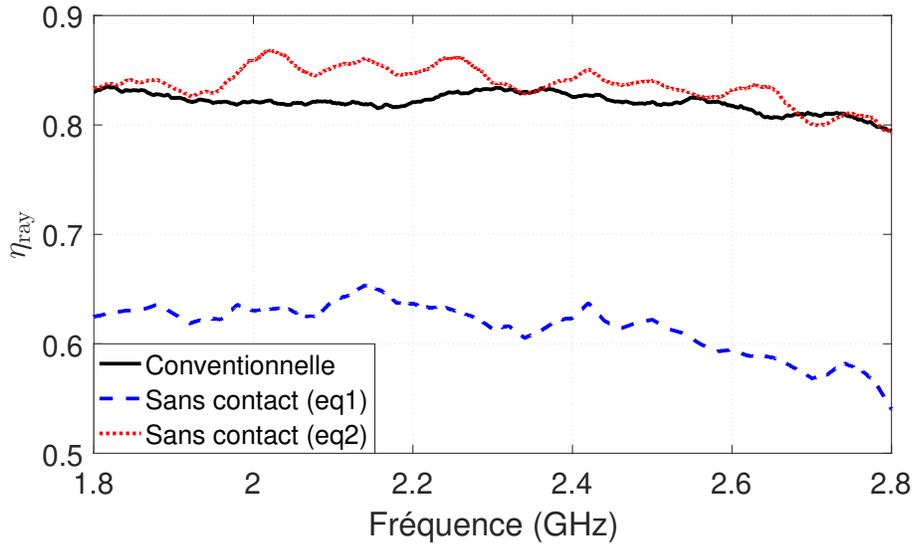


FIGURE 3.11 – Efficacité de rayonnement de l’antenne patch mesurée en CR en utilisant la méthode classique (invasive) et les approches sans contact en fonction de la fréquence. Les résultats sont lissés sur une fenêtre fréquentielle de 30 MHz.

3.4.3 Approximations appliquées sur le coefficient de réflexion

La méthode sans contact nécessite la détermination de $\Gamma_{a,c}$ à partir de l’équation (3.14) et la mesure des coefficients Γ_a et Γ_c . Dans le cas de nos mesures, ils ont été déterminés à partir des mesures directes en utilisant un VNA (mesures invasives). Néanmoins, leur mesure pourrait ne pas être possible d’un point de vue pratique. C’est pourquoi nous examinons ici ce qui serait possible dans ce cas. Ainsi, cette étude prend en considération le cas où on n’a pas de connaissance a priori des coefficients de réflexion. Deux approximations sont donc proposées :

1. Antenne AUT adaptée sur 50Ω : On suppose que l’AUT est adaptée sur 50Ω sur toute la plage fréquentielle de mesure ; cela revient à remplacer Γ_a par 0 comme présenté dans le Tableau 3.2. Dans ce cas $\Gamma_a = 0$ et donc $\Gamma_{a,c} = \Gamma_c$
2. Charges idéales avec Γ_c idéaux : On suppose qu’on a un circuit ouvert idéal et donc $\Gamma_{CO}=1$ et $|\Gamma_{a,CO}|=1$. Aussi, on a une charge adaptée à 50Ω idéale et donc $\Gamma_{50} = 0$ et $|\Gamma_{a,50}| = |\Gamma_a|$.

L’efficacité de rayonnement obtenue avec ces deux approximations est présentée dans la Figure 3.12 et elle est comparée à l’efficacité obtenue avec la méthode conventionnelle et avec la méthode sans contact sans que les approximations ne soient appliquées. Lorsque l’AUT est considérée parfaitement adaptée à 50Ω sur toute la bande fréquentielle de mesure (approximation 1), l’efficacité obtenue est très proche de celle obtenue sans contact et sans les approximations (moyenne égale à 82,3 % calculée sur toute la bande fréquentielle de mesure). Cela est cohérent avec le fait que l’AUT est bien adaptée sur cette bande fréquentielle de mesure (Figure 3.9), ce qui implique que cette approximation modifie peu

TABLE 3.2 – Les valeurs du coefficient $|\Gamma_{a,c}|$ dans le cas des deux approximations proposées.

Approximation	Type de charge	Γ_a	Γ_c	$ \Gamma_{a,c} $
(1)	Circuit ouvert	0	Γ_c mesuré	$ \Gamma_c$ mesuré
	Charge adaptée (50Ω)	0	Γ_c mesuré	$ \Gamma_c$ mesuré
(2)	Circuit ouvert	Γ_a mesuré	1	1
	Charge adaptée (50Ω)	Γ_a mesuré	0	Γ_a

le résultat. En effet, lorsque Γ_a est très faible (entre 1,85 GHz et 2,5 GHz), les deux courbes se superposent. Par ailleurs, lorsqu'on considère des charges idéales, une sous estimation systématique de l'efficacité est observée (moyenne égale à 78,6 % calculée sur toute la bande fréquentielle de mesure). Ce résultat est principalement lié aux pertes introduites par le switch ainsi que par le câble situé entre le port de calibration et les charges, ces pertes n'étant pas correctement prises en compte ni compensées convenablement.

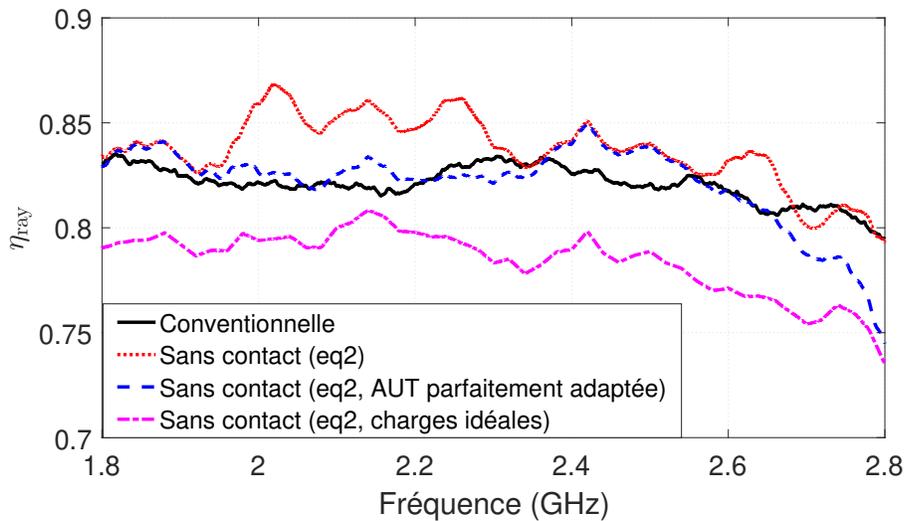


FIGURE 3.12 – Efficacité de rayonnement de l'antenne patch mesurée en CR en utilisant la méthode classique (invasive), l'approche sans contact basée sur (3.24) ainsi que les deux approximations proposées pour les coefficients de réflexion.

Dans la section suivante, nous évaluerons les incertitudes des mesures selon le processus de brassage utilisé.

3.4.4 Effet du brassage

Les résultats présentés dans les sections précédentes ont été obtenus en appliquant toutes les possibilités de brassage fournies par le setup de mesure, notamment le brassage mécanique (72 configurations), le brassage de source (17 configurations) et le brassage de

TABLE 3.3 – Moyenne, variance et écart type de l'efficacité de rayonnement de l'AUT en CR ESYCOM calculés sur la bande fréquentielle de mesure.

	Moyenne μ	Variance σ^2	Écart type σ
Conventionnelle	81,9 %	$1,05 \cdot 10^{-4}$	0,0102
Sans contact η_a^{eq1}	61,6 %	$5,18 \cdot 10^{-4}$	0,0228
Sans contact η_a^{eq2}	83,7 %	$2,67 \cdot 10^{-4}$	0,0163
Sans contact η_a^{eq2} (AUT parfaitement adaptée)	82,3 %	$2,21 \cdot 10^{-4}$	0,0149
Sans contact η_a^{eq2} (charges idéales)	78,6 %	$1,71 \cdot 10^{-4}$	0,0131

l'AUT (4 configurations). Ainsi, le setup fournit un total de 4896 configurations de mesure. L'objectif de ce brassage est de réduire les incertitudes de mesure ce qui revient à réduire l'écart-type de l'estimation de l'efficacité de rayonnement. Par ailleurs, la précision des mesures en CR repose sur la taille effective des échantillons générés par le processus de brassage, c'est-à-dire le nombre de configurations décorréliées. Afin d'estimer cette grandeur, le coefficient de corrélation ρ calculé entre les coefficients de transmission (entre l'antenne d'émission et de réception) mesurés pour les 72 positions du brasseur est calculé d'abord dans le cas d'une seule position de source et une seule position de l'AUT. La taille effective des échantillons N_{eff} peut être ensuite déduite des valeurs de ρ [54]. Les valeurs obtenues pour la taille effective des échantillons ont été calculées en fonction de la fréquence. En raison des fluctuations fréquentielles qu'elles présentent (Figure 3.13), leur valeur moyenne est calculée entre 2 GHz et 2,4 GHz. Cette estimation a été faite pour toutes les positions de la source et toutes les positions de l'AUT avant d'être moyennées. Ainsi, à partir de l'ensemble des mesures effectuées avec pour charge le circuit-ouvert, on a obtenu la taille effective moyenne des échantillons $N_{\text{eff}} = 59$. Le même traitement a été effectué à partir des résultats obtenus lorsque la charge est la charge adaptée, mais les résultats étant très similaires, seuls ceux obtenus dans le cas du CO seront présentés par la suite. Une fois la taille effective des échantillons connue, on pourra estimer par la suite l'écart-type normalisé attendu pour l'efficacité de rayonnement selon [113] comme suit

$$\frac{\sigma_{\eta_a}}{\langle \eta_a \rangle} \approx \sqrt{\frac{2}{N_{\text{eff}}}} \quad (3.25)$$

Dans notre cas ($N_{\text{eff}} = 59$), l'écart type normalisé est estimé à 0,184. Afin de valider ce résultat, l'écart-type normalisé de l'efficacité de rayonnement a été estimé à partir des résultats de mesure. Étant donné que nous avons utilisé deux types de brassage différents en plus du brassage mécanique, deux estimations de l'écart-type normalisé de l'efficacité de rayonnement peuvent être calculées : l'une en utilisant le brassage de source et l'autre en utilisant le brassage de l'AUT. D'abord, on estime $\sigma_{\eta_a}^{\text{src}}$ pour toutes les positions de source et une seule position de l'AUT. Le résultat est ensuite moyenné sur toutes les

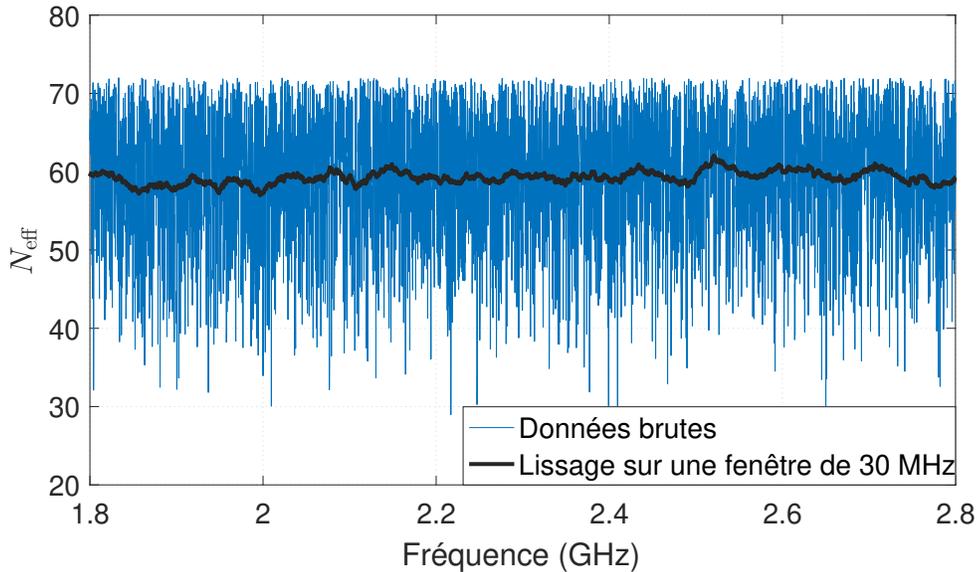


FIGURE 3.13 – N_{eff} estimée pour une configuration particulière (une position de source, une position d'AUT).

TABLE 3.4 – Moyenne et écart-type normalisé de l'efficacité de rayonnement en CR ESY-COM.

	Écart-type normalisé
Prédiction	0,184
Brassage de source	0,173
Brassage de l'AUT	0,186

positions de l'AUT $\langle \sigma_{\eta_a}^{p_{\text{src}}} \rangle_{p_{\text{aut}}}$. De la même façon, nous avons calculé l'écart-type pour toutes les positions de l'AUT et une seule position de source $\sigma_{\eta_a}^{p_{\text{AUT}}}$ avant de moyenniser cette valeur sur les positions de source $\langle \sigma_{\eta_a}^{p_{\text{AUT}}} \rangle_{p_{\text{src}}}$. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3.4. Pour les deux cas de brassage, les estimations sont en très bonne concordance avec la prédiction théorique (erreur relative de 6 % pour l'estimation avec le brassage de source et 1 % avec le brassage de l'AUT). Ce résultat confirme que l'écart-type normalisé peut être prédit directement à partir de N_{eff} . Dans notre cas de mesure, on a évalué 10 positions de source décorréelées parmi 17 en utilisant le même processus que celui utilisé pour le brassage mécanique. Le nombre de positions de l'AUT, à savoir 4, est trop faible pour pouvoir estimer la taille effective des échantillons, et on considère ici que ces 4 positions sont décorréelées. Le nombre total de configurations décorréelées est donc $4 \times 10 \times 59 = 2360$ positions. Selon (3.25), cela est équivalent à un écart-type normalisé égal à 0,029.

Ainsi, les résultats obtenus pour l'efficacité de rayonnement de l'AUT estimée avec la nouvelle méthode sans contact en CR ESYCOM sont en très bonne concordance avec le résultat obtenu en utilisant la méthode conventionnelle. De plus, l'étude menée sur le nombre d'échantillons décorrélés dans la CR ESYCOM dans le cas de différents types de brassage a montré que ce nombre était suffisant pour une estimation précise, ce qui se traduit par le faible écart-type normalisé (Tableau 3.4). Ces résultats confirment que le choix d'utiliser une seule AUT était suffisant pour valider la technique proposée dans la CR ESYCOM. Toutefois, l'ajout d'autres antennes non connectées identiques aurait été possible pour augmenter l'effet de ces antennes sur les résultats de mesure, ce qui aurait pu être nécessaire dans un environnement de mesure moins favorable ou pour une antenne moins efficace. Ce cas est étudié dans la section suivante.

3.4.5 Etude de l'effet de la présence de plusieurs AUTs en CR sur le facteur de qualité

Bien qu'une seule AUT ait été nécessaire lors de la validation de notre méthode de mesure, nous nous intéressons ici à l'utilisation de plusieurs AUTs identiques afin d'augmenter l'impact de la variation de charge sur le facteur de qualité de la CR. L'idée consiste à comparer la variation du facteur de qualité de la CR lorsqu'elle est chargée par 1 AUT ou par 4 AUTs. Le setup de mesure est identique à celui présenté sur la Figure 3.6 : CR et antennes de transmission identiques mais le nombre d'AUT (antenne patch présentée sur la Figure 2.3) varie cette fois de 1 à 4. Chaque AUT est reliée à un switch mécanique piloté à distance (via un câble coaxial de 50 cm) permettant de choisir entre deux états de charge (50Ω et CO). Il est à noter que les 4 AUTs, les 4 switches, les 4 câbles et les deux jeux de 4 charges sont identiques. Tout d'abord, dans le premier cas de mesure, une seule AUT est installée dans la chambre. Dans ce cas, quatre mesures sont effectuées pour quatre positions différentes de l'AUT et les quatre mesures sont exploitées par la suite pour le calcul du facteur de qualité. Dans le deuxième cas de mesure, l'antenne AUT est remplacée par quatre AUTs identiques et trois mesures sont effectuées, chacune pour une configuration différente des quatre AUTs. L'ensemble des trois mesures est ensuite exploité pour le calcul du facteur de qualité. En plus des mesures présentées ci-dessus, une mesure sans les AUTs mais en gardant les switches et les câbles à l'intérieur de la CR est faite dans les deux cas de mesure (1 AUT et 4 AUTs). Le facteur de qualité de la CR, calculé pour les différentes mesures, est présenté sur la Figure 3.14.

A gauche, les résultats présentés concernent le cas de mesure avec une seule AUT et à droite, le cas de mesure avec 4 AUTs identiques. Les courbes sont aussi comparées aux mesures sans les AUTs (mais en laissant les switches et les câbles à l'intérieur de la cavité) dans les deux cas. Les résultats sont cohérents, les facteurs de qualité obtenus sans AUTs sont plus élevés qu'en présence des AUT, et ce y compris lorsque les antennes sont chargées par un circuit-ouvert : ceci traduit les pertes introduites par la présence des antennes qui proviennent uniquement de la structure de l'antenne lorsque celle-ci est en circuit-ouvert. De plus, le facteur de qualité présente les valeurs les plus faibles lorsque les AUTs sont connectées à des charges adaptées, puisque l'énergie absorbée par la charge est

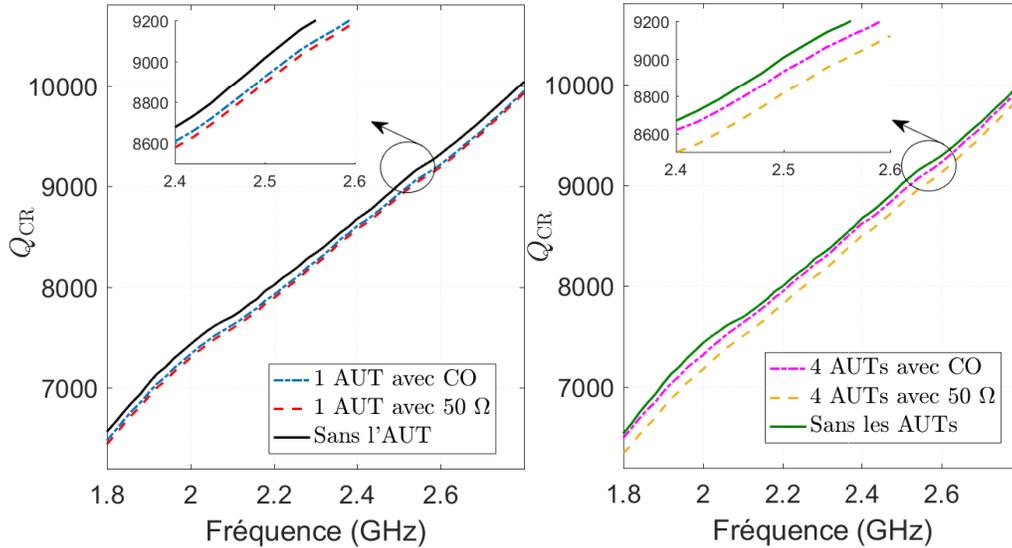


FIGURE 3.14 – Facteur de qualité de la CR ESYCOM dans deux cas de mesures : à gauche, le cas où 1 AUT est utilisée, à droite, le cas où 4 AUT sont utilisées.

alors maximale. Afin de mieux évaluer la différence de facteur de qualité liée à l'efficacité de rayonnement de l'antenne, nous calculons dans les deux cas les variations relatives entre les facteurs de qualité obtenus pour des antennes chargées par un circuit ouvert et une charge adaptée 50Ω (Figure 3.15).

Les courbes des variations relatives des facteurs de qualité en fonction de la fréquence montrent clairement une variation plus importante lorsque quatre AUTs sont utilisées. A la fréquence de 2,2 GHz par exemple, la variation $\Delta_{CO,50\Omega}^{4AUT}$ obtenue avec 4 AUTs est 4 fois plus élevée que $\Delta_{CO,50\Omega}^{1AUT}$ obtenue avec une seule AUT. Par ailleurs, la différence relative entre facteurs de qualité diminue avec la fréquence, ce qui est cohérent avec le fait qu'à hautes fréquences, l'effet des antennes (de mesure ou AUT) sur le facteur de qualité de la CR devient négligeable. Tous ces résultats confirment donc l'hypothèse posée précédemment sur le fait que l'utilisation de plusieurs AUTs permet d'exacerber le phénomène qu'on souhaite étudier. En se basant sur ce principe, l'efficacité de l'antenne patch déjà mesurée dans la section 3.4.1 va être estimée dans une CR plus petite et donc possédant un facteur de qualité plus faible ; dans ce cas, 2 AUTs seront utilisées pour une meilleure sensibilité de la mesure. Les résultats obtenus sont présentés dans la section suivante.

3.5 Validation expérimentale (CR Langevin)

3.5.1 Configuration de mesure

On souhaite valider la nouvelle méthode de mesure d'efficacité d'antenne sans contact dans une autre CR plus petite, à savoir la CR de l'Institut Langevin (Figure 3.16). Elle a

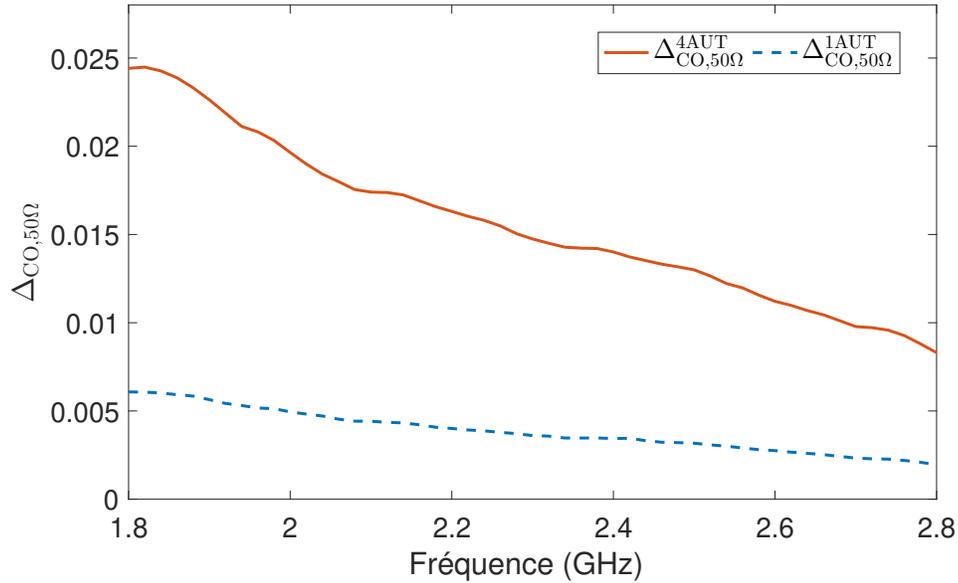


FIGURE 3.15 – Variations relatives entre les facteurs de qualité lorsque les AUTs sont chargées par un circuit ouvert et une charge adaptée, dans les cas de 1 AUT et 4 AUTs dans la CR ESYCOM.

un volume de 1 m^3 ce qui est nettement plus petit que celui de la CR ESYCOM, ainsi, elle possède un facteur de qualité plus faible. Cette CR est dotée d'un brasseur que l'on fait tourner, pour cette mesure, avec un pas de 5° . Des mesures sont prélevées pour chaque position (72 mesures sur un tour complet). On résume dans le Tableau 3.5 les propriétés caractéristiques de la CR de l'Institut Langevin.

TABLE 3.5 – Paramètres caractéristiques de la CR de l'Institut Langevin.

Paramètre	Description
Dimensions de la CR	73 cm x 96 cm x 146 cm
Bande de cohérence moyenne entre [1,7 GHz-2,7 GHz] et à (2,2 GHz)	$\langle B_c \rangle = 1,36 \text{ MHz}$ ($B_c = 1,34 \text{ MHz}$)
Nombre de positions décorréliées du brasseur estimé entre [1,7 GHz-2,7 GHz] et à (2,2 GHz)	21 (21)
Nombre d'échantillons décorréliés moyen du S_{11} estimé sur un tour de brasseur entre [1,7 GHz-2,7 GHz] et à (2,2 GHz)	17 (14)

Quatre antennes patch identiques sont utilisées dans cette mesure : 2 antennes en transmission et 2 en tant qu'AUTs non connectées (Figure 3.17). En effet, la petite dimension

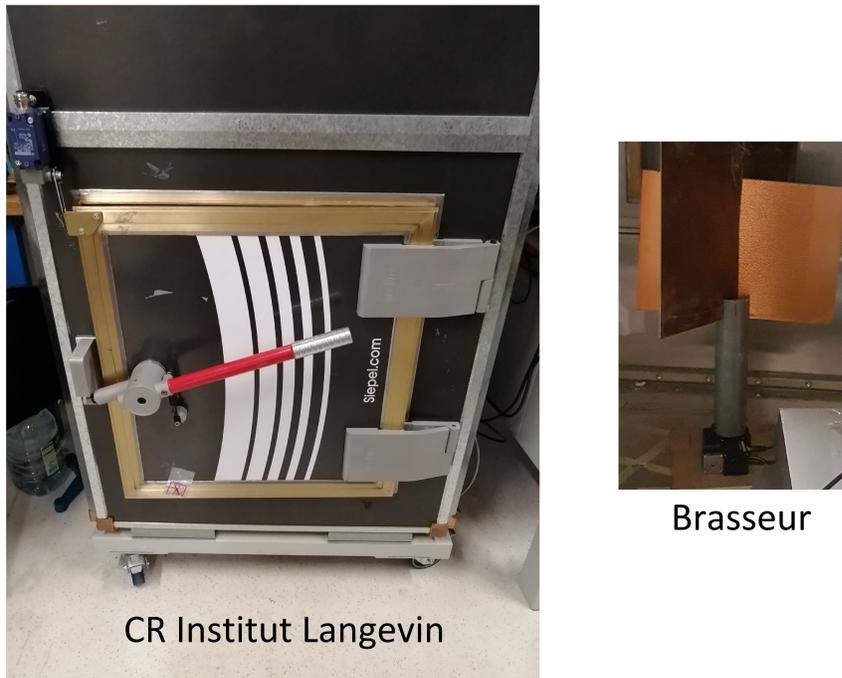


FIGURE 3.16 – CR du laboratoire de l'Institut Langevin et son brasseur.

de cette CR ne permet pas d'y insérer les antennes log-périodique et cornet précédemment utilisées. Ces antennes sont les mêmes que celles utilisées dans la section 3.4.5. Concernant la mesure chargée (en présence des AUTs à l'intérieur de la CR), on utilise deux switches identiques. Sur chaque switch est connectée une AUT à l'aide d'un câble coaxial de longueur 30 cm et sur les ports des deux switches sont connectées les impédances de charge correspondantes : CO et 50Ω (Figure 3.7). Afin d'effectuer un brassage de source en plus du brassage mécanique, les antennes de transmission sont fixées sur des supports qui peuvent se déplacer sur des glissières (rails) commandées de l'extérieur (sans ouvrir la chambre à chaque mesure). Ainsi, pour chaque mesure, on fait une translation de l'une des antennes de mesure (Figure 3.17). Trois positions sur la glissière sont considérées pour chaque antenne (positions 0 cm, 15 cm et 29 cm). Afin d'avoir le maximum de combinaisons possible, pour chaque position d'une antenne de mesure, on déplace la seconde antenne sur les trois positions et une mesure est prélevée à chaque fois à l'aide d'un VNA Anritsu. Cette procédure nous permet d'avoir un total de 9 mesures différentes dont chacune correspond à 72 configurations différentes du brasseur. On résume dans le Tableau 3.6 les paramètres fixés pour cette mesure. La configuration de mesure est illustrée dans la Figure 3.17.

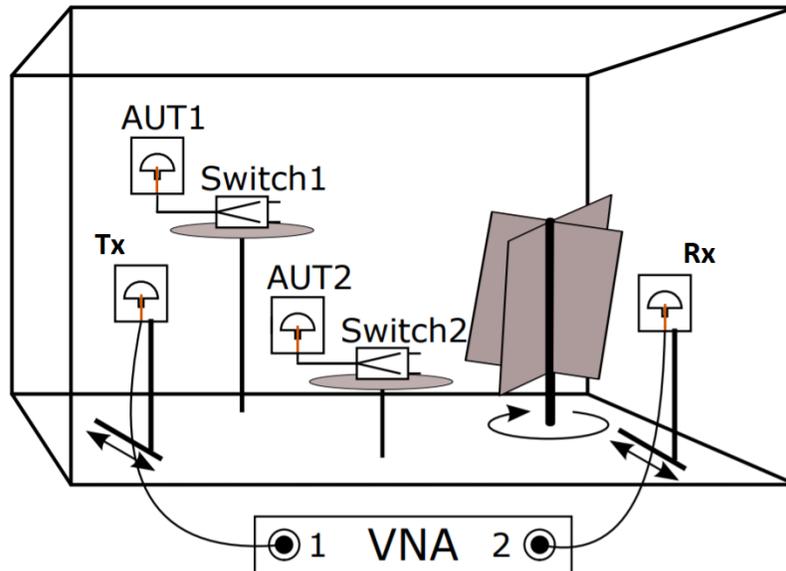


FIGURE 3.17 – Configuration de la mesure sans contact dans la CR de l’Institut Langevin.

TABLE 3.6 – Paramètres de la mesure sans contact en CR de l’Institut Langevin.

Paramètre	Description
Bande fréquentielle de mesure	[1,2 GHz - 3,2 GHz]
Nombre de points fréquentiels de mesure	10001
Antennes de transmission	Deux antennes patch identiques
Antennes de charge (AUTs)	Deux antennes patch identiques
Configurations de mesure	9 configurations x 72 positions de brasseur
Charges connectées aux AUTs	a) Circuit ouvert (CO) b) Charge adaptée (50 Ω)
Étapes de mesure	1- Mesure à vide 2- Mesure chargée (CO, 50 Ω)

3.5.2 Mesure conventionnelle

Avant de réaliser des mesures sans contact, il est nécessaire d’évaluer l’efficacité de l’antenne patch avec la méthode conventionnelle [46] dans cette nouvelle CR. En effet, la taille de la CR (auquel est fortement lié le facteur de qualité) ainsi que la qualité du brassage qui y est réalisée influent sur les résultats de mesure. De plus, nous présentons également ici les mesures des coefficients de réflexion des antennes utilisées.

La moyenne du coefficient de réflexion Γ_a de l'antenne patch sur un tour de brasseur est calculée pour les neuf configurations des deux antennes de transmission (Figure 3.18). Les neuf configurations nous permettent d'appliquer un brassage de source afin d'améliorer la précision de la mesure de l'efficacité par la suite. Aussi, le calcul de la moyenne du Γ_a sur les 9 configurations réduit les fluctuations en fonction de la fréquence et améliore la précision du résultat obtenu.

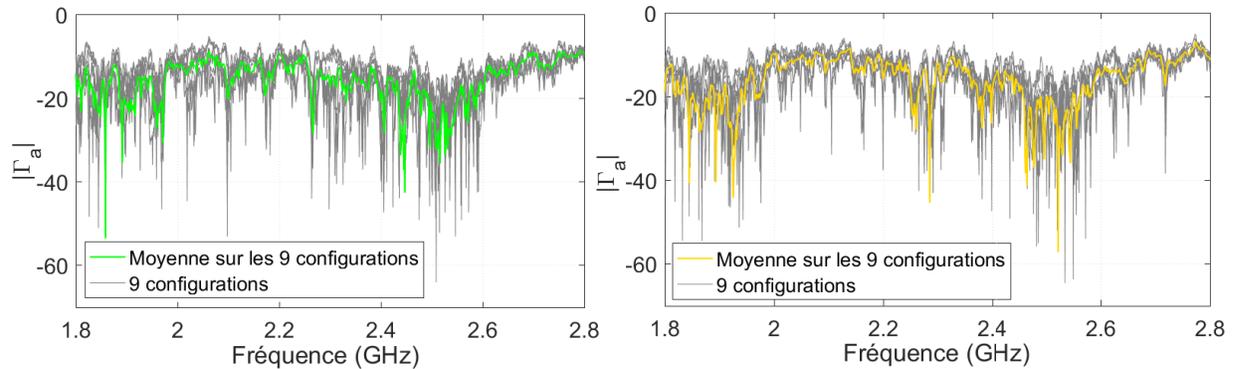


FIGURE 3.18 – Module du coefficient de réflexion des antennes de transmission pour les 9 configurations ainsi qu'en tirant profit des 9 configurations (à gauche : patch 1, à droite : patch 2).

Les moyennes du module et de la phase des coefficients de réflexion des antennes patch de transmission sont présentées dans la Figure 3.19. On remarque bien que les moyennes des deux coefficients sont similaires en module et en phase. Ce résultat confirme le fonctionnement identique des deux antennes.

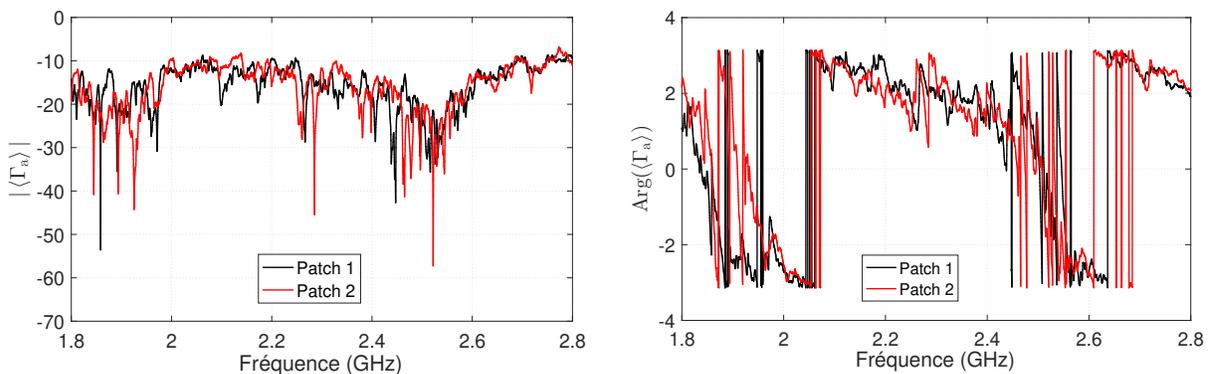


FIGURE 3.19 – Moyenne du coefficient de réflexion des deux antennes patch calculée sur les 9 configurations (à gauche : le module, à droite : la phase).

Par conséquent, en exploitant le fait que les deux antennes de transmission sont identiques et de plus sont identiques aux antennes de charge, les résultats obtenus pour les deux moyennes des coefficients de réflexion (Figure 3.19) peuvent être aussi moyennés.

Ainsi, une seule estimation du Γ_a est obtenue (Figure 3.20). On observe toujours des fluctuations sur la phase du Γ_a obtenue après cette moyenne mais avec des amplitudes moins importantes (Figure 3.21).

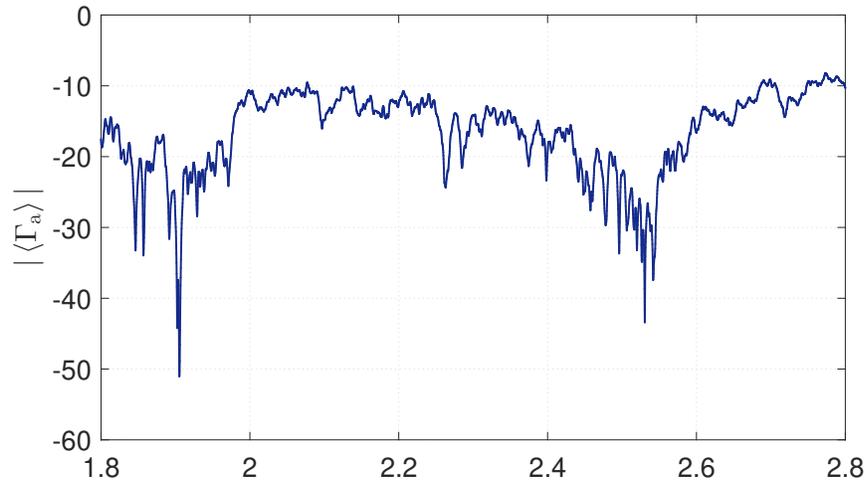


FIGURE 3.20 – Module du coefficient de réflexion de référence de l'antenne patch Γ_a .

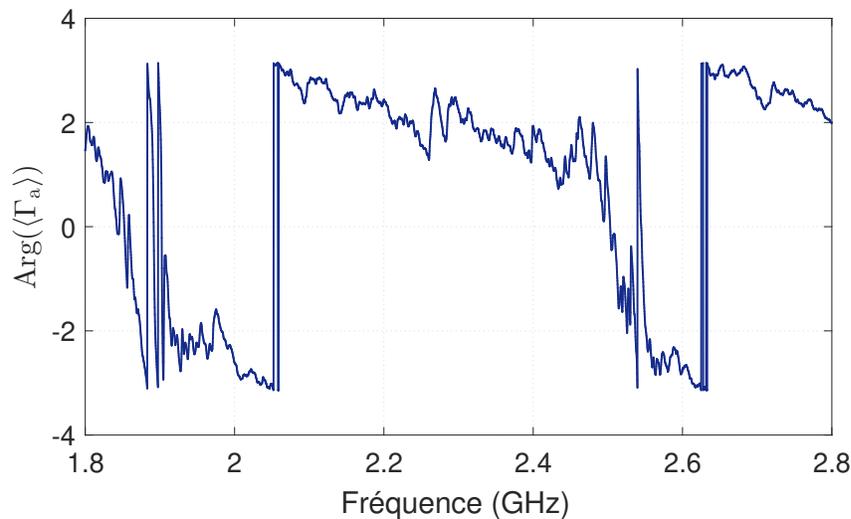


FIGURE 3.21 – Phase du coefficient de réflexion de référence de l'antenne patch Γ_a .

L'antenne patch qu'on souhaite caractériser est donc considérée bien adaptée ($|\Gamma_a| < -10$ dB) sur la bande fréquentielle [1,8 GHz - 2,8 GHz]. Elle est aussi adaptée à -15 dB ($|\Gamma_a| < -15$ dB) pour les bandes fréquentielles [1,8 GHz - 1,97 GHz] et [2,35 GHz - 2,6 GHz].

La mesure conventionnelle nous permet d'avoir une estimation du Γ_a ainsi qu'une estimation de l'efficacité de l'antenne patch en appliquant une méthode de mesure invasive classique (avec les antennes connectées). Pour la détermination de l'efficacité, il faut

d'abord estimer le facteur de qualité de la CR dans le cas de la mesure à vide (conventionnelle). En appliquant le brassage de source sur les 9 configurations de mesure combiné au brassage mécanique avec 72 positions du brasseur, le facteur de qualité de la CR est calculé. La même méthode de calcul que celle présentée dans la Section 2.3.2 est utilisée et le résultat obtenu pour le facteur de qualité est présenté sur la Figure 3.22.

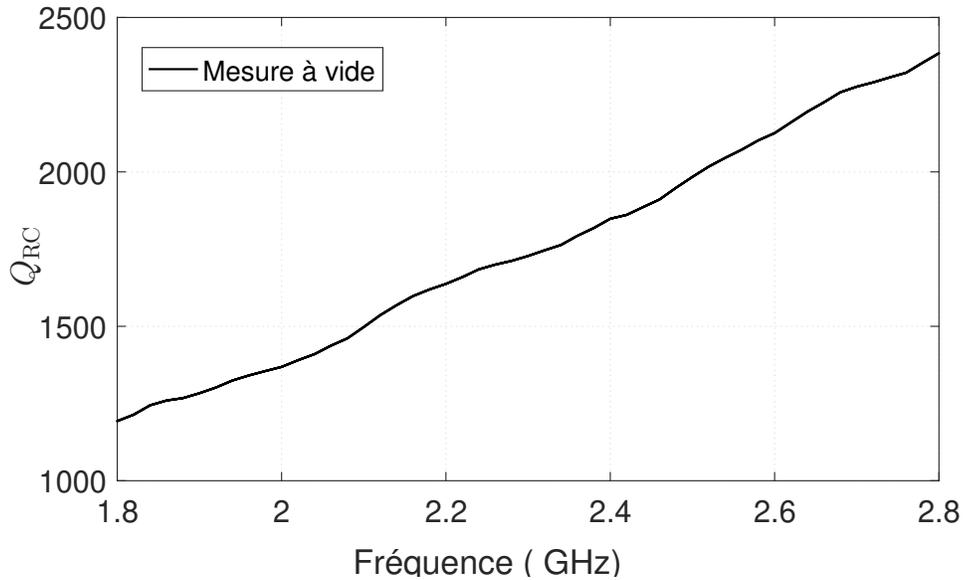


FIGURE 3.22 – Facteur de qualité de la CR à vide.

On calcule l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch dans le cas de la mesure à vide en utilisant la méthode classique (antennes connectées) déjà détaillée dans la section 2.3.1. Le résultat obtenu pour l'efficacité des deux antennes de transmission est présenté dans la Figure 3.23.

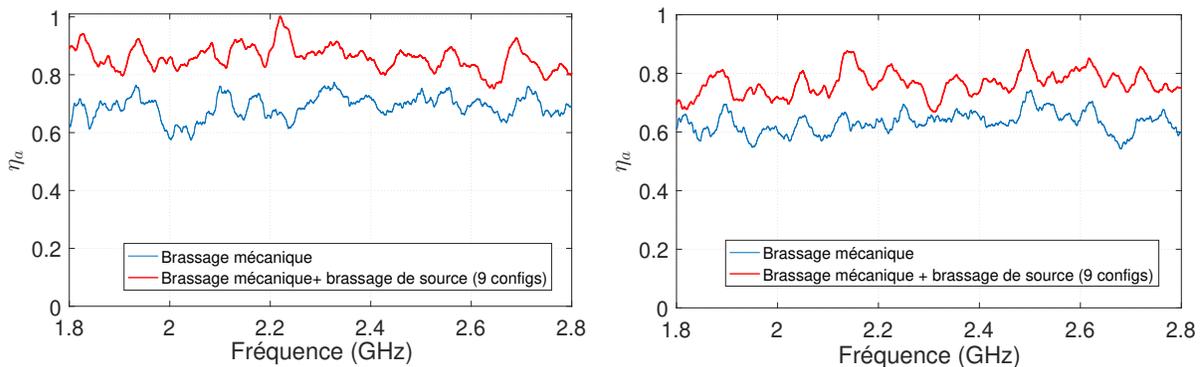


FIGURE 3.23 – Efficacité de rayonnement des antennes patch à vide avec et sans brassage de source en plus du brassage mécanique (à gauche : patch 1, à droite : patch 2).

On remarque que l'efficacité est mieux estimée lorsque le brassage de source (9 configurations) est combiné au brassage mécanique (72 positions du brasseur). Lorsqu'on exploite

une seule configuration de mesure (brassage mécanique uniquement), l'efficacité d'antenne obtenue est sous-estimée. Le même phénomène est observé sur la mesure de l'efficacité des deux antennes.

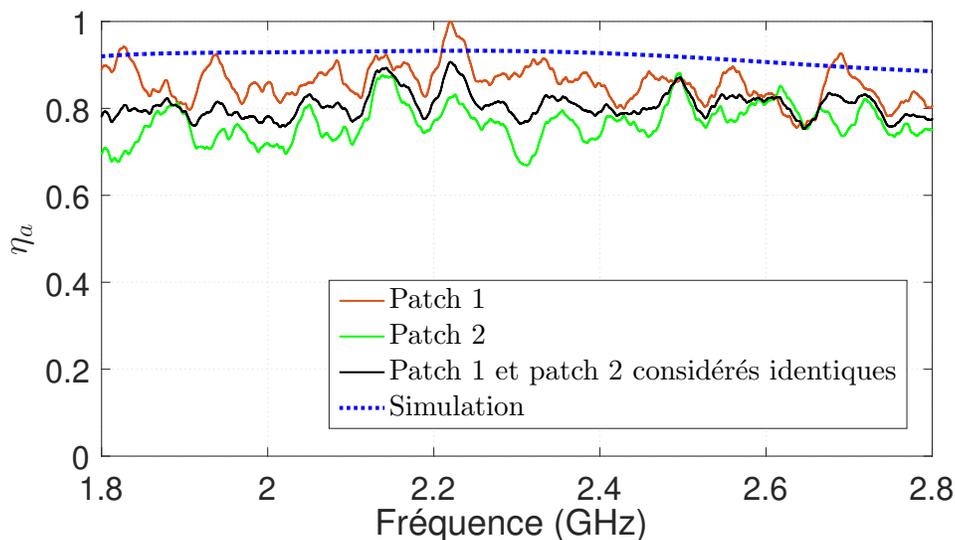


FIGURE 3.24 – Efficacité de rayonnement de référence à vide (en utilisant la méthode conventionnelle), et comparaison avec l'efficacité simulée.

La mesure de l'efficacité d'antenne considérée comme référence correspond à l'efficacité calculée à vide (avec la méthode conventionnelle invasive) en tenant compte des 9 configurations (en appliquant le brassage de source) et des 2 antennes (courbe noire sur la Figure 3.24) en calculant la moyenne des efficacités des deux antennes. Le résultat obtenu est comparé à celui issu de la simulation à l'aide du logiciel HFSS d'ANSYS. La moyenne de l'efficacité des deux antennes présente moins de fluctuations que pour chaque antenne prise séparément (le nombre de configurations ayant de cette façon été artificiellement augmenté), et son allure est en cohérence avec celle de l'efficacité simulée.

3.5.3 Mesure sans contact

Avant d'estimer l'efficacité de l'AUT à l'aide de l'approche sans contact, nous mesurons à l'aide d'un VNA les coefficients de réflexion des deux impédances de charge Γ_{CO} et Γ_{50} sur les 2 switches. Le module et la phase de ces coefficients de réflexion sont présentés sur la Figure 3.25 et la Figure 3.26 respectivement.

Nous observons que le module des charges Γ_c connectées aux deux switches ainsi que leurs phases sont très similaires. Cela nous permet de moyenniser les résultats obtenus pour les deux switches afin d'avoir une seule valeur pour le Γ_c que nous utiliserons par la suite. Par ailleurs, nous avons déjà mesuré Γ_a (Figure 3.20) et nous pouvons ainsi en déduire $\Gamma_{a,c}$ avec la formule (3.14). Le résultat obtenu pour les deux switches est présenté sur la Figure 3.27.

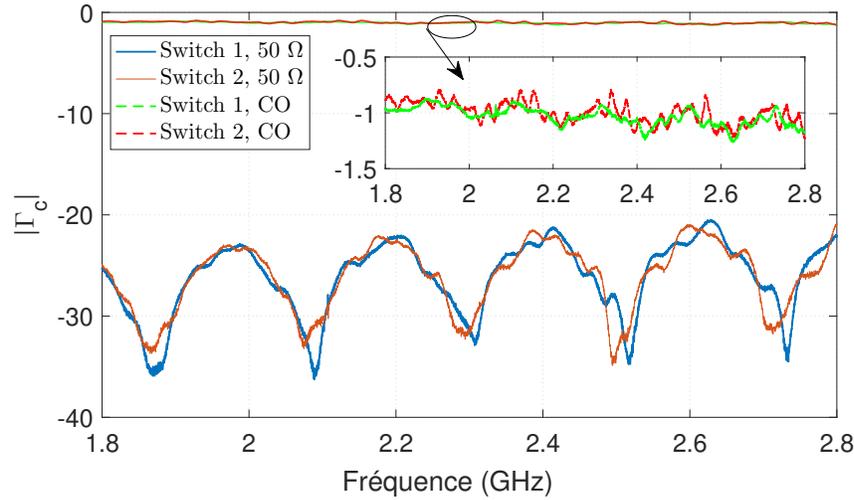


FIGURE 3.25 – Module du coefficient de réflexion des charges Γ_c connectées aux deux switches.

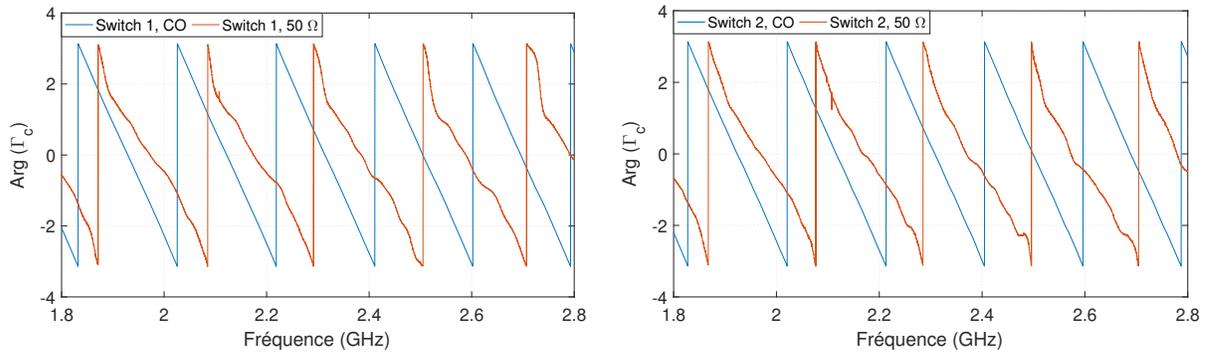


FIGURE 3.26 – Phase du coefficient de réflexion des charges Γ_c connectées aux deux switches (à gauche : switch 1, à droite : switch 2).

Les deux approximations proposées dans la section 3.4.3 sont appliquées aussi dans le cas de cette mesure. Pour rappel, elles consistent à considérer :

1. Charges avec Γ_c idéaux : On suppose que les charges mesurées précédemment sont idéales, cela revient à remplacer leur mesure par les valeurs idéales présentées dans le Tableau 3.2 ;
2. Antenne adaptée sur 50Ω : On suppose que l'antenne est parfaitement adaptée à 50Ω sur toute la plage fréquentielle de mesure, cela revient à remplacer Γ_a par 0 comme présenté dans le Tableau 3.2.

Comme déjà détaillé pour la mesure sans contact en CR ESYCOM, deux charges sont utilisées : un circuit ouvert et une charge adaptée (50Ω). La détermination de l'efficacité des deux antennes de charge est basée sur les équations (3.19) et (3.21). Pour cela, il faut calculer le facteur de qualité de la CR dans les deux cas de charge.

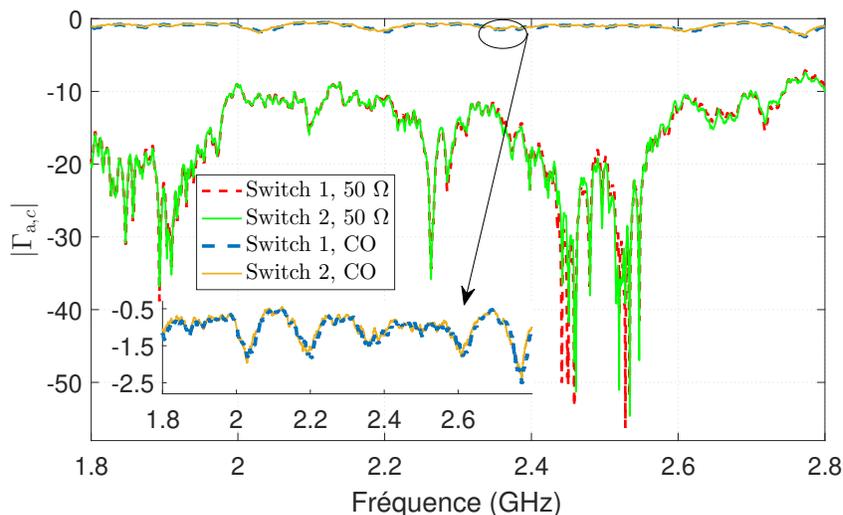


FIGURE 3.27 – Module du coefficient de réflexion des charges vues par l'antenne ($\Gamma_{a,c}$).

Dans la Figure 3.28, on présente le facteur de qualité de la CR obtenu dans le cas de la mesure à vide, de la CR chargée par les deux AUTs connectées à des circuits ouverts et de celui où les AUTs sont connectées à des charges adaptées.

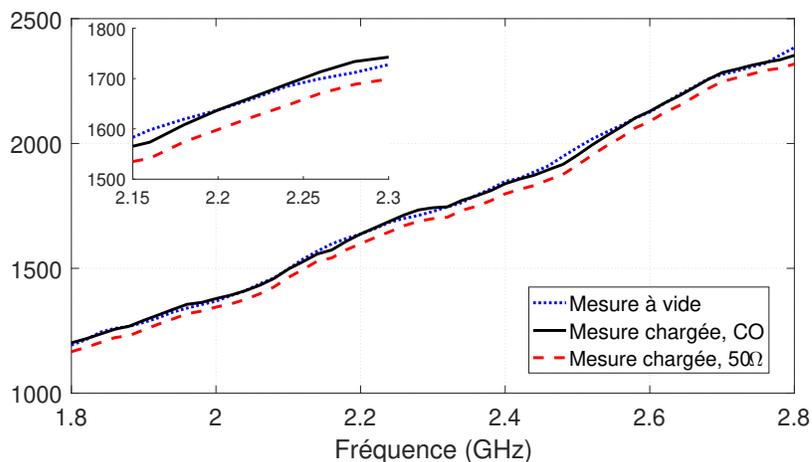


FIGURE 3.28 – Facteurs de qualité de la CR dans les deux cas de charge comparés au cas à vide.

Comme attendu, on s'aperçoit que les pertes sont plus importantes avec les charges adaptées sur l'ensemble de la bande fréquentielle (le facteur de qualité est donc le plus faible). Par ailleurs, alors que les pertes les moins importantes étaient attendues pour la mesure à vide, les courbes relatives à la mesure à vide et à celle avec des AUTs chargées par un circuit ouvert se chevauchent et se croisent plusieurs fois ; ceci est dû aux fluctuations

de l'estimation du facteur de qualité et montre l'imprécision de la mesure. Cela est précisément la raison pour laquelle la méthode de mesure sans contact proposée a été pensée pour éviter cette mesure à vide. On rappelle que ceci n'était pas le cas dans l'approche initialement proposée et présentée dans la section 3.2.3, puisque cette approche nécessite la détermination du facteur de qualité à vide de la CR. L'efficacité de rayonnement mesurée en utilisant le setup sans contact est comparée à l'efficacité obtenue précédemment dans le cas de la mesure conventionnelle. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.29 en fonction de la fréquence.

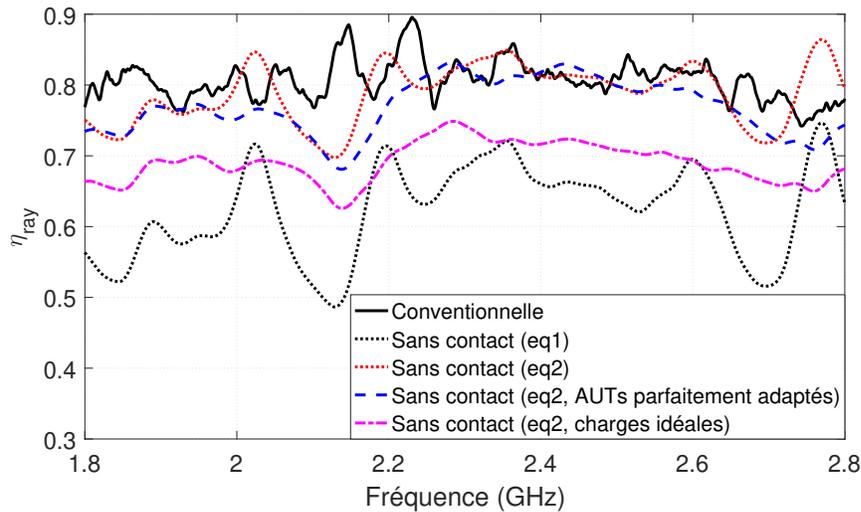


FIGURE 3.29 – Efficacité de rayonnement de l'antenne patch mesurée en CR en utilisant la méthode conventionnelle (invasive), l'approche sans contact (3.23) et l'approche sans contact (3.24) avec les approximations proposées pour les coefficients de réflexion.

Étant donné que les valeurs d'efficacité sont quasiment constantes dans la bande de fréquence, nous calculons les valeurs moyennes ainsi que les variances et les écart-types de l'efficacité pour les différentes mesures. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.7.

TABLE 3.7 – Moyenne, variance et écart-type de l'efficacité de rayonnement des AUTs en CR de l'Institut Langevin.

	Moyenne μ	Variance σ^2	Écart-type σ
Conventionnelle	80,9 %	$6,43 \cdot 10^{-4}$	0,0254
Sans contact η_a^{eq2}	78,9 %	$18,0 \cdot 10^{-4}$	0,0424
Sans contact η_a^{eq2} (AUTs parfaitement adaptés)	76,9 %	$15,0 \cdot 10^{-4}$	0,0387
Sans contact η_a^{eq2} (charges idéales)	69,0 %	$7,74 \cdot 10^{-4}$	0,0278

Les résultats obtenus et présentés dans la Figure 3.28 ainsi que dans le Tableau 3.7

confirment ceux obtenus dans la section 3.4.3. En effet, on obtient des valeurs d'efficacité très similaires entre le cas de la mesure conventionnelle et le cas de la mesure sans contact basée sur (3.21) (différence absolue moyenne de 2 % et différence relative moyenne de 6 %). Comme précédemment, l'écart-type et donc la variance en fonction de la fréquence sont plus importants dans le cas de la mesure sans contact. Par ailleurs, nous remarquons que les valeurs de l'écart-type sont plus élevées que dans le cas des mesures dans la CR ESYCOM. Afin d'expliquer cela, nous calculons le nombre moyen de positions de brasseur décorrélés (Tableau 3.5). Il est estimé à 21 positions autour de 2 GHz. Aussi, en utilisant la même technique, on estime à 5,4 le nombre de configurations d'antenne décorrélés. Ainsi, le nombre total de configurations décorrélés dans la CR de l'Institut Langevin est estimé à 113 configurations, ce qui est très inférieur au nombre de configurations décorrélés estimées dans la CR ESYCOM (2360 configurations). Ceci explique en effet l'écart-type plus élevé observé dans la CR de l'Institut Langevin.

L'efficacité obtenue avec la méthode sans contact basée sur (3.19) n'est pas très cohérente avec celle obtenue avec la méthode conventionnelle, ce qui confirme une nouvelle fois que le modèle de facteur de qualité d'antenne utilisé pour (3.19) n'est pas adapté. Les mêmes approximations que dans la section 3.4.3 concernant les coefficients de réflexion ont été appliquées. Lorsque les AUTs sont considérées parfaitement adaptées à 50Ω , le résultat de l'efficacité est sous-estimé de 2 % en moyenne alors qu'avec l'approximation où les charges sont considérées idéales, la sous-estimation est de 10 %. Ces résultats montrent que considérer l'antenne comme parfaitement adaptée modifie peu le résultat (car l'antenne est déjà bien adaptée), ce qui permet d'avoir une bonne estimation de l'efficacité sans mesure préalable de l'impédance d'entrée de l'antenne.

Conclusion

Dans ce chapitre, notre travail s'est focalisé sur la caractérisation sans contact de l'efficacité d'antenne en CR en proposant une méthode originale. Le but de cette approche est de supprimer la présence des câbles d'excitation sur l'AUT, afin d'éviter qu'ils perturbent le rayonnement de l'antenne. En se basant sur les travaux présentés dans [122] et [120], on a proposé une nouvelle méthode de détermination de l'efficacité d'antenne sans contact en CR basée sur l'estimation des pertes introduites par ces antennes lorsqu'une modulation d'impédance est appliquée, ce qui est effectué via la détermination du facteur de qualité de la CR. Deux cas de charge ont été considérés avec un circuit ouvert et une charge adaptée, et une mesure précise des deux impédances de charge a par ailleurs été effectuée. La sensibilité de l'estimation de l'efficacité aux valeurs de $\Gamma_{a,c}$ ainsi qu'à la désadaptation de l'antenne (AUT) a aussi été étudiée et pour cela deux approximations ont été proposées. Cette méthode a été validée dans deux CRs différentes de volumes respectifs 1 m^3 et 19 m^3 . Les résultats obtenus pour l'efficacité sont, dans les deux CRs, en cohérence avec la mesure de référence (mesure conventionnelle) avec une différence relative moyenne de 2,3 % dans le cas de la grande CR et 6 % dans le cas de la petite CR. L'avantage de la méthode proposée est qu'elle est précise car elle ne modifie pas l'environnement de mesure

entre deux mesures. Cela est assuré grâce à l'utilisation de switches commandés à distance pour changer les impédances de charge des antennes à caractériser mais aussi grâce au fait que la mesure à vide n'est pas requise dans le cas de cette méthode et donc qu'il n'y a aucune nécessité d'ouvrir la CR entre les mesures. La méthode sans contact proposée ouvre la voie à la caractérisation d'antennes miniatures et enfouies grâce au setup non invasif.

Conclusion générale

Les travaux menés dans cette thèse avaient pour objectif de proposer des solutions pour une caractérisation non biaisée de l'efficacité d'antenne en chambre réverbérante. Cela nous a amenés à étudier de manière approfondie plusieurs aspects de la caractérisation d'antenne en CR. D'une part, nous avons étudié l'apport de différents types de brassage dans l'amélioration de l'estimation de l'efficacité d'antenne. D'autre part, une nouvelle méthode de mesure sans contact a été proposée ; celle-ci s'adresse particulièrement aux antennes miniatures ou enfouies pour permettre une caractérisation non-invasive et vise à remplacer les méthodes conventionnelles non adaptées à ces antennes.

Le premier chapitre de ce manuscrit comporte une synthèse des méthodes de caractérisation d'antenne. Après des rappels sur les propriétés électriques et de rayonnement des antennes au début du chapitre, nous nous sommes focalisés par la suite sur l'efficacité de rayonnement. Un état de l'art des différentes techniques de mesure de l'efficacité d'antenne a été présenté, avec les méthodes utilisant les CAs, la méthode Wheeler cap ainsi que les méthodes de mesure utilisant les CRs. Ces dernières présentent l'avantage d'être moins onéreuses que les CAs et sont particulièrement bien adaptées à la mesure de l'efficacité de rayonnement car, contrairement au cas de la CA, cette mesure ne nécessite pas de faire tourner l'antenne sous test pour collecter l'énergie rayonnée dans les différentes directions. Les différentes propriétés des CRs ont ensuite été présentées, à savoir les propriétés statistiques des champs dans une CR idéale qui vérifient les conditions d'homogénéité et d'isotropie, ainsi que les propriétés intrinsèques d'une CR réelle telles que le coefficient de corrélation entre des échantillons de mesure et le nombre d'échantillons décorrélés. Lors d'une mesure en CR, la bonne estimation du paramètre d'intérêt nécessite un nombre suffisant de configurations de mesure décorrélées. Ceci est assuré grâce à différents processus de brassage et nous avons ainsi détaillé les principales techniques de brassage de champ en CR. Les techniques de mesure de l'efficacité de rayonnement d'antenne en CR ont ensuite été présentées en les regroupant dans deux catégories selon qu'elles nécessitent ou non l'utilisation d'une antenne de référence. Dans le cas où une antenne de référence est utilisée, son efficacité de rayonnement, connue, est généralement supposée constante sur toute la bande fréquentielle de mesure. Parmi les méthodes qui ne nécessitent pas d'antenne de référence, se trouvent trois approches basées sur l'utilisation d'une, deux ou trois antennes de mesure. Bien qu'il ait été montré que ces méthodes conduisent à des résultats cohérents et précis, ces méthodes ne sont pas adaptées aux antennes miniatures

en raison du dispositif de mesure invasif. En effet, la taille des antennes miniatures devient comparable à la taille des câbles et des autres éléments constituant le banc de mesure. Les solutions proposées dans la littérature pour s'affranchir de ce problème ont ainsi été présentées ; elles se fondent sur des mesures en rétro-diffusion des antennes effectuées en CA ou en CR.

Le deuxième chapitre expose des résultats expérimentaux d'évaluation de l'efficacité de rayonnement d'antenne en CR, obtenus dans différentes conditions de mesure. Dans la première partie du chapitre, nous avons comparé l'efficacité de rayonnement d'une antenne estimée avec une méthode basée sur l'utilisation d'une antenne de référence avec celle obtenue via une méthode ne nécessitant pas d'antenne de référence. Pour cette dernière, nous avons choisi, dans un souci de compromis entre précision et temps de mesure, la méthode basée sur l'utilisation de deux antennes. Les résultats obtenus montrent l'existence d'un biais dans l'estimation de l'efficacité entre les deux méthodes de mesure. En effet, l'efficacité de rayonnement de l'antenne estimée avec la méthode utilisant l'antenne de référence présente, dans le cas considéré, une sous-estimation sur la bande fréquentielle la plus haute. Pour expliquer ce résultat, nous avons vérifié la valeur de l'efficacité de l'antenne de référence à l'aide d'une mesure en CR en utilisant la méthode des deux antennes (sans antenne de référence), et nous nous sommes aperçus que l'efficacité estimée pour cette antenne de référence diverge de sa valeur supposée constante à partir de la même fréquence que celle pour laquelle un écart entre les deux méthodes est observé. Cela signifie qu'une estimation préalable de l'efficacité de l'antenne de référence est nécessaire pour que l'approche basée sur cette antenne conduise à des résultats précis. Ainsi, l'hypothèse d'une efficacité de rayonnement de l'antenne de référence constante sur la bande de fréquence, lorsqu'elle n'est pas vérifiée, peut induire un biais dans l'estimation de l'efficacité de rayonnement de l'antenne sous test. Ensuite, la deuxième partie de ce chapitre a mis en lumière le lien entre la composante non brassée du champ et la précision de l'estimation de l'efficacité d'antenne en CR. D'abord, nous avons proposé une nouvelle formulation des coefficients de réflexion et de transmission de l'antenne en CR, qui prend en compte la composante du champ qui n'a pas été en interaction avec le brasseur et qui a pour origine les trajets directs et/ou les réflexions spéculaires sur les parois de la CR. Nous avons montré, grâce à cette nouvelle formulation, que les différents processus de brassage ont des effets différents sur les moyennes d'ensemble des coefficients mesurés en CR. Ceci a été illustré dans le cas particulier de la mesure en CR avec deux antennes, et les résultats de mesure ont montré que lorsque le brassage mécanique est appliqué seul, il ne permet pas de supprimer la composante non brassée liée aux trajets du champ sans interaction avec le brasseur. Il est ainsi montré que la présence de cette composante non brassée est à l'origine du biais d'estimation de l'efficacité de rayonnement de l'antenne. C'est pour cette raison que nous avons proposé de combiner le brassage d'antenne au brassage mécanique de façon à supprimer cette source de biais. Les résultats que nous avons obtenus ont montré l'efficacité du brassage d'antenne pour supprimer ce biais. En particulier, l'utilisation d'un brassage simultané de l'antenne source et de l'AUT combiné au brassage mécanique permet l'obtention d'une estimation non biaisée de l'efficacité de rayonnement de l'AUT.

Les conclusions de l'étude précédente, montrant l'apport des processus de brassage dans l'élimination du biais d'estimation de l'efficacité, ont ensuite été mises à profit pour des mesures en basses fréquences (à des fréquences proches de la LUF de la CR). L'objectif était d'améliorer la précision de l'estimation de l'efficacité lorsque celle-ci est évaluée à la limite des conditions nécessaires au bon fonctionnement de la CR. Les résultats que nous avons obtenus ont montré que, grâce aux différents processus de brassage, une nette amélioration de l'estimation de l'efficacité a été obtenue dans cette bande fréquentielle basse.

Le troisième chapitre est quant-à lui dédié à la caractérisation d'antennes sans contact en CR. Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode originale visant à estimer l'efficacité d'antenne à la fois sans contact et donc de manière non invasive pour une antenne miniature, mais aussi en exploitant les propriétés statistiques de la CR. Dans une première partie de ce chapitre nous avons présenté deux paramètres importants permettant de quantifier l'interaction d'un objet qui peut être une antenne avec les ondes électromagnétiques, à savoir la surface équivalente d'absorption et la surface équivalente de diffusion. Ces deux paramètres sont définis respectivement par la capacité d'un objet à absorber et diffuser le champ électromagnétique qui l'illumine, et sont également valables pour les antennes. En effet, la présence d'une antenne au sein d'une CR est une source de pertes et de diffusion des ondes. Dans la littérature, il existe un modèle standard décrivant la contribution d'une antenne au facteur de qualité de la CR. Ce modèle évalue les pertes qu'elle introduit dans la chambre en fonction de son efficacité et de son coefficient de réflexion (sans qu'elle soit connectée à l'appareil de mesure). Néanmoins, ce modèle ne prend pas en considération la dissipation de la puissance dans l'antenne mais uniquement dans sa charge, ce qui induit un biais dans le cas des antennes présentant de fortes pertes. Un nouveau modèle a récemment été proposé comme une amélioration du modèle standard en prenant en considération les pertes précédemment négligées. Dans notre travail, ces deux modèles ont été utilisés dans le but d'estimer l'efficacité de rayonnement d'une antenne en CR. Les résultats issus de la littérature ont montré, pour une méthode de mesure choisie, des valeurs extraites d'efficacité non stables (avec des valeurs aberrantes et même supérieures à 1) dans le cas où le modèle standard est appliqué, alors que des résultats moins fluctuants étaient obtenus avec le modèle amélioré. Néanmoins, la méthode de mesure utilisée présente également des limitations liées d'une part au fait qu'elle exige que les antennes utilisées soient identiques, et d'autre part parce qu'elle nécessite une mesure à vide (sans les antennes connectées) ce qui implique d'ouvrir et de refermer la CR entre les mesures et donc de potentiellement modifier les conditions de mesure. De plus, l'élimination des pertes liées au rayonnement des antennes en les retirant de la CR, lors de la mesure à vide, implique également l'élimination des pertes liées à leur structure (mode de structure) et introduit donc un biais dans l'évaluation de l'efficacité de rayonnement. En raison de ces limitations, nous avons proposé une nouvelle méthode de mesure sans contact en CR, fondée sur l'estimation du facteur de qualité d'antenne avec le modèle amélioré, mais qui en revanche n'exige pas que les antennes soient identiques ni de faire une mesure à vide. Le principe de cette méthode repose sur deux mesures différentes en

appliquant une modulation de l'impédance de charge aux antennes sous test. Grâce à un switch commandé à distance, ces impédances de charge sont modifiées sans intervention d'un manipulateur dans la CR, ce qui permet de conserver les mêmes conditions de mesure dans les deux cas de charge des antennes AUTs. Nous avons choisi d'utiliser comme impédance de charge des AUTs des charges adaptées à 50Ω et des circuits ouverts de manière à maximiser la différence entre les facteurs de qualité entre les deux mesures ; en effet, le calcul de l'efficacité de l'AUT dépend de la différence entre les facteurs de qualité de la CR dans les deux états de charge, et un écart suffisant est nécessaire à une bonne précision de l'estimation de cette différence. Cette nouvelle méthode de caractérisation d'antenne sans contact a été validée dans une première CR et le résultat obtenu, bien qu'il présente des fluctuations, est en cohérence avec le résultat de la mesure conventionnelle (invasive). Par ailleurs, cette nouvelle technique proposée nécessite la mesure des coefficients de réflexion des antennes non connectées et des impédances de charge utilisées. Dans notre étude, ces grandeurs ont été déterminées à partir des mesures directes en utilisant un VNA (mesures invasives). Néanmoins, leur mesure pourrait ne pas être possible d'un point de vue pratique, et ce cas de figure a donc été envisagé en examinant l'impact de deux approximations. Tout d'abord, nous avons considéré que les antennes AUTs étaient parfaitement adaptées à 50Ω sur toute la bande de mesure et estimé l'efficacité de rayonnement dans ce cas, ensuite, nous avons appliqué notre approche en considérant les charges utilisées comme idéales. La première hypothèse a conduit à des résultats très cohérents avec ceux obtenus en utilisant les coefficients mesurés. En effet, la bande fréquentielle de mesure a été choisie de sorte que l'antenne soit bien adaptée. En revanche, la seconde hypothèse a entraîné une sous-estimation de l'efficacité de rayonnement des AUTs en raison de l'absence de prise en compte des pertes introduites par les switches et les câbles situés entre le port de calibrage et les charges. Ces résultats montrent la sensibilité de cette méthode de mesure (sans contact) d'une part à la désadaptation de l'antenne et d'autre part aux valeurs des charges utilisées. Par ailleurs, dans les mesures en CR, le nombre d'échantillons de mesure décorrélés est le paramètre clé de la précision d'une mesure. C'est pourquoi, afin de vérifier que nous avons un nombre suffisant d'échantillons de mesure décorrélés, nous avons déterminé la taille effective des échantillons au sein de la première CR et avons ainsi prédit la valeur de l'écart-type normalisé de l'efficacité de rayonnement. Cette prédiction a été validée en combinant le brassage mécanique à un brassage de source d'une part, et un brassage de l'AUT d'autre part. Lorsque les deux types de brassage sont combinés et appliqués conjointement au brassage mécanique, nous obtenons un écart-type normalisé très faible (0,029) et les résultats sont en très bonne concordance avec ceux obtenus par la méthode conventionnelle. Ceci montre que le nombre d'échantillons décorrélés est suffisant et que l'utilisation d'un seul AUT est approprié pour caractériser cette antenne dans cette première CR. Toutefois, la caractérisation sans contact d'une antenne de plus faible efficacité pourrait nécessiter l'utilisation de plusieurs AUT pour exacerber le phénomène étudié. Ceci pourrait également être le cas avec une mesure au sein d'une CR de facteur de qualité plus faible, la faible variation du facteur de qualité lors du changement de charge étant alors plus difficile à estimer précisément. Une mesure a ainsi été effectuée suivant le même principe en insérant quatre AUTs dans la CR ; la variation plus importante du

facteur de qualité a ainsi été démontrée. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacrée à la validation de la nouvelle méthode de mesure sans contact dans une CR de taille réduite (volume de 1 m^3). En raison du plus faible facteur de qualité de cette CR, deux AUTs ont été utilisées. Nous avons obtenu un résultat d'efficacité très similaire au cas de la mesure conventionnelle (différence relative moyenne de 6 %) avec toutefois un écart-type en fonction de la fréquence plus important dans le cas de la mesure sans contact. Les fluctuations d'efficacité plus importantes dans cette CR que dans la précédente, de taille plus importante, s'explique par un nombre de configurations décorréliées plus faible (113 contre 2360). Ainsi, la précision de cette méthode dépend des performances de la CR, en particulier de son efficacité de brassage.

Les résultats du travail que nous avons mené le long de cette thèse ouvrent la voie pour des travaux futurs. Dans le deuxième chapitre nous avons mis en lumière la contribution de la composante non brassée du champ dans le biais d'estimation de l'efficacité de rayonnement de l'AUT. Des solutions visant à réduire la contribution de cette composante pourraient être étudiées en plus de la combinaison des différents types de brassage (principalement le brassage de source), notamment la modification de la géométrie de la CR, par exemple en créant des courbures sur les murs via l'insertion de structures métalliques afin d'éviter les réflexions spéculaires entre l'antenne de mesure et l'AUT. Par ailleurs, dans le troisième chapitre, nous avons vu que la nouvelle méthode proposée pour des mesures sans contact a donné des résultats satisfaisants. La sensibilité de cette approche reste toutefois à analyser au regard de l'efficacité de rayonnement de l'AUT, puisque l'extraction de l'efficacité s'annonce plus délicate pour des antennes à faible efficacité de rayonnement. Sur ce point, nous avons déjà démontré que l'augmentation du nombre d'AUTs était une piste prometteuse. Par ailleurs, nos mesures ont été effectuées sur des antennes assez grandes et nous les avons connectées à des switches via des câbles. Ceci ne sera plus possible avec des antennes miniatures ou enfouies. Ainsi les travaux futurs incluront la miniaturisation du dispositif de commutation (le switch) afin de l'intégrer dans l'AUT. Une conception spécifique d'antenne, avec le dispositif de commutation intégré, peut être envisagée dans le cadre de futurs travaux, afin de montrer la capacité de cette approche à caractériser de manière non invasive des antennes miniatures.

Annexe A

Vérification de l'hypothèse posée par les méthodes de mesure de l'efficacité de rayonnement sans antenne de référence

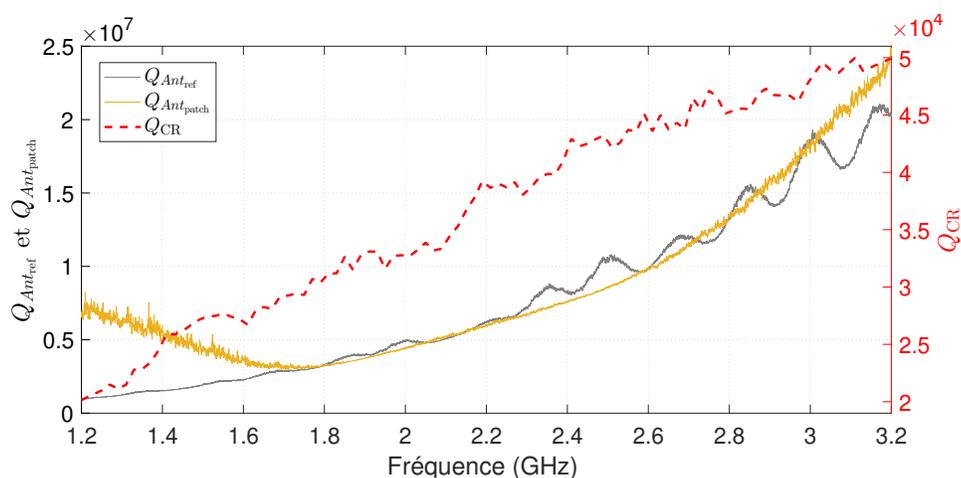


FIGURE A.1 – Facteur de qualité de la CR IETR estimé en temporel (axe de droite) et celui des antennes patch et log-périodique (axe de gauche) .

Dans la bande fréquentielle de mesure [1,2 GHz - 3,2 GHz], le facteur de qualité des deux antennes patch et log-périodique est beaucoup plus important que le facteur de qualité de la CR IETR calculé en temporel (Figure A.1). Les pertes dans la CR sont donc dominées par les pertes dans les parois de la CR. L'hypothèse posée par les méthodes de mesure sans antennes de référence est donc bien vérifiée en CR IETR également.

Annexe B

Coefficient de réflexion entre l'antenne sous test et sa charge

L'équation (3.14) a été proposée en se basant sur les travaux présentés dans [123]. Lorsqu'une ligne de transmission est connectée à un circuit et que ce dernier n'est pas adapté à l'impédance caractéristique de la ligne, on doit considérer l'existence de deux ondes de puissance se propageant dans des directions opposées le long de cette ligne, et ce bien que le circuit connecté ne possède pas de source. L'onde incidente et l'onde réfléchie sont données par les expressions suivantes [123] :

$$a = \frac{V + ZI}{2\sqrt{|\operatorname{Re} Z|}}, \quad b = \frac{V - Z^*I}{2\sqrt{|\operatorname{Re} Z|}} \quad (3.26)$$

où V et I sont la tension et le courant au niveau de la connexion, et Z est l'impédance vue depuis l'extrémité de la ligne. Dans la suite, ce même raisonnement est appliqué aux configurations de mesures lors de la caractérisation d'antennes sans contact, en s'appuyant sur des schémas équivalents.

Schéma équivalent AUT + charge

On considère une antenne d'impédance Z_a connectée à une charge d'impédance Z_L différente de l'impédance caractéristique de l'antenne. La réception d'un champ incident par cette antenne peut être représentée par le schéma équivalent de la Figure B.1 où l'antenne est modélisée par un générateur de tension d'impédance interne Z_a . L'onde incidente (notée a) générée par l'antenne dans le câble se propage jusqu'à la charge Z_L . Une partie de cette onde est ensuite réfléchie (notée b) comme illustré sur la Figure B.1. Dans ce cas, les équations (3.26) s'écrivent comme suit :

$$a = \frac{V + Z_a I}{2\sqrt{|\operatorname{Re} Z_a|}}, \quad b = \frac{V - Z_a^* I}{2\sqrt{|\operatorname{Re} Z_a|}} \quad (3.27)$$

Le coefficient de réflexion entre l'antenne et sa charge, donné par $\Gamma_{a,L} = \frac{b}{a}$, devient, en

remplaçant a et b par leurs expressions :

$$\begin{aligned}\Gamma_{a,L} &= \frac{V - Z_a^* I}{V + Z_a I} = \frac{Z_L I - Z_a^* I}{Z_L I + Z_a I} \\ \Gamma_{a,L} &= \frac{Z_L - Z_a^*}{Z_L + Z_a}\end{aligned}\quad (3.28)$$

On peut ainsi exprimer $\Gamma_{a,L}$ en fonction des coefficients de réflexion de l'antenne sous test et de la charge mesurée, en remplaçant les impédances Z_L et Z_a par les valeurs correspondantes.

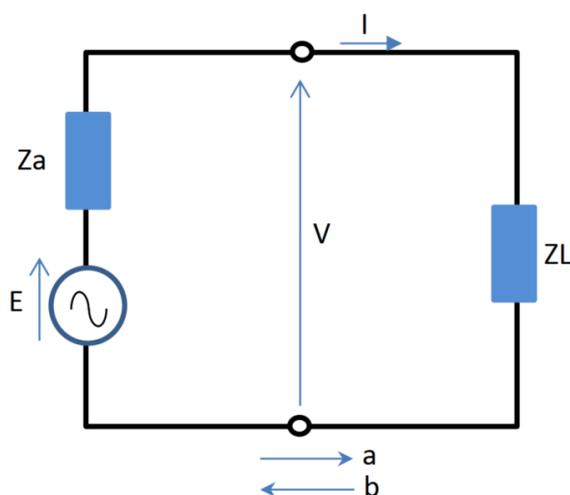


FIGURE B.1 – Schéma équivalent d'une antenne connectée à une charge Z_L .

Schéma équivalent AUT + VNA

Le schéma équivalent de l'antenne sous test connectée au VNA lors de la mesure est présenté dans la Figure B.2. Le VNA est modélisé par un générateur de tension avec une impédance interne Z_0 égale à l'impédance caractéristique 50Ω dans notre cas. Par analogie avec le cas précédent, on trouve

$$\begin{aligned}\Gamma_a &= \frac{Z_a - Z_0^*}{Z_a + Z_0} = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \\ Z_a &= Z_0 \frac{1 + \Gamma_a}{1 - \Gamma_a}\end{aligned}\quad (3.29)$$

Schéma équivalent charge + VNA

Le schéma équivalent de la charge connectée au VNA lors de la mesure est présenté dans la Figure B.3. Le VNA est modélisé par un générateur de tension d'impédance interne Z_0

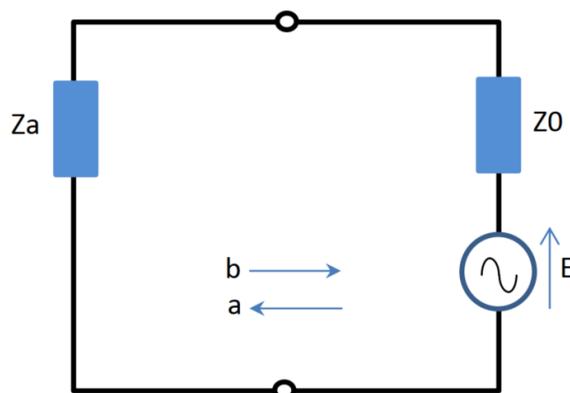
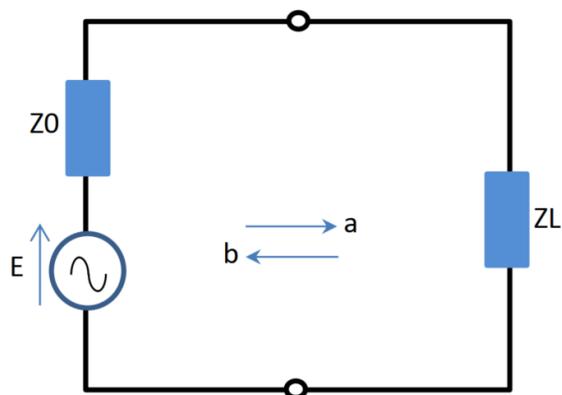


FIGURE B.2 – Schéma équivalent de l'antenne AUT connectée au VNA.

FIGURE B.3 – Schéma équivalent de la charge Z_L connectée au VNA.

égale à l'impédance caractéristique 50Ω dans notre cas. Par analogie avec le cas précédent, on trouve :

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0^*}{Z_L + Z_0} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.30)$$

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L}$$

Lorsqu'on remplace les impédances Z_a et Z_L par leurs valeurs obtenues dans (3.29) et

(3.30) on trouve :

$$\begin{aligned}
\Gamma_{a,L} &= \frac{Z_L - Z_a^*}{Z_L + Z_a} = \left(\frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} - \frac{1 + \Gamma_a^*}{1 - \Gamma_a^*} \right) \cdot \left(\frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} + \frac{1 + \Gamma_a}{1 - \Gamma_a} \right)^{-1} \\
\Gamma_{a,L} &= \frac{1 - \Gamma_a}{1 - \Gamma_a^*} \cdot \frac{(1 + \Gamma_L) \cdot (1 - \Gamma_a^*) - (1 + \Gamma_L) \cdot (1 + \Gamma_a^*)}{(1 + \Gamma_L) \cdot (1 - \Gamma_a) + (1 + \Gamma_L) \cdot (1 + \Gamma_a)} \\
\Gamma_{a,L} &= \frac{1 - \Gamma_a}{1 - \Gamma_a^*} \cdot \frac{1 + \Gamma_L - \Gamma_a^* - \Gamma_L \Gamma_a^* - (1 - \Gamma_L + \Gamma_a^* - \Gamma_L \Gamma_a^*)}{1 + \Gamma_L - \Gamma_a - \Gamma_L \Gamma_a - (1 - \Gamma_L + \Gamma_a - \Gamma_L \Gamma_a)} \\
\Gamma_{a,L} &= \frac{1 - \Gamma_a}{1 - \Gamma_a^*} \cdot \frac{\Gamma_L - \Gamma_a^*}{1 - \Gamma_L \Gamma_a}
\end{aligned} \tag{3.31}$$

Bibliographie

- [1] S. M. R. Islam, D. Kwak, M. H. Kabir, M. Hossain, and K.-S. Kwak, “The internet of things for health care : A comprehensive survey,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 678–708, 2015.
- [2] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, “Internet of things for smart cities,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
- [3] L. J. Chu, “Physical limitations of omni-directional antennas,” *Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 12, pp. 1163–1175, 1948.
- [4] C. A. Balanis, *Antenna Measurements*, pp. 977–1033. 2008.
- [5] M. Chen, Y. Miao, Y. Hao, and K. Hwang, “Narrow band internet of things,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20557–20577, 2017.
- [6] P.-S. Kildal, C. Carlsson, and J. Yang, “Measurement of free-space impedances of small antennas in reverberation chambers,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 32, no. 2, pp. 112–115, 2002.
- [7] M. Piette, “Antenna radiation efficiency measurements in a reverberation chamber,” in *2004 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2004. Proceedings.*, pp. 19–22, 2004.
- [8] C. Lemoine, E. Amador, P. Besnier, J.-M. Floch, and A. Laisné, “Antenna directivity measurement in reverberation chamber from rician k-factor estimation,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 10, pp. 5307–5310, 2013.
- [9] A. Reis, F. Sarrazin, P. Besnier, P. Pouliguen, and E. Richalot, “Contactless antenna gain pattern estimation from backscattering coefficient measurement performed within reverberation chambers,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 1–1, 2021.
- [10] J. DeMarinis, “The antenna cable as a source of error in emi measurements,” in *IEEE 1988 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 9–14, 1988.
- [11] S. Saario, D. Thiel, J. Lu, and S. O’Keefe, “An assessment of cable radiation effects on mobile communications antenna measurements,” in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1997. Digest*, vol. 1, pp. 550–553 vol.1, 1997.
- [12] J. O. C. Icheln and P. Vainikainen, “Reducing the influence of feed cables on small antenna measurements,” *lectron. Lett.*, vol. 35, no. 15, p. 1212–1214, 1999.

- [13] L. Liu, Y. Weng, S. W. Cheung, T. I. Yuk, and L. J. Foged, "Modeling of cable for measurements of small monopole antennas," in *2011 Loughborough Antennas Propagation Conference*, pp. 1–4, 2011.
- [14] K. S. Leong, M. L. Ng, and P. H. Cole, "Investigation of rf cable effect on rfid tag antenna impedance measurement," in *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 573–576, 2007.
- [15] C. D. L. Huitema and R. D'Errico, "Impedance and radiation measurement methodology for ultra miniature antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3463–3473, 2014.
- [16] "Ieee standard for definitions of terms for antennas - redline," *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993) - Redline*, pp. 1–92, 2014.
- [17] *IEC 61000-4-21, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-21 : Testing and Measurement Techniques - Reverberation Chamber Test Methods*, 2011.
- [18] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas," *Proceedings of the IRE*, vol. 35, no. 12, pp. 1479–1484, 1947.
- [19] J. S. McLean, "A re-examination of the fundamental limits on the radiation q of electrically small antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, no. 5, pp. 672–, 1996.
- [20] "Ieee standard test procedures for antennas," *ANSI/IEEE Std 149-1979*, pp. 1–144, 1979.
- [21] H. A. Wheeler, "The radiansphere around a small antenna," *Proceedings of the IRE*, vol. 47, no. 8, pp. 1325–1331, 1959.
- [22] D. M. Pozar and B. Kaufman, "Comparison of three methods for the measurement of printed antenna efficiency," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 1, pp. 136–139, 1988.
- [23] W. E. McKinzie, "A modified wheeler cap method for measuring antenna efficiency," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1997. Digest*, vol. 1, pp. 542–545 vol.1, 1997.
- [24] H. Schantz, "Radiation efficiency of uwb antennas," in *2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (IEEE Cat. No.02EX580)*, pp. 351–355, 2002.
- [25] M.-C. Huynh, "Wideband compact antennas for wireless communication applications," 2004.
- [26] G. Le Fur, C. Lemoine, P. Besnier, and A. Sharaiha, "Performances of uwb wheeler cap and reverberation chamber to carry out efficiency measurements of narrowband antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 332–335, 2009.
- [27] D. A. Hill, *Reverberation Chambers*, pp. 91–150. 2009.

- [28] D. Hill, D. Camell, K. Cavcey, and G. Koepke, “Radiated emissions and immunity of microstrip transmission lines : theory and reverberation chamber measurements,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, no. 2, pp. 165–172, 1996.
- [29] H. A. Mendez, “A new approach to electromagnetic field strength measurements in shielded enclosures,” in *Wescon Technical Papers, Western Electronic Show and Convention*, 1968.
- [30] H. A. Mendez, “Meaningful emc measurements in shielded enclosures,” in *1969 IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Record*, pp. 137–137, 1969.
- [31] M. Migliaccio, G. Gradoni, and L. R. Arnaut, “Electromagnetic reverberation : The legacy of paolo corona,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 3, pp. 643–652, 2016.
- [32] D. Hill, *Electromagnetic theory of reverberation chambers*,. Gaithersburg, MA, USA, Tech. Rep.1506 : National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [33] J. Ladbury, G. Koepke, and D. Camell, *Evaluation of the NASA Langley Research Center Mode-Stirred Chamber Facility*. No. 1508, Technical Note (NIST TN), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999-01-01 1999.
- [34] J. Yousaf, H. Lee, M. Faisal, H. Junea, W. Nah, M. N. Hasan, and J. G. Yang, “Em field uniformity analysis of rra reverberation chamber,” in *2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET)*, pp. 1–4, 2020.
- [35] C. R. Dunlap, C. L. Holloway, R. Pirkl, J. Ladbury, E. F. Kuester, D. A. Hill, and S. van de Beek, “Characterizing reverberation chambers by measurements of the enhanced backscatter coefficient,” in *2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 210–215, 2012.
- [36] A. B. Ubin and M. Z. B. M. Jenu, “Field uniformity evaluation of different stirrer structure in a reverberation chamber,” in *2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, pp. 32–35, 2012.
- [37] M. Roman and R. van Zyl, “Passive field uniformity enhancement in reverberation chambers,” in *IEEE Africon '11*, pp. 1–6, 2011.
- [38] R. J. Pirkl and K. A. Remley, “Experimental evaluation of the statistical isotropy of a reverberation chamber’s plane-wave spectrum,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 3, pp. 498–509, 2014.
- [39] W. Petirsch and A. Schwab, “Investigation of the field uniformity of a mode-stirred chamber using diffusers based on acoustic theory,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 4, pp. 446–451, 1999.
- [40] C. L. Holloway, D. A. Hill, J. M. Ladbury, P. F. Wilson, G. Koepke, and J. Coder, “On the use of reverberation chambers to simulate a rician radio environment for the testing of wireless devices,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 11, pp. 3167–3177, 2006.

- [41] B. L. Y. X. Congsheng Li, Lei Yang and T. Wu, "A reverberation chamber for rodents' exposure to widebandradiofrequency electromagnetic fields with different small-scalefading distributions," *Electromagnetic Biology and Medicine* 35 (1), pp. 30–39, 2016.
- [42] H.-J. Asander, G. Eriksson, L. Jansson, and H. Akermark, "Field uniformity analysis of a mode stirred reverberation chamber using high resolution computational modeling," in *2002 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, vol. 1, pp. 285–290 vol.1, 2002.
- [43] L. F. Wanderlinder, D. Lemaire, I. Coccato, and D. Seetharamdoo, "Practical implementation of metamaterials in a reverberation chamber to reduce the luf," in *2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, pp. 1–3, 2017.
- [44] J. Song, Z. Li, H. Sun, J. Shi, C. Gu, and K. Wang, "Field uniformity improvement at lower frequencies in a reverberation chamber using metasurfaces," in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, pp. 1156–1159, 2018.
- [45] J. Ladbury and D. A. Hill, "Enhanced backscatter in a reverberation chamber : Inside every complex problem is a simple solution struggling to get out," in *2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1–5, 2007.
- [46] C. L. Holloway, H. A. Shah, R. J. Pirkl, W. F. Young, D. A. Hill, and J. Ladbury, "Reverberation chamber techniques for determining the radiation and total efficiency of antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, pp. 1758–1770, April 2012.
- [47] Zhihao Tian, Yi Huang, and Qian Xu, "Enhanced backscatter coefficient measurement at high frequencies in reverberation chamber," in *2017 International Workshop on Electromagnetics : Applications and Student Innovation Competition*, pp. 166–167, 2017.
- [48] L. A. Bronckers, A. Roc'h, and A. B. Smolders, "Reverberation chamber enhanced backscattering : High-frequency effects," in *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, pp. 1–6, 2019.
- [49] Q. Xu, L. Xing, Y. Zhao, T. Jia, and Y. Huang, "The measurable range issue in the measurement of enhanced backscatter coefficient in a reverberation chamber," in *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, pp. 1–3, 2020.
- [50] Q. Xu and Y. Huang, *Fundamentals of the Reverberation Chamber*, pp. 89–131. 2018.
- [51] O. Lunden and M. Backstrom, "Stirrer efficiency in foa reverberation chambers. evaluation of correlation coefficients and chi-squared tests," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.00CH37016)*, vol. 1, pp. 11–16 vol.1, 2000.

- [52] Q. Xu, L. Xing, D. Yan, Y. Zhao, T. Jia, and Y. Huang, “Experimental verification of stirrer angular correlation with different definitions in a reverberation chamber,” in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, pp. 1–5, 2018.
- [53] K. Oubaha, M. Richter, U. Kuhl, F. Mortessagne, and O. Legrand, “Refining the experimental extraction of the number of independent samples in a mode-stirred reverberation chamber,” in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pp. 719–724, 2018.
- [54] C. Lemoine, P. Besnier, and M. Drissi, “Estimating the effective sample size to select independent measurements in a reverberation chamber,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 2, pp. 227–236, 2008.
- [55] P. Hallbjorner, “Estimating the number of independent samples in reverberation chamber measurements from sample differences,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 2, pp. 354–358, 2006.
- [56] R. J. Pirkl, K. A. Remley, and C. S. L. Patane, “Reverberation chamber measurement correlation,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 3, pp. 533–545, 2012.
- [57] N. Wellander, O. Lunden, and M. Backstrom, “Experimental investigation and mathematical modeling of design parameters for efficient stirrers in mode-stirred reverberation chambers,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 1, pp. 94–103, 2007.
- [58] J. Clegg, A. Marvin, J. Dawson, and S. Porter, “Optimization of stirrer designs in a reverberation chamber,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 4, pp. 824–832, 2005.
- [59] X. Chen, “On independent platform sample number for reverberation chamber measurements,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 6, pp. 1306–1309, 2012.
- [60] P. Hallbjorner, “Accuracy in reverberation chamber antenna correlation measurements,” in *2007 International workshop on Antenna Technology : Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*, pp. 170–173, 2007.
- [61] M. I. Andries, P. Besnier, and C. Lemoine, “On the prediction of the average absorbing cross section of materials from coherence bandwidth measurements in reverberation chamber,” in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, pp. 1–6, 2012.
- [62] C. L. Holloway, H. A. Shah, R. J. Pirkl, K. A. Remley, D. A. Hill, and J. Ladbury, “Early time behavior in reverberation chambers and its effect on the relationships between coherence bandwidth, chamber decay time, rms delay spread, and the chamber buildup time,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 4, pp. 714–725, 2012.

-
- [63] D. Barakos and R. Serra, "Performance characterization of the oscillating wall stirrer," in *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, pp. 1–4, 2017.
- [64] R. Serra and D. Barakos, "A novel hybrid source-tuner stirring allows for an extended working volume in rcs," in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pp. 699–703, 2018.
- [65] F. Leferink, J.-C. Boudenot, and W. van Etten, "Experimental results obtained in the vibrating intrinsic reverberation chamber," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.00CH37016)*, vol. 2, pp. 639–644 vol.2, 2000.
- [66] R. Serra and A. Rodriguez, "Vibrating intrinsic reverberation chamber for electromagnetic compatibility measurements," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 1, pp. 389–395, 2013.
- [67] M. Hara, Y. Takahashi, R. Vogt-Ardatjew, and F. Leferink, "Validation of vibrating intrinsic reverberation chamber using computational electromagnetics," in *2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC)*, pp. 593–596, 2019.
- [68] M. Hara, Y. Takahashi, R. Vogt-Ardatjew, and F. Leferink, "Statistical analysis for reverberation chamber with flexible shaking walls with various amplitudes," in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pp. 694–698, 2018.
- [69] G. Andrieu and N. Ticaud, "Performance comparison and critical examination of the most popular stirring techniques in reverberation chambers using the "well-stirred" condition method," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 1, pp. 3–15, 2020.
- [70] D. Hill, "Electronic mode stirring for reverberation chambers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 4, pp. 294–299, 1994.
- [71] G. Gradoni, L. Bastianelli, V. M. Primiani, and F. Moglie, "Uncorrelated frequency steps in a reverberation chamber : A multivariate approach," in *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 558–562, 2015.
- [72] C. Lemoine, P. Besnier, and M. Drissi, "Evaluation of frequency and mechanical stirring efficiency in a reverberation chamber," in *2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe*, pp. 1–6, 2008.
- [73] A. C. Marvin and Y. He, "A study of enclosure shielding effectiveness measurement using frequency stirring in a mode-stirred chamber," in *2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1–6, 2008.
- [74] Y. Huang and D. Edwards, "A novel reverberating chamber : the source-stirred chamber," in *Eighth International Conference on Electromagnetic Compatibility, 1992.*, pp. 120–124, 1992.
-

-
- [75] K. Rosengren, P.-S. Kildal, C. Carlsson, and J. Carlsson, "Characterization of antennas for mobile and wireless terminals by using reverberation chambers : improved accuracy by platform stirring," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001 Digest. Held in conjunction with : USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.01CH37229)*, vol. 3, pp. 350–353 vol.3, 2001.
- [76] P.-S. Kildal, S.-H. Lai, and X. Chen, "Direct coupling as a residual error contribution during ota measurements of wireless devices in reverberation chamber," in *2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1–4, 2009.
- [77] P.-S. Kildal and C. Carlsson, "Detection of a polarization imbalance in reverberation chambers and how to remove it by polarization stirring when measuring antenna efficiencies," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 2, pp. 145–149, 2002.
- [78] C. Li, T.-H. Loh, Z. Tian, Q. Xu, and Y. Huang, "Evaluation of chamber effects on antenna efficiency measurements using non-reference antenna methods in two reverberation chambers," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 11, no. 11, pp. 1536–1541, 2017.
- [79] C. Yu, Y. Zhao, W. Qi, and Q. Xu, "Improving field uniformity using beam deflection with metasurface in a reverberation chamber," in *2020 IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, pp. 324–327, 2020.
- [80] X. Chen, W. Xue, H. Shi, L. Wang, S. Zhu, and A. Zhang, "Improving field uniformity using source stirring with orbital angular momentum modes in a reverberation chamber," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 8, pp. 560–562, 2019.
- [81] R. Serra, A. C. Marvin, F. Moglie, V. M. Primiani, A. Cozza, L. R. Arnaut, Y. Huang, M. O. Hatfield, M. Klingler, and F. Leferink, "Reverberation chambers a la carte : An overview of the different mode-stirring techniques," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 63–78, 2017.
- [82] Madsen, Hallbjorner, and Orlenius, "Models for the number of independent samples in reverberation chamber measurements with mechanical, frequency, and combined stirring," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 3, pp. 48–51, 2004.
- [83] Q. Xu and Y. Huang, *Applications in the Reverberation Chamber*.
- [84] P. Hallbjörner, "Reflective antenna efficiency measurements in reverberation chambers," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 30, no. 5, pp. 332–335, 2001.
- [85] P.-S. Kildal and K. Rosengren, "Correlation and capacity of mimo systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas : simulations and measurements in a reverberation chamber," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 12, pp. 104–112, 2004.
- [86] P. Besnier, J. Sol, A. Presse, C. Lemoine, and A.-C. Tarot, "Antenna efficiency measurement from quality factor estimation in reverberation chamber," in *2016 46th European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 715–718, 2016.
-

- [87] Q. Xu, Y. Huang, X. Zhu, L. Xing, Z. Tian, and C. Song, "A modified two-antenna method to measure the radiation efficiency of antennas in a reverberation chamber," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 336–339, 2016.
- [88] J. M. Ladbury and D. A. Hill, "An improved model for antennas in reverberation chambers," in *2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 663–667, 2010.
- [89] E. J. Rothwell and R. O. Ouedraogo, "Antenna miniaturization : definitions, concepts, and a review with emphasis on metamaterials," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 28, no. 17, pp. 2089–2123, 2014.
- [90] C. Harrison, "Monopole with inductive loading," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 11, no. 4, pp. 394–400, 1963.
- [91] J. Birchfield and W. Free, "Dielectrically loaded short antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 22, no. 3, pp. 471–472, 1974.
- [92] J. James, "Electrically short monopole antennas with dielectric or ferrite coatings," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 125, pp. 793–803(10), September 1978.
- [93] H. Wong, K.-M. Luk, C. H. Chan, Q. Xue, K. K. So, and H. W. Lai, "Small antennas in wireless communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2109–2121, 2012.
- [94] K. Carver and J. Mink, "Microstrip antenna technology," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 29, no. 1, pp. 2–24, 1981.
- [95] J. S. Kula, D. Psychoudakis, W.-j. Liao, C.-c. Chen, J. L. Volakis, and J. W. Halloran, "Patch-antenna miniaturization using recently available ceramic substrates," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, no. 6, pp. 13–20, 2006.
- [96] J. Schindler, R. Mack, and P. Blacksmith, "The control of electromagnetic scattering by impedance loading," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 8, pp. 993–1004, 1965.
- [97] J. Wang, C. Choi, and R. Moore, "Precision experimental characterization of the scattering and radiation properties of antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 1, pp. 108–112, 1982.
- [98] N. Nakamoto, T. Takahashi, T. Nomura, M. Otsuka, and H. Miyashita, "A method to measure the antenna mode and structural mode for antenna rcs reduction using circulator and phase shifter," in *2014 International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings*, pp. 21–22, 2014.
- [99] J. Appel-Hansen, "Accurate determination of gain and radiation patterns by radar cross-section measurements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 27, pp. 640–646, 1979.
- [100] W. Wiesbeck and E. Heidrich, "Wide-band multiport antenna characterization by polarimetric rcs measurements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 3, pp. 341–350, 1998.

-
- [101] Hsin-Chia Lu and Tah-Hsiung Chu, “Antenna gain and scattering measurement using reflective three-antenna method,” in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1999 Digest. Held in conjunction with : USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.99CH37010)*, vol. 1, pp. 374–377 vol.1, 1999.
- [102] B. Monsalve, S. Blanch, J. Romeu, and L. Jofre, “A contact-less small antenna characterization through impedance modulation,” in *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, pp. 696–698, 2009.
- [103] U. Johannsen, M. Spiritoy, and A. B. Smolders, “Contactless measurement method for integrated mm-wave antennas,” in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 797–801, 2011.
- [104] A. J. van den Biggelaar, D. P. P. Daverveld, A. C. F. Reniers, U. Johannsen, and A. B. Smolders, “Assessment of a contactless characterization method for integrated antennas,” in *2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 1016–1019, 2019.
- [105] P. Besnier, J. Sol, and S. Méric, “Estimating radar cross-section of canonical targets in reverberation chamber,” in *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, pp. 1–5, 2017.
- [106] A. Reis, F. Sarrazin, E. Richalot, and P. Pouliguen, “Mode-stirring impact in radar cross section evaluation in reverberation chamber,” in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pp. 875–878, 2018.
- [107] A. Reis, F. Sarrazin, E. Richalot, S. Méric, J. Sol, P. Pouliguen, and P. Besnier, “Radar cross-section pattern measurements in a mode-stirred reverberation chamber : Theory and experiments,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 1–1, 2021.
- [108] “<https://www.ietr.fr/chambres-reverberantes-brassage-de-modes>,”
- [109] Q. Xu, L. Xing, Y. Zhao, T. Jia, and Y. Huang, “A source stirred reverberation chamber using a robotic arm,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 2, pp. 631–634, 2020.
- [110] V. M. Primiani, P. Russo, and G. Cerri, “Design and testing of an antenna system for the source stirring technique in reverberation chambers,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 26, no. 7, pp. 837–850, 2012.
- [111] A. De Leo, G. Cerri, P. Russo, and V. Mariani Primiani, “Experimental comparison between source stirring and mechanical stirring in a reverberation chamber by analyzing the antenna transmission coefficient,” in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, pp. 677–682, 2018.
- [112] A. Reis, F. Sarrazin, P. Pouliguen, J. Sol, P. Besnier, and E. Richalot, “Radar cross section measurement within reverberation chamber : Stirrer position issues,” in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–4, 2020.
- [113] X. Chen, “On statistics of the measured antenna efficiency in a reverberation chamber,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 11, pp. 5417–5424, 2013.
-

- [114] F. Sarrazin, S. Pflaum, and C. Delaveaud, “Radiation efficiency improvement of a balanced miniature ifa-inspired circular antenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1309–1312, 2017.
- [115] D. A. Hill, M. T. Ma, A. R. Ondrejka, B. F. Riddle, M. L. Crawford, and R. T. Johnk, “Aperture excitation of electrically large, lossy cavities,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 3, pp. 169–178, 1994.
- [116] U. Carlberg, P.-S. Kildal, A. Wolfgang, O. Sotoudeh, and C. Orlenius, “Calculated and measured absorption cross sections of lossy objects in reverberation chamber,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 2, pp. 146–154, 2004.
- [117] D. Senic, A. Sarolic, Z. M. Joskiewicz, and C. L. Holloway, “Absorption cross-section measurements of a human model in a reverberation chamber,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, pp. 721–728, 2016.
- [118] Q. Xu, X. Shen, K. Chen, Y. Zhao, and Y. Huang, “Absorption cross section measurement of a vehicle in reverberation chamber for quick estimation of field strength,” *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 8, pp. 44–49, 2019.
- [119] I. D. Flintoft, S. J. Bale, S. L. Parker, A. C. Marvin, J. F. Dawson, and M. P. Robinson, “On the measurable range of absorption cross section in a reverberation chamber,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, pp. 22–29, 2016.
- [120] G. Lerosey and J. de Rosny, “Scattering cross section measurement in reverberation chamber,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, pp. 280–284, 2007.
- [121] J. De Rosny and P. Roux, “Multiple scattering in a reflecting cavity : Application to fish counting in a tank,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, no. 6, pp. 2587–2597, 2001.
- [122] A. Cozza, “Power loss in reverberation chambers by antennas and receivers,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 6, pp. 2041–2044, 2018.
- [123] K. Kurokawa, “Power waves and the scattering matrix,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 13, pp. 194–202, 1965.

Liste des publications

Revue internationale avec comité de lecture

1. Wafa Krouka, François Sarrazin, Julien de Rosny, Adnane Labdouni, and Elodie Richalot, "*Antenna Radiation Efficiency Estimation From Backscattering Measurement Performed Within Reverberation Chambers,*" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, doi : 10.1109/TEM.2021.3129912.
2. Wafa Krouka, François Sarrazin, Jérôme Sol, Philippe Besnier, and Elodie Richalot, "*Biased Estimation of Antenna Radiation Efficiency Within Reverberation Chambers due to Unstirred Field : Role of Antenna Stirring,*" IEEE Transactions on Antennas and Propagation (accepté sous réserve de corrections majeures à IEEE Transactions on Antennas and Propagation).

Colloques internationaux avec comité de lecture

1. Wafa krouka, Adnane Labdouni, François Sarrazin, Elodie Richalot, Philippe Besnier, "*Considerations on unstirred path effects on antenna characterization in non-chaotic reverberation chambers,*" 2021 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), 2021, pp. 38-40
2. W. Krouka, F. Sarrazin and E. Richalot, "*Influence of the Reverberation Chamber on Antenna Characterization Performances,*" 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2018, pp. 329-333
3. W. Krouka, F. Sarrazin, J. Sol, P. Besnier and E. Richalot, "*Comparison of Antenna Radiation Efficiency Measurement Techniques in Reverberation Chamber Using or Not a Reference Antenna,*" 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020, pp. 1-4
4. W. Krouka, F. Sarrazin and E. Richalot, "*Antenna Characterization in Reverberation Chamber at Frequencies Close to the Lowest Usable Frequency,*" 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 2020, pp. 1261-1262

Colloques nationaux avec comité de lecture

1. W. Krouka, F. Sarrazin, J. Sol, P. Besnier, E. Richalot, "*Mesure de l'efficacité de rayonnement d'antennes en chambre réverbérante : Impact de l'estimation de l'efficacité de l'antenne de référence,*" 20^{ème} Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM 2020) 13-15 avril 2021, Lyon
2. W. Krouka, F. Sarrazin, S. Protat, J. Dubouil, E. Richalot, "*Caractérisation d'antenne en chambre réverbérante à des fréquences proches de la limite d'utilisation,*" XXI^{èmes} Journées Nationales Microondes (JNM) 14-17 mai 2019, Caen
3. W. Krouka, F. Sarrazin, E. Richalot "*Influence des propriétés d'une chambre réverbérante sur la caractérisation d'antenne,*" 19^{ème} Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM 2018) 9-11 juillet 2018, Paris

Séminaires

1. W. Krouka, F. Sarrazin, E. Richalot, "*Caractérisation d'antenne en chambre réverbérante,*" Groupement De Recherche (GDR) Ondes, Paris, Octobre 2019

Résumé

L'efficacité de rayonnement est devenue un paramètre d'antenne crucial dans le cadre des nouvelles applications liées à l'Internet des objets afin de maîtriser la consommation énergétique de ces dispositifs. Toutefois, l'estimation de l'efficacité par la mesure reste encore aujourd'hui délicate. La caractérisation d'antennes en chambres réverbérantes (CRs) à brassage de modes représente une nouvelle orientation dans le domaine des mesures d'antennes et en particulier pour les mesures d'efficacité. En effet, les propriétés statistiques d'isotropie et d'homogénéité du champ à l'intérieur de la cavité en font un environnement particulièrement adapté à l'estimation de l'efficacité. Différentes techniques de mesure d'efficacité en CR ont été proposées dans la littérature. Ces techniques reposent sur la condition d'un champ "bien" brassé au sein de la CR afin d'assurer une estimation précise de l'efficacité. Cette condition est directement liée à la qualité du brassage et donc au nombre de configurations décorréliées de la CR que permet d'obtenir le brassage. La première partie de ce travail consiste à mettre en lumière l'existence d'un biais systématique de l'estimation de l'efficacité dû à la contribution de trajets non brassés sur la mesure des paramètres S, malgré un nombre important de configurations décorréliées de la CR. L'importance des contributions non brassées est quantifiée à l'aide de comparaisons avec des mesures de coefficients de réflexion en chambre anéchoïque. L'apport des brassages dits de source et de plateforme et leurs liens avec la précision de l'estimation de l'efficacité sont ainsi clairement exposés. Dans la deuxième partie de ce travail, une méthode originale de mesure d'efficacité de rayonnement d'antenne en CR a été proposée. Elle repose sur une mesure en rétro-diffusion de l'antenne sous test dans la CR. La méthode est donc sans contact : il n'est pas nécessaire de relier l'antenne sous test à un analyseur. Cette méthode offre de nouvelles perspectives pour la caractérisation d'antennes non invasives avec comme application principale la mesure d'antennes miniatures, dont les propriétés de rayonnement sont fortement perturbées par les câbles de mesure avec les méthodes conventionnelles.

Mots clés : Chambre réverbérante à brassage de modes, efficacité de rayonnement d'antenne, brassage, mesure sans contact.

Abstract

Radiation efficiency has become a crucial antenna parameter in the new applications related to Internet of Things in order to control the energy consumption of these devices. However, estimating efficiency by measurement is still difficult today. The characterization of antennas in reverberation chambers (RCs) represents a new trend in the field of antenna measurements and in particular for efficiency measurements. Indeed, the field statistical properties of isotropy and uniformity, inside the cavity, make it a particularly suitable environment for efficiency estimation. Different techniques used for efficiency measurements in

RC have been proposed in the literature. These techniques are based on the condition of a "well" stirred field within the RC to ensure an accurate efficiency estimation. This condition is directly linked to the quality of the stirring process and therefore to the number of uncorrelated configurations of the RC. The first part of this work consists in highlighting the existence of a systematic bias in the efficiency estimation due to the contribution of unstirred paths in the S parameters measurement, despite a large number of decorrelated configurations of the RC. The importance of unstirred contributions is quantified thanks to comparisons with anechoic chamber reflection coefficient measurements. The contribution of the so-called source and platform stirrings and their links with the accuracy of the efficiency estimation is thus clearly exposed. In the second part of this work, an original contactless method for measuring the antenna radiation efficiency in RC is proposed. It is based on a backscattering measurement of the antenna under test in the RC. The method is therefore contactless as it is not necessary to connect the antenna under test to an analyzer. This method offers new perspectives for the non-invasive characterization of antennas with as main application the measurement of miniature antennas, whose radiation properties are strongly disturbed by measurement cables in the case of the conventional methods.

Key words : Mode-stirred reverberation chamber, antenna radiation efficiency, stirring, contactless measurement.