MESURE DE LA SURFACE EQUIVALENTE RADAR EN CHAMBRE REVERBERANTE : IMPACT DE LA POSITION DU BRASSEUR

A. Reis[1], F. Sarrazin[1], P. Pouliguen[2], J. Sol[3], P. Besnier[3], E. Richalot[1]

[1]ESYCOM lab, Univ Gustave Eiffel, UMR CNRS 9007, F-77454 Marne-la-Vallée, France, ariston.defreitastavaresdosreis@univ-eiffel.fr
[2]Agence Innovation Défense, Direction Générale de l'Armement, 75509 Paris, France, philippe.pouliguen@intradef.gouv.fr
[3]INSA Rennes, CNRS, IETR-UMR 6164, F-35000 Rennes, philippe.Besnier@insa-rennes.fr

Résumé. Cet article concerne la mesure de la Surface Équivalente Radar (SER) d'une plaque métallique, en Chambre Réverbérante à Brassage de Modes (CRBM). La méthode est fondée sur l'extraction de l'onde balistique entre l'antenne de mesure et la cible, à partir d'un signal comportant la rétrodiffusion de la CRBM elle-même. Les résultats obtenus sont en bon accord avec la SER mesurée en chambre anéchoïque. Cet article met en évidence l'impact d'une maîtrise imparfaite de la position du brasseur sur la précision de la SER extraite.

I. INTRODUCTION

La Surface Équivalente Radar (SER) d'un objet est un paramètre crucial dans un large éventail d'applications, notamment les applications militaires telles que la furtivité et la détection radar, mais également les applications civiles telles que l'interrogation RFID [1] et la caractérisation d'antenne [2]. Son évaluation est généralement effectuée dans une chambre anéchoïque (CA) en mesurant le coefficient de réflexion dans des configurations monostatiques, quasi monostatiques ou bistatiques. Ces dernières années, la Chambre Réverbérante à Brassage de Modes CRBM est devenue une alternative prometteuse à la CA pour une large gamme d'applications électromagnétiques, notamment l'estimation de paramètres tels que la Surface Équivalente d'Absorption [3], l'efficacité d'antennes [4] ou le diagramme de rayonnement [5]. Récemment, les CRBMs ont été proposées comme nouvel environnement pour mesurer la SER d'objets métalliques [6], [10]. Cette technique de mesure de la SER repose sur l'extraction de l'onde balistique (trajet direct entre l'antenne et la cible) rétrodiffusée par la cible en la distinguant du champ diffus rétrodiffusé par la chambre elle-même. La méthode présente l'avantage d'utiliser une configuration de mesure moins onéreuse que la mesure en CA classique. De plus, et contrairement à la méthode proposée dans [7], un fenêtrage temporel n'est pas nécessaire, évitant ainsi toute transformation de Fourier.

La méthode considérée dans ce papier [6] consiste en deux étapes : tout d'abord, le coefficient de réflexion de l'antenne est mesuré dans la CRBM à vide (sans la cible); dans un second temps, la même mesure est effectuée avec la cible. La différence entre les deux mesures permet de remonter à la SER de cette dernière. Bien que ne tournant pas pendant la mesure effectuée dans [6], le brasseur est néanmoins présent à l'intérieur de la CRBM.

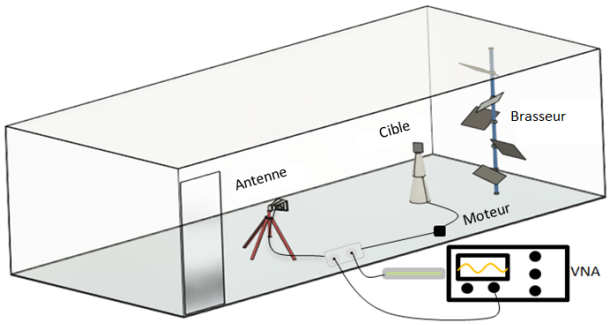

Fig.1. Configuration de la mesure de la SER en CRBM.

Dans ce papier, on présente l'impact du brasseur lorsque les deux mesures (avec et sans la cible) ne sont pas effectuées pour la même position de brasseur. Tout d'abord, on introduit la théorie de l'estimation de la SER en CRBM pour la configuration monostatique. Dans la section III, nous présentons la configuration de la mesure de la SER d'une cible canonique (plaque métallique) en CRBM. Ensuite, nous montrons l'impact de la position de brasseur sur la précision de l'estimation de la SER.

II. PROCESSUS DE MESURE DE LA SER EN CRBM

II.1. Mesure sans la cible en CRBM

Considérons une seule antenne positionnée dans le volume de travail de la chambre et orientée vers la position où sera ensuite placée la cible (lors de la seconde mesure). Son coefficient de réflexion peut être exprimé comme

$$S(f_0,\theta_b) = S_{EL}(f_0) + (1-|S_{EL}(f_0)|^2)H(f_0,\theta_b)\eta_{ant} \quad (1)$$

Dans cette équation $S_{EL}(f_0)$ représente le coefficient de réflexion de l'antenne en espace libre (EL), il peut être déduit en calculant la moyenne du coefficient de réflexion sur un tour de brasseur dans la CRBM. Le second terme est dû à la rétrodiffusion de la chambre, et s'écrit en fonction de $H(f_0,\theta_b)$ qui représente la fonction de transfert de la chambre à la position de l'antenne pour une position de brasseur arbitraire θ_b. Pour un fonctionnement idéal de la CRBM, cette fonction de transfert suit une loi normale centrée en fonction de la fréquence. Elle est pondérée par $(1-|S_{EL}(f_0)|^2)$ qui représente les pertes par

désadaptation de l'antenne, et η_{ant} représentant l'efficacité de rayonnement de l'antenne.

II.2. Mesure en CRBM avec la cible

Une fois la cible placée sur le mât (déjà présent lors de la mesure sans la cible), l'équation précédente peut être écrite comme :

$$S^C(f_0,\theta_b^C) = S_{EL}(f_0) + C(f_0)\sqrt{\sigma^C(f_0)} + (1-|S_{EL}(f_0)|^2)H^C(f_0,\theta_b^C)\eta_{ant} \quad (2)$$

Les deux termes précédents dans la partie droite de (1) sont toujours présents, mais la fonction de transfert est modifiée par la présence de la cible et devient $H^C(f_0,\theta_b^C)$ où l'indice C indique la présence de la cible. Le terme additionnel $C(f_0)\sqrt{\sigma^C(f_0)}$ représente la rétrodiffusion de l'onde balistique par la cible vers l'antenne. En particulier, la grandeur complexe $C(f_0)$ décrit la propagation de l'onde sur le trajet aller-retour entre l'antenne et la cible à la fréquence f_0. Le terme σ^C symbolise la SER de la cible à la même fréquence f_0. Si la distance R entre l'antenne et la cible est choisie pour être supérieure à $2D^2/\lambda$ où D est à la plus grande dimension de la cible et λ la longueur d'onde minimale considérée, l'amplitude de $C(f_0)$ peut-être simplifiée grâce à l'équation de Friis :

$$|C(f_0)| = \frac{G_{ant}(f_0)\,\lambda_0}{(4\pi)^{3/2}R^2}(1-|S_{EL}(f_0)|^2) \quad (3)$$

où $G_{ant}(f_0)$ correspond au gain de l'antenne à la fréquence considérée. En supposant que la taille de la cible est beaucoup plus petite que la distance R, la phase est supposée être constante le long de la cible, ce qui conduit à l'expression simplifiée suivante :

$$C(f_0) = |C(f_0)| \cdot exp\frac{-j2\pi f_0 2R}{c} \cdot exp\,(j\phi_0) \quad (4)$$

avec ϕ_0 une phase arbitraire constante. La variation de la phase correspond à la propagation de l'onde à la vitesse c le long du trajet aller-retour de deux fois la distance R entre l'antenne de mesure et la cible.

II.3. L'expression de la Surface Équivalente Radar

L'expression qui permet l'extraction du signal rétrodiffusé par la cible, puis de la SER, est trouvée en calculant la différence entre les deux mesures précédentes (avec et sans la cible) :

$$S^C(f_0,\theta_b^C) - S\,(f_0,\theta_b) = (1-|S_{EL}(f_0)|^2)\left(H^C(f_0,\theta_b^C) - H(f_0,\theta_b)\right)\eta_{ant} + \sqrt{\sigma^C(f_0)}\frac{G_{ant}(f_0)\,\lambda_0}{(4\pi)^{3/2}R^2}(1-|S_{EL}(f_0)|^2) \times exp\frac{-j2\pi f_0 2R}{c}\cdot exp\,(j\phi_0) \quad (5)$$

La partie droite de l'équation (5) consiste en l'addition de deux termes. Le premier est proportionnel à la différence entre les deux variables aléatoires $H^C(f_0,\theta_b^C) - H(f_0,\theta_b)$ suivant une distribution gaussienne centrée (en fonction de la fréquence ou de la rotation de brasseur). Cette distribution attendue permet de considérer ce terme comme un bruit additionnel non biaisé et extraire la SER à partir du deuxième terme à droite de cette équation. Ce dernier contient l'amplitude du signal rétrodiffusé par la cible vers l'antenne de mesure. En simplifiant cette équation (5), on obtient :

$$\frac{S^C(f_0,\theta_b^C) - S\,(f_0,\theta_b)}{G_{ant}(f_0)\,\lambda_0(1-|S_{EL}(f_0)|^2)} \propto \sqrt{\sigma^C(f_0)} \times exp\frac{-j2\pi f_0 2R}{c}\cdot exp\,(j\phi_0) \quad (6)$$

L'estimation de l'amplitude du signal rétrodiffusé du second terme de l'équation (6) permet de déduire la SER, tous les autres paramètres étant connus.

Cette méthode est expliquée en détails dans [8] et [9]. Pour une même position de brasseur lors des mesures avec et sans cible, la SER de la cible est retrouvée avec une bonne précision (Fig. 2). Dans cette étude, nous nous sommes attachés à extraire la SER à partir de la différence entre le coefficient de réflexion mesuré en CRBM chargée par la cible, à la position initiale du brasseur ($\theta_b^C = 0°$), et le coefficient de réflexion mesuré dans le cas de CRBM à vide (sans la cible), pour une position de brasseur décalée ($\theta_b \neq \theta_b^C$). Cet ensemble d'expériences vise à observer l'impact du changement de position du brasseur entre les deux étapes du processus de mesure.

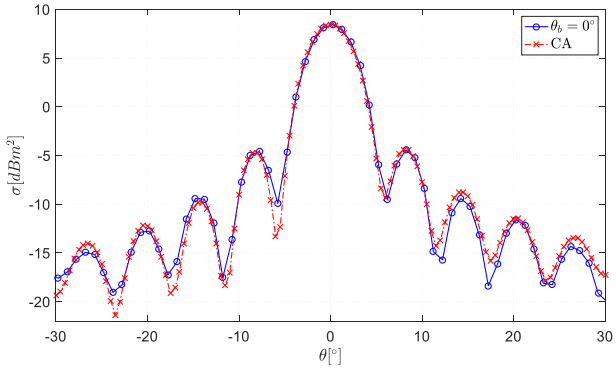

Fig.2. Variation angulaire de la SER de la plaque métallique à 10 GHz, obtenue à partir de la différence entre les deux mesures (avec et sans la cible) pour la même position de brasseur ($\theta_b^C = \theta_b = 0°$), comparée à la SER mesurée en chambre anéchoïque.

III. CONFIGURATION DE LA MESURE

L'antenne cornet est placée dans le volume de travail de la chambre, et orientée vers la cible (plaque métallique de dimension 14,8 × 15,1 cm²), posée sur le mât à une distance R = 2,95 m de l'antenne (Fig. 1). L'antenne cornet est connectée à l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) afin de mesurer son coefficient de réflexion. L'antenne, la cible et le brasseur sont alignés, et les deux premiers sont centrés à la même hauteur.

Les mesures sont effectuées dans la gamme de fréquences 9,75 GHz - 10,25 GHz, si bien que la distance R est assez grande pour que l'onde balistique puisse être considérée localement comme une onde plane à la position de la cible. La fréquence considérée est très haute comparée à la

fréquence minimale d'utilisation de la chambre (autour de 200 MHz), de sorte que le champ électrique à l'intérieur de la cavité peut être considéré comme homogène et isotrope. La SER de la cible est évaluée dans le plan azimutal, entre $\theta = +/-30°$ par pas de 1° autour de la position associée au maximum de rétrodiffusion ($\theta = 0°$). L'antenne cornet est polarisée verticalement avec un champ électrique le long de la hauteur de la CRBM. Le paramètre de réflexion $S(f_0)$ est mesuré par le VNA, après calibrage au niveau du connecteur de l'antenne.

IV. IMPACT DU DECALAGE DE LA POSITION DU BRASSEUR SUR LA PRECISION DE L'ESTIMATION DE LA SER

Cette partie, dédiée à l'impact de la position du brasseur mécanique, s'intéresse à la précision de l'estimation de la SER suivant le choix de la position de brasseur lors du calcul de la différence entre les deux mesures (avec et sans cible). Pour mettre en évidence l'impact du décalage de la position de brasseur entre les deux mesures, nous calculons la différence entre le paramètre de réflexion mesuré en CRBM chargée (avec la cible) à sa position initiale ($\theta_b^C = 0°$), et le paramètre de réflexion mesuré en CRBM à vide (sans la cible) pour des positions de brasseur différentes ($\theta_b^C \neq \theta_b$).

IV.1. Surface Équivalente Radar pour des positions de brasseur décalées

La Fig. 3 montre les modèles de la SER obtenus à partir de la différence entre les deux types de mesures, pour des positions de brasseur décalées ($\theta_b^C \neq \theta_b$). Les courbes relatives aux positions de brasseur à proximité de $\theta_b = 0°$ (considérée comme la référence) présentent une allure correcte de la SER de la cible. Mais néanmoins, lorsqu'on s'éloigne de la référence il devient de plus en plus compliqué de retrouver le modèle de la SER, voire impossible, sauf pour les angles de la cible où l'amplitude du signal rétrodiffusé est la plus importante (autour de 0°).

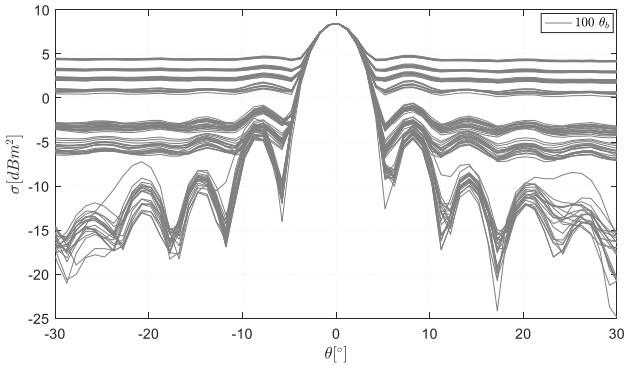

Fig.3. Variation angulaire de la SER de la plaque métallique à 10 GHz, obtenue à partir de la différence entre les deux mesures (avec et sans la cible) pour un décalage de position de brasseur ($\theta_b^C - \theta_b$) variant de 0° à 360°.

IV.2. Estimation de l'erreur en fonction de la position de brasseur décalée

La Fig. 4 montre la différence entre la SER obtenue pour $\theta_b^C = \theta_b = 0°$ et la SER déduite à partir de la différence entre les deux mesures pour des positions de brasseur décalées ($\theta_b^C \neq \theta_b$); cette différence est représentée sous la forme d'une erreur relative moyennée sur l'ensemble des positions de cible. Cette erreur varie en fonction de θ_b (pour $\theta_b^C = 0°$) et peut atteindre jusqu'à 650 % dans certains cas. Néanmoins, cette erreur varie en fonction de l'angle de la cible.

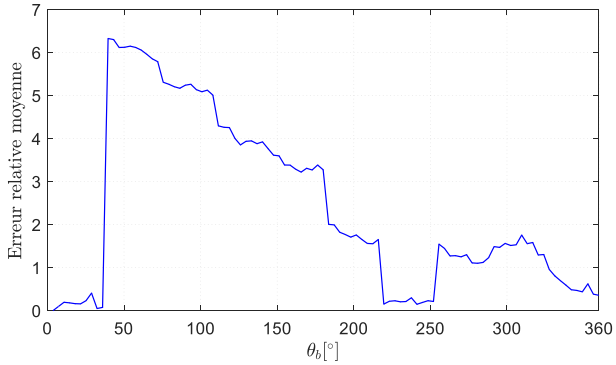

Fig.4. Erreur relative moyenne entre la SER obtenue pour une position fixe de brasseur ($\theta_b^C = \theta_b = 0°$) et celle extraite pour une position de brasseur décalée ($\theta_b^C \neq \theta_b$ avec $\theta_b^C = 0°$). La moyenne de l'erreur relative est calculée sur l'ensemble des angles de la cible [-30°; 30°].

Ces résultats ont été obtenus pour une position de brasseur arbitraire de référence (ici $\theta_b = 0°$), alors que la réponse de la chambre est fortement variable en fonction de la position de celui-ci. Afin d'étudier l'impact moyen d'un décalage de brasseur, nous présentons les résultats moyennés sur l'ensemble des positions de brasseur prises comme référence. L'erreur relative moyennée sur les positions de cible ainsi que sur les positions de brasseur prises comme référence sont présentées sur la Fig. 5 en fonction de $\theta_b^C - \theta_b$.

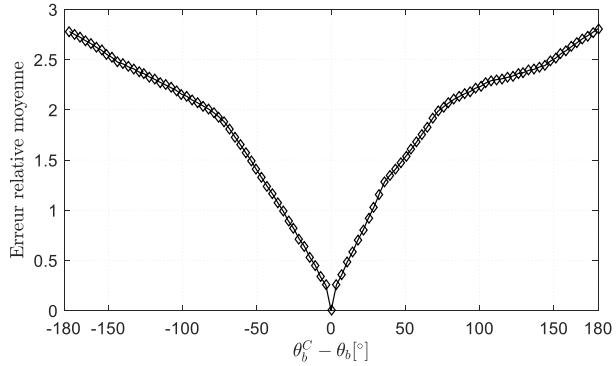

Fig.5. Erreur relative sur la SER obtenue pour une position de brasseur fixe et celle relative à un décalage de la position du brasseur. L'erreur est obtenue en utilisant à chaque fois une position de brasseur différente comme la référence. Le résultat final est moyenné sur l'ensemble des positions de brasseur références.

La position $\theta_b^C = \theta_b$ étant prise comme référence dans chacun des cas, l'erreur relative est strictement égale à 0° pour $\theta_b^C - \theta_b$ = 0°. L'erreur augmente ensuite de façon monotone à mesure que l'on s'éloigne de la position de brasseur prise comme référence. De manière générale, il est donc nécessaire de prendre deux positions de brasseur identiques, ou, a minima, deux positions proches afin d'estimer au mieux la SER de la cible.

V. CONCLUSION

Ce papier présente la mesure de la SER d'une plaque métallique en CRBM, où nous avons mis en évidence l'impact de la position de brasseur sur la précision de l'estimation de la SER, i.e., lorsque la position de brasseur n'est pas la même entre les deux mesures nécessaires (avec et sans la cible). Les résultats montrent que la précision de la SER diminue fortement lorsque les deux positions de brasseur considérées sont très différentes. Néanmoins, pour des positions de brasseur relativement proches, la différence reste assez faible. Ce comportement dépend du brasseur lui-même, i.e. de sa géométrie. Bien que la CRBM puisse être proposée comme une alternative valable et économiquement avantageuse par rapport à la CA pour les mesures de la SER de cibles canoniques, nous concluons que la même position de brasseur doit être choisie lorsqu'on calcule la différence entre les deux mesures (avec et sans la cible), afin d'augmenter la précision de l'estimation du modèle de la SER.
Les perspectives de ce travail concernent à la fois l'amélioration de la précision de la SER obtenue à l'aide d'autres méthodes de traitement de signal ainsi que l'application de cette approche pour mesurer des SER d'antennes.

REFERENCES

[1] P. V. Nikitin and K. V. S. Rao, "*Theory and measurement of backscattering from RFID tags*", IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 48, no. 6, pp. 212-218, Dec. 2006.

[2] F. Sarrazin, P. Pouliguen, A. Sharaiha, J. Chauveau and P. Potier, "*Antenna Physical Poles Extracted From Measured Backscattered Fields*", IEEE Trans. Antenna. Propag., vol. 63, no. 9, pp. 3963-3972, Sept. 2015.

[3] G. Lerosey and J. de Rosny, "*Scattering cross section measurement in reverberation chamber*", IEEE Trans. Electromagn. Compat. vol. 49, no. 2, pp. 280-284, May 2007.

[4] W. Krouka, F. Sarrazin and E. Richalot, "*Influence of the Reverberation Chamber on Antenna Characterization Performances*", 2018 Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC EUROPE), Amsterdam, pp. 329-333, 2018.

[5] C. Lemoine, E. Amador, P. Besnier and J.M. Floc'h, "*Antenna directivity measurement in reverberation chamber from Rician K-factor estimation*", IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 61, no.10, pp 5307-5310, Oct. 2013.

[6] P. Besnier, J. Sol and S. Meric, *"Estimating Radar Cross-Section of Canonical Targets in Reverberation Chamber",* EMC Europe, Angers, France, 2017.

[7] A. Soltane, G. Andrieu and A. Reineix, "*Monostatic Radar Cross-Section Estimation of Canonical Targets in Reverberating Room Using Time-Gating Technique*", 2018 Int. Symp . Electromagn. Compat. (EMC EUROPE), Amsterdam, pp. 355-359, 2018.

[8] A. Reis, F. Sarrazin, E. Richalot and P. Pouliguen, "*Mode-Stirring Impact in Radar Cross Section Evaluation in Reverberation Chamber*", 2018 Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC EUROPE), Amsterdam, pp. 875-878, 2018.

[9] 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 Trans. Antennas Propag., doi: 10.1109/TAP.2021.3060581, to be published.

[10] A. Sorrentino, G. Ferrara, M. Migliaccio and S. Cappa, "*Measurements of Backscattering from a Dihedral Corner in a Reverberating Chamber*", ACESS JOURNAL, vol. 33, no. 1, January 2018.