



**HAL**  
open science

## Caractérisation passive du couplage entre deux antennes par corrélation de bruit en chambre réverbérante

Meriem Tamart, Francois Sarrazin, Elodie Richalot, Matthieu Davy, Julien de  
Rosny

► **To cite this version:**

Meriem Tamart, Francois Sarrazin, Elodie Richalot, Matthieu Davy, Julien de Rosny. Caractérisation passive du couplage entre deux antennes par corrélation de bruit en chambre réverbérante. 20eme Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM 2020), Apr 2021, Lyon, France. hal-03327427

**HAL Id: hal-03327427**

**<https://hal.science/hal-03327427v1>**

Submitted on 27 Aug 2021

**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.

# Caractérisation passive du couplage entre deux antennes par corrélation de bruit en chambre réverbérante

M. Tamart<sup>1</sup>, F. Sarrazin<sup>1</sup>, E. Richalot<sup>1</sup>, M. Davy<sup>2</sup>, J. de Rosny<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Est, ESYCOM (FRE2028), UPEMLV, ESIEE-Paris, CNAM, F-77454 Marne-la-Vallée, France, meriem.tamart@u-pem.fr

<sup>2</sup>Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR - UMR 6164, F-35000 Rennes, France, matthieu.davy@univ-rennes1.fr

<sup>3</sup>ESPCI ParisTech, PSL Research University, CNRS, Institut Langevin - 1 rue Jussieu, F-75005, Paris, France, julien.derosny@espci.fr

## Résumé

Cette communication s'intéresse à une technique passive d'estimation de la fonction de transfert entre antennes en chambre réverbérante à brassage de modes. En exploitant l'inter-corrélation du champ électromagnétique diffus généré par une unique antenne en émission, nous démontrons que la réponse impulsionnelle entre deux antennes en réception peut être récupérée. Ces résultats montrent qu'il est possible de caractériser passivement le couplage entre deux antennes en chambre réverbérante.

## I. INTRODUCTION

Le domaine des communications sans fil est en perpétuelle évolution. Cet essor considérable a engendré d'énormes besoins en termes de développement de nouvelles techniques de caractérisation permettant de mesurer les performances des antennes utilisées. Nous exploitons ici la technique d'inter-corrélation de champs diffus pour pouvoir caractériser passivement le couplage entre deux antennes.

La technique d'extraction de la fonction de transfert du champ d'ondes a été introduite et développée parallèlement dans différents domaines de la physique théorique et expérimentale et elle a été appliquée à tous types d'ondes (sismiques [1], acoustiques [2], élastiques [3] et électromagnétiques [4]). L'estimation de cette fonction nécessite la réception d'un champ diffus, cela signifie que le champ reçu au niveau d'un récepteur quelconque placé dans le milieu est homogène et isotrope. Ce champ diffus peut être obtenu soit par une distribution particulière de sources, soit par des diffuseurs introduits dans le milieu (diffusion multiple), ou alors tout simplement par la nature réverbérante du milieu.

Dans cet article, nous allons reconstruire passivement la fonction de transfert entre deux antennes en nous basant sur les propriétés de la chambre Réverbérante à Brassage de Mode (CRBM) pour l'obtention d'un champ diffus. En utilisant une seule antenne source et en moyennant sur différentes réalisations, le signal reconstruit est attendu converger vers la réponse impulsionnelle entre les deux antennes en réception. Le travail présenté ici consiste

à tirer profit de cette technique pour caractériser passivement le couplage entre deux antennes par corrélation de bruit en CRBM. Dans la première partie de l'article, nous décrivons le principe de corrélation de bruit et son lien avec la reconstruction passive de la réponse impulsionnelle. Ensuite, nous détaillerons le dispositif de mesure et les résultats obtenus.

## II. PRINCIPE DE RECONSTRUCTION DE LA FONCTION DE TRANSFERT ENTRE DEUX ANTENNES EN CRBM

L'idée fondamentale de la corrélation de champ est d'utiliser la complexité du champ pour extraire des informations sur le milieu, c'est-à-dire tendre vers sa réponse impulsionnelle. La relation entre la fonction de transfert et la corrélation du champ se traduit donc par le fait que sous l'hypothèse d'un champ diffus, la corrélation des signaux enregistrés par deux capteurs passifs contient essentiellement la même information sur le milieu que le signal que l'on aurait acquis, si un de ces capteurs était actif (émetteur) et l'autre était passif (récepteur) (Fig. 1).

La fonction de corrélation obtenue pour une paire de capteurs possède une partie avec des temps positifs (ou partie causale) et une partie avec des temps négatifs (partie anti-causale).

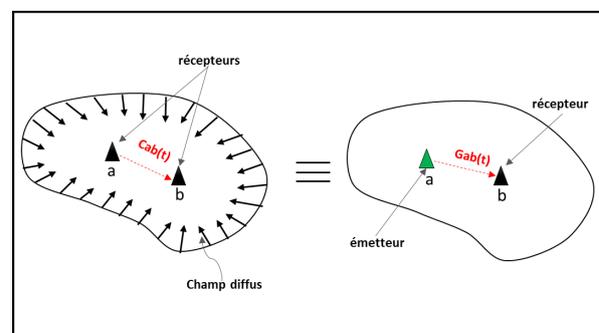


FIGURE 1. Schéma illustrant la reconstruction de la fonction de transfert par inter-corrélation de champs diffus.

En se basant sur le théorème de fluctuation dissipation,

la fonction de corrélation  $C_{ab}$  entre deux points a et b peut être obtenue dans le domaine fréquentiel à partir des paramètres impédance  $Z$  mesurés entre les capteurs en ces points et les différentes sources en utilisant (1).

$$C_{ab}(f) = \sum_k Z_{ak} Z_{bk}^* \quad (1)$$

Où  $C_{ab}$  est obtenu en moyennant les contributions des différentes sources et  $k$  l'indice des sources.

Pour un ensemble de sources  $S$  entourant les récepteurs a et b, la relation liant la fonction d'inter-corrélation aux deux parties (causale et anti-causale) de la fonction de transfert entre a et b est donnée par (2), avec  $G_{ab}$  et  $G_{ba}$  les réponses impulsionnelles entre les récepteurs a et b.

$$\frac{dC_{ab}(\tau)}{d\tau} \propto G_{ab}(t) - G_{ba}(t) \quad (2)$$

Le champ généré à l'intérieur d'une cavité chaotique, ici une CRBM, est naturellement diffus. Il est généré à partir d'une seule antenne source et de la diffusion multiple sur les parois de la CRBM, de sorte que les antennes en réception sont illuminées par une distribution aléatoire et uniforme d'ondes planes provenant de toutes les directions. Dans ce cas, plusieurs configurations de l'environnement électromagnétique sont obtenues en faisant tourner le brasseur de modes : ainsi, la fonction d'inter-corrélation donnée en (1) est calculée via une moyenne sur les différentes positions du brasseur. La fonction reconstruite contient en effet non seulement l'onde directe mais aussi les contributions multiplement diffusées dans le milieu.

### III. Mesures

La validation expérimentale du principe de reconstruction de la fonction de transfert entre deux antennes a été faite à travers des mesures effectuées dans la CRBM du laboratoire ESYCOM. Elle possède les caractéristiques suivantes : - Une géométrie parallélépipédique avec des dimensions (LxlxH) de 2,751m x 2,951m x 2,354m ; - Un brasseur de modes de type mécanique et de forme non-symétrique qui est commandé de l'extérieur à l'aide d'un moteur pas à pas connecté à un ordinateur à travers une interface utilisateur ; - Une fréquence minimale d'utilisation (LUF) de 400 MHz.

Nous visons la reconstruction de la réponse impulsionnelle entre deux antennes identiques de type cornet en réception à partir du champ diffus généré par une unique source, une troisième antenne large bande de type cornet fonctionnant dans la bande [1-10] GHz. Le setup de mesure est présenté sur Fig. 2. L'antenne en émission (notée c) est dirigée vers un brasseur de modes permettant de modifier les modes de la cavité et d'obtenir un champ statistiquement homogène et isotrope. Les deux antennes réceptrices (notées a et b) sont placées en vis à vis dans

le volume de travail de la CRBM. Elles sont connectées aux ports 1 et 2 d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) fonctionnant jusqu'à 8 GHz et permettant ainsi de mesurer les paramètres  $S$  entre les trois antennes utilisées.

Les mesures sont effectuées en 100001 points fréquentiels uniformément espacés sur la bande fréquentielle de [1-8] GHz pour 10 positions de brasseur.

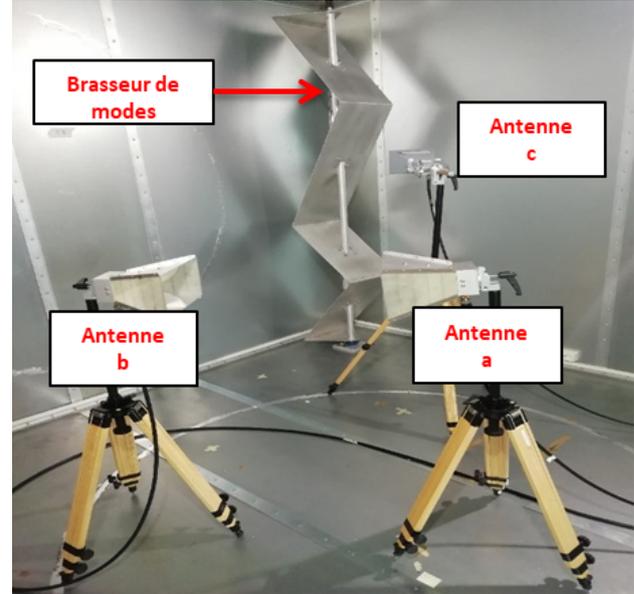


FIGURE 2. Setup de mesure à l'intérieur de la CRBM .

Afin d'étudier la convergence de la fonction de corrélation vers la réponse impulsionnelle estimée entre deux antennes en réception, nous avons fait une étude sur l'influence des paramètres contrôlables sur la qualité de la reconstruction. Dans un premier lieu, nous avons étudié l'influence du nombre de positions de brasseur. Pour cela, plusieurs mesures ont été faites par pas angulaire variable (360°, 72°, 36°, 18°, 12°, 6°) correspondant à des nombres croissants de positions de brasseur.

Par la suite, pour étudier l'influence de l'espacement entre les deux antennes réceptrices sur la reconstruction passive de leurs réponses impulsionnelles, nous avons utilisé une deuxième configuration (Fig. 3). L'antenne a étant fixe, nous avons déplacé l'antenne b de façon à espacer les deux antennes de 44 cm à 64 cm avec un pas de 10 cm.

Une fois les données de mesures récupérées, elles sont traitées dans le domaine fréquentiel car le calcul de la fonction de corrélation en fréquentiel est plus rapide que dans le domaine temporel. Dans un premier temps, nous éliminons les informations d'amplitude des paramètres  $Z_{ij}$  en travaillant seulement avec les informations contenues sur la phase  $\Phi_{ij}$  des signaux. Cela permet d'avoir des contributions équivalentes de toutes les fréquences dans la bande de travail. L'efficacité des informations de phase a déjà été démontrée dans [5]. Soient  $Z'$  les

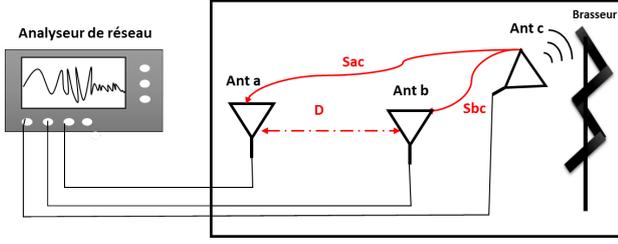


FIGURE 3. Schéma illustrant le principe de mesure avec un espacement  $D$  variable entre antennes réceptrices .

nouveaux paramètres ne prenant en considération que les informations de la phase, les indices  $a$  et  $b$  pour les antennes réceptrices, et  $c$  pour l'antenne source. L'inter-corrélation  $C_{ab}$  est alors calculée comme suit :

$$C_{ab}(f) = Z'_{ac} Z'_{bc}{}^* \quad (3)$$

Avec :

$$Z'_{ij}(f) = \exp(j \cdot \Phi_{ij}) \quad (4)$$

La fonction d'inter-corrélation est ensuite convertie dans le domaine temporel en utilisant une transformation de Fourier inverse et elle est moyennée sur les différentes positions de brasreur.

#### IV. Résultats de mesure

La Fig. 4 montre les résultats obtenus en calculant la fonction de corrélation en ne tenant compte que de phases des signaux (courbe rouge) et par mesure directe des réponses impulsionnelles entre les antennes  $a$  et  $b$  (courbe bleue) et inversement (courbe noire). Comme attendu, les résultats obtenus sont bien superposés et la fonction d'inter-corrélation converge vers la réponse impulsionnelle moyenne entre les antennes de sorte que l'on puisse récupérer l'onde balistique et les premiers échos dans la CRBM. Afin de voir l'influence du blanchiment fréquentiel des amplitudes des réponses, la Fig. 5 illustre les résultats obtenus en calculant la fonction d'inter-corrélation et par mesure directe lorsque les amplitudes des impédances complexes sont conservées.

La Fig. 6 montre les fonctions de corrélation obtenues sur la paire d'antennes ( $a$  et  $b$ ) utilisées en réception pour un nombre croissant de positions de brasreur. On observe que le niveau de fluctuation de la réponse diminue en augmentant le nombre de positions de brasreur. Les résultats obtenus au-delà de 30 positions de brasreur sont assez similaires, indiquant une convergence de la réponse en fonction du nombre de positions du brasreur.

Pour déterminer le nombre optimal de positions de brasreur à prendre en compte pour converger rapidement vers la réponse impulsionnelle entre deux antennes, nous avons calculé le coefficient de similitude  $S$ . La Fig. 7

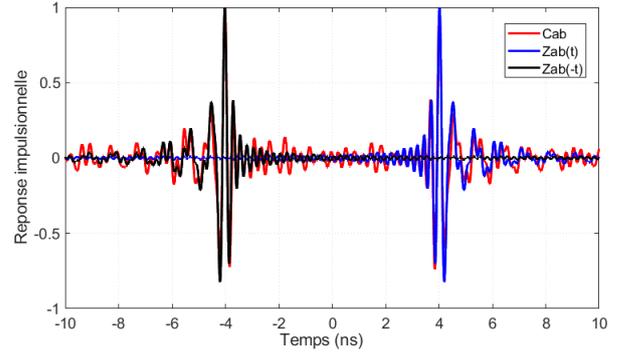


FIGURE 4. Fonction de corrélation calculée avec les phases des signaux (rouge) et réponses impulsionnelles mesurées (noire et bleue), pour une distance de 54 cm entre les 2 antennes et 10 positions de brasreur.

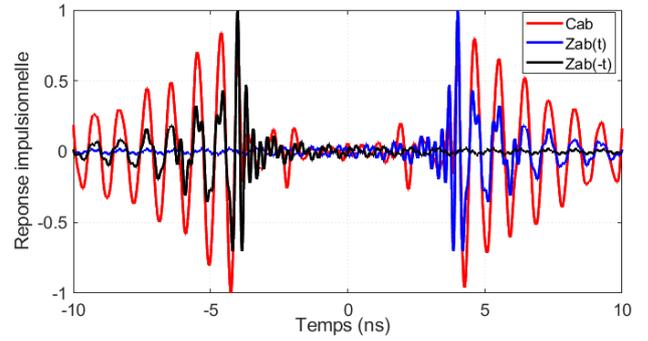


FIGURE 5. Fonction de corrélation calculée en tenant en compte des amplitudes des signaux (rouge) et réponses impulsionnelles mesurées (noire et bleue), pour une distance de 54 cm entre les 2 antennes et 10 positions de brasreur.

montre que les résultats de corrélation obtenus avec 30 positions et 60 positions de brasreur sont proches ce qui permet de conclure que dans ce cas 30 positions de brasreur (pas angulaire  $12^\circ$ ) sont suffisantes pour converger vers la réponse impulsionnelle entre les deux antennes cornets.

$$S = Re \frac{\int_f C_{ab}(f) \tilde{C}_{ab}^*(f) df}{\sqrt{(\int_f |C_{ab}(f)|^2 df) (\int_f |\tilde{C}_{ab}(f)|^2 df)}} \quad (5)$$

Avec  $\tilde{C}_{ab}$  la corrélation obtenue avec 60 positions de brasreur prise comme référence.

Les résultats de corrélation obtenus dans la deuxième configuration permettant d'étudier l'impact de l'espacement entre les antennes en réception sur la qualité de reconstruction de leurs fonctions de transfert sont montrés sur la Fig. 8. Pour un espacement de 44 cm, la première impulsion correspondant à la partie causale apparaît à  $t_1=3,67$  ns, pour un espacement de 54 cm, elle apparaît à  $t_2=4$  ns et pour un espacement de 64 cm, elle apparaît à

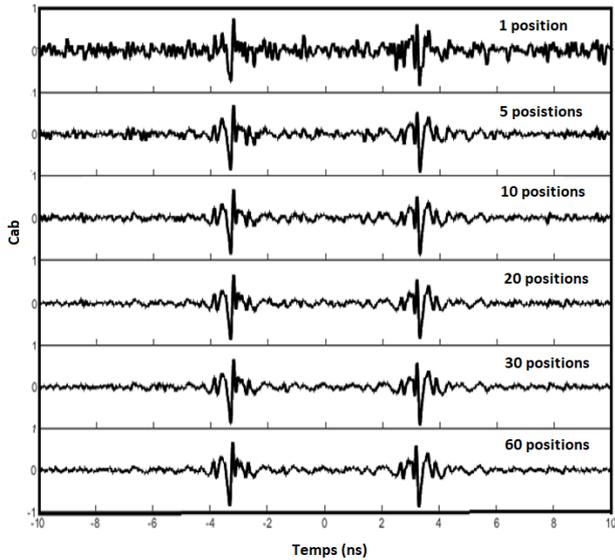


FIGURE 6. Résultats obtenus par calcul de la fonction d'intercorrélacion pour un nombre croissant de positions de brasseur, pour une distance de 45 cm entre les 2 antennes.

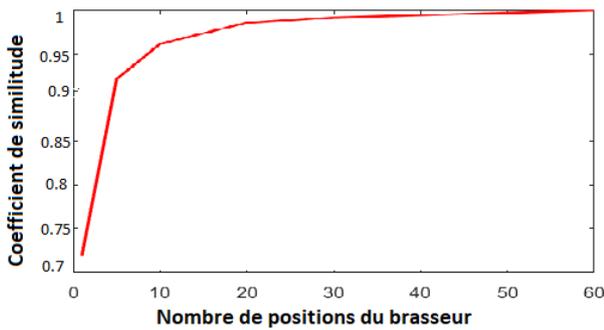


FIGURE 7. Evolution du coefficient de similitude en fonction du nombre de positions du brasseur, en prenant pour référence la réponse pour 60 positions.

$t_3=4,33$  ns. La différence des temps associés aux impulsions pour chaque distance correspond à un espacement de 9,9 cm, proche des 10 cm attendus. Il est à noter que pour une distance donnée, il est difficile d'extraire l'espacement entre les antennes en se basant sur les temps d'apparition des impulsions correspondant aux parties causale et anti-causale des réponses impulsionnelles. En effet, les antennes cornets se comportent comme des guides d'onde et le temps de trajet de l'onde dans le cornet s'ajoute au temps de propagation en espace libre.

## V. Conclusion

Dans cet article, nous avons exploité la technique d'inter-corrélacion du champs diffus pour estimer passivement la réponse impulsionnelle entre deux antennes en utilisant une seule source localisée dans une CRBM. La

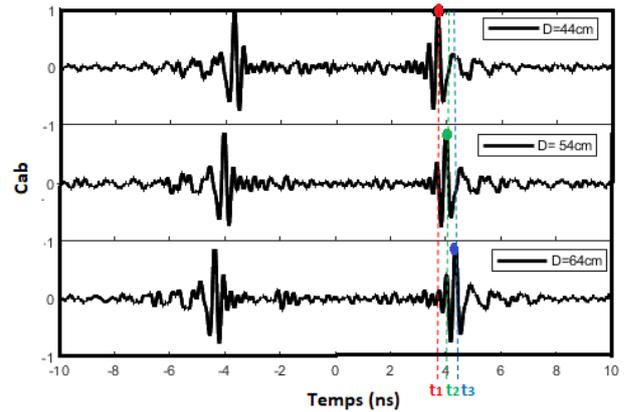


FIGURE 8. Résultats obtenus par calcul de la fonction d'intercorrélacion pour plusieurs espacements entre les antennes en réception, pour 10 positions de brasseur

validation expérimentale de cette technique a été exposée à travers des mesures dans la CRBM du laboratoire ESYCOM avec deux antennes cornets en réception. Nous avons présenté les résultats de mesure obtenus permettant de valider le principe de la reconstruction de la réponse impulsionnelle en étudiant l'influence de l'espacement entre les antennes réceptrices ainsi que le nombre de positions de brasseur sur la convergence de l'inter-corrélacion de champ vers la réponse impulsionnelle entre les antennes.

En perspective, ce travail sera approfondi pour utiliser la technique d'inter-corrélacion afin de caractériser le couplage entre deux antennes en réception qui n'ont pas la possibilité d'être utilisées en émission.

## Références

- [1] M. Campillo and A. Paul, "Long-Range Correlations in the Diffuse Seismic Coda", *Science* 299, 547 (2003).
- [2] P. Roux, W. Kuperman, and N. Grp, "Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean", *J. Acoust. Soc. Am.* 116, 1995 (2004).
- [3] L. Chehemi, J. D. Rosny, C. Prada, E. Moulin, and J. Assaad, "Extraction des fonctions de Green par corrélation de bruit : application pour la détection et l'imagerie de défaut dans des plaques minces réverbérante", *Lebanese Science Journal*, Vol. 16, Special Issue, 2015.
- [4] M. Davy, J. de Rosny, and P. Besnier, "Green's Function Retrieval with Absorbing Probes in Reverberating Cavities", *Phys. Rev. Lett.*, p.5, 2016.
- [5] A. Derode, A. Tourin, and M. Fink, "Ultrasonic pulse compression with one-bit time reversal through multiple scattering", *J. Appl. Phys.*, vol. 85, p. 6434, 2014.