



**HAL**  
open science

## Etude du couplage entre deux antennes 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. Etude du couplage entre deux antennes en chambre réverbérante.. 22ièmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. hal-04064031

**HAL Id: hal-04064031**

**<https://hal.science/hal-04064031>**

Submitted on 6 Jun 2023

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

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

## Etude du couplage entre deux antennes 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>Univ Gustave Eiffel, CNRS, ESYCOM, F-77454 Marne-la-Vallée, France

<sup>2</sup>Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR - UMR 6164, F-35000, Rennes, France

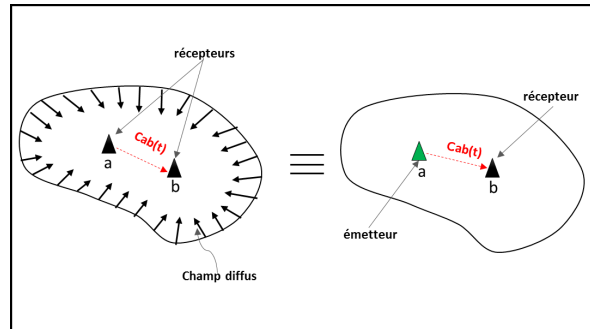
<sup>3</sup>ESPCI Paris, PSL Research University, CNRS, Institut Langevin, F-75005 Paris, France  
meriem.tamart@univ-eiffel.fr

**Résumé** — Cette communication s'intéresse à une technique passive d'estimation du couplage entre deux antennes en réception dans une chambre réverbérante à brassage de modes. En exploitant l'inter-corrélation des impédances mutuelles entre chaque récepteur et une unique antenne en émission qui génère un champ électromagnétique diffus, nous démontrons que la réponse impulsionnelle entre deux antennes en réception peut être récupérée.

### 1. Introduction

Pour de nombreuses applications et notamment dans le cas de réseaux d'antennes, il est nécessaire de bien estimer le couplage entre antennes. De plus, la miniaturisation des dispositifs antennaires rend leur caractérisation difficile et la recherche de nouvelles techniques pour mesurer les performances réelles des antennes est devenue un réel besoin. Dans ce cadre, l'objectif de cet article est de présenter une nouvelle méthode de caractérisation passive du couplage entre deux antennes par corrélation de champ diffus dans une cavité réverbérante. La méthode de corrélation de bruit sur laquelle elle s'appuie a été développée dans différents domaines de la physique théorique et expérimentale et a été appliquée à tous les types d'ondes (sismique [1], acoustique [2], élastique [3] et électromagnétique [4]). L'utilisation de cette technique nécessite la réception d'un champ diffus, c'est-à-dire que le champ reçu en tout point est homogène et isotrope. Ce champ diffus peut être obtenu soit par une distribution particulière des sources, soit par des diffuseurs introduits dans le milieu (diffusion multiple), soit encore tout simplement par la nature réverbérante du milieu. Le travail présenté ici tire parti de cette technique pour caractériser passivement le couplage entre deux antennes par corrélation de bruit dans une chambre réverbérante (CR). Nous exploitons les propriétés de la CR pour générer un champ diffus en utilisant une source unique et un brasseur de modes mécanique; en faisant la moyenne sur différentes réalisations, on s'attend à ce que le signal reconstruit converge vers la réponse impulsionnelle entre les deux antennes en réception [5].

Contrairement aux travaux récents portant sur l'inter-corrélation des paramètres S[6], nous nous intéressons dans ce papier à l'inter-corrélation des paramètres Z. La section 2 rappelle le principe d'extraction de la réponse



**Figure 1. Principe de la reconstruction de la réponse impulsionnelle par corrélation de champs diffus.**

impulsionnelle à partir des intercorrélations alors que les sections 3 et 4 présentent respectivement notre configuration de mesure ainsi que les résultats.

### 2. Principe de la reconstruction de la réponse impulsionnelle entre deux antennes en CR

La relation entre la réponse impulsionnelle et la fonction de corrélation est reflétée par le fait que, dans l'hypothèse d'un champ diffus, la corrélation des signaux enregistrés par deux capteurs passifs contient essentiellement la même information que le signal que l'on aurait acquis, si l'un de ces capteurs était actif (émetteur) et l'autre passif (récepteur) (Figure 1).

On considère deux signaux provenant de plusieurs sources  $k$  sur les ports  $a$  et  $b$ . En appliquant le principe de superposition, les deux tensions  $U_a$  et  $U_b$  induites aux accès de ces 2 antennes par le rayonnement de ces sources peuvent être écrites comme suit :

$$U_a = \sum_k U_{ak}, U_b = \sum_k U_{bk} \quad (1)$$

Avec  $U_{ak}$  et  $U_{bk}$  les tensions générées par une source  $k$  sur les ports  $a$  et  $b$ , respectivement. La fonction de corrélation  $C_{ab}$  de deux tensions  $U_a$  et  $U_b$  calculée en fonction de la matrice d'impédance  $Z$  entre les ports  $a$  et  $b$  est donnée par l'équation (2).

$$C_{ab}(f) = \sum_k Z_{ak} Z_{bk}^* \quad (2)$$

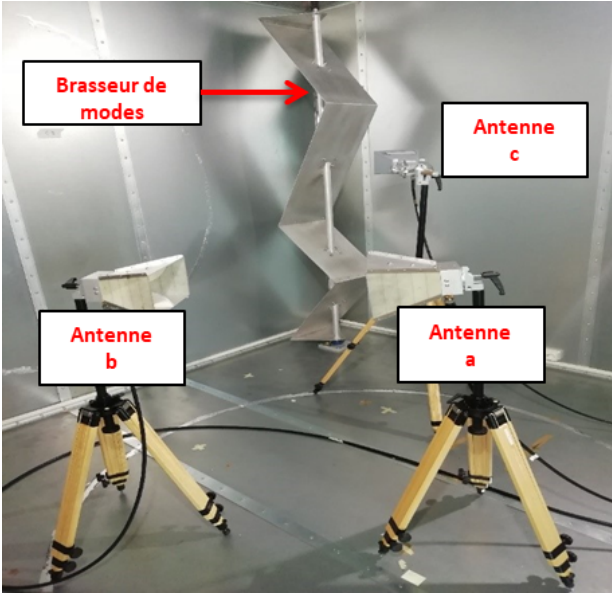


Figure 2. Setup de mesure à l'intérieur de la CR.

Où  $Z_{ak}$  ( $Z_{bk}$ ) est l'impédance mutuelle entre la source  $k$  et le port  $a$  ( $b$ ) lorsqu'une tension est appliquée au port  $a$  ( $b$ ) et que le port  $b$  ( $a$ ) est en circuit-ouvert.

En se basant sur le théorème de fluctuation-dissipation, à l'équilibre thermique, la fonction de corrélation se calcule à partir des matrices impédance et de charge et elle est exprimée comme suit [4] :

$$C_{ab}(f) = 2k_B T(f) Q [Z + Z^*] Q^\top \quad (3)$$

Où :

- $k_B$  est la constante de Boltzmann.
- $T$  est la température du système.
- $Q$  est une matrice donnée par l'équation (4).

$$Q = Z_L (Z + Z_L)^{-1} \quad (4)$$

Avec  $Z_L$  l'impédance de charge. Dans le cas où les 2 antennes en réception sont chargées sur une haute impédance, l'équation (4) se simplifie, et la fonction de corrélation tend vers la partie réelle de l'impédance mutuelle.

$$C_{ab}(f) = 2k_B T(f) \Re(Z_{ab}) \quad (5)$$

Dans le domaine temporel, la relation liant la fonction d'inter-corrélation aux deux parties (causale et anti-causale) de la fonction de transfert entre les récepteurs  $a$  et  $b$  est donnée par l'équation (6), avec  $G_{ab}$  et  $G_{ba}$  les réponses impulsionnelles entre  $a$  et  $b$ .

$$\frac{dC_{ab}(\tau)}{d\tau} = G_{ab}(t) - G_{ba}(t) \quad (6)$$

Dans ce qui suit, une seule source est utilisée et les différentes configurations d'excitation sont générées par la rotation de bras de modes, au lieu de sommer sur les sources, la somme s'applique ici aux différentes positions du bras de modes.

### 3. Mesures

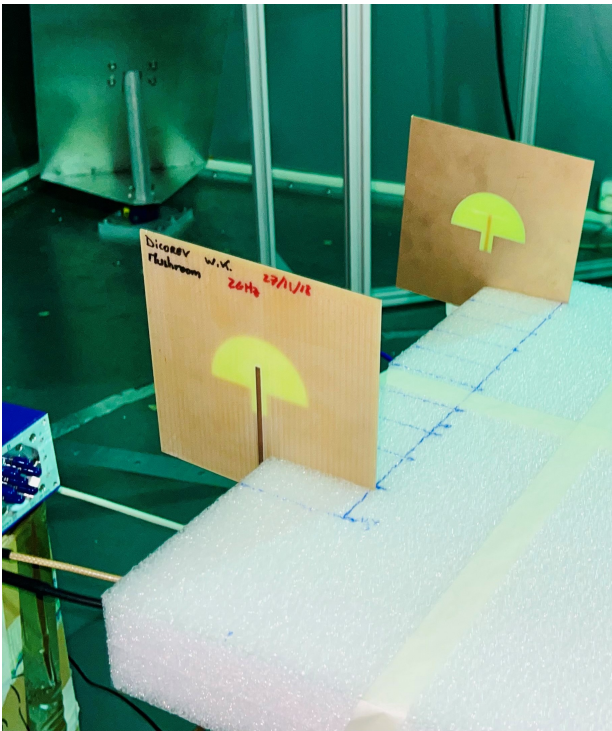
Les résultats théoriques sont confirmés expérimentalement à travers des mesures effectuées dans la CR du laboratoire ESYCOM. Elle possède les caractéristiques suivantes : - Une géométrie parallélépipédique avec des dimensions (LxlxH) de 2,751m x 2,951m x 2,354m ; - Un bras de modes de type mécanique possédant une géométrie complexe ; - Une fréquence minimale d'utilisation (LUF) de 400 MHz. Nous visons la reconstruction de la réponse impulsionnelle entre deux antennes identiques de type cornet (gain de 10,7 dB à 4 GHz) 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 la Figure 2. L'antenne en émission (notée c) est dirigée vers un bras 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 CR. Elles sont connectées aux ports 1 et 2 d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) fonctionnant jusqu'à 8 GHz. Les mesures sont effectuées en 100001 points fréquentiels uniformément espacés sur la bande fréquentielle de [1-8] GHz pour 10 positions de bras de modes. 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 de la bande passante en réduisant la bande fréquentielle initiale de [1-8] GHz à [1-3] GHz. Par la suite, nous avons analysé l'effet du nombre de positions de bras de modes sur la convergence de la fonction de corrélation. Pour cela, on considère un pas angulaire variable (360°, 36°, 12°, 6°) correspondant à des nombres croissants de positions de bras de modes.

Pour valider la méthode de corrélation de champ également dans le cas d'antennes non directives, nous avons utilisé une deuxième configuration (figure 3). Les antennes caractérisées sont deux antennes imprimées sur un substrat en FR4 et constituées d'une fente en forme de demi-cercle excitée par un monopôle. Les deux antennes sont séparées par une distance de 15 cm. 60 mesures ont été effectuées sur un tour complet du bras de modes avec un pas angulaire de 6° dans la bande fréquentielle [1-4] GHz.

Une fois les données de mesures récupérées, elles sont traitées dans le domaine fréquentiel car le calcul de corrélation en fréquentiel est plus rapide que dans le domaine temporel. 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 bras de modes.

### 4. Résultats

La figure 4 montre les résultats obtenus en calculant la fonction de corrélation (courbe rouge) et par mesure directe des réponses impulsionnelles entre les antennes a et b (courbe bleue et courbe noire). Comme attendu, la fonction de corrélation obtenue converge vers la réponse im-



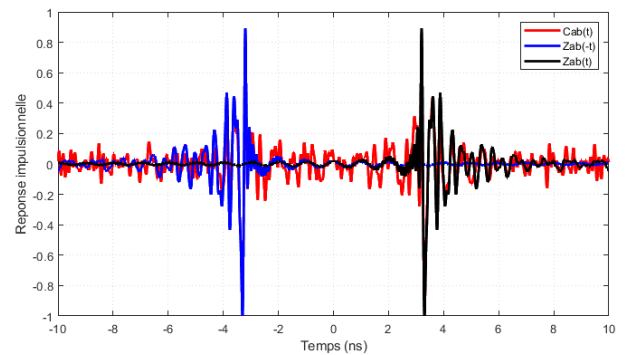
**Figure 3. Banc de mesure avec deux antennes de type patch en réception.**

pulsionnelle moyenne entre les antennes de sorte que l'on puisse récupérer l'onde balistique et les premiers échos dans la CR. On retrouve l'impulsion due au trajet direct à  $t=3,3$  ns ce qui correspond à la distance entre les deux plans de calibrage (le temps de trajet de l'onde dans les deux cornets de longueur de 25 cm ce qui correspond à  $t=1,7$  ns s'ajoute au temps de propagation en espace libre : 45 cm d'espacement entre les récepteurs ce qui correspond à  $t=1,5$  ns).

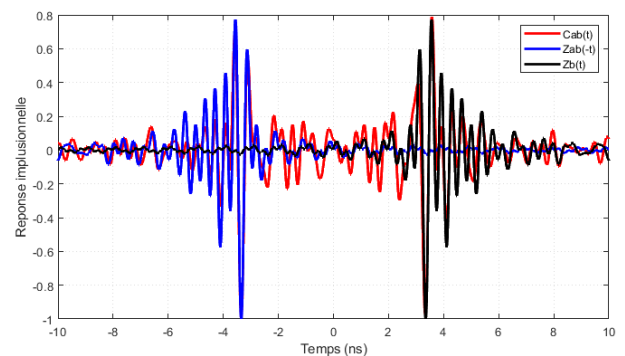
Afin de voir l'influence de la largeur de bande passante, la Figure 5 illustre les résultats obtenus en calculant la fonction d'intercorrélation et par mesure directe en considérant une bande fréquentielle de [1-3] GHz. Les pics principaux sont bien reconstruits aux bons endroits. On voit bien qu'en diminuant la largeur de bande fréquentielle on perd en résolution temporelle et les échos après l'onde directe ont des amplitudes plus importantes par rapport au cas large bande ([1-8] GHz).

La figure 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 brasseur. On observe que le niveau de fluctuations de la réponse impulsionnelle estimée diminue en augmentant le nombre de positions de brasseur.

La fonction de corrélation reconstruite dans le cas de la deuxième configuration avec deux antennes omnidirectionnelles ainsi que la mesure directe sont montrées sur la figure 7. Le pic principal reconstruit est bien superposé à celui de la mesure directe ce qui permet de valider cette méthode pour tout type d'antenne.



**Figure 4. Fonction de corrélation calculée (rouge) et réponses impulsionnelles mesurées (noire et bleue) dans la bande [1-8] GHz, pour une distance de 45 cm entre les 2 antennes et 10 positions de brasseur.**

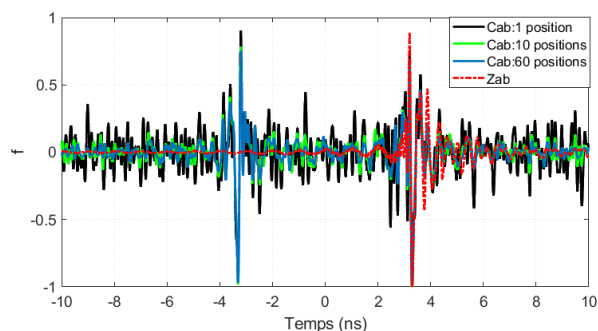


**Figure 5. Fonction de corrélation calculée (rouge) et réponses impulsionnelles mesurées (noire et bleue) dans la bande [1-3] GHz, pour une distance de 45 cm entre les 2 antennes et 10 positions de brasseur.**

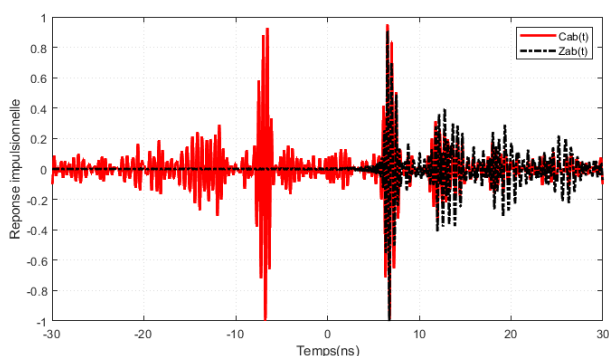
## 5. Conclusion

Dans cet article, nous avons exploité la technique d'inter-corrélation du champ diffus pour estimer passivement la réponse impulsionnelle entre deux antennes en utilisant une seule source localisée dans une chambre réverbérante à brassage de modes. La validation expérimentale de cette technique a été exposée à travers des mesures dans la CR du laboratoire ESYCOM avec deux antennes cornets en réception et aussi deux antennes non directives de type patch. 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 la largeur de la bande fréquentielle considérée ainsi que le nombre de positions de brasseur sur la convergence de l'inter-corrélation de champ vers la réponse impulsionnelle entre les antennes.

Dans une perspective, ce travail sera approfondi pour caractériser passivement un réseau d'antennes avec un seul émetteur et en exploitant les signaux reçus sur les différents récepteurs.



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



**Figure 7. Fonction de corrélation calculée (rouge) et réponse impulsionnelle mesurée (noire) dans la bande [1-4] GHz, pour une distance de 15 cm entre les 2 antennes de type patch et 60 positions de brasseur.**

## Références

- [1] M. Campillo and A. Paul, "Long-range correlations in the diffuse seismic coda," *Science*, vol. 299, no. 547, 2003.
- [2] P. Roux *et al.*, "Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean," *J. Acoust.*, vol. 116, no. 1995, 2004.
- [3] L. Chehami *et al.*, "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*, 2015.
- [4] M. Davy *et al.*, "Green's function retrieval with absorbing probes in reverberating cavities," *Phys. Rev. Lett.*, 2016.
- [5] M. Tamart *et al.*, "Diffuse field cross-correlation in a reverberation chamber," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, 2020.
- [6] M. Davy *et al.*, "Diffuse field cross-correlations : Scattering theory and electromagnetic experiments," *Phys. Rev. E*, vol. 104, no. 044204, 2021.