



**HAL**  
open science

# Un banc de mesure de paramètres S en espace libre sans moyennage ni filtrage temporel : caractérisation de matériaux jusqu'à 330 GHz

Alain Peden, Daniel Bourreau, Clément Henry, Gregory Gaudin

## ► To cite this version:

Alain Peden, Daniel Bourreau, Clément Henry, Gregory Gaudin. Un banc de mesure de paramètres S en espace libre sans moyennage ni filtrage temporel : caractérisation de matériaux jusqu'à 330 GHz. JCMM 2023 : 17èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Apr 2023, Tours, France. hal-04164234

**HAL Id: hal-04164234**

**<https://hal.science/hal-04164234>**

Submitted on 18 Jul 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Un banc de mesure de paramètres S en espace libre sans moyennage ni filtrage temporel : caractérisation de matériaux jusqu'à 330 GHz

Daniel Bourreau, Alain Péden, Clément Henry, Gregory Gaudin  
Lab-STICC, UMR 6285 CNRS, IMT Atlantique, technopôle Brest-Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex 3  
[daniel.bourreau@imt-atlantique.fr](mailto:daniel.bourreau@imt-atlantique.fr)  
[alan.peden@imt-atlantique.fr](mailto:alan.peden@imt-atlantique.fr)

**Résumé :** Cet article présente un banc de mesure des paramètres S en espace libre en bande J. La caractérisation complexe de la permittivité de divers matériaux est effectuée jusqu'à 330 GHz en mesurant l'amplitude et la phase des coefficients de réflexion et de transmission. La comparaison entre les paramètres S mesurés et simulés montre un très bon accord et valide le banc d'essai ainsi que la procédure d'étalonnage.

### I. INTRODUCTION

Les ondes millimétriques et même jusqu'au THz sont de plus en plus utilisées dans diverses applications telles que la 5 et 6G (backhaul), les tags RFID pour analyser les risques liés au vieillissement des structures, l'imagerie (contrôle non destructif, sécurité), les radars automobiles, la radiométrie ... Quelle que soit l'application, la connaissance de la permittivité diélectrique des matériaux est essentielle pour concevoir et optimiser les dispositifs et systèmes hyperfréquences. De plus, l'étude de la propagation et des interactions des ondes avec l'environnement nécessite également une connaissance fine de ces caractéristiques.

Cet article présente la mise en œuvre d'un banc de test en bande normalisée J (220-330 GHz) et nos développements en cours.

### II. DEFINITION DU BANC DE TEST

Les bancs de test "quasi-optiques" permettent de mesurer les paramètres S en espace libre [1] [2] [3] d'un élément plan placée entre deux GOLLA (Gaussian Optic Lens Antenna), comme le montre la Figure 1.

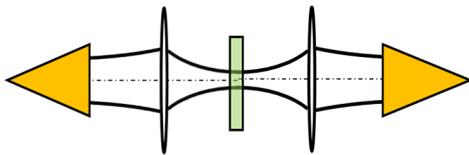


Figure 1 : faisceau gaussien focalisé, positionnement du circuit dans le waïst

Ces éléments spécifiques sont réalisés à l'aide d'un cornet et d'une lentille.

- Afin d'obtenir un faisceau proche d'une gaussienne un cornet conique corrugué devrait être utilisé mais à ces fréquences l'usinage est quasi-impossible. Les corrugations sont encore plus problématiques.

Un cornet diagonal est donc utilisé ; les champs électromagnétiques se rapprochent de ceux d'un cornet conique et ont donc d'une répartition gaussienne [4], [5].

Son gain et son rendement ont été caractérisés (Figure 3). En modélisation les lobes secondaires sont à plus de 22 dB.

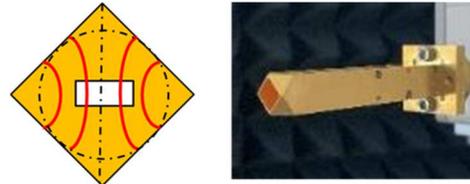


Figure 2 : cornet diagonal commercial (VDI)

- La lentille réalise la transformée du champ. Elle transforme donc ce faisceau gaussien en un autre faisceau gaussien [1] [2]. Le gain de cette nouvelle antenne a aussi été caractérisée (Figure 4).

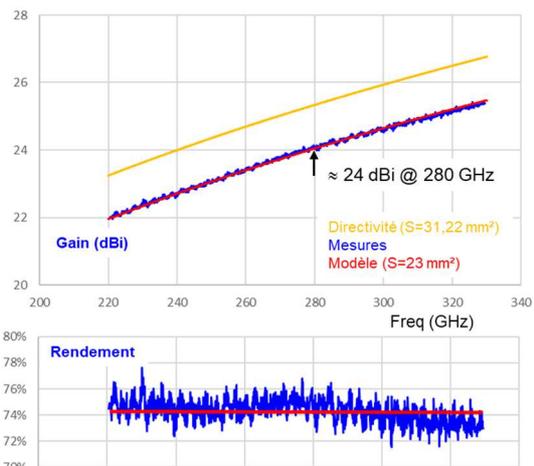


Figure 3 : caractérisation d'un cornet en bande J

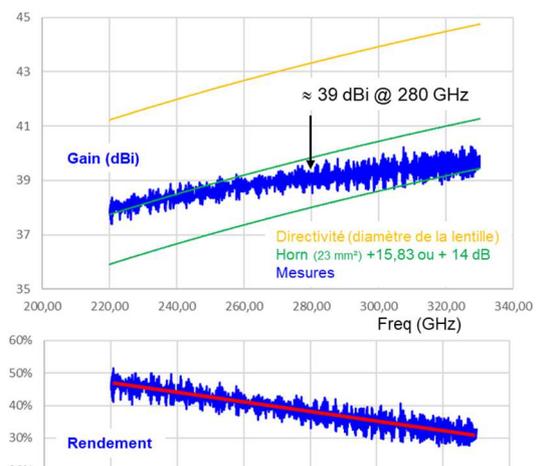


Figure 4 : caractérisation en bande J d'un cornet associé à une lentille

L'ouverture du cornet diminue lorsque la fréquence croît, aussi le rendement (vis à vis de la surface de la lentille) décroît. A partir des modèles des champs électromagnétiques issus du cornet et transformés par la lentille [1][2][4][5] on observe qu'il décroît linéairement (Figure 4).

Deux antennes GOLLA symétriques sont alors placées face à face, alignées et optimisées en position pour constituer le banc (Figure 1 et Figure 5).

Le waist est la position optimale pour insérer le circuit à tester (lame diélectrique, surfaces sélectives en fréquences, polariseur, etc.) et en mesurer les paramètres S (Figure 1 et Figure 5) [3], [6].



Figure 5 : Banc de test quasi-optique en bande J avec la lame de Rexolite sous test

### III. CARACTERISATION DE MATERIAUX

Un étalonnage en espace libre Thru-Reflect-Line (TRL) est effectué comme décrit dans [3][6][7]. En conséquence, un plan de référence unique des paramètres S est obtenu correspondant à l'une des 2 faces de la lame avec cependant un offset lié à une incertitude sur l'épaisseur de la plaque métallique et donc du décalage pour caractériser le Reflect [6]. Grâce aux propriétés de la TRL, ce décalage est symétrique par rapport aux 2 faces de l'échantillon. Compte tenu des propriétés de la matrice S la phase du produit des 2 coefficients de réflexions est alors indépendante de cet offset. Si l'échantillon est symétrique cet offset peut être déterminé.

L'extraction de la permittivité complexe se fait à partir d'un modèle de lame diélectrique dont les faces parallèles sont sous incidence normale d'une onde plane. Dans le waist l'onde électromagnétique de répartition gaussienne est localement plane.

L'épaisseur de la lame est d'abord mesurée avec un pied à coulisse [2][3][6] ; elle est donc caractérisée sur les bords de l'échantillon. Ensuite, à partir des paramètres S12 et S21 (amplitude et phase), la permittivité complexe relative est extraite à chaque point de fréquence (Figure 6) par minimisation d'une fonction d'erreur [2][3][6][7]. Il est alors possible d'estimer les valeurs moyennes et écarts types ainsi que les régressions linéaires. Pour tout autre modèle (Debye, ...) nous le définissons en post-traitement.

Sont ensuite comparés les mesures et simulations des 4 paramètres S. A l'endroit où le faisceau électromagnétique

interagit avec le matériau, l'épaisseur de l'échantillon peut être différente de la valeur initiale. Si un décalage en phase est observé [2][3][6][7] (visible principalement en réflexion) on modifie l'épaisseur en conséquence et relançons une extraction de la permittivité suivie d'une nouvelle comparaison des paramètres S. 3 itérations maximum suffisent.

A titre d'exemple, le résultat d'extraction de la permittivité pour une plaque de Rexolite de 12,815 mm est donné à la Figure 6.

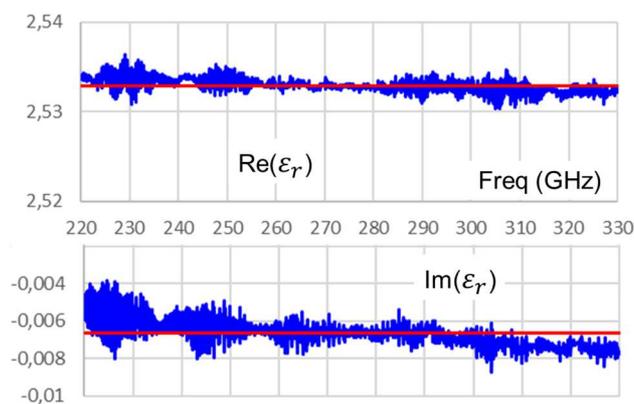


Figure 6 : Permittivité extraite de la lame de Rexolite et valeurs moyennes (parties réelles et imaginaires)

Compte tenu de la très faible variation sur la bande de fréquence, les valeurs moyennes, minimum et maximum ainsi que leurs écarts-types ( $\sigma$ ) peuvent être utilisées pour définir les propriétés du matériau.

$$\begin{aligned} \epsilon_r' &= 2.5329 \text{ avec } \sigma = 0.00089 \\ \text{et} \quad \epsilon_r'' &= -0.00667 \text{ avec } \sigma = 0.00078 \end{aligned}$$

A partir de ces valeurs moyennes nous obtenons une très bonne correspondance entre mesures et modélisations (Figure 7, Figure 8).

En bas et en haut de bande il subsiste un léger décalage sur les pertes en transmission. La régression linéaire sur la partie imaginaire permettra d'améliorer les comparaisons mesures et modélisation sur ces pertes (Figure 7). L'effet sur l'adaptation (Figure 8) sera négligeable.

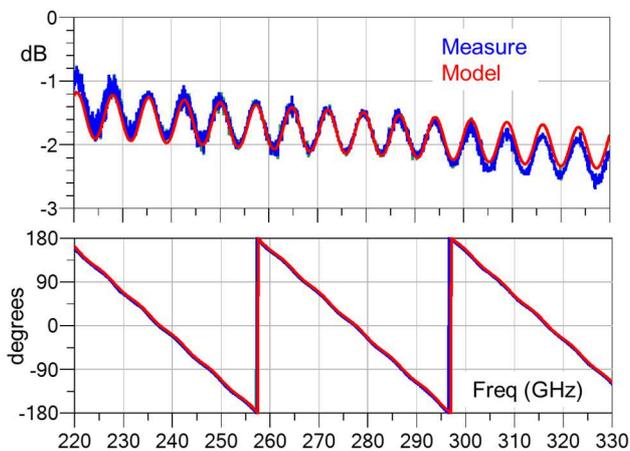


Figure 7 : comparaison des coefficients de transmission mesurés et modélisés (amplitudes et phase)

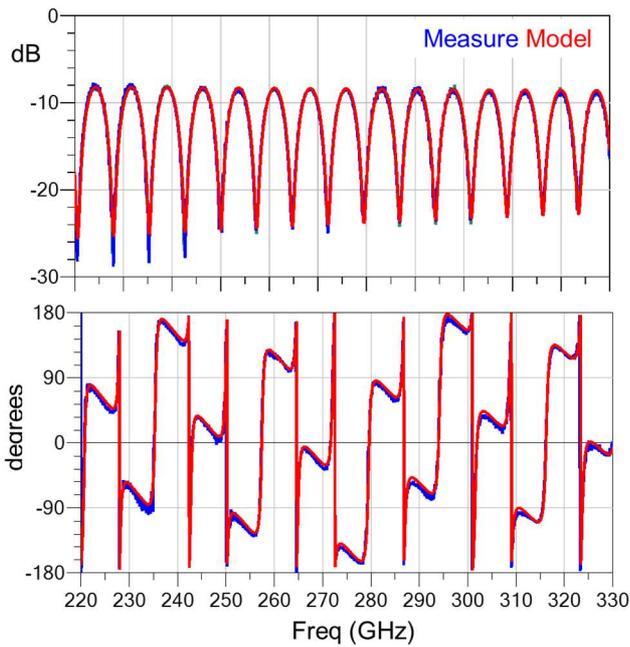


Figure 8 : comparaison des coefficients de réflexion mesurés et modélisés (amplitudes et phase)

En prenant en compte les autres bandes testées (Ka et W) une régression linéaire est parfaitement visible pour la partie imaginaire (Figure 9). Suivant la littérature la propriété de ce matériau est telle que la partie réelle est constante.

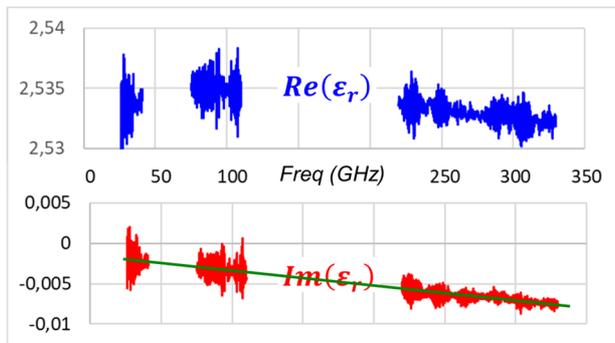


Figure 9 : Permittivité extraite de la lame de Rexolite sur plusieurs bandes

#### IV. MATERIAUX NON-SOLIDES

Nous travaillons aussi sur des matériaux non-solides de type poudres et liquide.

La méthode consiste à caractériser individuellement les parois A et B de la cuve en permittivité et épaisseur.

Le matériau inséré est alors caractérisé tout comme un simple matériau [8][9].

Pour l'eau le modèle de Debye a été défini à partir des extractions des 3 bandes Ka, W et J.

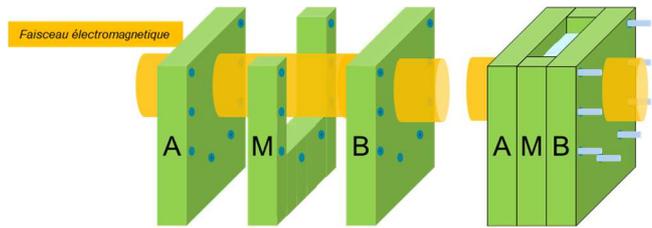


Figure 10 : cuve pour la caractérisation de matériaux non-solides

#### V. EFFET DE LA PLUIE SUR UN RADOME PLAN

Que ce soit pour le radar automobile ou les liaisons 5 et 6G l'effet de la pluie sur le bilan de liaison sera important [10].

De plus l'eau qui s'écoule sur la surface d'un radôme a plusieurs effets sur la réponse du système [8] [11] [12] : pertes et désadaptations.

Nous finalisons actuellement la modélisation de gouttes d'eau sur un matériau plan (publication en rédaction) avec des comparaisons expérimentales jusqu'à 330 GHz.

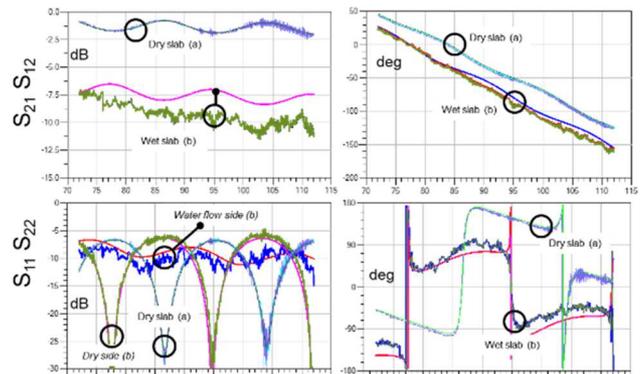


Figure 11 : modélisation et caractérisation de l'effet de la pluie sur la réponse d'un matériau plan

#### VI. MODELISATION DU BANC

Afin d'optimiser nos bancs de tests qui restent perfectibles mais surtout pour initialiser des projets d'imageries le banc doit être modélisé en 3D afin de vérifier les incidences de chaque paramètre [13].

Sur la Figure 12 la lentille est inclinée ; on observe une "inclinaison" du faisceau.

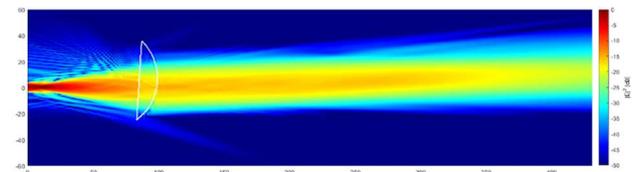


Figure 12 : modélisation d'un cornet associé à une lentille

## VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une technique de mesure des paramètres S en espace libre a été mise en œuvre pour les bandes Ka, W et J. La procédure d'étalonnage et les mesures sont validées par l'extraction de permittivité des lames diélectriques.

D'excellents résultats sont démontrés par la comparaison avec le modèle. Aucun moyennage, lissage ou filtrage temporel n'est appliqué aux données mesurées. Nous ne le faisons que si cela nous est demandé et clairement exprimé.

Nous testons actuellement l'incidence de gouttes d'eau de pluie sur un radôme et ce de 26 à 330 GHz.

Nous projetons aussi de caractériser en diagramme de rayonnement les antennes utilisées sur le banc mais aussi de les évaluer en champ proche pour ensuite minimiser les erreurs potentielles du banc. Aussi en parallèle une modélisation électromagnétique globale du banc est en cours, une caractérisation (utilisation d'un robot) aussi.

## REFERENCES

- [1] P.F. Goldsmith "Quasi-optical techniques" Proceedings of the IEEE Vol. 80, Issue: 11, Nov 1992
- [2] Le Goff M., Le Bras J.L., Deschamps B., Bourreau D., Peden A. "Ka band quasi optical test bench using focusing horns". 29th EUMC, 1999
- [3] Bourreau D., Péden A., Le Maguer S., "A quasi-optical free-space measurement setup without time-domain gating for material characterization in the W-band". IEEE transactions on instrumentation and measurement, december 2006, vol. 55, n° 6, pp. 2022-2026
- [4] A. W. Love "The Diagonal Horn Antenna" Microwave Journal, Vol. V, pp. 117-122, March 1962.
- [5] Joakim F. Johansson, and, Nicholas D. Whyborn "The Diagonal Horn as a Sub-Millimeter Wave Antenna" IEEE Transactions on MTT, Vol. 40, N.5, May 1992
- [6] Le Bras J.L., Le Goff M., Deschamps B., Peden A., Bourreau D., Toutain S. "Quasi optical circuit measurements method in W band". ESA workshop, 1998
- [7] Jin-Seob Kang "Free-Space Unknown Thru Measurement Using Planar Offset Short for Material Characterization" J. Electromagn. Eng. Sci. 2022 September 30
- [8] Daniel Bourreau, Alain Péden "Characterization of non-solid materials in the W-Band" 15<sup>èmes</sup> Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux Paris, 19-21 Mars 2018
- [9] D. Bourreau and A. Peden, "Solid and Non-Solid Dielectric Material Characterization for Millimeter and Sub-Millimeter Wave Applications," in 2020 50th European Microwave Conference (EuMC). Utrecht, Netherlands : IEEE, Jan. 2021, pp. 909-912. Available <https://ieeexplore.ieee.org/document/9338045/>
- [10] Lucien Boithias "Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre" Janvier 1983, Dunod technique
- [11] N. Chen et al., "The influence of the watercovered dielectric radome on 77GHz automotive radar signals," in 2017 European Radar Conference (EURAD). Nuremberg : IEEE, Oct. 2017, pp. 139-142. Available <http://ieeexplore.ieee.org/document/8249166/>
- [12] Paul Bouquin, Daniel Bourreau, Alain Péden "Caractérisation et modélisation de l'impact sur les systèmes radio de la pluie déposée sur un radôme aux ondes millimétriques" XXIIèmes Journées Nationales Microondes 8-10 juin 2022 – Limoges
- [13] Gregory Gaudin, Alain Péden, Daniel Bourreau "Modélisation et conception d'antennes à faisceaux gaussiens aux ondes millimétriques et submillimétriques, application à la caractérisation de matériaux et l'imagerie en bande J (220-330 GHz)" XXIIèmes Journées Nationales Microondes 8-10 juin 2022 – Limoges