

Développement d'un microcalorimètre sur ligne coaxiale de 2,4 mm et des sondes de puissance associées

Development of microcalorimeter in the 2.4 mm coaxial line and associated power standards

Djamel ALLAL, Denis BELIÈRES, Alexis LITWIN et Michaël CHARLES

Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 29 Avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes Cedex, France, djamel.allal@lne.fr.

Résumé

Cet article présente le développement d'un nouveau microcalorimètre symétrique sur ligne coaxiale de diamètre 2,4 mm ainsi que le développement des sondes de puissance thermoélectriques associées utilisées comme étalons de puissance radiofréquence. L'efficacité effective est mesurée et les résultats sont présentés pour deux types de sondes.

MOTS CLÉS : MICROCALORIMÈTRE, LIGNE COAXIALE, ÉTALON DE PUISSANCE HF, SONDE DE PUISSANCE, SONDE THERMOÉLECTRIQUE.

Abstract

This paper presents the development of a new 2.4 mm coaxial twin load microcalorimeter and the development of the thermoelectric power sensors used as radiofrequency power standards. The effective efficiency is measured and results are presented for two types of sensors.

KEY WORDS: MICROCALORIMETER, COAXIAL LINE, HF POWER STANDARD, POWER SENSOR, THERMOELECTRIC SENSOR.

1. Introduction

Dans un contexte où les principaux fabricants arrêtent progressivement la production de montures bolométriques à thermistances et remplacent ces dernières par des sondes thermoélectriques, nous avons entrepris de développer de nouveaux types de microcalorimètres adaptés à ce type de technologie. Les sondes thermoélectriques disponibles aujourd'hui sur le marché permettent

d'atteindre la fréquence de 110 GHz, à l'aide du connecteur coaxial de diamètre extérieur 1 mm.

Ceci constitue, bien entendu, un nouveau défi pour les laboratoires nationaux de métrologie, chargés de fournir la traçabilité aux utilisateurs pour de telles sondes, puisque les montures bolométriques traditionnellement utilisées comme références au-delà de 18 GHz sont montées en guide d'ondes alors que ces nouvelles sondes sont de type coaxial. Un nouveau microcalorimètre a donc été récemment développé au LNE pour l'étalonnage de sondes de puissance montées en connecteur coaxial de diamètre 2,4 mm pour des fréquences allant jusqu'à 50 GHz.

Afin de pouvoir être étalonnées dans ce type de microcalorimètre, ces sondes sont modifiées par nos soins, avec l'élimination notamment de toute l'électronique intégrée à la sonde. L'unique information nécessaire pour ce type d'étalonnage est alors la tension aux bornes du thermocouple déterminant l'échauffement de la charge radiofréquence (RF) en bout de la sonde de puissance.

2. Le microcalorimètre

La réalisation de ce nouveau microcalorimètre s'appuie sur des parties déjà existantes au laboratoire, issues du prototype de microcalorimètre sur ligne coaxiale de diamètre 3,5 mm [1], réalisé précédemment dans le cadre

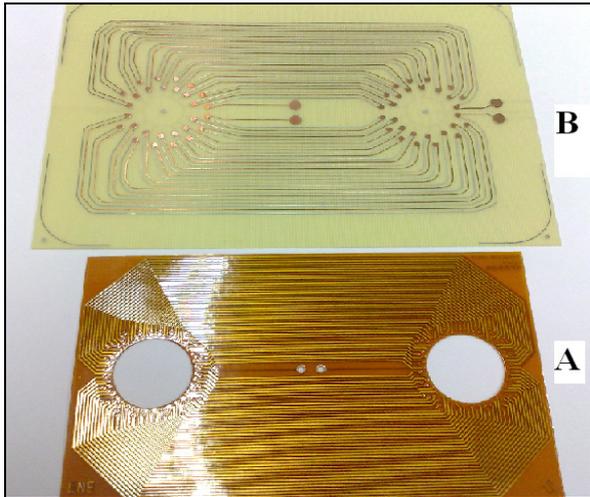


Fig. 1. – Nouvelle (A) et ancienne (B) thermopiles ; la vue B présente la thermopile avant découpe des trous de passage des connecteurs des sondes ; en configuration de mesure, les deux pastilles situées au milieu de la carte sont raccordées par un fil et la mesure de la tension thermoélectrique se fait aux bornes des deux pastilles situées à droite de la vue ; sur la vue A, la thermopile est prête à l'emploi et la mesure de la tension thermoélectrique se fait aux bornes des deux pastilles centrales.

de notre participation à une comparaison internationale en mesure de puissance jusqu'à 26,5 GHz.

Les parties qui ne sont pas issues du microcalorimètre de diamètre 3,5 mm sont la thermopile, non adaptable sur les nouvelles sondes 50 GHz, et les lignes coaxiales d'isolation thermique montées en connecteur de diamètre 2,4 mm et nécessairement compatibles avec un mode de propagation transverse électromagnétique (TEM) jusqu'à 50 GHz. La réalisation d'un nouveau microcalorimètre a d'ailleurs été l'occasion d'améliorer la sensibilité en comparaison des thermopiles d'ancienne génération.

2.1. Thermopile de nouvelle génération

La thermopile de nouvelle génération utilise le même type de jonction que les anciennes thermopiles, à savoir la jonction cuivre-constantan. Nous avons cependant augmenté la densité des pistes sur la carte imprimée et donc le nombre de thermocouples mis en série (fig. 1). Ainsi la nouvelle thermopile comprend 168 jonctions contre 72 jonctions pour la thermopile du microcalorimètre de diamètre 3,5 mm et sa sensibilité se trouve améliorée d'un facteur 2,3. Cela a été rendu possible en utilisant les deux faces de la carte imprimée, les pistes de cuivre de largeur 35 μm étant imprimées sur une face de la carte et les pistes de constantan de largeur 25 μm étant imprimées sur l'autre face. La jonction entre les deux faces est réalisée par des trous métallisés traversant la plaque et garantissant ainsi les liaisons électriques.

Un film mince enveloppe toute la plaque pour assurer l'isolation électrique des thermocouples et vient s'intercaler entre la surface échauffée de la sonde et la zone

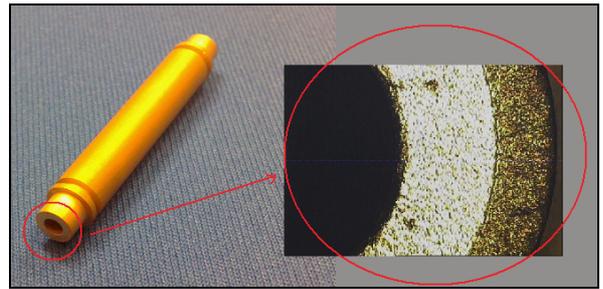


Fig. 2. – Conducteur externe et ses faces latérales métallisées.

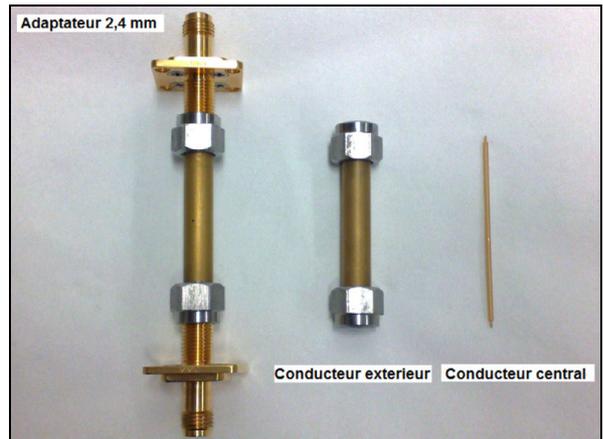


Fig. 3. – Ligne coaxiale à isolation thermique assemblée avec ses adaptateurs.

déetectrice. L'ensemble est plus compact afin de réduire sa résistance thermique, non négligeable lors de mesures de faible température.

2.2. Lignes à isolation thermique

Il est important de rappeler que l'objectif de la ligne à isolation thermique est de pouvoir amener la puissance à mesurer jusqu'à la sonde de puissance à tester tout en maintenant cette dernière isolée thermiquement du corps du microcalorimètre afin de pouvoir procéder à la mesure de l'échauffement propre de la sonde dû à l'absorption de la puissance électrique.

Pour obtenir un bon niveau d'isolation, le conducteur interne de la ligne coaxiale est réalisé en acier inoxydable avec une dorure en surface et le conducteur externe est constitué d'un tube de cuivre à paroi très mince (0,2 mm d'épaisseur) également doré. Afin de consolider le conducteur externe, le tube de cuivre est collé à l'intérieur d'un tube en Macor (fig. 2).

Les deux conducteurs sont insérés entre deux adaptateurs de diamètre 2,4 mm (fig. 3). Ce montage définitif constitue la ligne à isolation thermique proprement dite.

La figure 4 montre que l'affaiblissement de ces lignes est équivalent à l'affaiblissement d'une ligne à air étalon de longueur comparable.

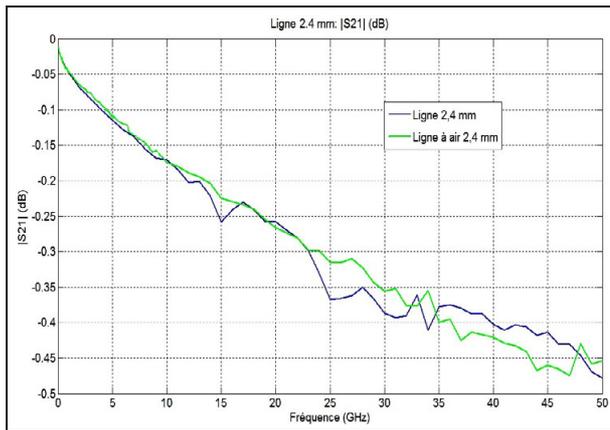


Fig. 4. – Comparaison de l'affaiblissement d'une ligne à isolation thermique avec une ligne étalon de diamètre 2,4 mm.

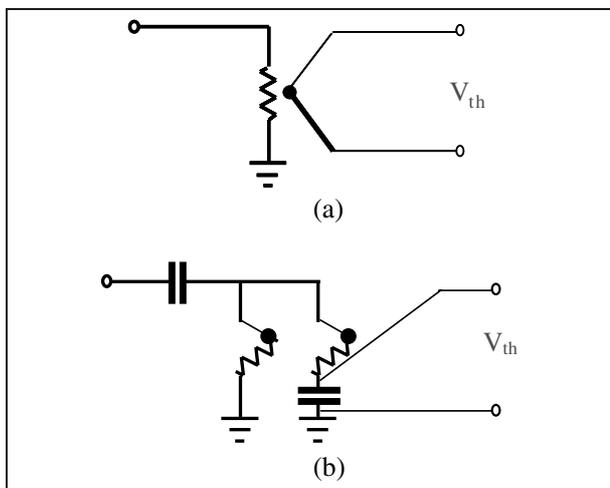


Fig. 5. – Schéma électrique de principe des sondes thermoélectriques de puissance à chauffage indirect (a) et à chauffage direct (b).

3. Réalisation des sondes de puissance

Différentes familles de sondes de puissance disponibles sur le marché ont été modifiées afin d'être évaluées au moyen du nouveau microcalorimètre. La modification consistait simplement à éliminer les composants électroniques du capteur.

Deux types de sondes thermoélectriques ont été pris en compte dans le cadre de ce développement : celles dites à chauffage direct et celles dites à chauffage indirect (fig. 5).

3.1. Sondes thermoélectriques à chauffage indirect

Ce type de sonde de puissance repose sur une charge RF et un thermocouple placé au plus près de la charge afin d'en mesurer l'échauffement. Le thermocouple mesure cet échauffement qui est dû à l'absorption de puissance électrique, soit en courant continu/basse fréquence (CC/BF) qui constitue la puissance de référence, soit en haute fréquence (HF).

La méthode d'étalonnage de sondes thermoélectriques à chauffage indirect est bien établie [2] et le principe est le même que celui utilisé pour les convertisseurs thermiques en tension. En effet, l'efficacité effective d'une sonde de puissance, qui est définie comme le rapport entre la puissance absorbée par la charge et la puissance injectée à l'entrée de la sonde peut être déterminée par la mesure d'un rapport d'échauffement de la sonde quand lui sont appliquées successivement une puissance CC/BF de référence et la puissance HF considérée.

L'efficacité effective est alors donnée par :

$$\eta_e = \alpha \frac{e_1}{e_2} \quad (1)$$

où e_1 et e_2 sont respectivement les tensions lues aux bornes de la thermopile pour une puissance CC/BF et HF appliquée à la sonde, et α est un facteur de correction dû aux pertes de la ligne d'isolation thermique donné dans [3] :

$$\alpha = 1 + 0,115 \times A_{dB} \quad (2)$$

où A_{dB} représente les pertes, exprimées en décibel (dB), de la ligne coaxiale d'isolation thermique insérée entre la sonde à tester et la source de puissance.

Deux modèles d'étalon de puissance ont été caractérisés dans le nouveau microcalorimètre. Le premier a été réalisé à partir d'une sonde Rohde & Schwarz NRV-Z55 munie d'un connecteur de diamètre 2,92 mm utilisable jusqu'à 40 GHz. Un adaptateur de diamètre de 2,92 mm à 2,4 mm a été inséré entre le capteur et la ligne d'isolation. Le second a été réalisé à partir d'une sonde Agilent N8487A avec un connecteur de diamètre 2,4 mm, utilisable jusqu'à 50 GHz. Un modèle spécifique, sans condensateur d'entrée, nous a été fourni par le fabricant. Deux autres étalons ont également été réalisés : l'un à partir d'une sonde Rohde & Schwarz NRP-Z56 et l'autre à partir d'une sonde Anritsu MA24005A sans condensateur d'entrée, toutes deux utilisables jusqu'à 50 GHz.

3.2. Sondes thermoélectriques à chauffage direct

Ce type de sonde de puissance repose sur une charge RF réalisée par la superposition de deux matériaux différents, constituant un couple thermoélectrique au sein même de la charge RF. Le thermocouple faisant partie de la charge RF, un système associé est nécessaire pour contrôler la puissance totale absorbée par la charge lorsque la puissance de référence CC/BF est remplacée par la puissance HF.

Dans le cadre de ce développement, nous avons étudié la sonde de puissance Agilent 8487A munie d'un connecteur de diamètre 2,4 mm et utilisable jusqu'à 50 GHz. La configuration d'une telle sonde ne permet pas l'utilisation d'une méthode de mesure similaire à celle employée pour les sondes à chauffage indirect. En effet, le condensateur d'entrée ne peut être supprimé et il empêche l'utilisation d'une puissance de référence CC/BF ou, tout au moins, d'une puissance de référence à une fréquence inférieure à quelques dizaines de mégahertz.

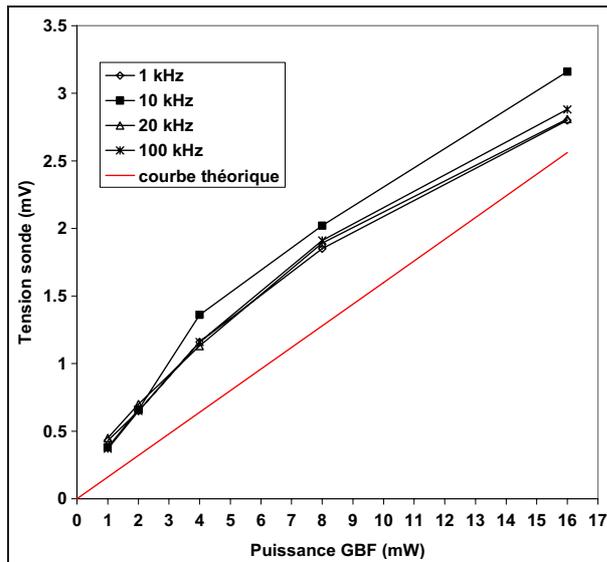


Fig. 6. – Réponse de la sonde à chauffage direct en fonction de la puissance BF du signal d'entrée.

Un circuit de régulation spécifique a donc été mis au point pour permettre l'ajustement de la puissance absorbée par la charge en accédant directement à la charge *via* les bornes du couple thermoélectrique à l'arrière de la sonde. Ainsi l'opération est similaire à celle utilisée dans les cas des montures à thermistances. Le principe consiste à injecter un signal BF (1 kHz) à la sortie du couple thermoélectrique et à asservir son amplitude afin de maintenir constante la tension délivrée par le couple, quelle que soit la puissance du signal HF. La mesure des variations de la tension alternative, lorsque le signal HF est appliqué ou non, permet alors de connaître la puissance HF injectée. Un courant BF est injecté dans la charge et est ajusté pour maintenir la tension de sortie du couple à une valeur constante correspondant à une puissance nominale de 10 mW.

Malheureusement, les résultats des mesures effectuées ne correspondent pas au fonctionnement attendu d'une sonde de puissance et ne permettent pas de retenir ce type de sonde pour l'application recherchée. Des mesures complémentaires ont finalement montré un comportement non linéaire en puissance de la sonde pour des fréquences s'étendant jusqu'à 100 kHz (fig. 6). Cela rend ce type de sonde inapproprié pour une telle méthode d'étalonnage si la puissance de référence utilisée est inférieure à la gamme des mégahertz pour laquelle la sonde présente effectivement une réponse linéaire en puissance.

4. Étalonnage des sondes de puissance

Compte tenu de la réponse non linéaire de la sonde de puissance à chauffage direct, seules les sondes de puissance à chauffage indirect ont été étalonnées.

Les résultats sont montrés en figure 7 pour deux modèles, à savoir les modèles reposant sur les sondes Rohde & Schwarz NRV-Z55 et Agilent N8487A.

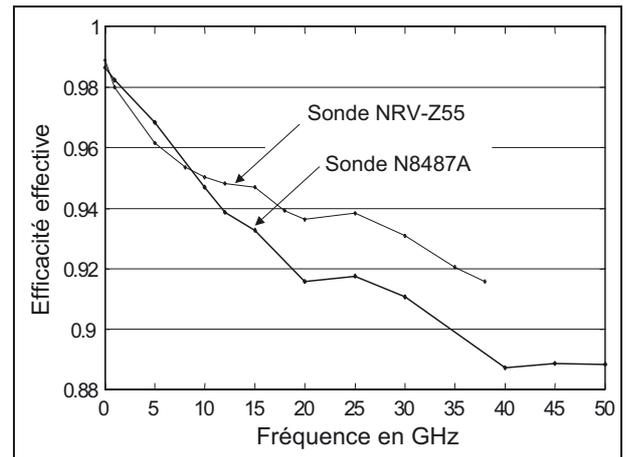


Fig. 7. – Efficacité effective de deux sondes à chauffage indirect.

Tableau 1

Valeurs approximatives relevées pour deux sondes en connecteur 3,5 mm déduites des données publiées en [5].

	Fréquence (GHz)	Facteur étalonnage	Facteur réflexion	Efficacité effective
Sonde 1	10	0,957 6	0,040	0,956 1
	18	0,947 5	0,055	0,944 6
	26	0,937 1	0,025	0,936 5
Sonde 2	10	0,967 4	0,020	0,937 0
	18	0,912 5	0,025	0,911 9
	26	0,877 0	0,065	0,873 3

Tableau 2

Valeurs et incertitudes associée de l'efficacité effective de la sonde munie d'un connecteur de diamètre 2,4 mm.

Fréquence (GHz)	Efficacité effective	Incertitude type relative ($k = 1$)
0,05	0,986 3	$1,27 \times 10^{-3}$
1	0,982 8	$1,97 \times 10^{-3}$
10	0,947 6	$3,07 \times 10^{-3}$
20	0,916 9	$2,95 \times 10^{-3}$
30	0,912 3	$5,81 \times 10^{-3}$
40	0,889 4	$5,93 \times 10^{-3}$
50	0,891 2	$7,41 \times 10^{-3}$

Les résultats de mesure représentent des valeurs compatibles avec des données qui ont été publiées précédemment pour des sondes équivalentes, en connecteur 3,5 mm [4, 5]. À partir de ces données (facteur d'étalonnage et facteur de réflexion), nous avons déduit approximativement l'efficacité effective dont quelques valeurs sont présentées dans le tableau 1 pour deux sondes et pour trois fréquences de mesure.

Un bilan d'incertitude complet pour l'étalonnage de sondes thermoélectriques est détaillé dans [3] dans le cadre du développement de sondes avec connecteur de type N. Dans le cas de la sonde avec connecteur de diamètre 2,4 mm, les valeurs présentées dans le tableau 2

montrent que l'incertitude devient plus importante aux fréquences millimétriques, notamment en raison des moins bonnes performances à la fois de la sonde en terme d'efficacité et de la ligne d'isolation thermique en terme d'affaiblissement.

5. Conclusion

Un nouveau microcalorimètre sur ligne coaxiale de diamètre 2,4 mm a été développé au LNE pour l'étalonnage direct de sondes de puissance coaxiales jusqu'à 50 GHz. Des sondes étalons ont été développées à partir de sondes thermoélectriques à chauffage indirect commercialisées, pour lesquelles les circuits électroniques ont été supprimés. Le résultat d'étalonnage montre que ces sondes peuvent être utilisées en remplacement des montures à thermistance pour disposer d'une solution économique large bande.

Article reçu le 1^{er} février 2013, version révisée reçue le 23 juillet 2013.

Références

- [1] Kazemipour A., BOURGHES M., LITWIN A. et ALLAL D., « Nouvel étalon primaire de puissance HF, DC-26,5 GHz », *JNM 2003 Conf. Digest*, Lille, France, 6D-20, 9-14 juillet 2003.
- [2] BRUNETTI L. et VREMERA E., "A new microcalorimeter for measurements in 3.5 mm coaxial line", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **52**, 2, 2003, 320-323.
- [3] CHARLES M., LITWIN A., POLETAEFF A. et ALLAL D., « Etalon de puissance radiofréquence pour les basses fréquences de 100 kHz à 1 GHz », *Revue française de métrologie*, **29**, 2012, 25-30.
- [4] JANIK D., "Final report on EUROMET.EM.RF-K10.CL (EUROMET comparison 525 (GT-RF/99-2)): Power in the coaxial PC 3.5 mm line system", *Metrologia*, **44**, Tech. Suppl., 2007, 01010.
- [5] JANIK D., ASCROFT J. et CLARK R., "Measurement techniques and results of an intercomparison for RF power in a 3.5 mm coaxial line up to 26 GHz", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48**, 2, 1999, 166-168.