



M. CHARLES

Étalon de puissance électrique en technologie à thermocouples pour les fréquences RF jusqu'à 50 GHz

RF power standard in thermocouple sensor technology up to 50 GHz

Michaël CHARLES, Alexis LITWIN et Djamel ALLAL

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

Résumé

Cet article présente la réalisation d'étalons de puissance à partir de sondes à thermocouples. Ce travail a été réalisé dans le cadre du développement d'un microcalorimètre pour un laboratoire national de métrologie étranger. L'étalonnage d'une telle sonde de puissance a été effectué afin de déterminer son efficacité effective et l'incertitude associée pour 21 fréquences jusqu'à 50 GHz. Le LNE étend ainsi son domaine de compétences à la réalisation de bancs de mesure primaires de puissance RF large bande (DC-50 GHz).

MOTS CLÉS : EFFICACITÉ EFFECTIVE, INCERTITUDE, SONDE À THERMOCOUPLES, ÉTALON, PUISSANCE RF, TENSION, MICROCALORIMÈTRE.

Abstract

This paper describes the development of a power standard based on thermocouple sensors. This work has been done in the framework of the fabrication of a microcalorimeter to destination of a foreign National Metrology Institute. The calibration has been performed in order to determine both the effective efficiency and the uncertainty for 21 frequency points up to 50 GHz. LNE expands its capability for manufacturing broadband (DC-50 GHz) primary calibration systems for RF power.

KEY WORDS: EFFECTIVE EFFICIENCY, UNCERTAINTY, THERMOCOUPLE SENSOR, RF POWER STANDARD, VOLTAGE STANDARD, MICROCALORIMETER.

1. Introduction

Comme la plupart des laboratoires nationaux de métrologie (LNM), la méthode primaire de mesure de

la puissance électrique mise en œuvre par le LNE est celle du microcalorimètre utilisant des détecteurs bolométriques à thermistance qui constituent les étalons primaires radiofréquences (RF) [1]. Cependant la production de ces détecteurs s'arrête progressivement et certaines bandes de fréquences sont d'ores et déjà introuvables. Une nouvelle approche métrologique consiste à utiliser des capteurs de température de type thermocouple comme étalons primaires [2]. Des détecteurs de puissance conçus sur la base de thermocouples à chauffage indirect ont fait l'objet d'une comparaison internationale (CCEM.RF-K10.CL) [3] dans laquelle a été expérimenté pour la première fois un microcalorimètre symétrique sur ligne coaxiale spécialement optimisé pour ce type de capteurs. Les résultats de cette comparaison ont permis de conclure que ces sondes à thermocouples étaient une réelle alternative aux sondes à thermistances pour réaliser un étalon de puissance jusqu'à 26,5 GHz. De plus, elles présentent les avantages d'avoir une charge RF totalement isolée du thermocouple, de ne pas avoir de condensateur de couplage à l'entrée permettant d'étendre leur domaine au courant continu (DC) et d'être insensibles à la température absolue.

Le contexte de ce travail était une demande de réalisation d'un microcalorimètre pour l'étalonnage de sondes de puissance jusqu'à 50 GHz à destination d'un laboratoire national de métrologie étranger car le LNE a aujourd'hui une expérience reconnue dans ce domaine [4]. Dans cet article, nous présentons les différents éléments

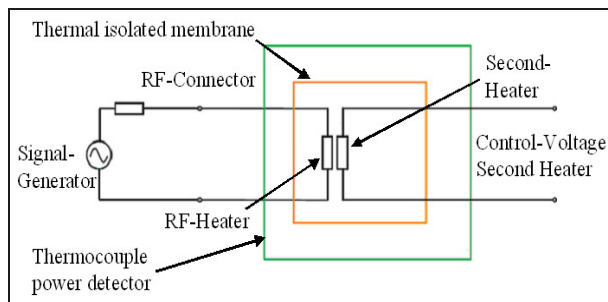


Fig. 1. – Schéma électrique de la sonde à thermocouples.

sensibles constituant le microcalorimètre (le guide coaxial à paroi mince et la thermopile), le banc d'étalonnage, la mesure de l'efficacité effective de la sonde et l'évaluation de l'incertitude de mesure obtenues à partir de son étalonnage au microcalorimètre. Les contraintes d'implantation du système au sein du laboratoire étranger nous ont obligés à diminuer les dimensions de la cuve adiabatique. Afin de valider métrologiquement ces nouvelles dimensions, nous avons effectué une comparaison des résultats entre un étalonnage avec la cuve du laboratoire étranger et celle du LNE.

2. Le montage du microcalorimètre

À l'intérieur du microcalorimètre sont insérées deux sondes à thermocouples physiquement identiques, disposées de manière symétrique. L'une est active (sonde étalon) et reçoit la puissance RF à mesurer, l'autre est une référence thermique (sonde référence) soumise à aucun signal RF. Les deux éléments primordiaux sont le guide coaxial à paroi mince et la thermopile. Le guide coaxial à paroi mince assure d'une part la liaison électrique entre la source RF et la sonde tout en isolant thermiquement la sonde de l'ensemble du microcalorimètre. La thermopile permet de mesurer l'écart de température entre la sonde étalon et la sonde référence en le traduisant en une tension continue.

Les principaux avantages de la méthode d'étalonnage au microcalorimètre sont l'élimination au premier ordre [5] des effets de la puissance réfléchie due à la désadaptation et la puissance dissipée dans les lignes de transmissions.

2.1. Sonde à thermocouples

L'étalon de transfert est conçu sur la base d'une tête de sonde de mesure de puissance Rohde&Schwarz de type NRP-Z56. Il se présente comme un convertisseur puissance-tension reposant sur l'effet thermoélectrique, où un thermocouple placé au plus près d'une charge RF mesure l'échauffement de celle-ci (fig. 1) [4]. Ce détecteur présente une sensibilité de l'ordre de $230 \mu\text{V}\cdot\text{mW}^{-1}$ et le domaine de mesure de la puissance s'étend de $1 \mu\text{W}$ à 100mW [6].

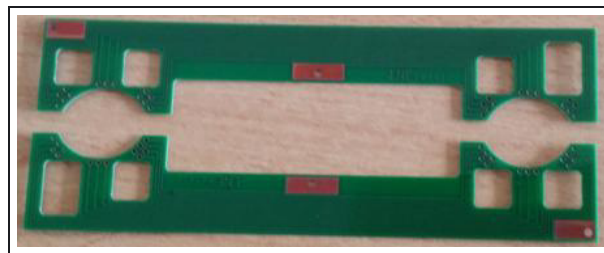


Fig. 2. – Photographie de la thermopile utilisée au LNE ($10,6 \text{ cm} \times 3,7 \text{ cm}$).

2.2. La thermopile

Une thermopile est utilisée pour mesurer la différence de température entre la sonde à étalonner et la sonde de référence. Elle est constituée de jonctions cuivre/constantan et recouverte par un film mince de résine (fig. 2) [4].

Le coefficient de Seebeck d'une jonction cuivre/constantan est égal à $41 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ à température ambiante [7]. La thermopile dispose de 13 jonctions de ce type ; ce qui nous permet d'obtenir une sensibilité globale de $533 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$.

2.3. Le guide coaxial

Au sein du microcalorimètre, les guides coaxiaux assurent la liaison électrique de la sonde de puissance avec l'extérieur, tout en garantissant une isolation thermique optimale [4]. Afin d'assurer la meilleure isolation thermique possible entre l'entrée et la sortie du guide coaxial, ce dernier est réalisé en paroi mince à partir d'un alliage nickel/chrome/titane de conductivité thermique $11,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ recouvert d'une dorure d'épaisseur $1 \mu\text{m}$ améliorant la propagation électrique du signal (fig. 3).

Afin de d'obtenir l'efficacité effective de la sonde, nous devons déterminer l'atténuation (exprimée en décibel, dB) du guide à paroi mince (fig. 4). Pour ce faire, l'ensemble connecteur-conducteur-connecteur est considéré comme étant le guide coaxial.

2.4. Microcalorimètre symétrique

Janik et al. [8] ont montré la pertinence d'étalonner au microcalorimètre une sonde à thermocouples en substitution à une monture bolométrique afin d'en faire un étalon secondaire de puissance. Le LNE a développé plusieurs microcalorimètres de type symétrique, notamment pour des étalonnages à partir d'éléments coaxiaux [9]. Ce type de calorimètre se compose de deux lignes symétriques coaxiales isolées thermiquement permettant le cheminement du signal électrique haute fréquence jusqu'aux sondes de puissance, d'une thermopile permettant une mesure de la différence de température entre la sonde à étalonner et la sonde de référence, et d'un puits de chaleur en cuivre reliant les deux branches du microcalorimètre constituant ainsi la « masse » thermique de la structure (fig. 5).

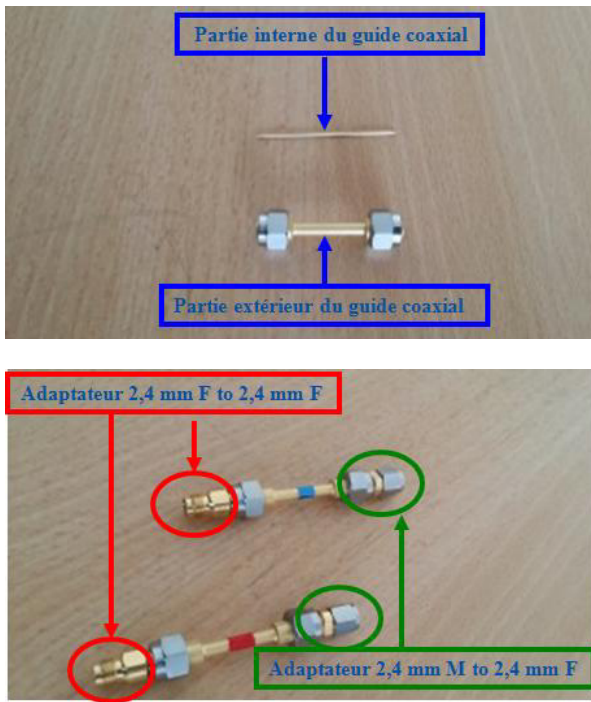


Fig. 3. – Guide coaxial à paroi mince.

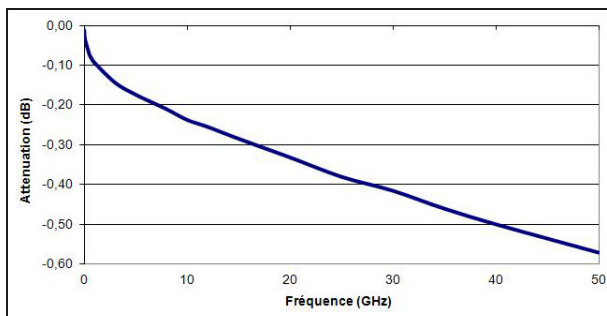


Fig. 4. – Atténuation (exprimée en décibel, dB) du guide coaxial à paroi mince.

3. Étalonnage de la sonde à thermocouples

Étalonner la sonde revient à déterminer son efficacité effective par la méthode primaire décrite précédemment. L'efficacité effective (η_{eff}) de l'ensemble sonde de puissance et guide coaxial est déterminé à partir d'une première mesure de référence à basse fréquence (200 Hz). Puis la sonde à thermocouples reçoit alternativement un signal électrique BF et un signal électrique RF à la fréquence d'étalonnage. Le signal RF est ajusté afin d'obtenir une tension en sortie de la sonde qui soit égale à celle obtenue avec le signal BF. On détermine alors l'efficacité effective de l'ensemble sonde de puissance et guide coaxial par la relation suivante :

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{RF}}}{V_{\text{BF}}} \times \frac{e_{\text{BF}}}{e_{\text{RF}}}, \quad (1)$$

où e_{BF} et e_{RF} sont les tensions de sortie de la thermopile et V_{BF} et V_{RF} ($V_{\text{BF}} = V_{\text{RF}}$) sont les tensions en sortie de la sonde à thermocouples, obtenues respectivement avec le signal BF et le signal RF [3].

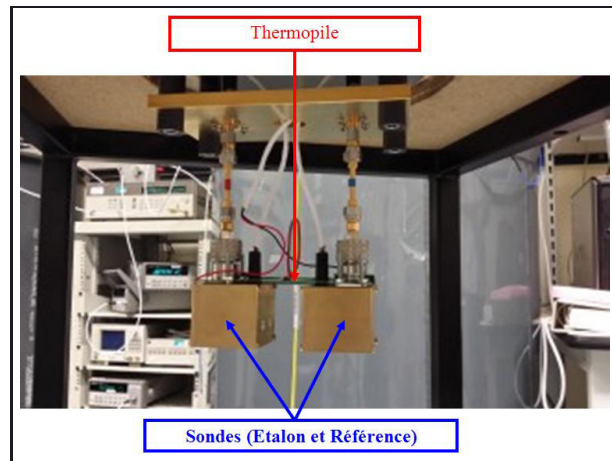


Fig. 5. – Microcalorimètre symétrique coaxial 2,4 mm.

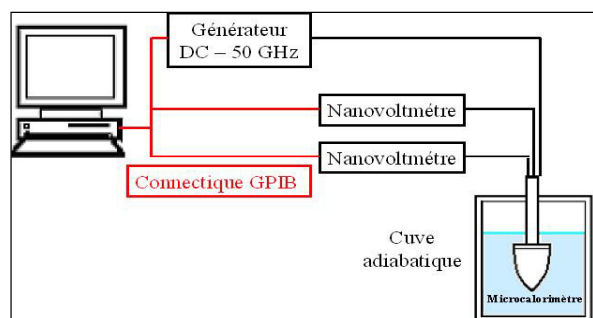


Fig. 6. – Schéma du banc d'étalonnage de la sonde de puissance RF.

3.1. Banc d'étalonnage de la sonde de puissance

Le montage expérimental complet (fig. 6) est constitué des éléments suivants :

- un microcalorimètre ;
- une cuve adiabatique remplie d'eau ;
- une source de signal sinusoïdal de fréquence variable du continu à 50 GHz ;
- un nanovoltmètre en sortie de la sonde ;
- un nanovoltmètre connecté à la thermopile ;
- un ordinateur pilotant l'ensemble du banc.

Les mesures sont effectuées dans une salle régulée à une température de $(23,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, avec une humidité relative inférieure à 60 %. Les paramètres du milieu ambiant sont enregistrés pendant toute la durée de l'étalonnage. Une automatisation du banc permet de gérer les différents appareils programmables, d'effectuer l'acquisition des données, de calculer, de traiter et d'enregistrer les résultats. Le calcul de l'efficacité effective et de son incertitude s'effectue à partir des tensions acquises au cours des cycles de mesure « signal BF – signal RF » (14 cycles).

Tableau 1

Synthèse des composantes d'incertitudes de l'étalonnage de la sonde à 10 GHz ($k = 1$).

Mesurande (x_i)	Mesure x_i	Incertainde $u(x_i)$	Sensibilité c_i	Contribution d'incertitude $ c_i \cdot u(x_i) $
Tension en sortie de la sonde (V_{BF})	$1,50 \times 10^{-4}$ V	$1,92 \times 10^{-7}$ V	$-6,13 \times 10^3$ V ⁻¹	$1,18 \times 10^{-3}$
Tension en sortie de la sonde (V_{RF})	$1,50 \times 10^{-4}$ V	$2,12 \times 10^{-7}$ V	$6,13 \times 10^3$ V ⁻¹	$1,30 \times 10^{-3}$
Tension aux bornes de la thermopile (e_{BF})	$1,55 \times 10^{-5}$ V	$1,55 \times 10^{-8}$ V	$5,95 \times 10^4$ V ⁻¹	$9,68 \times 10^{-4}$
Tension aux bornes de la thermopile (e_{RF})	$1,68 \times 10^{-5}$ V	$2,45 \times 10^{-8}$ V	$-5,47 \times 10^4$ V ⁻¹	$1,37 \times 10^{-3}$
Efficacité effective : η_{eff}	0,920	$2,4 \times 10^{-3}$		
Affaiblissement du guide à paroi mince	$-2,37 \times 10^{-1}$ dB	$1,06 \times 10^{-3}$ dB	$-2,73 \times 10^{-2}$ dB ⁻¹	$2,89 \times 10^{-5}$
Efficacité effective corrigée : η_{effc}	0,946	$2,5 \times 10^{-3}$		

3.2. Correction sur l'efficacité effective

Dans le microcalorimètre, l'élément de ligne coaxiale à paroi mince connecté à la sonde introduit des pertes entraînant un échauffement. Le terme correctif dû à cet échauffement supplémentaire est proportionnel à l'affaiblissement de cette ligne et sa prise en compte donne l'efficacité corrigée [10] :

$$\eta_{\text{effc}} \cong \eta_{\text{eff}} \times (1 + 0,115 \times A_{\text{dB}}) \quad (2)$$

où A_{dB} représente les pertes de la ligne coaxiale à paroi mince exprimées en décibel (dB).

3.3. Incertitude d'étalonnage d'une sonde

Le bilan d'incertitude (u) s'exprime en utilisant la loi de propagation des incertitudes pour l'efficacité effective (η_{eff}) et l'efficacité effective corrigée (η_{effc}) [1] :

$$u(\eta_{\text{eff}}) = \sqrt{\sum [c_i \cdot u(x_i)]^2} \quad \text{avec} \quad c_i = \frac{\partial \eta_{\text{eff}}(x_i)}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$u(\eta_{\text{effc}}) = \sqrt{\sum [c_i \cdot u(x_i)]^2} \quad \text{avec} \quad c_i = \frac{\partial \eta_{\text{effc}}(x_i)}{\partial x_i} \quad (4)$$

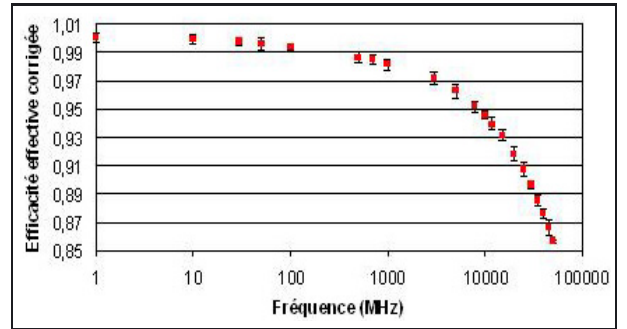
où x_i sont les mesurandes des composantes de l'incertitude, $u(x_i)$ sont les incertitudes associées à la mesure des x_i , et c_i sont les sensibilités de chaque composante x_i sur l'incertitude globale.

Le tableau 1 synthétise les composantes d'incertitude de l'étalonnage de la sonde à la fréquence de 10 GHz ainsi que l'incertitude de l'efficacité effective de la sonde (et l'efficacité effective corrigée).

3.4. Résultats de l'étalonnage

Nous contrôlons les deux puissances appliquées, pour chacune des 21 fréquences, pour obtenir V_{BF} égale à V_{RF} . Si cette égalité est bien respectée alors nous pouvons considérer que les deux puissances sont équivalentes, au niveau de l'élément résistif.

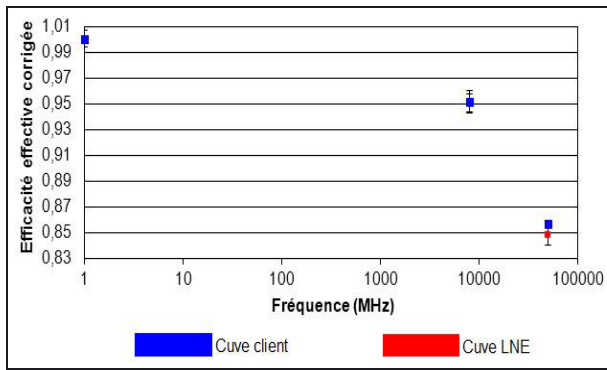
La figure 7 montre les valeurs d'efficacité effective corrigée et d'incertitude de la sonde jusqu'à 50 GHz. Les incertitudes sont plus élevées que celles obtenues avec les sondes à thermocouples en connectique type-N



f (MHz)	η_{effc}	$u(\eta_{\text{effc}})$ ($k = 1$)
1	1,000	$3,2 \times 10^{-3}$
10	0,999	$3,5 \times 10^{-3}$
30	0,997	$1,9 \times 10^{-3}$
50	0,996	$4,2 \times 10^{-3}$
100	0,993	$2,6 \times 10^{-3}$
500	0,986	$3,6 \times 10^{-3}$
700	0,984	$3,1 \times 10^{-3}$
1 000	0,981	$3,5 \times 10^{-3}$
3 000	0,972	$4,5 \times 10^{-3}$
5 000	0,962	$4,8 \times 10^{-3}$
8 000	0,952	$4,2 \times 10^{-3}$
10 000	0,946	$2,5 \times 10^{-3}$
12 000	0,939	$4,2 \times 10^{-3}$
15 000	0,931	$4,3 \times 10^{-3}$
20 000	0,918	$5,2 \times 10^{-3}$
25 000	0,907	$4,9 \times 10^{-3}$
30 000	0,896	$3,4 \times 10^{-3}$
35 000	0,885	$3,7 \times 10^{-3}$
40 000	0,876	$3,1 \times 10^{-3}$
45 000	0,866	$5,0 \times 10^{-3}$
50 000	0,857	$1,4 \times 10^{-3}$

Fig. 7. – Efficacité effective corrigée de la sonde et l'incertitude associée pour chaque fréquence.

fonctionnant jusqu'à 18 GHz [4]. Cette différence est due à une performance plus large bande en fréquence de la sonde fonctionnant jusqu'à 50 GHz, ce qui occasionne une incertitude globale plus importante.



Cuve du laboratoire externe

f (MHz)	$\eta_{\text{effic}}(f)$	$u(\eta_{\text{effic}}) (k = 1)$
1	1,000	$3,2 \times 10^{-3}$
8 000	0,952	$4,2 \times 10^{-3}$
50 000	0,857	$1,4 \times 10^{-3}$

Cuve du LNE

f (MHz)	$\eta_{\text{effic}}(f)$	$u(\eta_{\text{effic}}) (k = 1)$
1	1,000	$3,7 \times 10^{-3}$
8 000	0,951	$3,5 \times 10^{-3}$
50 000	0,849	$4,2 \times 10^{-3}$

Fig. 8. – Efficacité effective corrigée de la sonde et l'incertitude associée pour les deux cuves.

4. Comparaison des résultats d'étalonnage obtenus en utilisant deux cuves adiabatiques de volumes différents

Dans le banc d'étalonnage, la cuve adiabatique joue le rôle de tampon thermique en isolant le dispositif de l'environnement extérieur. Nous remplissons cette dernière avec de l'eau et nous y plaçons le microcalorimètre durant l'étalonnage.

Les contraintes imposées par le projet dans sa réalisation nous ont obligés à diminuer les dimensions de la cuve par rapport à celle déjà existante au LNE. Ainsi, l'épaisseur de la paroi d'eau entre le microcalorimètre et la paroi interne de la cuve est de 175 mm pour le système de laboratoire externe et de 285 mm pour celui du LNE.

Nous avons donc saisi l'occasion de vérifier si les cuves adiabatiques du LNE étaient surdimensionnées ou non, en comparant un étalonnage effectué dans une cuve puis dans l'autre.

La figure 8 met en lumière une convergence des résultats d'étalonnage entre les deux cuves, en basse fréquence, en fréquence intermédiaire et en haute fréquence. Nous pouvons donc conclure que les cuves du LNE sont surdimensionnées par rapport au besoin.

Article reçu le 8 janvier 2015, version révisée reçue le 22 mai 2015.

5. Conclusion

L'étude dont l'objectif était le développement d'un étalon de puissance jusqu'à 50 GHz a permis de démontrer la faisabilité et la pertinence d'utiliser des sondes à thermocouples comme étalons de puissance sur une très large bande de fréquences. Ainsi le LNE dispose d'une connaissance lui permettant de couvrir les mesures de puissance RF pour un signal électrique de fréquence s'étendant du continu à 50 GHz avec un seul étalon, là où nous utilisons six sondes bolométriques à thermistances (deux sondes coaxiales et quatre sondes sur guides d'onde) pour couvrir la bande de fréquences comprises entre 100 kHz et 50 GHz. Ce travail a également mis en lumière le surdimensionnement des cuves adiabatiques jusqu'alors utilisées au LNE.

Références

- [1] BOURGHES M., « Développement d'un nouveau microcalorimètre coaxial jusqu'à 50 GHz », Mémoire d'ingénieur CNAM, Spécialité « Instrumentation et mesure, métrologie et qualité », document LNE, 2009.
- [2] ALLAL D., BELIÈRES D., LITWIN L. et CHARLES M., « Développement d'un microcalorimètre sur ligne coaxiale de 2,4 mm et des sondes de puissance associées », *Revue française de métrologie*, **33**, 2014, 3-7.
- [3] JANIK D. et al., CCEM Key Comparison CCEM.RF-K10.CL (GT/RF 99-2) "Power in 50 Ohm coaxial lines, frequency: 50 MHz to 26 GHz", *27th CPEM*, Londres, Royaume-Uni, 27 juin–2 juill, 2004.
- [4] CHARLES M., LITWIN L., 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.
- [5] FANTOM A.E., "Radio frequency and microwave power measurement", *Peter Peregrinus Ltd on behalf of the Institutions of Electrical Engineers*, United Kingdom, 1990, ISBN 0863411207.
- [6] "Fundamentals, Definitions, Products R&S Voltage and Power Measurement", *Brochure Rohde&Schwarz*, 22-23.
- [7] LOWHORN N.D. et al., "Round-Robin studies of two potential seebeck coefficient standard reference materials", *26th International conference on thermoelectrics (ICT'07)*, 3-5 juin 2007, *IEEE Conference publications*, 2008.
- [8] JANIK D., ASCROFT J. et CLARK R., "Measurement techniques and results of an intercomparison a RF power in 3,5 mm coaxial line up to 26 GHz", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-48**, 1999, 166-168.
- [9] KAZEMIPOUR A., BOURGHES M., LITWIN A. et ALLAL D., « Nouvel étalon primaire de puissance HF, DC-26,5 GHz », *13^{es} journées nationales micro-ondes (JNM)*, Lille, France, 21-23 mai, 2003.
- [10] ERARD L., TORRALBA B. et VELASCO L., « Mesures de puissance à des fréquences supérieures à 40 GHz », « Rapport d'étude interne BNM n° 1344 », *Bureau national de métrologie*, 1996, 19-21.