



M. CHARLES

Étalon de puissance radiofréquence pour les basses fréquences de 100 kHz à 1 GHz

Radio frequency power standard for low frequencies from 100 kHz to 1 GHz

Michaël CHARLES, Alexis LITWIN, André POLETAEFF et Djamel ALLAL

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

Résumé

Cette publication présente la réalisation d'un nouvel étalon de puissance à partir d'une sonde à thermocouple commerciale. Un étalonnage au microcalorimètre a été effectué afin de déterminer l'efficacité effective de la sonde. Un étalonnage par la méthode de transposition thermique a contribué à valider les résultats obtenus au microcalorimètre. Le LNE s'est doté ainsi d'un nouvel étalon de puissance pour les basses fréquences.

MOTS CLÉS : EFFICACITÉ EFFECTIVE, INCERTITUDE, SONDE À THERMOCOUPLE, ÉTALON, PUISSANCE RF, TENSION, MICROCALORIMÈTRE, TRANSPOSITION THERMIQUE.

Abstract

This paper describes the development of a new power standard based on a commercial thermocouple sensor. A calibration with a twin microcalorimeter has been performed in order to determine the effective efficiency of the sensor. A calibration using thermal transfer allows us to validate the results got with the microcalorimeter. LNE has got a new power standard for low frequencies.

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

1. Introduction

Comme la plupart des laboratoires nationaux de métrologie (LNM), la méthode primaire de raccordement mise en œuvre par le LNE est celle du microcalorimètre utilisant des détecteurs bolométriques à thermistance qui constituent les étalons primaires radiofréquences

(RF) [1]. Ce procédé est cependant limité pour des étalonnages portant sur des fréquences inférieures à 10 MHz. Afin de pallier cette contrainte, l'utilisation d'un thermocouple remplaçant la thermistance apparaît comme une solution cohérente pour des caractérisations dans les basses fréquences. Des détecteurs de puissance basés sur les thermocouples à chauffage indirect ont fait l'objet d'une comparaison internationale (CEEM.RF-K10.CL) [2] 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 étaient une réelle alternative aux thermistances afin de 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.

L'origine de ce travail est le constat d'un besoin croissant de mesures radiofréquences étendues vers les basses fréquences (jusqu'à 100 kHz) des laboratoires accrédités pour lesquelles les montures bolométriques ne suffisent plus car elles sont opérantes qu'au-dessus de 300 kHz. Nous présentons dans cet article les différents éléments sensibles constituant le microcalorimètre (guide coaxial à parois minces et thermopile), le banc d'étalonnage, les mesures de l'efficacité effective de la sonde thermoélectrique et une comparaison de ces mesures avec celles obtenues par la méthode de transposition

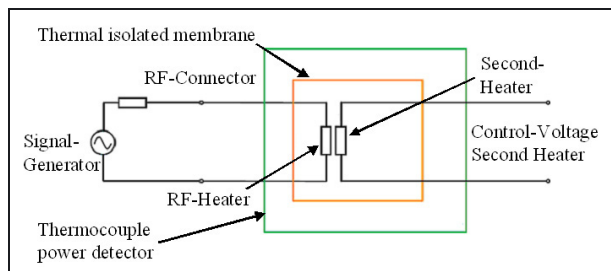


Fig. 1. – Schéma électrique de la sonde.

thermique développée par le LNE comparant la sonde thermoélectrique à un étalon de tension.

2. Le montage du microcalorimètre

Le microcalorimètre est constitué de deux sondes thermoélectriques physiquement identiques, disposées symétriquement. L'une est active (sonde étalon) et reçoit la puissance RF, l'autre est une référence thermique (sonde référence) soumise à aucun signal. Les deux éléments primordiaux sont le guide coaxial à parois minces et la thermopile. Le guide coaxial à parois minces assure 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.

Le principal avantage de la méthode d'étalonnage au microcalorimètre est l'élimination au premier ordre [3] des effets de la puissance réfléchie due à la désadaptation et de la puissance dissipée dans les lignes de transmissions.

2.1. Sonde à thermocouples

Un thermocouple repose sur le principe suivant : si une extrémité d'un métal est portée à une température T_1 et l'autre à une température T_2 , on relève alors une différence de potentiel entre ses deux extrémités ; de même, si deux métaux différents sont reliés par leurs extrémités et que celles-ci sont soumises à des températures différentes, une différence de potentiel apparaît entre les deux extrémités. La sonde à thermocouple est basée sur cette différence de tension entre les deux métaux. Une extrémité porte le nom de jonction « chaude » et l'autre le nom de jonction « froide ». La différence de tension U peut être reliée à la variation de température induite par une puissance micro-onde. L'étalon de transfert utilisable jusqu'à 18 GHz est basé sur une tête de sonde Rohde & Schwarz de type NRP-Z51 et se présente comme un convertisseur puissance-tension. Cette sonde est basée sur l'effet thermoélectrique où un thermocouple placé au plus près d'une charge RF mesure l'échauffement de celle-ci (fig. 1). Ce détecteur présente une sensibilité de l'ordre de $230 \mu\text{V}/\text{mW}$. La puissance maximale admissible est de 100 mW et la plus petite puissance mesurable se situe autour de $1 \mu\text{W}$ [4].

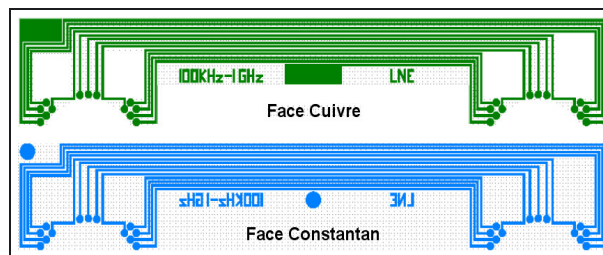


Fig. 2. – Topologie de la thermopile utilisée au LNE.

2.2. La thermopile

Une thermopile est utilisée pour mesurer la différence de température entre la sonde sous test et la sonde de référence. La thermopile utilisée est constituée de 13 jonctions montées en série réalisées par l'intermédiaire d'un dépôt électrolytique de cuivre (épaisseur de $35 \mu\text{m}$) sur la première face d'un circuit époxy et de constantan (épaisseur de $25 \mu\text{m}$) sur la seconde face (fig. 2). Dans ces couples thermoélectriques, l'élément de polarité négative est le constantan, alliage de cuivre et de nickel, tandis que l'élément de polarité positive est constitué par le cuivre. La jonction entre les deux faces est réalisée par un trou métallisé traversant la plaque et garantissant ainsi la liaison électrique. Un film mince de résine électriquement isolant et thermiquement conducteur vient envelopper tout le circuit.

Le coefficient de Seebeck d'une jonction cuivre/constantan est égal à $41 \mu\text{V}/\text{K}$ à température ambiante [5]. La thermopile utilisée dispose de 13 jonctions ; ce qui nous permet d'obtenir une sensibilité de $533 \mu\text{V}/\text{K}$.

2.3. Le guide coaxial

Dans un microcalorimètre, les lignes à parois minces constituent des composants de première importance. Ces lignes assurent la liaison électrique de la sonde de puissance avec l'extérieur, tout en garantissant une isolation thermique optimale. En effet, l'objectif de la méthode d'étalonnage consiste à confiner l'échauffement produit par la dissipation de la puissance RF au niveau du détecteur. On détermine ensuite, avec la meilleure incertitude possible, la force électromotrice induite aux bornes des thermocouples apposés entre la sonde active et la sonde de référence. Ce phénomène est d'autant mieux quantifié qu'il y a moins de fuites en direction de la masse extérieure *via* ces lignes à parois minces. 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 $1 \mu\text{m}$ permettant la propagation électrique du signal.

2.4. Microcalorimètre symétrique

D. Janik et al. [6] 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. Dans le cadre

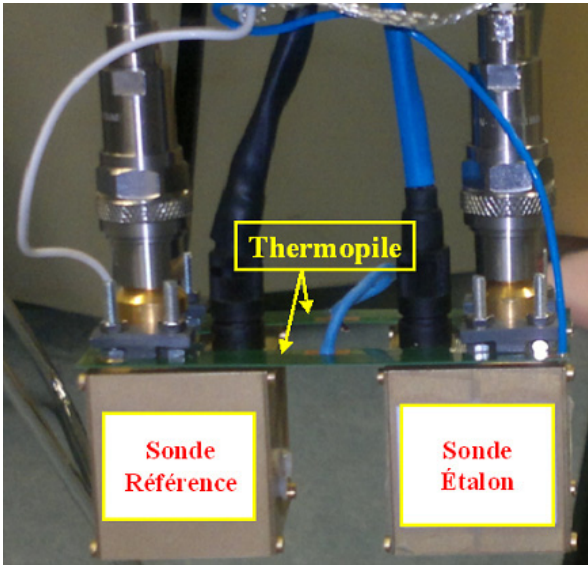


Fig. 3. – Microcalorimètre symétrique coaxial du LNE.

du maintien à niveau de ses références, le LNE a développé plusieurs microcalorimètres de type symétrique, notamment pour des étalonnages à partir d'éléments coaxiaux [7]. Ce type de calorimètre (fig. 3) 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 en tension de la différence de température entre la sonde sous test 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.

3. Étalonnage de la sonde à thermocouples

L'efficacité effective (η_{eff}) de la sonde est déterminée à partir d'une première mesure de référence à basse fréquence (114 Hz, fréquence de travail du générateur BF). 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 similaire à celle obtenue avec le signal BF. On détermine alors l'efficacité effective 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 de la sonde à thermocouples, obtenues respectivement avec le signal BF et le signal RF [2].

3.1. Banc d'étalonnage de la sonde

Le montage expérimental complet (fig. 4) est constitué des éléments suivants :

- un microcalorimètre ;
- une enceinte thermique contenant environ 400 litres d'eau dans laquelle est placé le microcalorimètre.

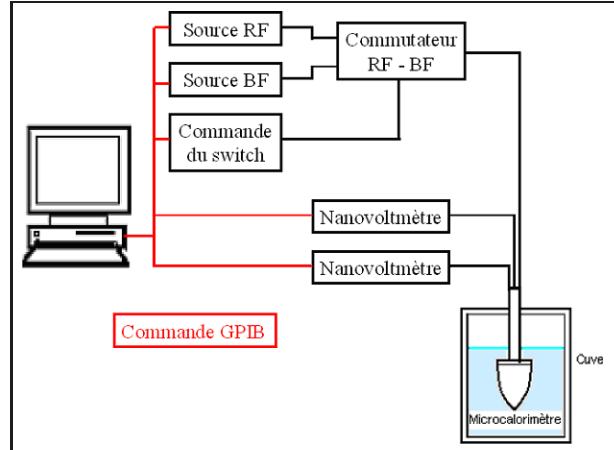


Fig. 4. – Schéma du banc d'étalonnage de la sonde.

Elle joue le rôle de tampon thermique en isolant le dispositif de l'extérieur ;

- une source de puissance RF ;
- une source de puissance BF ;
- un commutateur large bande RF – BF ;
- une commande de commutateur ;
- un nanovoltmètre connecté en sortie de la sonde pour mesurer les tensions continues V_i aux bornes des thermocouples ;
- un nanovoltmètre connecté à la thermopile qui mesure, sous forme de tension e_i , la différence de température entre la référence thermique et la sonde à étalonner ;
- 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 conditions du milieu ambiant sont enregistrées et conservées 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).

3.2. Correction sur l'efficacité effective

Dans le microcalorimètre, l'élément de ligne coaxiale à parois minces connecté à la sonde introduit des pertes. 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. L'hypothèse concernant cette correction a été exprimée dès les premières expériences selon le rapport d'étude BNM n° 1344 [8] et s'écrit :

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

Tableau 1

Synthèse des composantes d'incertitudes de l'étalonnage de la sonde à 5 MHz ($k = 1$).

Composante d'incertitude (x_i)	valeur de x_i	$u(x_i)$	Sensibilité c_i	Contribution d'incertitude $C_i \cdot u(x_i)$
Tension en sortie de la sonde (V_{BF})	$1,00 \times 10^{-4}$ V	$2,36 \times 10^{-8}$ V	$-9,96 \times 10^3$ V ⁻¹	$-2,35 \times 10^{-4}$
Tension en sortie de la sonde (V_{RF})	$1,00 \times 10^{-4}$ V	$1,81 \times 10^{-8}$ V	$9,96 \times 10^3$ V ⁻¹	$1,80 \times 10^{-4}$
Tension aux bornes de la thermopile (e_{BF})	$1,01 \times 10^{-5}$ V	$1,09 \times 10^{-8}$ V	$9,91 \times 10^4$ V ⁻¹	$1,08 \times 10^{-3}$
Tension aux bornes de la thermopile (e_{RF})	$1,01 \times 10^{-5}$ V	$1,17 \times 10^{-8}$ V	$-9,88 \times 10^4$ V ⁻¹	$-1,16 \times 10^{-3}$
Affaiblissement du guide à paroi mince	$-2,49 \times 10^{-3}$ dB	$4,02 \times 10^{-4}$ dB	$1,15 \times 10^{-1}$ dB ⁻¹	$4,61 \times 10^{-5}$
Mesurande (y)	valeur mesurée	incertitude ($k = 1$)		
Efficacité effective (η_{eff})	0,997 5	$1,6 \times 10^{-3}$		
Efficacité effective corrigée (η_{effc})	0,997 8	$1,6 \times 10^{-3}$		

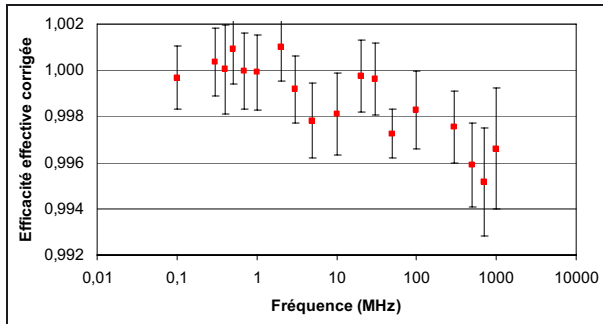


Fig. 5. – Efficacité effective corrigée de la nouvelle sonde.

Les pertes de la ligne coaxiale à parois minces sont mesurées sous la forme d'un affaiblissement exprimé en décibel (dB), A_{dB} .

3.3. Incertitude d'étalonnage de la sonde

Le bilan d'incertitude s'exprime en utilisant la loi générale de propagation des incertitudes (3) pour l'efficacité effective et l'efficacité effective corrigée [1].

$$u(y) = \sqrt{\sum |c_i \cdot u(x_i)|^2} \quad c_i = \frac{\partial}{\partial x_i}. \quad (3)$$

Le tableau 1 synthétise les composantes d'incertitudes de l'étalonnage de la sonde à la fréquence de 5 MHz.

3.4. Résultats de l'étalonnage

Afin d'assurer une meilleure linéarité, nous contrôlons à chaque fréquence les deux puissances appliquées, dans le but d'obtenir V_{BF} égale à V_{RF} . Si cette condition est bien respectée, nous pouvons estimer que les deux puissances, au niveau de l'élément résistif, sont quasiment égales.

Le tableau 2 et la figure 5 laissent apparaître des valeurs d'efficacité effective corrigée (proches de 1) qui permettent de valider la méthode et faire de la sonde

Tableau 2

Valeurs et incertitudes associées de l'efficacité effective corrigée de la nouvelle sonde pour chaque fréquence.

f (en MHz)	$\eta_{\text{effc}}(f)$	$u(\eta_{\text{effc}}) (k = 1)$
0,1	0,999 7	$1,3 \times 10^{-3}$
0,3	1,000 4	$1,5 \times 10^{-3}$
0,4	1,000 0	$1,9 \times 10^{-3}$
0,5	1,000 9	$1,5 \times 10^{-3}$
0,7	1,000 0	$1,6 \times 10^{-3}$
1	0,999 9	$1,6 \times 10^{-3}$
2	1,001 0	$1,5 \times 10^{-3}$
3	0,999 2	$1,4 \times 10^{-3}$
5	0,997 8	$1,6 \times 10^{-3}$
10	0,998 1	$1,8 \times 10^{-3}$
20	0,999 7	$1,5 \times 10^{-3}$
30	0,999 6	$1,6 \times 10^{-3}$
50	0,997 3	$1,1 \times 10^{-3}$
100	0,998 3	$1,7 \times 10^{-3}$
300	0,997 6	$1,6 \times 10^{-3}$
500	0,995 9	$1,8 \times 10^{-3}$
700	0,995 2	$2,3 \times 10^{-3}$
1 000	0,996 6	$2,6 \times 10^{-3}$

à thermocouples, un étalon primaire de puissance pertinent sur la gamme de fréquences de 100 kHz à 1 GHz. On constate également que l'incertitude absolue varie de 0,1 % à 0,3 % ($k = 1$), ce qui est comparable à l'incertitude obtenue pour les montures bolométriques du LNE pour cette gamme de fréquences.

4. Comparaison avec un étalon de tension

L'objectif de cette dernière partie est d'établir la conformité des résultats d'étalonnage de la sonde obtenus au microcalorimètre aux incertitudes prés. Nous avons donc mis en œuvre un nouvel étalonnage de la sonde en la comparant à un étalon de tension par la méthode de transposition thermique, banc d'étalonnage développé par le LNE et fonctionnant jusqu'à 100 MHz.

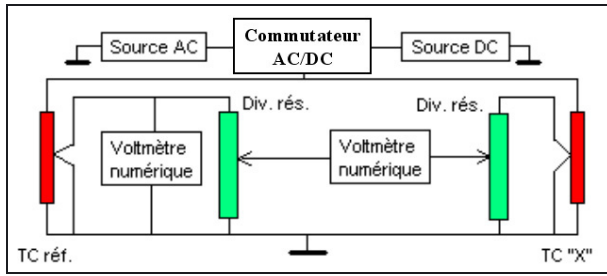


Fig. 6. – Schéma de principe du banc d'étalonnage des convertisseurs thermiques.

4.1. Méthode de transposition thermique [9]

La transposition thermique est actuellement le moyen le plus précis pour raccorder les valeurs efficaces des grandeurs mesurées en courant alternatif (AC) aux unités servant à mesurer ces grandeurs en régime continu, y compris pour les tensions RF. Elle consiste à appliquer successivement le signal AC à mesurer et le signal DC de référence à un convertisseur thermique (TC sur fig. 6). Celui-ci est constitué d'une résistance chauffante et d'un thermocouple destiné à mesurer l'échauffement de cette résistance. Lorsque l'amplitude du signal DC (de référence) est ajusté de façon à produire la même réponse thermique qu'avec le signal AC, la valeur efficace de ce dernier est égale à l'amplitude du signal DC, à l'erreur près du convertisseur. Pour effectuer un tel raccordement avec la meilleure incertitude, une bonne connaissance de cette erreur, appelée aussi écart de transposition, est indispensable.

4.2. Banc d'étalonnage

Ce banc reprend le principe de celui utilisé pour les étalonnages en tension BF [10].

Les entrées des deux convertisseurs en comparaison, TC_{rf} et TC_X sont connectées en parallèle et alimentées successivement, par l'intermédiaire d'un commutateur RF-DC, par la source de tension RF et la source de tension continue. Les diviseurs résistifs permettent, par un ajustement adéquat de leurs rapports de division, de rendre négligeable l'influence de petites variations de la tension d'alimentation sur la tension différentielle lue par le voltmètre (fig. 6).

4.3. Comparaison des méthodes d'étalonnage

La mesure a été effectuée sous une alimentation de 1 V, ce qui donne une puissance de 20 mW (l'impédance étant égale à 50 Ω) inférieure à la puissance maximale supportée par la sonde (100 mW). Cette comparaison a été réalisée pour la gamme de fréquences allant de 500 kHz à 100 MHz, ce qui correspond aux possibilités du banc de transposition thermique développé au LNE.

Afin de définir l'efficacité effective corrigée de la sonde *via* un étalonnage par transposition thermique,

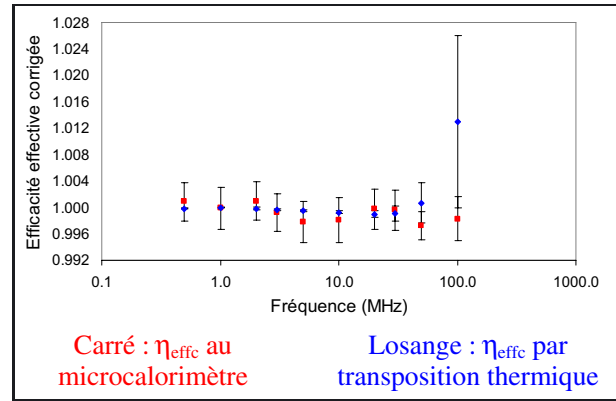


Fig. 7. – Comparaison entre les étalonnages de la sonde par le microcalorimètre et par transposition thermique.

il faut établir la relation reliant l'efficacité effective à l'écart de transposition. Ce dernier est défini par :

$$d = \frac{U_{RF} - U_{DC}}{U_{DC}} \Big|_{V_{RF}=V_{DC}}, \quad (4)$$

où U_{RF} est la tension en entrée de la sonde en régime RF et U_{DC} est la tension en entrée de la sonde en régime DC, et V_{RF} est la tension en sortie de la sonde en régime RF et V_{DC} est la tension en sortie de la sonde en régime DC.

On peut ainsi déterminer l'efficacité effective corrigée en appliquant le raisonnement traduit par la relation (5) :

$$\eta_{\text{effc}} = \frac{P_{RF}}{P_{DC}} = \frac{U_{RF}^2}{U_{DC}^2} = (1 + d)^2 \quad (5)$$

Les résultats des étalonnages au microcalorimètre et *via* un étalon de tension sont présentés sur la figure 7.

On constate, par l'analyse des résultats présentés à la figure 7, un bon accord entre les deux méthodes d'étalonnage de notre sonde. En effet, les résultats de mesures obtenus par les deux méthodes sont équivalents aux incertitudes élargies près ($k = 2$). Ce constat confirme les résultats obtenus pour l'étalonnage au microcalorimètre et valide le nouveau moyen de raccordement de sondes thermoélectriques et des montures bolométriques.

5. Conclusion

L'étude dont l'objectif était le développement d'un étalon de puissance pour les basses fréquences (de 100 kHz à 1 GHz) a permis de démontrer la faisabilité et la pertinence d'utiliser des sondes thermoélectriques comme étalons de puissance. Le LNE dispose donc d'un nouvel étalon de puissance et d'une nouvelle méthode de raccordement pour les basses fréquences. Cependant, les caractéristiques physiques et techniques de ce type de sonde fonctionnant théoriquement jusqu'à 18 GHz, impulsent la perspective d'une étude plus large bande pour les étalonnages en puissance de 9 kHz à 18 GHz.

Références

- [1] BOURGHES M., « Développement d'un nouveau microcalorimètre coaxial jusqu'à 50 GHz », Mémoire d'ingénieur CNAM, 2009, document LNE.
- [2] 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", *CPEM 2004*, Londres, Royaume-Uni, 27 juin–2 juill. 2004, DOI : 10.1109/CPEM.2004.305554.
- [3] FANTOM A., "Radio frequency and microwave power measurement", London, *Peter Peregrinus Ltd.*, 1990, 47.
- [4] "Fundamentals, Definitions, Products R&S Voltage and Power Measurement", *Brochure Rohde&Schwarz*, 22-23.
- [5] LOWHORN ND. *et al.*, "Round-Robin studies of two potential seebeck coefficient standard reference materials", *26th International conference on thermoelectrics (ICT'07)*, 3–5 juin 2007, 2008, DOI : 10.1109/ICT.2007.4569495.
- [6] 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, DOI : 10.1109/19.769554.
- [7] KAZEMIPOUR A., BOURGHES M., LITWIN A. et ALLAL D., « Nouvel étalon primaire de puissance HF, DC – 26,5 GHz », *13^e journées nationales micro-ondes (JNM)*, Lille, France, 21–23 mai 2003.
- [8] ERARD L., TORRALBA B. et VELASCO L., « Mesures de puissance à des fréquences supérieures à 40 GHz », *Rapport interne BNM*, n° 1344, avril 1996, 19-21.
- [9] POLETAEFF A. *et al.*, « Transposition alternatif-continu en tension jusqu'à 100 MHz au LNE », *12^e congrès international de métrologie*, Lyon, France, 20–23 juin 2005.
- [10] POLETAEFF A., "Automated comparator for accurate AC-DC difference measurements at the BNM-LCIE", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **48**, 2, 1999, 412-414, DOI : 10.1109/19.769613.

Article reçu le 13 mars 2012, version révisée reçue le 30 mai 2012.