



M. S. KHAN

# Caractérisation des références électriques de transposition alternatif-continu en basse tension entre 10 Hz et 1 MHz au LNE

## *Characterization of low-voltage AC-DC transfer standards between 10 Hz and 1 MHz at LNE*

Mohammad Saif KHAN, André POLETAEFF et Hervé NDILIMABAKA

LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais), 29 avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes Cedex, France, mohammad-saif.khan@lne.fr, andre.poletaeff@lne.fr, herve.ndilimabaka@lne.fr.

### Résumé

Cet article décrit la procédure récemment mise en place au LNE pour l'étalonnage de références de transposition alternatif-continu en faible tension pour les fréquences allant de 10 Hz à 1 MHz. Un ensemble de micropotentiomètres a notamment été développé pour la prise en compte de la dépendance de ces références en fonction de la valeur de tension appliquée au cours de la procédure de *step-down*. Les premiers résultats de mesure sont présentés.

**MOTS CLÉS** : ÉCART DE TRANSPOSITION, ÉTALONNAGE, CONVERTISSEURS THERMIQUES, INCERTITUDE, MESURE DE TENSION ÉLECTRIQUE.

### Abstract

*This paper describes the procedure recently introduced at LNE to calibrate low-voltage AC-DC transfer reference standards from 10 Hz to 1 MHz. Especially, a set of micro-potentiometers was developed in order to take into account the voltage level dependence of the standards during the step-down procedure. First measurement results are presented.*

**KEY WORDS**: AC-DC DIFFERENCE, CALIBRATION, THERMAL CONVERTERS, UNCERTAINTY, VOLTAGE MEASUREMENT.

### 1. Introduction

La demande sans cesse croissante d'étalonnages d'appareils de mesure avec la plus faible incertitude possible, à de faibles tensions pouvant descendre jusqu'à quelques millivolts et pour des fréquences pouvant

atteindre 1 MHz, a conduit le LNE à améliorer ses possibilités d'étalonnage dans ce domaine [1]. À l'heure actuelle, la transposition thermique constitue le moyen le plus précis pour assurer la traçabilité des mesures de tensions et de courants alternatifs au SI. Elle consiste à comparer les effets énergétiques mis en jeu lors de l'application successive d'un signal alternatif et d'un signal continu à une résistance. Un ensemble de micropotentiomètres ( $\mu$ Pot) a ainsi été développé au LNE. Il a en effet été montré [2] que l'usage de  $\mu$ Pot peut permettre d'atteindre une excellente incertitude lors de la caractérisation de faibles tensions alternatives dans un domaine fréquentiel étendu (jusqu'à 1 GHz). Plus récemment, des  $\mu$ Pot conçus pour des mesures très précises jusqu'à 1 MHz ont été développés par plusieurs laboratoires [3–5]. Les  $\mu$ Pot développés au LNE ont été réalisés à partir de convertisseurs multijonctions obtenus par dépôt de couches minces, développés et fabriqués par l'institut IPHT en coopération avec la PTB (Allemagne). Ce choix a été motivé par la très faible dépendance de ces convertisseurs en fonction de la valeur de tension appliquée à leur entrée. En effet, lors de la procédure mise en œuvre pour étalonner les références de transposition alternatif-continu, chaque  $\mu$ Pot est d'abord étalonné sous sa tension nominale puis, dans une seconde étape, est utilisé sous une tension réduite pour l'étalonnage suivant. Nous faisons l'hypothèse que l'écart de transposition du  $\mu$ Pot reste identique pour ces deux tensions. Par ailleurs, ces  $\mu$ Pot ont été conçus pour présenter une erreur intrinsèque (écart de transposition) la plus petite possible sur

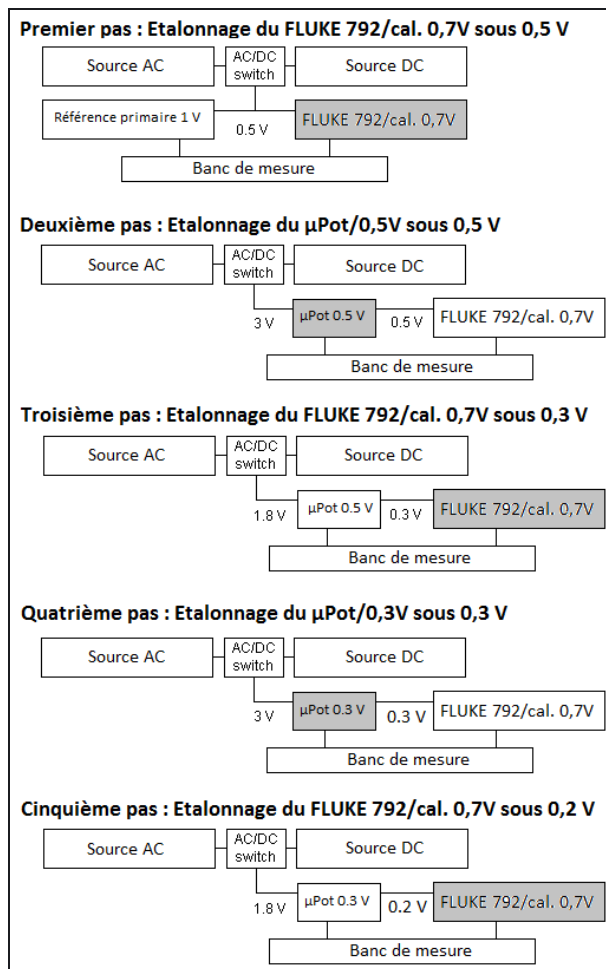


Fig. 1. – Illustration de la procédure de « step-down » pour l'étalonnage d'un des FLUKE 792A sur le calibre 0,7 V sous les tensions de 0,5 V, 0,3 V et 0,2 V (l'appareil en étalonnage est représenté coloré en gris).

l'ensemble du domaine fréquentiel d'utilisation. Dans cet article, nous décrivons ces micropotentiomètres et donnons les premiers résultats d'étalonnage obtenus.

## 2. La procédure de step-down

Au LNE, les références de transposition alternatif-continu en tension de faible valeur sont traçables à la référence primaire de transposition alternatif-continu en tension basse fréquence, dont la tension nominale est égale à 1 V, au moyen d'une procédure de *step-down* consistant à étalonner chacune des références sous une tension donnée par rapport à une autre référence déjà étalonner sous une tension supérieure. La figure 1 illustre les premiers pas de cette procédure.

Le paramètre à déterminer, lors des étalonnages, est l'écart de transposition  $\delta$  de ces références défini par la relation (1) :

$$\delta = \frac{U_{AC} - U_{DC}}{U_{DC}}, \quad (1)$$

où  $U_{AC}$  est la valeur efficace de la tension alternative appliquée à l'entrée de l'appareil et  $U_{DC}$  la moyenne des valeurs absolues des tensions continues positive et négative produisant la même réponse de cet appareil que  $U_{AC}$ .

La plupart des appareils, ou systèmes, permettant d'effectuer des mesures par transposition thermique présentent une dépendance de leur écart de transposition plus ou moins forte en fonction de l'amplitude du signal qui leur est appliqué. C'est aussi le cas des appareils FLUKE 792A utilisés comme références au LNE. C'est pourquoi, afin de prendre en compte cette dépendance, nous avons choisi d'utiliser des micropotentiomètres.

Dans un premier temps, l'une des références est étalonner sur le calibre 0,7 V par rapport à la référence primaire sous une tension de 0,5 V. Ce FLUKE 792A est ensuite connecté à la sortie d'un  $\mu$ Pot de tension nominale de sortie de 0,5 V et dont la tension d'entrée est choisie de façon à ce qu'il délivre 0,5 V en sortie. De cette façon, le  $\mu$ Pot peut être étalonner sous sa tension nominale par rapport au FLUKE 792A préalablement étalonner. Puis, la tension d'entrée du  $\mu$ Pot est réduite de façon à ce qu'il ne délivre en sortie plus que 0,3 V. Son écart de transposition, supposé ne pas varier lorsque sa tension de sortie passe de 0,5 V à 0,3 V, il peut servir maintenant à étalonner le FLUKE 792A sous 0,3 V. Une fois étalonner sous 0,3 V, le FLUKE 792A va servir à étalonner le  $\mu$ Pot de tension nominale 0,3 V qui sera ensuite utilisé pour étalonner ce FLUKE 792A sous 0,2 V. Ce FLUKE 792A est ensuite utilisé (toujours sur son calibre 0,7 V) pour étalonner l'autre FLUKE 792A sous 0,2 V sur le calibre 220 mV. Des  $\mu$ Pot, de tensions nominales 200 mV, 100 mV, 50 mV et 30 mV, chargés par ce second FLUKE 792A sont utilisés de la même façon tantôt comme inconnu, tantôt comme étalon, pour étalonner ce dernier sur le calibre 220 mV sous des tensions allant de 100 mV à 20 mV. On étalonner ensuite le premier FLUKE 792A sur son calibre 22 mV, directement par rapport à l'autre sous 20 mV et au moyen de  $\mu$ Pot de tensions nominales 20 mV et 10 mV sous les tensions respectives 10 mV et 5 mV.

Dans cette procédure, les  $\mu$ Pot sont connectés sur la même charge lors de leur étalonnage et lorsqu'ils servent ensuite d'étalon dans l'étape suivante. Ainsi les erreurs dues à l'effet de charge [6] sont prises en compte dès le processus d'étalonnage et ne donnent lieu à aucune correction supplémentaire liée à cet effet.

Toutes les mesures mentionnées ici sont réalisées au moyen du banc d'étalonnage des convertisseurs thermiques développé au LNE et décrit par A. Poletaev en 1999 [7].

## 3. Conception des micropotentiomètres

### 3.1. Description des micropotentiomètres

La figure 2 présente un schéma simplifié des micropotentiomètres développés au LNE.

Le composant principal constitutif des micropotentiomètres développés au LNE est un convertisseur

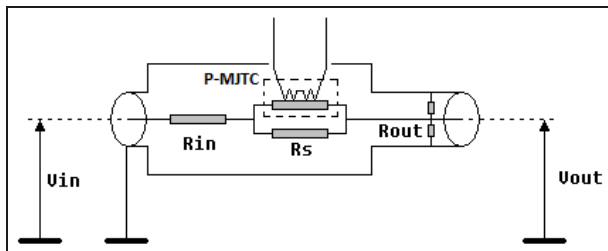


Fig. 2. – Schéma simplifié d'un micropotentiomètre.

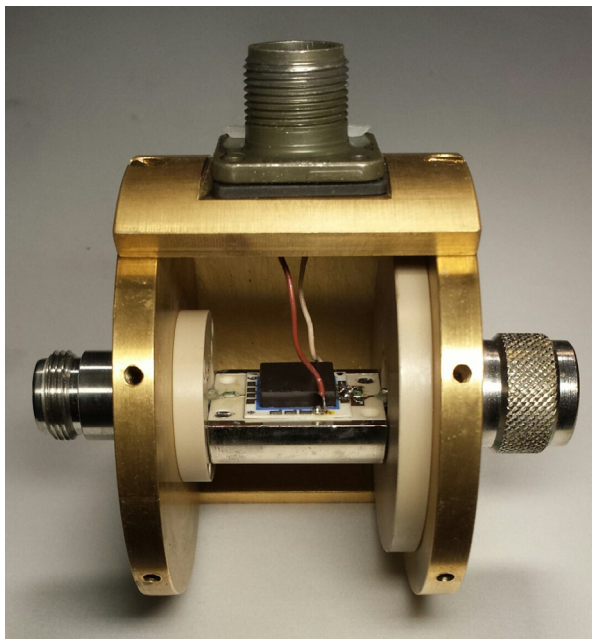


Fig. 3. – Vue montrant la réalisation intérieure des micropotentiomètres.

multijonction obtenu par dépôt de couches minces (IPHT-PTB) [8] dont l'impédance d'entrée est voisine de  $180 \Omega$ . Un shunt  $R_s$  est connecté en parallèle avec le convertisseur de façon à ce que le courant nominal parcourant le  $\mu$ Pot soit d'environ 20 mA. Une résistance d'entrée  $R_{in}$  est connectée en série avec l'ensemble « convertisseur + shunt » afin qu'une tension d'entrée  $V_{in}$  de 3 V corresponde au courant nominal du  $\mu$ Pot. La tension de sortie  $V_{out}$  du  $\mu$ Pot est délivrée aux bornes de la résistance de sortie  $R_{out}$ .

### 3.2. Réalisation des micropotentiomètres

Une photographie d'un des  $\mu$ Pot fabriqués au LNE est présentée en figure 3. Le convertisseur multijonction (boîtier au centre du  $\mu$ Pot), la résistance d'entrée (à gauche du convertisseur) et le shunt (à droite) sont placés sur l'axe du cylindre formé par le boîtier du  $\mu$ Pot afin de lui conférer une structure coaxiale. Les résistances utilisées sont des composants CMS (composants montés en surface). L'assemblage des différentes parties mécaniques est illustré plus en détail dans la vue éclatée de la figure 4.

Le cylindre extérieur ainsi que les deux flasques constituant le boîtier du  $\mu$ Pot sont en laiton. L'ensemble formé par les deux demi cylindres en cuivre nickelé

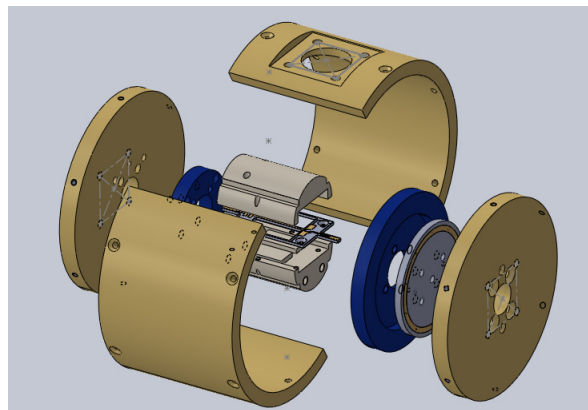


Fig. 4. – Vue éclatée montrant l'assemblage des différentes parties mécaniques du micropotentiomètre (longueur 5,2 cm, diamètre 7 cm).

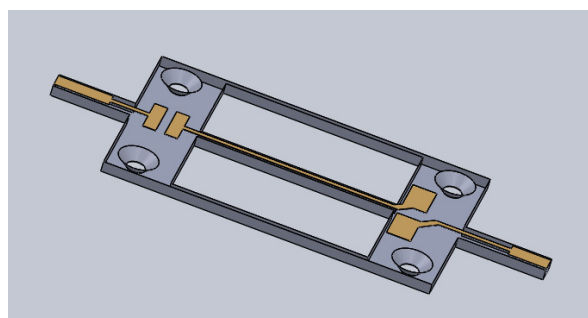


Fig. 5. – Support mécanique servant à maintenir le convertisseur multijonction, la résistance d'entrée et le shunt.

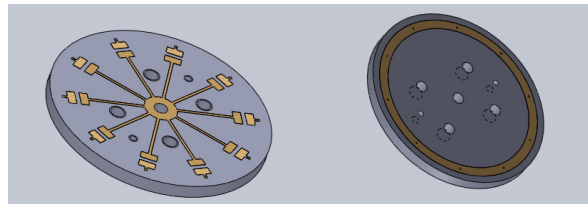


Fig. 6. – Vue des deux faces du disque servant de support à la résistance de sortie.

(en gris sur la vue éclatée) est monté autour du convertisseur multijonction et sert de shunt thermique. Cet ensemble est fixé aux flasques au moyen de vis en nylon et électriquement isolé de ceux-ci par deux disques en PVC (Peek) représentés en bleu. Le convertisseur multijonction, la résistance d'entrée et le shunt sont montés sur le support inséré entre les deux demi-cylindres et représenté sur la figure 5.

Le disque situé entre le flasque de droite et le disque isolant sert de support à la résistance de sortie. Cette résistance est constituée d'un ensemble de résistances radiales connectées en parallèle et montées sur le disque leur servant de support (fig. 6). Le point commun au centre du disque est connecté au point bas de l'entrée du convertisseur multijonction et au contact central du connecteur de sortie du  $\mu$ Pot (non représenté sur la vue éclatée). L'autre côté de chacune des résistances est connecté à la piste conductrice déposée sur la face opposée du disque. Cette piste est en contact direct avec le flasque sur lequel

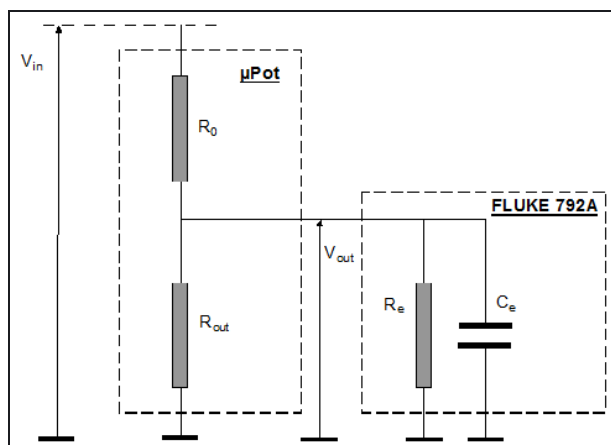


Fig. 7. – Modèle utilisé pour l'étude de l'effet de charge.

est fixé le connecteur de sortie. Cette configuration a été adoptée pour réduire autant que possible la composante réactive (inductive) de la résistance et comme conséquence la dépendance de la tension de sortie du  $\mu\text{Pot}$  en fonction de la fréquence.

#### 4. L'effet de charge

Bien que l'effet de charge soit exactement le même lors de l'étalonnage du  $\mu\text{Pot}$  et quand il sert ensuite d'étalon dans l'étape suivante de la procédure de *step-down* et ne nécessite donc l'application d'aucune correction particulière, nous avons néanmoins cherché à déterminer l'ordre de grandeur de cet effet. Le modèle utilisé est illustré sur la figure 7.

La tension d'entrée  $V_{in}(\omega)$  nécessaire pour produire la tension de sortie  $V_{out}(\omega)$  est donnée par la relation (2) :

$$V_{in}(\omega) = V_{out}(\omega) \frac{Z_L(\omega) + R_0}{Z_L(\omega)} \quad (2)$$

où :

- $Z_L(\omega)$  est l'impédance équivalente à  $R_{out}$ ,  $R_e$  et  $C_e$  connectés en parallèle à la fréquence

$$f = \frac{\omega}{2\pi};$$

- $R_0$ , la résistance totale du  $\mu\text{Pot}$ , vue du connecteur d'entrée, diminuée de sa résistance de sortie  $R_{out}$ .

Pour quantifier l'influence de l'effet de charge sur l'écart de transposition du  $\mu\text{Pot}$ , nous avons supposé que cet écart de transposition était nul lorsque le  $\mu\text{Pot}$  n'était pas chargé par le FLUKE 792 et nous avons étudié comment il évoluait lorsqu'on le chargeait. L'écart de transposition supplémentaire  $\delta_{LOAD}$  du à l'effet de charge est alors par définition donné par la relation (3) :

$$\delta_{LOAD}(\omega) = \frac{|V_{in}(\omega)| - |V_{in}(0)|}{|V_{in}(0)|} = \frac{|V_{in}(\omega)|}{|V_{in}(0)|} - 1, \quad (3)$$

où  $V_{in}(0)$  est la moyenne des tensions, positive et négative, qui produit la même tension de sortie  $V_{out}$  ( $|V_{out}(\omega)| = V_{out}(0) = V_{out}$ ) du  $\mu\text{Pot}$  lorsqu'il est chargé.

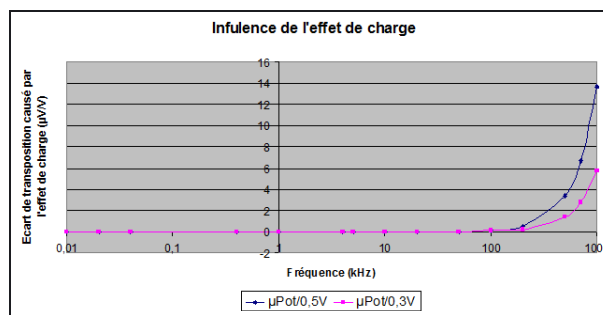


Fig. 8. – Écart de transposition supplémentaire causé par l'effet de charge.

En remplaçant  $|V_{in}(\omega)|$  et  $|V_{in}(0)|$  par leurs valeurs déduites de l'expression (2) et en tenant compte du fait que

$$Z_L(\omega) = \frac{-jR_{out}R_e}{R_{out}R_eC_e\omega - j(R_{out} + R_e)}$$

(impédance équivalente à  $R_{out}$ ,  $R_e$  et  $C_e$  connectés en parallèle) et en conséquence

$$Z_L(0) = \frac{R_{out}R_e}{R_{out} + R_e},$$

la relation (3) devient la relation (4) après quelques transformations :

$$\delta_{LOAD}(\omega) = \sqrt{1 + \frac{R_{out}^2 C_e^2 \omega^2}{\left(1 + \frac{R_{out}}{R_0} + \frac{R_{out}}{R_e}\right)^2}} - 1. \quad (4)$$

Les valeurs de  $R_e$  et  $C_e$  spécifiées par le constructeur sont  $R_e = 10 \text{ M}\Omega$  et  $C_e = 40 \text{ pF}$  pour le calibre 0,7 V.

Pour le  $\mu\text{Pot}/0,5 \text{ V}$ ,  $R_0 = 125 \Omega$  et  $R_{out} = 25 \Omega$ .

Pour le  $\mu\text{Pot}/0,3 \text{ V}$ ,  $R_0 = 135 \Omega$  et  $R_{out} = 15 \Omega$ .

Les valeurs résultantes pour  $\delta_{LOAD}$  sont données sur la figure 8.

Il apparaît clairement que l'effet de charge est négligeable jusqu'à 200 kHz. Il croît ensuite avec la fréquence pour atteindre 14  $\mu\text{V}/\text{V}$  pour le  $\mu\text{Pot}/0,5 \text{ V}$ . La relation (4) montre par ailleurs que lorsque  $R_{out}$  décroît, ce qui est le cas lorsque la tension nominale des  $\mu\text{Pot}$  diminue, l'influence de l'effet de charge décroît elle aussi.

#### 5. Résultats des mesures

A l'heure actuelle, les deux FLUKE 792 ont été étalonnés sur le seul calibre 0,7 V aux tensions de 0,5 V, 0,3 V et 0,2 V. Pour ces étalonnages, les  $\mu\text{Pot}/0,5 \text{ V}$  et  $\mu\text{Pot}/0,3 \text{ V}$  ont été utilisés. Les résultats d'étalonnage de ces  $\mu\text{Pot}$  sont présentés sur les figures 9 et 10.

La réponse en fréquence de ces deux micropotentiomètres peut être considérée comme constante (l'écart de transposition n'excède pas 20  $\mu\text{V}/\text{V}$  pour le  $\mu\text{Pot}/0,5 \text{ V}$  et 30  $\mu\text{V}/\text{V}$  pour le  $\mu\text{Pot}/0,3 \text{ V}$  avec une incertitude élargie maximum de 50  $\mu\text{V}/\text{V}$  à 1 MHz).

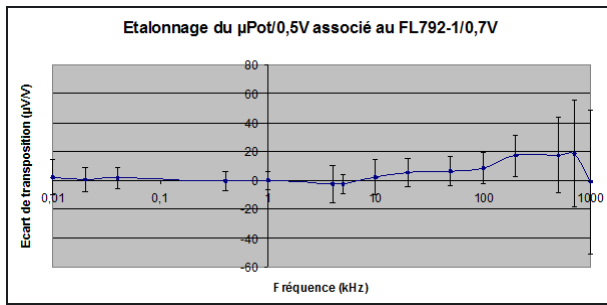


Fig. 9. – Résultat de l'étalonnage du  $\mu$ Pot/0,5 V chargé par le FLUKE792-1 sur le calibre 0,7 V. Les incertitudes sont exprimées avec un facteur d'élargissement  $k = 2$ .

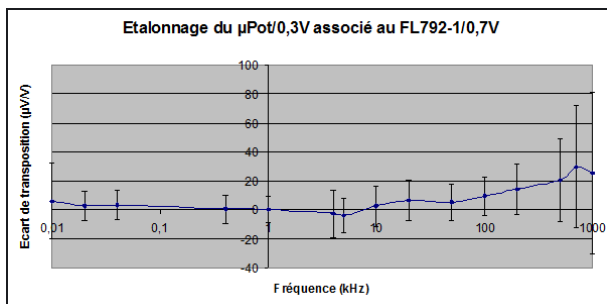


Fig. 10. – Résultat de l'étalonnage du  $\mu$ Pot/0,3 V chargé par le FLUKE792-1 sur le calibre 0,7 V. Les incertitudes sont exprimées avec un facteur d'élargissement  $k = 2$ .

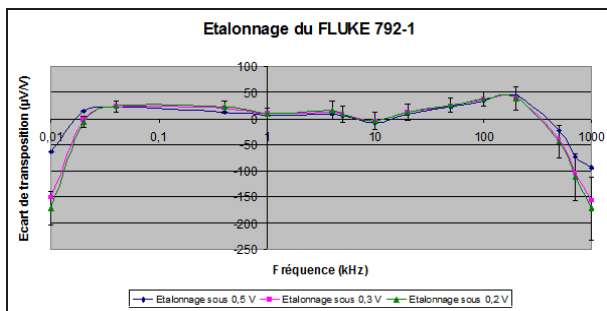


Fig. 11. – Résultat de l'étalonnage du FLUKE 792-1 sur le calibre 0,7 V. Les incertitudes sont exprimées avec un facteur d'élargissement  $k = 2$ .

Les résultats de l'étalonnage du FLUKE792-1 sur le calibre 0,7 V sont présentés sur la figure 11. Pour une meilleure lisibilité de la figure, seules les incertitudes d'étalonnage sous 0,2 V ont été reportées.

La dépendance de l'écart de transposition du FLUKE 792-1 sur le calibre 0,7 V en fonction de la valeur de la tension n'est que de quelques  $\mu$ V/V pour les fréquences comprises entre 40 Hz et 200 kHz. Mais aux fréquences plus basses et plus élevées, cette dépendance croît de façon significative et peut dépasser de façon sensible les incertitudes associées. L'usage de  $\mu$ Pot permet de prendre en compte cette dépendance et se trouve ainsi pleinement justifié.

Article reçu le 1<sup>er</sup> décembre 2014, version révisée reçue le 7 mai 2015.

Les résultats obtenus pour l'étalonnage du second FLUKE 792 sont très proches de ceux présentés ici avec des incertitudes pratiquement identiques.

## 6. Conclusion

Nous avons développés au LNE des micropotentiomètres destinés à l'étalonnage de références de transposition alternatif-continu en basse tension pour des fréquences allant de 10 Hz à 1 MHz. L'élément central de ces micropotentiomètres est un convertisseur multijonction à couches minces et la tension de sortie est générée aux bornes d'une résistance en étoile conçue de façon à présenter une composante réactive (inductive) la plus faible possible. À l'heure actuelle, deux références constituées par des appareils du commerce FLUKE 792 ont ainsi été étalonnées sur le calibre 0,7 V à des tensions de 0,5 V, 0,3 V et 0,2 V. Les incertitudes élargies obtenues sont de l'ordre de 15  $\mu$ V/V pour les fréquences allant de 1 kHz à 100 kHz et atteignent 60  $\mu$ V/V à 1 MHz, ceci sous une tension de 200 mV. Sous les tensions plus élevées, ces incertitudes deviennent plus petites, et sous 500 mV, elles sont de l'ordre de 10  $\mu$ V/V entre 1 kHz et 100 kHz pour atteindre environ 50  $\mu$ V/V à 1 MHz. Les étalonnages sur les calibres 220 mV et 22 mV sont actuellement en cours de réalisation.

## Références

- [1] KHAN M.S., POLETAEFF A. et NDILIMABAKA H., "Calibration of low-voltage AC-DC transfer standards at LNE in the frequency range from 10 Hz to 1 MHz", *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*, Rio de Janeiro, Brésil, 24–29 août 2014.
- [2] SELBY M.C., "Accurate radio-frequency microvoltages", *Trans. AIEE*, **72**, 1953, 158-163.
- [3] OLDHAM N.M. et HENDERSON R.M., "New Low-Voltage Standards in the DC to 1 MHz Frequency Range", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **40**, 2, 1991, 368-372.
- [4] RYDLER K.E.P. et SIMONSON P., "High accuracy low voltage AC-DC transfer standards", *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 1994)*, Boulder, États-Unis, 27 juin–1er juillet 1994, 382-383.
- [5] BUDOVSKY I., "A micropotentiometer based system for low-voltage calibration of alternating voltage measurement standards", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **46**, 2, 1994, 356-360.
- [6] OLDHAM N.M., AVRAMOV-ZAMUROVIC S., PARKER M.E. et WALTRIP B.C., "Low-Voltage Standards in the 10 Hz to 1 MHz Range", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **46**, 2, 1997, 395-398.
- [7] POLETAEFF A., "Automated comparator for accurate AC-DC difference measurements at the BNM-LCIE", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **48**, 2, 1999, 412-414.
- [8] KLONZ M. et WEIMANN T., "Accurate thin film multi-junction thermal converter on a silicon ship", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **38**, 2, 1989, 335-337.