

Comparaison internationale d'étalons de transposition thermique jusqu'à 1 000 V

International comparison of AC-DC transfer standards up to 1 000 V

André POLETAEFF et Dominique LEPRAT

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

Résumé

Afin d'établir les équivalences entre les différents laboratoires nationaux de métrologie dans le domaine de la transposition thermique alternatif-continu aux tensions élevées (200 V, 500 V et 1 000 V), une comparaison clef internationale a été organisée de février 2000 à mars 2003. L'accord entre les résultats soumis par les participants et la valeur de référence de la comparaison est de l'ordre de $5 \mu\text{V/V}$ à 1 kHz pour les trois tensions testées, et de l'ordre de $15 \mu\text{V/V}$ à 100 kHz sous 500 V et 1 000 V.

MOTS CLÉS : TRANSPOSITION THERMIQUE, CONVERTISSEUR THERMIQUE, VALEUR EFFICACE.

Abstract

In order to establish the equivalence between the National Metrology Institutes in the field of high voltage AC-DC transfer (200 V, 500 V and 1 000 V), an international key comparison was organised from February 2000 to March 2003. The results submitted by the participants and the key comparison reference value show agreement within $5 \mu\text{V/V}$ at 1 kHz at all tested voltages, and $15 \mu\text{V/V}$ at 100 kHz at 500 V and 1 000 V.

KEY WORDS: AC-DC TRANSFER, THERMAL CONVERTER, RMS VALUE.

1. Introduction

La transposition thermique est actuellement le moyen le plus précis permettant de raccorder les valeurs efficaces des tensions et des courants alternatifs aux grandeurs continues correspondantes. Elle nécessite l'emploi de convertisseurs thermiques [1], constitués d'une résistance chauffante sur laquelle sont fixés un ou plusieurs

thermocouples destinés à repérer l'échauffement produit par le signal appliqué à la résistance (fig. 1). Dans un premier temps, le signal alternatif à raccorder est appliqué à l'entrée du convertisseur et la tension générée par le thermocouple est repérée au moyen d'un voltmètre. Dans un second temps ce signal est remplacé par un signal continu étalon que l'on ajuste de façon à reproduire la même tension à la sortie du thermocouple. Lorsque cette condition est réalisée, on conclut que la valeur efficace du signal alternatif est égale à la valeur du signal continu, à l'erreur près du convertisseur [2, 3].

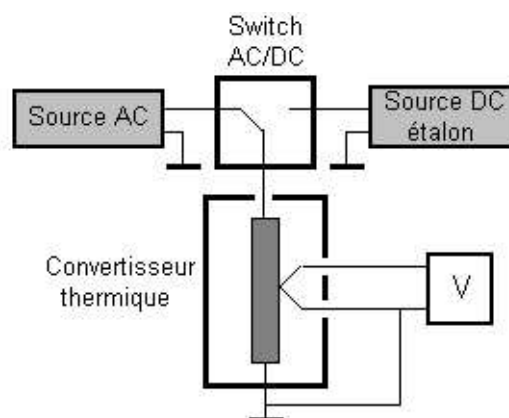


Fig. 1 – Principe de transposition thermique.

Dans le domaine de la tension électrique basse fréquence (10 Hz – 1 MHz), les laboratoires nationaux de métrologie (LNM) utilisent généralement des

convertisseurs thermiques multijonctions (MJTC) comme étalons primaires. De par leur construction, les corrections de ces derniers peuvent être, soit calculées, soit négligées, ceci avec une incertitude de quelques dixièmes de microvolts par volt. Leur tension nominale d'entrée est généralement comprise entre 1 V et 3 V. Il y a quelques années, une comparaison clef internationale pour ces niveaux de tension (CEM-K6a) [4] a fait apparaître un accord entre les participants meilleur que $0,6 \mu\text{V/V}$ à 1 kHz et de l'ordre de $1,4 \mu\text{V/V}$ à 100 kHz.

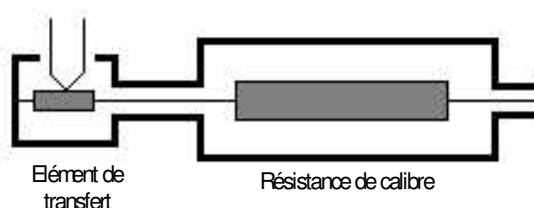


Fig. 2. – Convertisseur thermique.

Aux tensions plus élevées, les éléments de transfert (monojonctions ou multijonctions) sont associés à des résistances de calibre connectées en série (fig. 2). Un domaine de tension allant jusqu'à 1 000 V est alors couvert. Les corrections des convertisseurs ainsi constitués sont déterminées au moyen d'une procédure de remontée [1]. Celle-ci consiste en une série d'étalonnages (fig. 3) où chaque convertisseur est étalonné par rapport au convertisseur de calibre immédiatement inférieur déjà étalonné, puis sert de référence pour l'étalonnage du convertisseur de calibre immédiatement supérieur, avec comme point de départ le convertisseur servant d'étalon primaire.

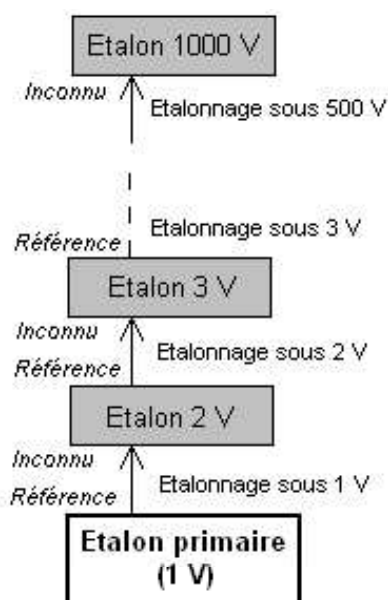


Fig. 3. – Principe d'une procédure de remontée.

Lors de cette procédure, les convertisseurs sont étalonnés sous une tension inférieure à leur tension nominale, puis utilisés sous leur tension nominale à

l'étape suivante. L'hypothèse, généralement faite que les corrections restent les mêmes dans les deux cas, est bien vérifiée jusqu'à une centaine de volts mais au-delà, une dépendance de l'écart de transposition en fonction du niveau de tension est observée. Les pertes diélectriques et les variations de la valeur ohmique des résistances de calibre avec la température en sont les principales causes [5] (la température de fonctionnement des résistances de calibre dépend de la puissance dissipée et donc du niveau de tension appliqué). La prise en compte correcte de cette dépendance, tant pour l'établissement des corrections des convertisseurs que pour le calcul d'incertitude est délicate, particulièrement aux fréquences supérieures à une dizaine de kilohertz. Des travaux, ayant pour objectif une meilleure quantification de cette dépendance [6, 7, 8], ont été menés dans de nombreux LNM au cours des quinze dernières années. Ils ont très certainement contribué aux excellents résultats de cette comparaison.

Afin d'établir l'équivalence entre les différents LNM, le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CEM) a initié une comparaison internationale dans le domaine de la transposition thermique aux tensions élevées sous la référence CEM-K9. Le pilotage de ce projet a été confié au LNE. En parallèle, dans ce même domaine le LNE a organisé, dans le cadre d'Euromet, une comparaison dénommée EUROMET.EM-K9, et il a été chargé d'établir le lien avec le projet CEM. Les résultats obtenus dans le cadre de ces deux projets sont présentés dans cet article.

2. Organisation de la comparaison

Ces deux projets se sont déroulés dans le même temps. Deux boucles simultanées ont été organisées, chacune ayant son propre étalon voyageur. Cependant, pour des raisons de disponibilité des participants, le découpage entre les deux boucles ne correspond pas exactement aux projets CEM et Euromet. Trois laboratoires (LNE, PTB et METAS) ont participé aux deux boucles afin d'assurer la liaison entre elles. De plus, ils ont vérifié la stabilité des étalons voyageurs tout au long de la comparaison.

Le temps initialement imparti à chaque laboratoire était d'un mois, temps de transport compris. Toutefois, les incidents survenus (destruction des étalons, problèmes aux douanes) ont largement augmenté la durée de la comparaison.

3. Définition de la grandeur à mesurer

La grandeur à mesurer était l'écart de transposition δ de l'étalon voyageur, défini de la façon suivante :

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

où V_{AC} est la valeur efficace du signal alternatif appliqué à l'entrée du convertisseur et V_{DC} , le signal continu qui, appliqué successivement dans chacune des polarités, produit la même tension de sortie moyenne que le signal alternatif.

La mesure de l'écart de transposition devait être effectuée sous des tensions de 200 V, 500 V et 1 000 V aux fréquences de 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz et 100 kHz.

4. Description des étalons voyageurs

Dans la première boucle, l'étalon voyageur était constitué d'un convertisseur thermique multijonction PTB-IPHT (fourni par la PTB), présentant une résistance d'entrée de 400 Ω , associé à une résistance de calibre 1 000 V pour transfert FLUKE 792 (fournie par le NIST). Il devait être mesuré sous toutes les tensions et à toutes les fréquences requises (voir partie 3). Au cours de la comparaison, l'élément de transfert multijonction a été détruit deux fois et, à chaque fois, remplacé par la PTB, si bien que trois étalons distincts nommés NIST-PTB/1000V[1], NIST-PTB/1000V[2] et NIST-PTB/1000V[3] ont circulé successivement dans cette boucle.

Dans la seconde boucle, deux étalons voyageurs ont été mis en circulation.

Le premier, nommé NIST-PTB/500V, consistait en un convertisseur thermique multijonction PTB-IPHT (fourni par la PTB), présentant une résistance d'entrée de 400 Ω , associé à une résistance de calibre 500 V pour transfert FLUKE 792 (fournie par le NIST). Les mesures devaient être faites sous 500 V (facultatif) et 200 V.

Le second, nommé METAS/1000V, a été fourni et entièrement développé par le METAS. Il était constitué d'un élément de transfert monojonction associé à une résistance de calibre 1 000 V et devait être mesuré sous 1 000 V et 500 V.

5. Participants

Les participants sont cités (tableau 1) dans l'ordre chronologique des mesures pour chacun des étalons voyageurs. Les périodes de participation et le projet dans le cadre duquel ils ont pris part (CCEM-K9 ou EUROMET.EM-K9) sont indiqués dans les deux colonnes de droite. Pour les laboratoires qui sont intervenus plusieurs fois (LNE, PTB, METAS), seules les périodes de mesures (hors vérification de la stabilité) ont été reportées.

6. Bancs de mesure et procédures

Les systèmes de mesure utilisés par les différents participants ont été décrits dans de nombreuses publications. Pour ce qui concerne le banc du LNE, on pourra se référer aux articles suivants [1, 9, 10].

La plupart des laboratoires ont développé des systèmes automatiques pour étalonner des convertisseurs thermiques par rapport à un convertisseur de référence. La procédure consiste à appliquer successivement un certain nombre de fois, variable selon les laboratoires, une tension alternative et une tension continue dans chacune des deux

polarités à l'entrée des convertisseurs en comparaison connectés en parallèle, et à mesurer à chaque fois leurs tensions de sortie. Cette mesure peut se faire soit directement, soit par une méthode de pont ou une méthode différentielle. Le résultat de l'étalonnage est déduit de l'ensemble des données ainsi collectées.

Tableau 1
Liste des participants.

	Laboratoire	Pays	Période	Comparaison	
Etalon voyageur : NIST-PTB/1000V[1]					
1	BNM-LNE	France	Févr. 2000	CCEM-K9	EUR-K9
2	BEV	Autriche	Avril 2000		EUR-K9
3	MIKES	Finlande	Mai 2000		EUR-K9
4	INETI	Portugal	Juin 2000		EUR-K9
5	DANIAmet-A.	Danemark	Juill. 2000	CCEM-K9	EUR-K9
6	NPL	UK	Août 2000	CCEM-K9	EUR-K9
7	SP	Suède	Sept. 2000	CCEM-K9	EUR-K9
8	IEN	Italie	Oct. 2000	CCEM-K9	EUR-K9
9	CEM	Espagne	Nov. 2000	CCEM-K9	EUR-K9
Etalon voyageur : NIST-PTB/1000V[2]					
10	PTB	Allemagne	Janv. 2001	CCEM-K9	EUR-K9
11	VSL	Pays Bas	Mai 2001	CCEM-K9	EUR-K9
12	OMH	Hongrie	Oct. 2001		EUR-K9
Etalon voyageur : NIST-PTB/1000V[3]					
13	JV	Norvège	Mars 2002		EUR-K9
14	UME	Turquie	Avril 2002		EUR-K9
Etalon voyageur : METAS/1000V et NIST-PTB/500V					
15	INTI	Argentine	Juil. 2000	CCEM-K9	
16	NMIA	Australie	Nov. 2000	CCEM-K9	
17	NRC	Canada	Mars 2001	CCEM-K9	
18	VNIIM	Russie	Mai 2001	CCEM-K9	
19	METAS	Suisse	Août 2001	CCEM-K9	EUR-K9
20	NIST	USA	Janv. 2002	CCEM-K9	
21	NIM	Chine	Mai 2002	CCEM-K9	
22	CMI	Rép. Tchèque	Déc. 2002		EUR-K9

7. Détermination de la valeur de référence

Les règles applicables aux comparaisons clefs internationales imposent la détermination d'une valeur de référence (KCRV) unique pour chaque grandeur mesurée. Nous avons donc choisi de prendre l'écart de transposition de l'étalon voyageur NIST-PTB/1000V[2] comme valeur de référence pour cette comparaison.

Dans un premier temps, nous avons déterminé les différences entre l'écart de transposition des différents étalons utilisés et celui du convertisseur NIST-PTB/1000V[2] à partir des mesures faites par le LNE, la PTB et le METAS.

Nous avons ensuite calculé pour chaque participant une valeur « ajustée » en soustrayant à la valeur reportée, la différence entre l'écart de transposition de l'étalon voyageur mesuré par ce participant et celui du NIST-PTB/1000V[2]. Cette valeur « ajustée » représente l'écart de transposition qu'aurait mesuré ce participant pour le convertisseur NIST-PTB/1000V[2].

La valeur de référence $\delta_{\text{réf}}$ et l'incertitude type $u_{\text{réf}}$ sur cette valeur ont été calculées à partir des valeurs « ajustées » des laboratoires ayant participé dans le cadre du projet CCEM, en utilisant les relations :

$$\delta_{\text{réf}} = \frac{\sum_i \delta_{\text{adj},i} / (u_{\text{adj},i})^2}{\sum_i 1 / (u_{\text{adj},i})^2}, \quad (2a)$$

$$u_{\text{réf}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i 1 / (u_{\text{adj},i})^2}}, \quad (2b)$$

où $\delta_{\text{adj},i}$ représente la valeur « ajustée » pour le i^{e} laboratoire et $u_{\text{adj},i}$ l'incertitude type sur $\delta_{\text{adj},i}$.

Les valeurs obtenues sont données dans le tableau 2, avec un facteur égal à 2 pour l'incertitude élargie $U_{\text{réf}}$.

Tableau 2
Valeurs de référence ($\delta_{\text{réf}}$) et incertitudes élargies ($U_{\text{réf}}$) exprimées en $\mu V/V$.

Fréquence	1 kHz		10 kHz		20 kHz		50 kHz		100 kHz	
	$\delta_{\text{réf}}$	$U_{\text{réf}}$	$\delta_{\text{réf}}$	$U_{\text{réf}}$	$\delta_{\text{réf}}$	$U_{\text{réf}}$	$\delta_{\text{réf}}$	$U_{\text{réf}}$	$\delta_{\text{réf}}$	$U_{\text{réf}}$
1 000 V	0,2	3,1	-2,3	3,4	-5,2	3,7	-19,9	5	-53,1	10
500 V	1,8	2,8	-2,2	2,8	-5,8	3,2	-20,9	4,2	-59,9	7,6
200 V	1,4	2,4	-2,5	2,5	-5,9	2,6	-21,9	3,5	-60,4	5,3

8. Présentation des résultats

Les résultats complets et détaillés ainsi que le rapport final sont disponibles dans la base de données sur les comparaisons clefs (KCDB) sur le site du BIPM (www.bipm.fr). Nous ne présentons ici que les degrés d'équivalence des participants avec la KCRV (différence entre la valeur « ajustée » et la KCRV avec l'incertitude élargie associé). Pour le LNE, la PTB et le METAS qui sont intervenus plusieurs fois au cours de la comparaison afin d'assurer le lien entre les différents étalons et vérifier leur stabilité dans le temps, seuls les résultats de la participation officielle sont mentionnés. Les étalons voyageurs se sont par ailleurs avérés être stables à l'exception d'un seul, le NIST-PTB/1000V[3], dont la dérive a été évaluée et prise en compte dans l'interprétation des résultats.

Ces résultats figurent dans les tableaux 3 à 5.

Les figures 4 à 8 présentent ces mêmes résultats sous forme graphique pour 1 000 V. L'incertitude élargie U est calculée avec un facteur égal à 2.

Tableau 3
Degrés d'équivalence (D) avec la KCRV et incertitudes élargies (U) sous 1 000 V exprimés en $\mu V/V$.

	1 kHz		10 kHz		20 kHz		50 kHz		100 kHz	
	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U
1	5,8	15,8	1,3	34,8	-2,8	34,8	-11,8	68,8	-20,5	68,3
2	0,5	18,4	3,2	20,4	5,3	24,4				
3	-0,1	10,6	-6,8	10,6	-11,6	11,5	-27,3	23,8	-40,3	82,7
4	13,5	32,1	25,2	40,1	34,3	52,1	53,8	68,2	89,5	103
5	4,5	20,9	4,2	20,8	5,3	25,7	1,8	40,7	0,5	80,4
6	-0,5	12,7	-2,8	12,7	-5,7	22,8	-7,2	31,6	-10,5	61,2
7	2,5	8,6	3,2	9,5	2,3	10,5	4,8	14,2	10,5	20,8
8	-0,9	14,6	-2,6	14,9	-6,6	24,8	-11	36,9	-13,4	78,8
9	-6,5	35,9	0,2	39,9	-1,7	43,8	-16,2	63,8	-9,5	97,5
10	-0,7	7,4	-1,5	7,2	-2	7,1	-2	8,7	-3,5	28,3
11	2,8	19,8	-0,8	19,7	-4,9	24,7	-5,3	34,6	-8,3	49
12	-0,8	43,1	3,3	52,1	-15,4	80,1	-25,3	120	-27,1	200
13	-1,3	22,3	-0,5	24,3	-2,4	28,2	0,4	42,3	11,6	68,7
14	0,7	30,3	3,5	30,3	4,6	40,2	6,4	44,3	12	66,8
15	-4,7	13,8	-2,3	15,7	-5	19,7	-4,1	23,6	-2,7	38,7
16	0,8	10,7	2,7	13,7	3	15,7	4,9	27,5	12,3	39,8
17	0,3	9,6	3,7	9,5	6	9,4	7,9	11	-0,7	21,8
18	-0,8	20,1	-0,7	20,4	-4,9	32,2	-22,3	51,4	22,7	101
19	-1,7	5,4	-1,7	6,3	-1,6	6,1	-1,3	8,8	3,3	26,2
20	7,2	16,8	3,9	16,8	5,7	15,9	-3,3	20,9	-6,1	27,4
21	-1	24,1	0,6	24,3	1,4	29	-2,8	45,1	-19,6	58,8
22	7,3	50,1	2,7	50,1	4	62,1	-8,1	78,2	-10,7	112

Ces résultats montrent un excellent accord entre les laboratoires ayant participé à cette comparaison.

Les écarts entre la valeur « ajustée » et la KCRV sont le plus souvent inférieurs à $5 \mu V/V$ sous les trois tensions requises pour les fréquences comprises entre 1 kHz et 20 kHz. Ces écarts augmentent aux fréquences plus élevées et atteignent une quinzaine de microvolts par volt à 100 kHz sous les tensions de 500 V et 1 000 V. Par ailleurs les incertitudes élargies sont pratiquement dans tous les cas très sensiblement supérieures aux valeurs absolues des écarts avec la KCRV. Il apparaît donc que de nombreux participants ont eu tendance à surestimer leurs incertitudes. 54 % des résultats rapportés s'écartent de la KCRV d'une valeur inférieure à l'incertitude élargie sur cette dernière.

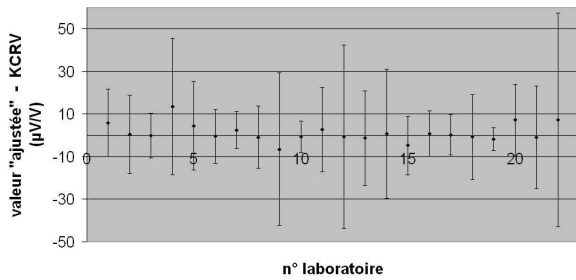


Fig. 4. – Degrés d'équivalence avec la KCRV et incertitude élargie sous 1 000 V – 1 kHz.

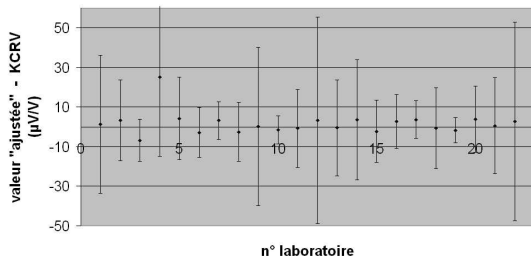


Fig. 5. – Degrés d'équivalence avec la KCRV et incertitude élargie sous 1 000 V – 10 kHz.

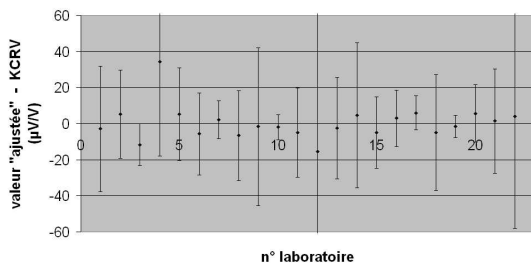


Fig. 6. – Degrés d'équivalence avec la KCRV et incertitude élargie sous 1 000 V – 20 kHz.

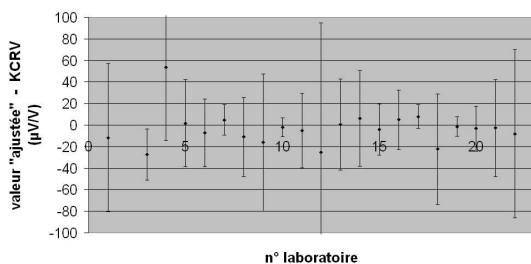


Fig. 7. – Degrés d'équivalence avec la KCRV et incertitude élargie sous 1 000 V – 50 kHz.

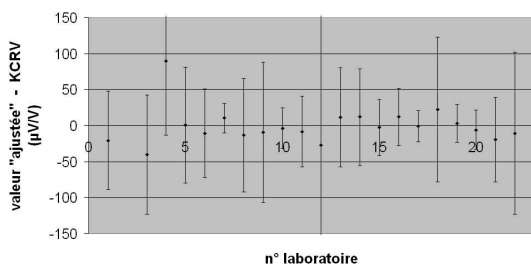


Fig. 8. – Degrés d'équivalence avec la KCRV et incertitude élargie sous 1 000 V – 100 kHz.

Tableau 4
Degrés d'équivalence (D) avec la KCRV et incertitudes élargies (U) sous 500 V exprimés en μV/V.

	1 kHz		10 kHz		20 kHz		50 kHz		100 kHz	
	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U
1	1,6	12,9	-0,3	20,9	-0,2	20,9	-2,7	35,8	-1,7	35,3
2	-0,2	13,5	1,9	15,4	3,6	19,4	7	21,5	19	32
3	-0,9	8,8	-6,5	8	-8,2	8,8	-22,1	13,8	-31,2	36,8
4	3,8	26,2	-9,1	30,1	-12,4	36,1	-17	46,2	-12	72,4
5	2,8	20,9	2,9	20,9	2,6	20,9	1	20,7	6	40,4
6	-1,2	12,9	-5,1	12,8	-6,4	16,8	-8	23,7	-9	45,5
7	1,8	7,8	2,9	8,7	1,6	9,7	5	13,5	11	19,7
8	-0,8	9,3	-2,8	9,1	-6,5	13,7	-12,2	19,9	-14,4	47,1
9	-2,2	30	-1,1	29,9	1,6	29,9	-6	37,8	4	49,4
10	-2,3	7,5	-0,6	7,5	-1,2	7,3	-1,6	9,1	-0,6	20,6
11	0,8	14,7	-2,1	14,7	-3,4	19,7	-4,8	24,6	-3,9	39,3
12	-2,2	31,1	-3,1	36,1	-1,3	40,1	1,9	63,1	-1,2	100
13	-0,5	20,3	0,4	22,3	0,1	24,3	1,8	34,3	14,4	48,7
14	-1,5	22,3	2,4	22,3	2,1	26,3	2,8	36,2	10	56,6
15	-3,2	11,9	-3,9	13,8	-3,3	15,8	-4	17,6	-3,1	29,1
16	2,4	8,8	3,1	8,7	3,7	9,6	7	14,5	13,9	21,8
17	0,8	8,6	3,1	8,2	5,7	9,6	8	9,8	0,9	22,9
18	0,5	16,5	0	16,9	-5,8	24,5	-20,1	40,4	-20,3	59,9
19	-1,4	5,6	-1,3	5,5	-1,1	5,3	-0,4	8,1	3,9	25
20	4,1	10,8	3,3	10,3	3,8	10,8	-4,1	13,5	-7,1	16,2
21	-1,7	19,5	-1,4	19,4	-0,5	21,1	-4	28,9	-21,6	39
22	1,8	38,2	-2,9	38,1	-2,3	46,1	-18	56,2	-13,1	80,4

Tableau 5
Degrés d'équivalence (D) avec la KCRV et incertitudes élargies (U) sous 200 V exprimés en μV/V.

	1 kHz		10 kHz		20 kHz		50 kHz		100 kHz	
	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U
1	-1,5	12	-3,3	12,9	-1,8	12,8	-6,3	15,8	-10,3	15,3
2	0,1	10,5	1,9	10,5	2,3	12,4	2,8	16,6	8,2	21,8
3	-0,8	7,5	0,7	6,4	1,2	7,1	1,7	7,9	5,9	10
4	5,1	16,4	4,9	16,3	4,3	18,2	5,8	20,4	11,2	30,6
5	2,1	10,9	2,9	10,8	1,3	10,8	-1,2	10,6	-5,8	25,6
6	5,1	12	-5,1	11,8	-3,7	13,9	-1,2	15,8	-0,8	19,4
7	2,1	6,9	4,9	7,8	4,3	8,7	3,8	12,7	11,2	18,5
8	0,8	8,6	-1,1	8,6	-5,1	12,6	-9,9	18	-11,1	42,2
9	2,1	22	5,9	22	5,3	21,8	2,8	23,8	6,2	28,4
10	-1,9	7,6	-0,8	7,6	-1,4	7,6	-0,8	9,4	-1,5	21,4
11										
12										
13	-0,8	18,7	1	18,7	0,8	20,2	2,6	26,3	11,8	36,5
14	-1,1	18,3	0,3	18,3	-2,2	24,1	0,6	30,3	1,1	44,4
15	-4,5	9,9	-2,7	9,8	-2,4	11,8	-1,8	15,7	-0,9	23,5
16	-1,6	6,9	0,3	6,8	-0,4	7,7	2,2	10,6	7,1	17,3
17	-1,5	9,9	-0,7	9,8	1,6	9,8	5,2	13,7	4,1	22,1
18	1	12,6	1,2	12,2	2,6	20	7,8	30,1	-0,6	40,2
19	-2,9	5,8	-1,9	5,7	-1,6	5,5	-0,9	8,5	0,1	23,5
20	4	5,4	3,5	5,5	3,4	5,5	1,6	7,3	1,9	9,6
21	-1,3	10,9	-3,1	10,8	-2,9	10,8	-2,5	11,9	-5,5	12,3
22	-2,5	24,2	-7,7	24,2	-4,4	28,1	-4,8	36,3	-2,9	60,2

9. Conclusion

Cette comparaison a montré un très bon accord entre les différents participants, avec des écarts observés par rapport à la valeur de référence très inférieurs à l'incertitude élargie dans la plupart des cas. Cet accord est de l'ordre de $5 \mu\text{V/V}$ aux fréquences les plus basses et d'une quinzaine de $\mu\text{V/V}$ à 100 kHz sous 500 V et 1 000 V.

Ces excellents résultats sont certainement dus, en partie du moins, aux nombreux travaux effectués dans les différents laboratoires nationaux de métrologie au cours des quinze dernières années sur la dépendance de l'écart de transposition des convertisseurs thermiques en fonction du niveau de tension appliqué, lorsque celle-ci dépasse la centaine de volts.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des participants à cette comparaison pour leur collaboration à ce projet et le travail qu'ils ont fourni pour produire des résultats de cette qualité, et plus particulièrement Manfred KLONZ (PTB), Marc FLUELI (METAS), Karl Erik RYDLER (SP), Peter FILIPSKI (NRC), Joseph R. KINARD (NIST) et Thomas E. LIPE (NIST) pour l'aide précieuse qu'ils ont apportée tant pour l'organisation de la comparaison que pour l'analyse des résultats.

Références

- [1] POLETAEFF A., « Détermination des valeurs efficaces des tensions et des intensités en courant alternatif par transposition thermique au BNM-LNE », *Bulletin du BNM*, **119**, 2000, 29-38.
- [2] INGLIS B., "AC-DC Transfer Standards - Present Status and Future Directions", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **34**, n° 2, 1985, 285-290.
- [3] INGLIS B.D., "Standards for AC-DC Transfer", *Metrologia*, **29**, 1992, 191-199.
- [4] KLONZ M., "CCE Comparison of AC-DC Voltage Transfer Standards at the Lowest Attainable Level of Uncertainty", *IEEE Trans. Meas. Instr.*, **46**, n° 2, 1997, 342-346.
- [5] HUANG D.X. et KINARD J.R. "AC-DC Differences of High Voltage Thermal Converters", *Proc. Meas. Sci. Conf.*, Anaheim, Etats-Unis d'Amérique, 1992.
- [6] SIMONSON P. et RYDLER K.E., "Level Dependence of AC-DC Transfer Devices", *IEEE Trans. Meas. Instr.*, **48**, n° 2, 1999, 395-398.
- [7] POGLIANO U., BOSCO G.C. et D'ELIA V., "Measurement System for the Voltage Dependence of High-Voltage Thermal Converters", *IEEE Trans. Meas. Instr.*, **48**, n° 2, 1999, 404-407.
- [8] KLONZ M., SPIEGEL T., LAIZ H. et KESSLER E., "A 1 000 V Resistor for AC-DC Voltage Transfer", *IEEE Trans. Meas. Instr.*, **48**, n° 2, 1999, 399-403.
- [9] POLETAEFF A., "Automated Comparator for Accurate AC-DC Difference Measurements at the BNM-LCIE", *IEEE Trans. Meas. Instr.*, **48**, n° 2, 1999, 412-414.
- [10] POLETAEFF A. et LEPRAT D. "AC-DC Transfer at BNM-LNE", *Proc. 12th IMEKO TC4 Int. Symp.*, Part 1, Septembre 2002, Zagreb, Croatie, 1-6.