

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



Rapport
sur la comparaison des étalons nationaux de force électromotrice
(novembre 1979 à février 1980)
par G. Leclerc

PAVILLON DE BRETEUIL
92 - SÈVRES
France

Rapport
sur la comparaison des étalons nationaux de force électromotrice
(novembre 1979 à février 1980)
par G. Leclerc

Huit laboratoires nationaux ont fait parvenir au BIPM 49 piles étalons au sulfate de cadmium, du type saturé, pour participer à cette comparaison. Ce sont :

- Le Comité d'Etat de Normalisation (CEN), de la Bulgarie, représenté par 3 piles nues définies à 20 °C ;
- Le Conseil National de Recherches (NRC), du Canada, représenté par 4 piles conservées à 30 °C dans une enceinte à air thermorégulée ;
- Le Laboratoire Central des Industries Electriques (LCIE), de France, représenté par 4 piles conservées à 30 °C dans une enceinte à air thermorégulée ;
- L'Office National des Mesures (OMH), de Hongrie, représenté par 4 piles nues définies à 20 °C ;
- L'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN), d'Italie, représenté par 6 piles nues définies à 20 °C et 4 piles conservées à 30 °C dans une enceinte à air thermorégulée ;
- Det Norske Justervesen (NJV), de Norvège, représenté par 4 piles conservées à 30 °C dans une enceinte à air thermorégulée ;
- Le Van Swinden Laboratorium (VSL), des Pays-Bas, représenté par 6 piles nues définies à 20 °C et 4 piles conservées à 30 °C dans une enceinte à air thermorégulée ;
- L'Institut National de Métrologie (INMR), de Roumanie, représenté par 2 groupes de 5 piles nues définies à 20 °C.

De son côté le BIPM a engagé dans la comparaison un groupe de 4 piles conservées à 30 °C dans une enceinte à air thermorégulée.

Les piles nues ont été immergées dans le bain d'huile de paraffine à $(20 \pm 0,05)$ °C du BIPM. Pendant les mesures leur température était déterminée à 0,2 mK près au moyen de deux thermomètres à résistance de platine.

Toutes les enceintes thermorégulées qui le permettaient ont été alimentées en courant continu ($V = 12$ V) durant leur séjour au BIPM.

On a admis que toutes les piles avaient le même coefficient de température, c'est-à-dire $\alpha_{20} = - 38,78$ $\mu\text{V/K}$, au voisinage de 20 °C et $\alpha_{30} = - 56,70$ $\mu\text{V/K}$, au voisinage de 30 °C.

Un observateur (Lc) a effectué les mesures suivantes :

- Les 6 groupes de piles définies à 20 °C ont été comparés deux à deux dans toutes les combinaisons possibles.
- Les 6 groupes de piles conservées à 30 °C dans des enceintes ont également été comparés deux à deux dans toutes les combinaisons possibles.
- Chacun des groupes de piles définies à 20 °C a été comparé à 3 des groupes de piles conservées à 30 °C dans une enceinte et réciproquement.
- Chacun des 11 groupes voyageurs a été comparé à 2 étalons de référence du BIPM et le groupe du BIPM engagé dans la comparaison à 6 de ces étalons de référence.

Les 76 séries de mesures "aller" ont été effectuées du 12 novembre au 14 décembre 1979 et les 76 séries de mesures "retour" du 7 janvier au 8 février 1980.

Les étalons de référence du BIPM étaient constitués par des piles non saturées, conservées à 30 °C, dont la force électromotrice était régulièrement déterminée par comparaison à une tension Josephson.

Les calculs ont été effectués directement avec les résultats obtenus sur chaque étalon (sans considération des groupes) en traitant, par la méthode des moindres carrés, les résultats des 588 comparaisons individuelles (moyennes des mesures "aller" et "retour"). A partir de la valeur connue des étalons de référence, on a exprimé celle de tous les étalons qui ont participé à la comparaison en fonction de V_{76-BI} (représentation du volt réalisée au BIPM à partir d'échelons de potentiel produits par l'effet Josephson, en admettant que la fréquence qui correspond à 1 V est 483 594,0 GHz).

La force électromotrice de chaque étalon voyageur à sa température de définition (20 °C ou 30 °C) est donnée, en fonction de V_{76-BI} , dans le tableau I.

Dans le tableau II nous avons calculé la force électromotrice de chaque étalon voyageur en fonction de la représentation du volt conservée par son laboratoire d'origine, à la date du 26 décembre 1979, date centrale des comparaisons effectuées au BIPM.

Les résultats individuels de la comparaison internationale sont calculés dans le tableau III.

Les résultats définitifs sont donnés dans le tableau IV. Pour les laboratoires représentés dans la comparaison par deux groupes d'étalons (l'un à 20 °C, l'autre à 30 °C), le résultat qui figure dans ce tableau est celui qui a été retenu par le laboratoire national concerné.

Précision

Pour estimer l'ordre de grandeur de la précision avec laquelle la représentation du volt conservée par chaque laboratoire national a été rattachée à V_{76-BI} , nous avons calculé un écart-type sur la valeur moyenne de chaque groupe en tenant compte de la dispersion des résultats fournis par les différents étalons qui le constituaient.

Conclusion

Les résultats des mesures faites au BIPM sont connus avec une précision satisfaisante puisque la force électromotrice de chaque pile est exprimée en fonction de V_{76-BI} avec un écart-type toujours inférieur à $0,02 \mu V$. La précision des résultats finaux, limitée par le comportement des piles en cours de transport, est malheureusement beaucoup plus faible pour la plupart des laboratoires.

On peut constater par ailleurs que les piles conservées dans les enceintes thermorégulées n'ont pas conduit systématiquement à des résultats meilleurs que les piles nues, moins protégées des chocs thermiques, ce qui est un peu décevant.

Avril 1981.
(révisé en août 1981)

Tableau I

Force électromotrice des étalons voyageurs exprimée en fonction de V_{76-BI} (représentation du volt conservée par le BIPM),
à la date du 26 décembre 1979.

laboratoire	température de définition	étalon	force électromotrice	incertitude (1σ)
<u>NRC</u> (Canada)	30 °C	40898	1,018 148 71 V_{76-BI}	0,016 μV
		40907	149 74	0,016
		40917	147 21	0,016
		40924	151 81	0,016
			1,018 149 37 V_{76-BI}	0,009 μV
<u>LCIE</u> (France)	30 °C	42421	1,018 171 37 V_{76-BI}	0,016 μV
		42428	164 04	0,016
		42472	168 54	0,016
		42429	162 97	0,017
			1,018 166 73 V_{76-BI}	0,010 μV
<u>IEN</u> (Italie)	20 °C	3180	1,018 604 59 V_{76-BI}	0,018 μV
		3181	604 26	0,017
		3182	607 06	0,017
		3183	607 63	0,017
		3184	607 37	0,017
		3185	604 53	0,019
		1,018 605 91 V_{76-BI}	0,009 μV	
	30 °C	37219	1,018 137 52 V_{76-BI}	0,016 μV
		37582	143 18	0,016
		38326	142 81	0,016
		38338	140 34	0,016
		1,018 140 96 V_{76-BI}	0,010 μV	

Tableau I (suite)

laboratoire	température de définition	étalon	force électromotrice			incertitude (1 σ)	
<u>VSL</u> (Pays-Bas)	20 °C	66087	1,018	611	19	V ₇₆ -BI	0,018 μ V
		66091		610	72		0,017
		66124		627	74		0,017
		66132		627	58		0,017
		67045		623	37		0,017
		67049		626	08		0,018
				1,018	621	11	V ₇₆ -BI
	30 °C	42568	1,018	172	19	V ₇₆ -BI	0,016 μ V
		42598		177	34		0,016
		42567		173	00		0,016
		52600		172	01		0,016
				1,018	173	64	V ₇₆ -BI
<u>CEN</u> (Bulgarie)	20 °C	48008	1,018	598	63	V ₇₆ -BI	0,016 μ V
		48034		593	33		0,016
		48038		587	58		0,016
				1,018	593	18	V ₇₆ -BI
<u>OMH</u> (Hongrie)	20 °C	G3651	1,018	584	93	V ₇₆ -BI	0,016 μ V
		J8315		590	63		0,016
		J9001		591	37		0,016
		J9009		617	09		0,017
				1,018	596	01	V ₇₆ -BI
<u>NJV</u> (Norvège)	30 °C	40235	1,018	148	00	V ₇₆ -BI	0,016 μ V
		40237		144	25		0,016
		40251		148	29		0,016
		40279		147	47		0,017
				1,018	147	00	V ₇₆ -BI

Tableau I (suite et fin)

laboratoire	température de définition	étalon	force électromotrice	incertitude (1σ)
<u>INMR</u> (Roumanie)	20 °C	348	1,018 634 05 V ₇₆ -BI	0,018 μ V
		364	626 88	0,016
		365	628 81	0,017
		366	644 93	0,017
		320	637 96	0,018
			<hr/>	
			1,018 634 53 V ₇₆ -BI	0,010 μ V
	20 °C	360	1,018 621 97 V ₇₆ -BI	0,020 μ V
		321	634 32	0,017
		326	629 67	0,017
345		633 75	0,016	
			<hr/>	
		1,018 629 93 V ₇₆ -BI	0,010 μ V	

La cinquième pile de ce groupe, trop instable, a été éliminée.

<u>BIPM</u>	30 °C	BI21	1,018 138 01 V ₇₆ -BI	0,015 μ V
		BI22	135 65	0,014
		BI23	137 05	0,014
		BI24	138 46	0,015
				<hr/>
		1,018 137 29 V ₇₆ -BI	0,009 μ V	

Tableau II

Force électromotrice des étalons voyageurs exprimée en fonction de la représentation du volt conservée par leur laboratoire d'origine, à la date du 26 décembre 1979

La force électromotrice de chaque étalon au 26 décembre 1979, date centrale de la comparaison, a été calculée par interpolation linéaire entre les forces électromotrices attribuées à l'étalon par son laboratoire national avant et après les mesures au BIPM.

NRC

Numéros des des bornes étalons		à 30 °C 20 octobre 1979	à 30 °C 15 mai 1980	26 décembre 1979
1	40898 :	1,018 147 18	1,018 148 86	1,018 147 72 V_{NRC}
2	40907 :	149 00	150 12	149 36
3	40917 :	146 58	147 64	146 92
4	40924 :	149 53	152 56	150 51
		<hr/>	<hr/>	<hr/>
		1,018 148 07	1,018 149 79 ₅	1,018 148 63 V_{NRC}

LCIE

		à 30 °C 18 octobre 1979	à 30 °C 28 février 1980	
1	42421 :	1,018 169 72	1,018 169 54	1,018 169 63 V_{LCIE}
2	42428 :	162 44	162 23	162 33
3	42472 :	166 64	167 16	166 91
4	42429 :	161 36	161 41	161 39
		<hr/>	<hr/>	<hr/>
		1,018 165 04	1,018 165 08 ₅	1,018 165 06 V_{LCIE}

Tableau II (suite)

		<u>IEN</u>		
Numéros des des bornes étalons		à 20 °C 10 octobre 1979	à 20 °C 16 avril 1980	26 décembre 1979
	3180 :	1,018 603 59	1,018 604 60	1,018 604 00 V _{IEN-69}
	3181 :	603 25	604 58	603 79
	3182 :	606 21	606 39	606 28
	3183 :	606 51	607 30	606 83
	3184 :	606 12	607 24	606 58
	3185 :	602 46	605 21	603 58
		<hr/> 1,018 604 69	<hr/> 1,018 605 89	<hr/> 1,018 605 18 V _{IEN-69}
		à 30 °C 17 octobre 1979	à 30 °C 31 mars 1980	
1	37219 :	1,018 136 41	1,018 136 57	1,018 136 48 V _{IEN-69}
2	37582 :	142 22	141 93	142 10
3	38326 :	142 54	142 30	142 44
4	38338 :	139 33	139 48	139 39
		<hr/> 1,018 140 12 ₅	<hr/> 1,018 140 07	<hr/> 1,018 140 10 V _{IEN-69}

		<u>VSL</u>		
		à 20 °C 1 ^{er} septembre 1979	à 20 °C 22 août 1980	
	66087 :	1,018 610 82	1,018 610 95	1,018 610 86 V _{VSL}
	66091 :	610 35	610 34	610 35
	66124 :	627 37	627 41	627 38
	66132 :	627 07	627 26	627 13
	67049 :	625 71	625 73	625 72
		<hr/> 1,018 620 26	<hr/> 1,018 620 34	<hr/> 1,018 620 29 V _{VSL}

La pile n° 67045, trop instable à son retour aux Pays-Bas, a été éliminée par le VSL.

		<u>OMH</u>		
		à 20 °C septembre 1979	à 20 °C mai 1980	
	G3651 :	1,018 587 9	1,018 588 1	1,018 587 97 ₅ V _{OHM}
	J8315 :	594 1	593 7	593 95
	J9001 :	594 0	594 6	594 22 ₅
	J9009 :	620 6	621 1	620 79
		<hr/> 1,018 599 15	<hr/> 1,018 599 38	<hr/> 1,018 599 24 V _{OMH}

Tableau III

Valeur de la représentation du volt conservée par chaque laboratoire national en fonction de V_{76-BI} , représentation conservée par le BIPM, à la date du 26 décembre 1979.

		<u>NRC</u>			
1	40898	: 1,018 147 72	V_{NRC}	=	1,018 148 71 V_{76-BI} d'où $V_{NRC} = V_{76-BI} + 0,97 \mu V$
2	40907	: 149 36		=	+ 0,37
3	40917	: 146 92		=	+ 0,28
		1,018 148 00	V_{NRC}	=	1,018 148 55 V_{76-BI} d'où $V_{NRC} = V_{76-BI} + 0,54 \mu V$

($\epsilon = 0,217$)

La 4^e pile du groupe (n° 40924) a été éliminée à la demande du NRC.

		<u>LCIE</u>			
1	42421	: 1,018 169 63	V_{LCIE}	=	1,018 171 37 V_{76-BI} d'où $V_{LCIE} = V_{76-BI} + 1,71 \mu V$
2	42428	: 162 33		=	+ 1,68
3	42472	: 166 91		=	+ 1,60
4	42429	: 161 39		=	+ 1,55
		1,018 165 06	V_{LCIE}	=	1,018 166 73 V_{76-BI} d'où $V_{LCIE} = V_{76-BI} + 1,64 \mu V$

($\epsilon = 0,037$)

		<u>IEN</u>			
3180	:	1,018 604 00	V_{IEN-69}	=	1,018 604 59 V_{76-BI} d'où $V_{IEN-69} = V_{76-BI} + 0,58 \mu V$
3181	:	603 79		=	+ 0,46
3182	:	606 28		=	+ 0,76 ₅
3183	:	606 83		=	+ 0,78 ₅
3184	:	606 58		=	+ 0,77 ₅
3185	:	603 58		=	+ 0,93
		1,018 605 18	V_{IEN-69}	=	1,018 605 91 V_{76-BI} d'où $V_{IEN-69} = V_{76-BI} + 0,72 \mu V$

($\epsilon = 0,068$)

1	37219	: 1,018 136 48	V_{IEN-69}	=	1,018 137 52 V_{76-BI} d'où $V_{IEN-69} = V_{76-BI} + 1,02 \mu V$
2	37582	: 142 10		=	+ 1,06
3	38326	: 142 44		=	+ 0,36
4	38338	: 139 39		=	+ 0,93
		1,018 140 10	V_{IEN-69}	=	1,018 140 96 V_{76-BI} d'où $V_{IEN-69} = V_{76-BI} + 0,84 \mu V$

($\epsilon = 0,163$)

Tableau III (suite)

		<u>VSL</u>				<u>VSL</u>			
66087	:	1,018 610 86	V_{VSL}	=	1,018 611 19	V_{76-BI}	d'où	V_{VSL}	= $V_{76-BI} + 0,32 \mu V$
66091	:	610 35		=	610 72			=	+ 0,36
66124	:	627 38		=	627 74			=	+ 0,35
66132	:	627 13		=	627 58			=	+ 0,44
67049	:	625 72		=	626 08			=	+ 0,35
		1,018 620 29	V_{VSL}	=	1,018 620 66	V_{76-BI}	d'où	V_{VSL}	= $V_{76-BI} + 0,36 \mu V$
($\epsilon = 0,020$)									

		<u>OMH</u>				<u>OMH</u>			
G3651	:	1,018 587 98	V_{OMH}	=	1,018 584 93	V_{76-BI}	d'où	V_{OMH}	= $V_{76-BI} - 2,99 \mu V$
J8315	:	593 95		=	590 63			=	- 3,26
J9001	:	594 23		=	591 37			=	- 2,81
J9009	:	620 79		=	617 09			=	- 3,63
		1,018 599 24	V_{OMH}	=	1,018 596 01	V_{76-BI}	d'où	V_{OMH}	= $V_{76-BI} - 3,17 \mu V$
($\epsilon = 0,178$)									

Tableau IV

Résultats de la comparaison internationale
(26 décembre 1979)

V_{NRC}	=	$V_{76-BI} + 0,54 \mu V$	($\sigma = 0,22 \mu V$)
V_{LCIE}	=	+ 1,64	($\sigma = 0,037 \mu V$)
V_{IEN-69}	=	+ 0,84	($\sigma = 0,16 \mu V$)
V_{VSL}	=	+ 0,36	($\sigma = 0,020 \mu V$)
V_{OMH}	=	- 3,17	($\sigma = 0,18 \mu V$)