Rapport
sur la mini-comparaison des étalons nationaux
de résistance électrique
(octobre-décembre 1976)

par G. Leclerc

Six laboratoires ont participé à la mini-comparaison des étalons nationaux de résistance électrique effectuée par le BIPM durant l'automne 1976 ; ce sont : le National Physical Research Laboratory (NPRL), d'Afrique du Sud ; le Conseil National de Recherches (NRC), du Canada ; le Laboratoire Central des Industries Electriques (LCIE), de France ; l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN), de l'Italie ; l'Electrotechnical Laboratory (ETL), du Japon et le Van Swinden Laboratorium (VSL), des Pays-Bas. Ces laboratoires ont fait parvenir au BIPM vingt étalons de résistance de 1 Ω de premier ordre, c'est-à-dire à quatre bornes, étanches, à coefficient de température faible et bien connu, définis à 20 °C. Le VSL a aussi envoyé un étalon de 1 Ω défini à 28 °C et deux étalons ESI de 10^4 Ω.

Les vingt étalons voyageurs définis à 20 °C et huit étalons du BIPM, dont les six étalons primaires qui servent à conserver $\Omega_{69\text{-BI}}$, ont été comparés deux à deux conformément au schéma de la figure 1 (les étalons d'un même laboratoire ont été comparés l'un à l'autre dans toutes les combinaisons possibles). Les 64 mesures "aller" ont été faites du 18 octobre au 13 novembre et les 64 mesures "retour" du 20 novembre au 17 décembre 1976.

Par ailleurs les six étalons primaires du BIPM ont été comparés entre eux deux à deux dans toutes les combinaisons possibles avant (11-15 octobre) et après (20-24 décembre) la comparaison internationale.

Les comparaisons ont été effectuées par un seul observateur (D. Bournaud), au moyen d'un pont double de Thomson à bras de 1 000 Ω et en procédant par substitution (les deux étalons comparés au cours d'une série de mesures étant opposés à tour de rôle à une résistance tare ajustable). Au milieu de chaque série les bras "mesure" et "tare" du pont étaient inversés. Pendant les observations les étalons étaient parcourus par un courant de 0,1 A et leur température déterminée au moyen de thermomètres à résistance de platine.

Les soixante dix-neuf équations de condition (moyennes des résultats des mesures "aller et retour" ramenés à 20 °C) que l'on a obtenues ont été traitées par la méthode des moindres carrés ; elles ont fourni, à partir de la somme connue des six étalons de

référence du BIPM, la valeur de chaque étalon voyageur en fonction de Ω_{69-BI}. Les résultats obtenus sont donnés dans la colonne 2 du tableau II.

Dans la colonne 1 du tableau II figurent les valeurs des étalons voyageurs, exprimées en fonction des représentations de l'ohm conservées par leur laboratoire d'origine, à la date du 17 novembre 1976 (date centrale des comparaisons effectuées au BIPM). Ces valeurs sont celles qui ont été calculées dans le tableau I, colonne 3.

Le tableau III contient les résultats finaux de la comparaison internationale des étalons nationaux de résistance.

PRECISION

Nous avons calculé l'ordre de grandeur de la précision des résultats du tableau III en considérant la dispersion des résultats fournis par les différents étalons voyageurs d'un même laboratoire.

En supposant que tous les étalons étaient de même qualité métrologiques, qu'ils avaient été transportés avec le même soin, qu'ils avaient été étalonnés avec la même précision dans leur laboratoire d'origine respectif, nous avons calculé, pour chaque laboratoire, la valeur de l'expression

$$\sqrt{\frac{\Sigma\ \varepsilon^2}{(n-p)q}}$$

dans laquelle

ε = écart entre ($\Omega_{lab} - \Omega_{69-BI}$) fourni par un étalon et la valeur moyenne admise pour le laboratoire (tableau II) ;
n = 20 = nombre des étalons voyageurs ;
p = 6 = nombre des laboratoires ;
q = nombre d'étalons voyageurs du laboratoire considéré.

Nous avons de cette façon obtenu les incertitudes suivantes :

1 σ = 0,029 $\mu\Omega$	pour	les	laboratoires	représentés	par	2	étalons
1 σ = 0,024 $\mu\Omega$	"	"	"	"	"	3	"
1 σ = 0,020 $\mu\Omega$	"	"	"	"	"	4	"

CONCLUSION

Cette comparaison, comme les précédentes, a été faite dans d'excellentes conditions mais, de plus, elle a été faite rapidement (la plupart des étalons voyageurs ne sont pas restés plus de 3,5 mois hors de leur laboratoire national). La bonne concordance des résultats fournis par les différents étalons d'un même laboratoire nous permet d'estimer que les résultats finaux de la comparaison sont exacts à 1×10^{-7} près.

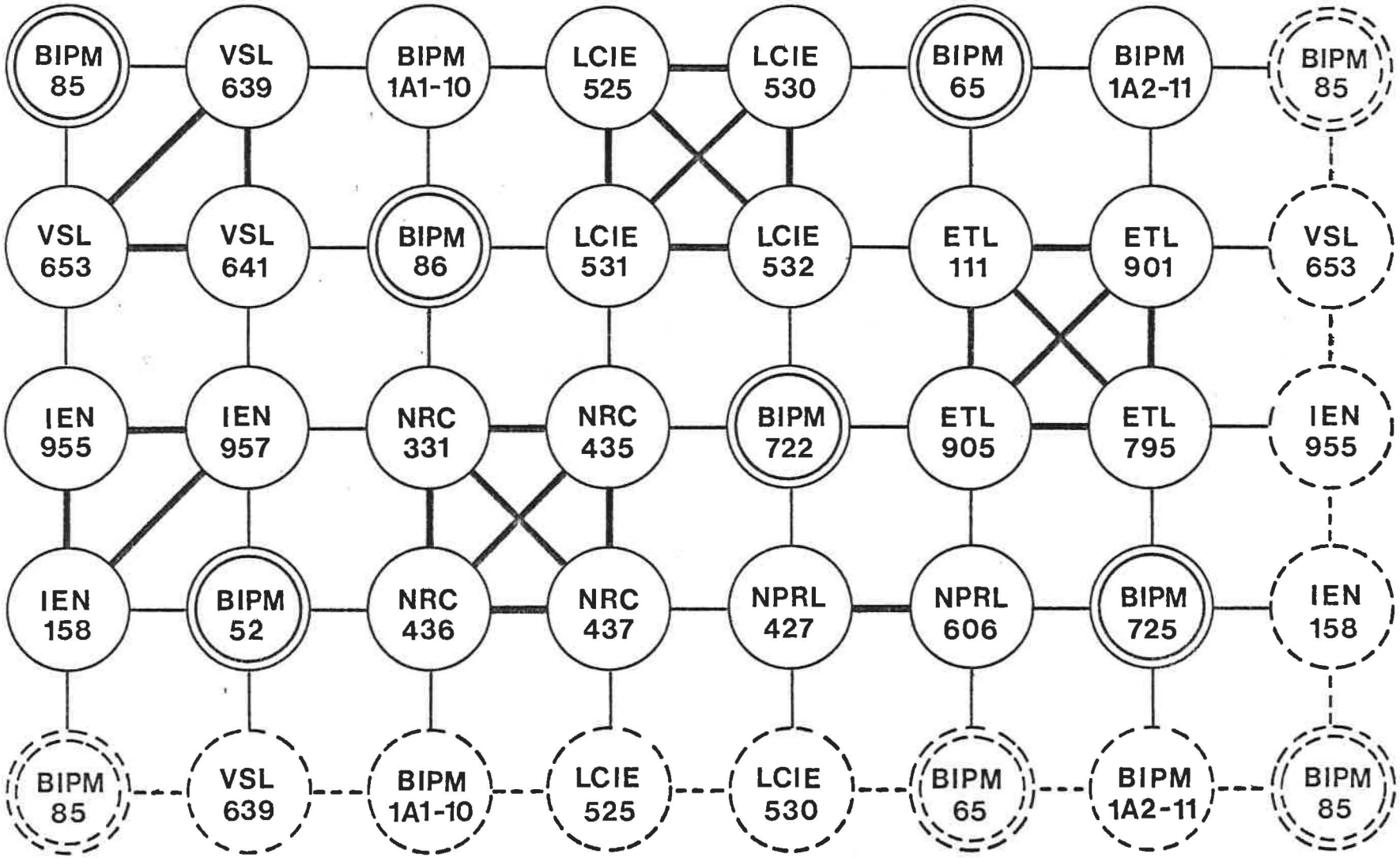

Fig. 1.- Schéma de comparaison des étalons de résistance. Les six étalons primaires du BIPM sont identifiés par un double cercle. Les étalons d'un même laboratoire ont été comparés entre eux dans toutes les combinaisons possibles (comparaisons indiquées par un trait gras).

TABLEAU I

Valeurs, à 20 °C, des étalons de 1 Ω, exprimées en "unité nationale"* du laboratoire d'origine, à la date du 17 novembre 1976

Les valeurs au 17 novembre 1976, date centrale de la comparaison, ont été calculées par interpolation linéaire à partir des valeurs attribuées aux étalons par les laboratoires nationaux avant et après les mesures au BIPM.

NPRL

	(1)	(2)	(3)	
	1er septembre 1976	17 janvier 1977	17 novembre 1976	
1132427	0,999 991 65	0,999 991 65	0,999 991 65	Ω_{NPRL}
1146606	0,999 991 05	0,999 991 05	0,999 991 05	
	0,999 991 35	0,999 991 35	0,999 991 35	Ω_{NPRL}

NRC

	8 octobre 1976	15 janvier 1977		
1029331	0,999 987 20	0,999 987 04	0,999 987 14	Ω_{NRC}
1336435	0,999 995 81	0,999 995 61	0,999 995 73	
1336436	0,999 993 76	0,999 993 59	0,999 993 69	
1336437	0,999 994 93	0,999 994 86	0,999 994 90	
	$0,999\ 992\ 92_5$	$0,999\ 992\ 77_5$	$0,999\ 992\ 86_4$	Ω_{NRC}

LCIE

	18 septembre 1976	28 janvier 1977		
1732525	0,999 977 39	0,999 977 34	0,999 977 37	Ω_{LCIE}
1732530	0,999 977 27	0,999 977 24	0,999 977 26	
1732531	0,999 980 97	0,999 980 98	0,999 980 97	
1732532	0,999 977 66	0,999 977 68	0,999 977 67	
	0,999 978 32	0,999 978 31	0,999 978 32	Ω_{LCIE}

* On entend par "unité nationale" la représentation de l'ohm conservée par chaque laboratoire au moyen d'étalons. Bien que cette expression soit impropre, elle a l'avantage d'être brève et bien comprise par tous les intéressés.

IEN

	30 septembre 1976	15 février 1977	17 novembre 1976	
1681955	0,999 975 28	0,999 975 27	0,999 975 28	Ω_{IEN}
1681957	0,999 973 35	0,999 973 26	0,999 973 32	
1723158	0,999 978 91	0,999 978 84	0,999 978 89	
	0,999 975 85	0,999 975 79	0,999 975 83	Ω_{IEN}

ETL

	1er octobre 1976	13 janvier 1977		
6905C2	1,000 068 73	1,000 068 77	1,000 068 75	Ω_{ETL}
6901H2	1,000 026 01	1,000 025 73	1,000 025 88	
70C111	1,000 001 75	1,000 001 97	1,000 001 85	
5795	0,999 880 95	0,999 881 37	0,999 881 14	
	0,999 994 36	0,999 994 46	0,999 994 41	Ω_{ETL}

VSL

	12 juillet 1976	23 mars 1977		
1753639	0,999 976 80	0,999 976 80	0,999 976 80	Ω_{VSL}
1753641	0,999 976 67	0,999 976 83	0,999 976 75	
1756653	0,999 978 31	0,999 978 35	0,999 978 33	
	0,999 977 26	0,999 977 33	0,999 977 29	Ω_{VSL}

TABLEAU II

Valeur de l'"unité nationale" de chaque laboratoire en fonction de Ω_{69-BI}, au 17 novembre 1976

NPRL

	(1)		(2)		(3)	
1132427	0,999 991 65	Ω_{NPRL} =	0,999 991 91	Ω_{69-BI} d'où Ω_{NPRL} =	Ω_{69-BI} + 0,26	µΩ
1146606	0,999 991 05	=	0,999 991 36	=	+ 0,31	
	0,999 991 35	Ω_{NPRL} =	0,999 991 64	Ω_{69-BI} d'où Ω_{NPRL} =	Ω_{69-BI} + 0,29	µΩ

NRC

1029331	0,999 987 14	Ω_{NRC} =	0,999 985 90	Ω_{69-BI} d'où Ω_{NRC} =	Ω_{69-BI} - 1,24	µΩ
1336435	0,999 995 73	=	0,999 994 61$_5$	=	- 1,12	
1336436	0,999 993 69	=	0,999 992 57	=	- 1,12	
1336437	0,999 994 90	=	0,999 993 72	=	- 1,18	
	0,999 992 86$_5$	Ω_{NRC} =	0,999 991 70	Ω_{69-BI} d'où Ω_{NRC} =	Ω_{69-BI} - 1,16$_5$	µΩ

LCIE

1732525	0,999 977 37	Ω_{LCIE} =	0,999 977 97	Ω_{69-BI} d'où Ω_{LCIE} =	Ω_{69-BI} + 0,60	µΩ
1732530	0,999 977 26	=	0,999 977 81$_5$	=	+ 0,56	
1732531	0,999 980 97	=	0,999 981 54	=	+ 0,57	
1732532	0,999 977 67	=	0,999 978 22	=	+ 0,55	
	0,999 978 32	Ω_{LCIE} =	0,999 978 89	Ω_{69-BI} d'où Ω_{LCIE} =	Ω_{69-BI} + 0,57	µΩ

IEN

1681955	0,999 975 28	Ω_{IEN} =	0,999 976 55	Ω_{69-BI} d'où Ω_{IEN} =	Ω_{69-BI} + 1,27	µΩ
1681957	0,999 973 32	=	0,999 974 53	=	+ 1,21	
1723158	0,999 978 89	=	0,999 980 11	=	+ 1,22	
	0,999 975 83	Ω_{IEN} =	0,999 977 06	Ω_{69-BI} d'où Ω_{IEN} =	Ω_{69-BI} + 1,23	µΩ

ETL

6905C2	1,000 068 75	Ω_{ETL} =	1,000 068 13	Ω_{69-BI} d'où Ω_{ETL} =	Ω_{69-BI} - 0,62	µΩ
6901H2	1,000 025 88	=	1,000 025 27	=	- 0,61	
70C111	1,000 001 85	=	1,000 001 25	=	- 0,60	
5795	0,999 881 14	=	0,999 880 62	=	- 0,52	
	0,999 994 41	Ω_{ETL} =	0,999 993 82	Ω_{69-BI} d'où Ω_{ETL} =	Ω_{69-BI} - 0,59	µΩ

VSL

1753639	0,999 976 80	Ω_{VSL}	= 0,999 977 26	Ω_{69-BI}	d'où Ω_{VSL}	= Ω_{69-BI}	+ 0,46	$\mu\Omega$
1753641	0,999 976 75		= 0,999 977 15			=	+ 0,40	
1756653	0,999 978 33		= 0,999 978 79			=	+ 0,46	
	0,999 977 29	Ω_{VSL}	= 0,999 977 73	Ω_{69-BI}	d'où Ω_{VSL}	= Ω_{69-BI}	+ 0,44	$\mu\Omega$

TABLEAU III

Résultats de la comparaison internationale

(au 17 novembre 1976)

Ω_{NPRL}	= Ω_{69-BI}	+ 0,29	$\mu\Omega$
Ω_{NRC}	=	$- 1,16_5$	
Ω_{LCIE}	=	+ 0,57	
Ω_{IEN}	=	+ 1,23	
Ω_{ETL}	=	- 0,59	
Ω_{VSL}	=	+ 0,44	

ETALONS SUPPLEMENTAIRES DU VSL

Etalon de 1 Ω, n° 1773191, défini à 28 °C :

- Résistance exprimée en fonction de Ω_{69-BI} :

L'étalon n° 1773191, maintenu à 28 °C dans un bain d'huile auxiliaire, a été comparé, au moyen du pont double à bras de 1 000 Ω, aux six étalons de référence primaire du BIPM conservés à 20 °C. Sa température était déterminée à l'aide d'un thermomètre à résistance de platine. Pendant les observations il était parcouru par un courant de 0,1 A. On a obtenu :

résistance à 28 °C, au 22 décembre 1976 (date moyenne des mesures)

N° 1773191 : 1,000 002 08 Ω_{69-BI}

- Résistance à 28 °C, exprimée en fonction de Ω_{VSL} :

Par interpolation linéaire entre les valeurs communiquées par le VSL on a obtenu :

	12 juillet 1976	23 mars 1977	interpolé au 22 décembre 1976
N° 1773191	1,000 001 68	1,000 001 60	1,000 001 63 Ω_{VSL}

- Rattachement de Ω_{VSL} à Ω_{69-BI} :

1,000 001 63 Ω_{VSL} = 1,000 002 08 Ω_{69-BI} d'où $\Omega_{VSL} = \Omega_{69-BI} + 0{,}45\ \mu\Omega$

Le résultat obtenu avec l'étalon N° 1773191 est en parfait accord avec celui de la comparaison internationale ($\Omega_{VSL} = \Omega_{69-BI} + 0{,}44\ \mu\Omega$).

Etalons de 10^4 Ω, ESI N° 851015 et 851036 :

- Résistances à 20 °C, exprimées en fonction de Ω_{69-BI} :

Les étalons N°s 851015 et 851036 ont été comparés, à une température voisine de 20 °C, à quatre étalons de référence de 10^4 Ω du BIPM au moyen d'un pont double à bras de 10^5 Ω. Pendant les observations ils étaient parcourus par un courant de 0,001 A. On a obtenu :

résistances à 20 °C, au 23 février 1977 (date moyenne des mesures)

N° 851015 : 9 999,997 8 Ω_{69-BI}
N° 851036 : 9 999,991 1

- Résistances à 20 °C, exprimées en fonction de Ω_{VSL} :

Par interpolation linéaire entre les valeurs communiquées par le VSL on a obtenu :

	11 mai 1976	30 juin 1977	interpolé au 23 février 1977	
N° 851015	9 999,997 6	9 999,995 1	9 999,995 9	Ω_{VSL}
N° 851036	9 999,989 1	9 999,989 5	9 999,989 4	

- Rattachement de Ω_{VSL} à Ω_{69-BI} :

par N° 851015 : 9 999,995 9 Ω_{VSL} = 9 999,997 8 Ω_{69-BI} d'où $\Omega_{VSL} = \Omega_{69-BI} + 0{,}19\ \mu\Omega$
par N° 851036 : 9 999,989 4 = 9 999,991 1 = + 0,17

en moyenne : $\Omega_{VSL} = \Omega_{69-BI} + 0{,}18\ \mu\Omega$

Les résultats fournis par les étalons de $10^4\ \Omega$ sont en excellent accord mais leur valeur moyenne s'écarte de celle obtenue avec les étalons de 1 Ω de 0,26 $\mu\Omega$. En 1973 on avait déjà constaté un écart dans le même sens et du même ordre de grandeur.

Février 1979.