

Rapport sur la
comparaison d'étalons de masse de 1 kg
en platine iridié et en acier inoxydable
entre le Bureau International des Poids et Mesures
le National Research Laboratory of Metrology (Japon)
et le CSIRO, Division of Applied Physics (Australie)

par G. Girard*
Y. Kobayashi et K. Uchikawa**
G.A. Bell et J.W. Humphries***

Le CSIRO, Division of Applied Physics, Australie, étant engagé dans une nouvelle mesure absolue de la masse volumique de l'eau, il lui est apparu souhaitable de s'assurer qu'il déterminait avec la plus grande exactitude des masses ayant une masse volumique très différente de celle du platine iridié. Il a donc été convenu que ce laboratoire nous enverrait pour vérification son Kilogramme prototype N° 44. En même temps, nous déterminerions un étalon de 1 kg en acier inoxydable du BIPM. Ces deux étalons seraient ensuite comparés entre eux au CSIRO.

Le National Research Laboratory of Metrology (NRLM), Japon, qui effectue la même étude sur la masse volumique de l'eau, a accepté de s'associer à une telle comparaison de masses. Les mesures ont été organisées en profitant d'un voyage que G. Girard a effectué à Canberra au début de décembre 1979.

Huit étalons de 1 kg ont participé à ces comparaisons : quatre étalons en platine iridié (N° 9 et N° 31 du BIPM, N° 44 du CSIRO et N° E59 du NRLM) et quatre étalons en acier inoxydable (N2, N3, U. et J1 du BIPM).

Ils ont été comparés entre eux au BIPM, à l'aide de la balance NBS-2 en septembre-octobre 1979.

En novembre, les étalons E59 et N2 ont été déposés au NRLM et les étalons N° 44 et N3 au CSIRO.

En décembre 1979, les étalons N3 et N2 ont été repris respectivement au CSIRO et au NRLM.

En février 1980, des comparaisons retour ont été effectuées entre ces deux derniers étalons et les étalons N° 9, N° 31, U. et J1 restés au BIPM.

* BIPM
** NRLM
*** CSIRO

1.- Mesures au BIPM (septembre-octobre 1979)

Les étalons comparés sont :

N ^{os} 9, 31	BIPM	} platine iridié
N° E59	Japon	
N° 44	Australie	

N2, N3	} BIPM acier inoxydable	Nicral D	20 % Cr - 20 % Ni
U.		Uranus 10	20 % Cr - 8-10 % Ni
J1		(fabrication	25 % Cr - 20 % Ni
		Chyo, Japon)	

Les mesures sont effectuées à la balance NBS-2, suivant les schémas suivants :

a)	9	31	E59	44	N2	N3
	x	x	x	x		
	x	x	x		x	
	x	x	x			x
	x	x		x	x	
	x	x		x		x
	x	x			x	x

b)	N2	N3	U.	J1
	x	x	x	x
	x	x	x	x
	x	x	x	x

Chaque ligne correspond à une comparaison de quatre étalons pris deux à deux dans les six combinaisons possibles.

Les conditions ambiantes moyennes et les instruments utilisés pour leur détermination sont les suivants pour chacun des ensembles de comparaisons a) et b)

températures	a) 20,14 °C	sonde à résistance de platine (Rosemount)
	b) 20,14 °C	incertitude ≈ 1 mK
pression	a) 101488 Pa	jauge à spirale de quartz (Texas Instruments)
	b) 100998 Pa	incertitude ≈ 4 à 5 Pa
humidité relative	a)	sonde à capacitance (HygroDynamics) étalon-
	b) 0,59	née d'après un hygromètre à point de rosée (EG et G) - incertitude ≈ 1 à 2 %
CO ₂	a) 0,000 77	analyseur à infrarouge (MSA)
	b) 0,000 77	incertitude ≈ 0,000 05

La masse volumique de l'air humide correspondant à ces mesures a été calculée par la formule proposée par le Groupe de travail 1 sur les Masses devenue maintenant "Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981)".

Les résultats de ces 54 comparaisons ont été compensés par la méthode des moindres carrés et ont donné les résultats suivants pour les étalons E59 et 44, N2 et N3.

E59	1 kg + 4,872 mg	$\sigma = 1,1 \mu\text{g}$
44	1 kg + 0,283 mg	$\sigma = 1,1 \mu\text{g}$
N2	1 kg + 0,220 mg	$\sigma = 1,0 \mu\text{g}$
N3	1 kg + 0,083 mg	$\sigma = 1,0 \mu\text{g}$

Les valeurs de l'écart-type σ données ci-dessus sont celles provenant seulement des comparaisons et ne font pas intervenir celles des écarts-types sur les Prototypes N^{OS} 9 et 31.

(Avant ces mesures, les étalons E59 et 44 avaient été nettoyés et lavés, ce qui avait eu pour conséquence de diminuer leur masse, respectivement de 54 μg et 19 μg).

2.- Mesures par le NRLM (novembre-décembre 1979)

Les étalons comparés sont :

E59	platine iridié	
N2	acier inoxydable BIPM	
S1-1	acier inoxydable (Chyo, Japon)	25 % Cr - 20 % Ni
NP	acier inoxydable Nicral D, France	20 % Cr - 20 % Ni

Les comparaisons sont effectuées avec la balance de haute précision du NRLM en deux groupes :

E59	N2	S1-1	et	E59	N2	NP
x	x			x	x	
x		x		x		x
	x	x			x	x

Les conditions ambiantes ont été déterminées par :

un thermomètre à quartz - incertitude $\approx 0,01 \text{ K}$;
un thermomètre à mercure ;

une jauge de pression du type à tube de bourdon, incertitude $\approx 0,01 \text{ mmHg}$;

un hygromètre à variations de résistance électrique (chlorure de lithium), incertitude $\approx 1 \%$. L'humidité relative a varié entre 0,35 et 0,49.

La masse volumique de l'air humide utilisée pour le calcul de la masse de N2 a été déterminée par pesée de deux corps de même masse et de volumes très différents à l'aide de la même balance de haute précision.

Les comparaisons des étalons ayant été faites à des humidités relatives différentes de celles existantes au BIPM, les résultats ont été ramenés à une humidité relative de 0,59 à l'aide d'une formule empirique déterminée au NRLM pour tenir compte de l'adsorption :

$$\underline{C} = 0,020 \underline{S}_K - (0,0092 \underline{H} - 0,103)(\underline{S}_S - \underline{S}_K)$$

où \underline{C} est la correction d'adsorption, en microgrammes ; \underline{S}_K et \underline{S}_S sont respectivement les surfaces, en cm^2 , de l'étalon en platine (ici $\underline{S}_K = 71,7 \text{ cm}^2$) et de l'étalon en acier inoxydable (par exemple pour N2, $\underline{S}_S = 140,6 \text{ cm}^2$).

\underline{H} , est le taux d'humidité relative en pour-cent.

La masse de l'étalon N2 trouvée au NRLM est

$$\text{N2 : } 1 \text{ kg} + 0,215 \text{ mg} \quad \sigma = 7 \text{ } \mu\text{g.}$$

Les conditions ambiantes aussi bien thermiques que mécaniques n'étaient pas favorables à des mesures de haute précision car le laboratoire se trouvait en déménagement.

La masse volumique de l'air humide utilisée pour le calcul de la masse de N2 a aussi été calculée à l'aide de la formule préconisée par le Groupe de travail 1. La teneur en CO_2 , moyenne de trois déterminations, a été de 0,000 6.

Les différences entre les résultats fournis par la méthode de pesée de deux corps et par le calcul sont données par la figure 1.

Fig.1.- Différence de masse volumique de l'air humide entre celle (A) calculée à partir de la formule et celle (B) déterminée à partir de la pesée de deux corps, en fonction de la masse volumique de l'air humide déterminée à l'aide des deux corps.

3.- Mesures par le CSIRO (décembre 1979 - courant 1980)

Ces comparaisons ont été faites en deux étapes.

En décembre 1979, l'étalon en Nicral N3 a été comparé à trois étalons en acier inoxydable du CSIRO, SS1, SS2 et St, dans toutes les combinaisons possibles.

Dans le courant de 1980, ces trois étalons ont été comparés au prototype N° 44. L'un des étalons en acier ayant varié anormalement, les calculs définitifs ne se sont appuyés que sur les valeurs des deux autres.

Les conditions ambiantes moyennes et les instruments utilisés pour leur détermination sont :

température moyenne 22 °C - thermomètre à mercure -
incertitude $\pm 0,05$ K ;

pression moyenne 756,1 mmHg - baromètre à mercure du type Fortin -
incertitude ± 7 Pa ($\pm 0,05$ mmHg) ;

humidité relative moyenne 0,50 - psychromètre à ventilation ;
température lue à $\pm 0,1$ K et tables de Marvin.

La masse volumique de l'air a été calculée à l'aide de la formule préconisée par le Groupe de travail 1 sur les Masses.

La teneur en CO₂ n'a pas été mesurée ; elle a été admise égale à 0,000 4. On n'a pas tenu compte de l'effet d'adsorption.

La valeur de la masse de l'étalon N3 issue de l'ensemble de ces comparaisons est

$$N3 : 1 \text{ kg} + 0,091 \text{ mg} \quad \sigma = 22 \text{ } \mu\text{g}$$

4.- Mesures au BIPM (février 1980)

Au retour d'Australie et du Japon, les étalons N2 et N3 ont été de nouveau comparés aux Prototypes N^{os} 9 et 31 ainsi qu'aux étalons en acier inoxydable U. et J1. Ces quatre derniers étalons ont été conservés dans l'armoire en fer de la Salle 105 depuis octobre 1979. Tous ont été seulement époussetés.

Au préalable, on a de nouveau étalonné la sonde thermométrique Rosemount RE2, par comparaison à un thermomètre à résistance, ainsi que la sonde hygrométrique par comparaison à l'hygromètre à point de rosée EG & G.

La jauge de pression MKS revenue de chez le constructeur au début de décembre 1979 a été comparée à plusieurs reprises au manobaromètre interférentiel du BIPM. Une correction moyenne a pu être admise.

Les conditions ambiantes moyennes ont été :

température : $\underline{t} = 20,06 \text{ }^\circ\text{C}$
pression : $\underline{p} = 101\,468 \text{ Pa}$
humidité relative : $\underline{h} = 0,40$
 $\text{CO}^2 = 0,000\,55$

et l'on a utilisé la formule du Groupe de travail pour le calcul de la masse volumique de l'air. Les comparaisons des étalons N2, N3, U. et J1 aux Prototypes N^{OS} 9 et 31 ont conduit à un écart-type de 1,3 µg sur les valeurs des étalons en acier, en tenant compte des pesées seules. Si l'on prend U. et J1 comme étalons pour s'assurer que les masses de N2 et N3 n'ont pas varié, on s'affranchit en grande partie de l'incertitude sur le calcul de la correction de poussée de l'air puisque la correction différentielle n'est plus au maximum que de 1,9 mg. On obtient les valeurs suivantes :

N2 : 1 kg + 0,220 mg
N3 : 1 kg + 0,098 mg.

De même, les valeurs "retour" du BIPM n'ont pas besoin d'être corrigées pour l'adsorption, car seuls les étalons en acier entrent en compte et on peut admettre que ces corrections se compensent exactement.

5.- Conclusion

Les masses des étalons N2 et N3 sont données dans le tableau suivant où ne figurent que les excès sur les valeurs nominales, ainsi que les écarts-types :

	BIPM sept./oct.1979	NRLM nov./déc.1979	CSIRO déc.1979 1980	BIPM fév. 1980 (à partir de U.-J1)
N2	+ 0,220 mg(0,001)	+ 0,215 mg(0,007)		+ 0,220 mg(0,001)
N3	+ 0,083 mg(0,001)		+ 0,096*mg(0,022)	+ 0,098 mg(0,001)

*Cette valeur serait augmentée d'environ 6 µg si l'on appliquait la correction pour l'adsorption comme au NRLM.

On peut considérer que l'accord est très bon et s'estimer satisfait de cette comparaison.

Suivant la formule proposée par Mr Kobayashi (NRLM) et appliquée lors de ses pesées, l'adsorption correspondant à une augmentation de l'humidité relative de 0,1 entraîne une augmentation différentielle de masse de 6 μg d'un étalon en acier inoxydable comparé à un étalon en platine iridié.

L'effet d'adsorption mériterait d'être confirmé car il n'est plus négligeable par rapport à l'exactitude obtenue lors des comparaisons de masse. Il serait souhaitable qu'une telle confirmation soit obtenue avant d'entreprendre une nouvelle vérification périodique des étalons de masse nationaux en platine iridié.

18 juin 1981

version corrigée
mars 1982
