

Bureau International des Poids et Mesures

Rapport BIPM-85/2

Rapport
sur l'étude, au BIPM,
de la règle de 1 mètre N° 12924
et
de la règle de 500 mm N° 16806

par J. Hamon et P. Carré

Janvier 1985

Rapport
sur l'étude, au BIPM,
de la règle de 1 mètre N° 12924
et
de la règle de 500 mm N° 16806

Sommaire

- <u>Description</u>	1
- <u>Appareillage</u>	1
I - <u>Etude</u>	1
I a - Détermination de la longueur à 20 °C de l'intervalle principal	1
1 - Méthode de mesure interférentielle	1
2 - Détermination de l'indice de réfraction de l'air	2
3 - Détermination de la température de la règle	2
4 - Mesures auxiliaires et corrections	3
4-1 - Pointés des traits	3
4-2 - Correction d'obliquité (ou d'étendue géométrique)	3
4-3 - Coefficient de dilatation (formule)	3
4-4 - Correction de compressibilité	3
I b - Etalonnage des divisions décimétriques, centimétriques et millimétriques	3
1 - Méthode	3
2 - Millimètre supplémentaire	4
I c - Détermination du coefficient de dilatation	4
I d - Evaluation du défaut de planéité de la surface tracée.	4
II - <u>Règle de 1 m N° 12924 - Résultats</u>	4
II a - Intervalle principal	4
II b - Etalonnage des traits décimétriques	9
II c - Etalonnage des traits centimétriques, millimétriques, déci-millimétriques	14
II d - Résultats finaux : intervalle principal et étalonnage	14
II e - Coefficient de dilatation	14
II f - Défaut de planéité de la règle	20

III - <u>Règle de 1 m N° 12924 - Incertitudes</u>	20
III a - Examen complémentaire des causes d'incertitude et évaluations	20
1 - Intervalle principal	21
2 - Etalonnage	23
3 - Coefficient de dilatation	23
III b - Incertitudes composées	24
1 - Intervalle principal	24
2 - Etalonnage	24
3 - Coefficient de dilatation	25
IV - <u>Règle de 500 mm N° 16806 - Résultats et incertitudes</u>	26
IV a - Mesure de l'intervalle principal	26
IV b - Etalonnage des traits décimétriques	29
IV c - Etalonnage des traits centimétriques et millimétriques	29
IV d - Résultats finaux	29
IV e - Coefficient de dilatation	34
IV f - Incertitudes	34

Rapport
sur l'étude, au BIPM,
de la règle de 1 mètre N° 12924
et
de la règle de 500 mm N° 16806

- Description

Ces deux règles sont celles que le BIPM a mises en circulation pour la comparaison internationale de mesure de règles divisées commencée en 1976. Elles sont en acier nickelé et ont une section en forme de H inscriptible dans un carré de 24 mm de côté. Les traits de la règle de 1 m, larges d'environ 4 μm et gravés selon la méthode traditionnelle, ont un profil en V. Les traits de la règle de 500 mm ont été gravés selon un nouveau procédé ne nécessitant pas d'ébavurage : chaque trait, de largeur 6 μm environ, est constitué de 7 traits élémentaires parallèles.

Au vu des résultats du premier circuit de la comparaison, la règle de 500 mm a été retirée de la circulation.

- Appareillage

Les mesures ont été faites au moyen du comparateur photoélectrique et interférentiel [1, 2]. Cet appareil est placé à l'intérieur d'un caisson étanche.

Ces mesures ont été effectuées comme des mesures de routine, sans modification de l'appareillage ni des méthodes d'exécution.

I - Etude

I a - Détermination de la longueur à 20 °C de l'intervalle principal

1 - Méthode de mesure interférentielle

On utilise une méthode de déplacement. La variation de l'ordre d'interférence correspondant au déplacement est déterminée grâce à des pointés statiques des figures d'interférence obtenues avant et après le déplacement ; deux radiations sont utilisées : la radiation orangée

[1] CARRÉ, P. Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures. Metrologia, 2, N° 1, 1966, pp. 13-23.

[2] GIACOMO, P., HAMON, J., HOSTACHE, J. et CARRÉ, P. Utilisation du comptage de franges d'interférences pour des mesures de longueur de haute précision. Metrologia, 8, N° 2, 1972, pp. 72-82.

($\lambda \approx 0,606 \mu\text{m}$) émise par une lampe à krypton 86 fonctionnant à une température voisine de 58 K et la radiation ($\lambda \approx 0,633 \mu\text{m}$) d'un laser à He-Ne. La partie entière de cette variation est déterminée par comptage de franges avec la radiation du laser. Les pointés statiques sont faits à l'aide d'un photomultiplicateur. Le laser est d'un type commercial asservi sur le "Lamp dip" ; trois ou quatre fois par an, la longueur d'onde de la radiation émise est comparée par une méthode de battements à celle d'un laser à He-Ne asservi sur une raie d'absorption saturée de l'iode. La longueur d'onde de la radiation émise par la lampe à krypton 86 utilisée dans les conditions habituelles de nos mesures (58,5 K et 10,4 mA) est prise égale à 605,780 201 nm.

2 - Détermination de l'indice de réfraction de l'air

Cet indice est mesuré, pour chacune des radiations utilisées, au début, au milieu et à la fin de chaque série de mesure de l'intervalle principal, au moyen d'un réfractomètre [3] installé à l'intérieur du caisson étanche du comparateur.

Ce réfractomètre est essentiellement un interféromètre de Michelson dans lequel une chambre à vide peut être placée successivement sur l'un, puis sur l'autre des faisceaux. La chambre à vide, dont la longueur est 323 mm environ, est reliée à une pompe à sorption qui y maintient une pression de l'ordre de 0,6 pascal.

3 - Détermination de la température de la règle

Un bloc de cuivre creusé de plusieurs puits est placé à l'intérieur du caisson. On mesure la température de ce bloc avec un thermomètre à résistance de platine étalonné connecté à un pont de mesure en courant continu (pont de Smith) jusqu'à fin 1980, et à un pont de mesure en courant alternatif (pont Tinsley) depuis cette date. Au moyen de thermocouples différentiels cuivre-constantan, on mesure la différence entre la température du bloc de référence et celle de la règle ; en général, cette différence est inférieure à 0,01 °C. Quatre thermocouples sont utilisés pour une règle de 1 mètre et trois pour une règle de 500 mm ; les soudures actives faites sur de petits disques de cuivre sont pressées sur la règle, alternativement d'un côté et de l'autre, par des cavaliers élastiques en bronze phosphoreux. Les abscisses des points de fixation sont choisies de telle façon que la moyenne arithmétique des températures mesurées en chacun de

[3] TERRIEN, J. An air refractometer for interference length metrology. Metrologia, 1, N° 3, 1965, pp. 80-83.

ces points soit une bonne approximation de la température moyenne de la règle. En prenant comme origine le milieu de la règle, ces abscisses sont

pour la règle de 1 m : - 398, - 94, + 94 et + 398 mm,
et pour la règle de 500 mm : - 177, 0 et + 177 mm.

Les soudures de référence sont pressées au fond des puits du bloc de référence par des fixations élastiques.

4 - Mesures auxiliaires et corrections

4-1 - On n'effectue généralement pas un déplacement strictement égal à la longueur à mesurer ; la différence entre ces deux grandeurs est fournie par les indications du microscope photoélectrique. Cette différence n'excède pas ± 200 nm, mais, néanmoins, l'étalonnage du système de lecture des microscopes est contrôlé périodiquement.

4-2 - Les pointés statiques des figures d'interférence sont effectués en sélectionnant au moyen d'une petite ouverture (de diamètre 0,6 mm) la partie centrale des anneaux formés dans l'interféromètre dans le plan focal de l'objectif de sortie (de distance focale 0,56 m). Il en résulte que les mesures doivent être corrigées de l'effet d'obliquité moyenne des faisceaux. Cette correction a été déterminée par des mesures faites avec des diaphragmes de différents diamètres. Les corrections appliquées aux mesures statiques sont, en valeur relative, $+ 71 \times 10^{-9}$ pour le faisceau du laser et $+ 68 \times 10^{-9}$ pour le faisceau de la lampe à krypton 86.

4-3 - La longueur à 20 °C (EIP-68) est calculée à partir de la longueur $l(t)$ mesurée à la température t et du coefficient de dilatation α mesuré au voisinage de 20 °C :

$$l(20\text{ °C}) = l(t) / [1 + \alpha (t - 20\text{ °C})].$$

4-4 - Il n'a pas semblé utile d'appliquer aux résultats une correction pour la compressibilité des règles.

I b - Etalonnage des divisions décimétriques, centimétriques, millimétriques et déci-millimétriques

1 - Méthode

On réalise un déplacement de la règle sous le microscope photoélectrique, tout en comptant les franges qui défilent dans l'interféromètre. On arrête le déplacement sur chacun des traits à étudier, à ± 200 nm près, en effectuant des déplacements partiels qui correspondent toujours à un nombre entier de franges comptées (nombre entier de demi-longueurs d'onde). L'écart de centrage des traits successifs par rapport au microscope est déterminé à l'aide du microscope photoélectrique lui-même. On vérifie que la température est suffisamment stable et uniforme le long de la règle ; on ne détermine pas l'indice de réfraction, qui doit néanmoins

rester stable. Par cette méthode, on détermine la position de chaque trait par rapport à une échelle idéale qui s'appuierait sur les extrémités de l'intervalle principal, c'est-à-dire une échelle dont les traits diviseraient l'intervalle principal en fractions décimales exactes.

2 - La détermination de la longueur à 20 °C d'un millimètre supplémentaire et de ses subdivisions est considérée comme un étalonnage. S'il y a lieu, le résultat est ensuite corrigé pour tenir compte de la valeur exacte de l'intervalle principal.

I c - Détermination du coefficient de dilatation linéique au voisinage de 20 °C

On réalise une douzaine de déterminations de la longueur de l'intervalle principal pour des températures échelonnées entre 17,5 °C et 22,5 °C environ. La méthode de mesure est celle indiquée en I a mais on utilise une seule position de la règle par rapport au comparateur et un seul microscope et on n'emploie que la méthode de comptage de franges. Ensuite, on détermine par la méthode des moindres carrés les paramètres d'un polynôme du premier degré, ou si nécessaire du second degré, qui représente au mieux les longueurs trouvées en fonction de la température.

I d - Etude de la planéité de la surface tracée

L'évaluation des défauts de planéité de la surface tracée de la règle est faite dans le comparateur en mesurant, pour chaque trait décimétrique, le déplacement vertical du chariot nécessaire pour obtenir une bonne mise au point de ce trait dans le microscope. La référence est la position du chariot dans laquelle la mise au point est correcte pour les traits extrêmes de l'intervalle principal.

II - Règle N° 12924 - Résultats

La règle N° 12924 a été étudiée cinq fois : quatre fois durant la comparaison internationale : en avril 1976, avril-mai 1978, septembre 1980 et octobre-novembre 1983 et, l'IMM ayant demandé à refaire des mesures en 1984, une dernière détermination a été faite au BIPM en octobre 1984.

II a - Intervalle principal

Durant son étude, la règle reposait sur deux supports (couteau et rouleau oscillant) placés à l'aplomb des traits gravés sur l'une des faces latérales de la règle et distants d'environ 576 mm. La mise au point a toujours été faite, sous le microscope photoélectrique, sur les traits 0 et 1000 mm. La région de chaque trait qui a été pointée était limitée par la longueur du spot des microscopes correspondant à l'écartement des repères d'alignement de la règle : environ 0,2 mm.

Une détermination complète comporte huit mesures, deux pour chacune des deux positions de la règle par rapport au comparateur et pour chacun des deux microscopes.

Dans les cinq tableaux suivants 1 à 5 on trouve, dans la 1^{ère} colonne le numéro de la mesure, dans la 2^e la position de la règle (AB ou BA), dans la 3^e le microscope utilisé (gauche ou droit), dans la 4^e la température de la règle, dans les 5^e, 7^e, 9^e les écarts par rapport à la valeur nominale obtenus successivement par comptage de franges, par mesure statique avec la radiation du laser et par mesure statique avec la radiation du krypton 86. Dans les colonnes 6, 8 et 10 apparaissent les moyennes partielles. Au bas des colonnes sont indiquées les moyennes des huit mesures suivies des écarts-types de ces moyennes calculés d'après la dispersion des mesures : c'est la partie aléatoire de l'incertitude des résultats. Enfin, on a aussi mentionné, à titre indicatif, les résultats obtenus avec chaque microscope.

Jusqu'en octobre 1983, seul le résultat obtenu avec la radiation orangée du krypton 86 (alors radiation étalon primaire) était retenu. On a procédé de même en 1984, bien que la définition du mètre ait changé en 1983, afin de maintenir l'homogénéité de nos résultats. Le graphique de la figure 1 montre la répartition chronologique des résultats. Compte tenu des incertitudes statistiques représentées sur le graphique par ± 1 écart-type, il apparaît que le résultat d'avril 1976 s'écarte notablement des quatre autres résultats.

Or, cette valeur de 1976 : $1 \text{ m} + 0,612 \text{ } \mu\text{m}$ avec une incertitude statistique $s = 0,007 \text{ } \mu\text{m}$ confirme bien le résultat d'une détermination préliminaire (4 mesures) faite au BIPM en décembre 1975 dont le résultat est $1 \text{ m} + 0,624 \text{ } \mu\text{m}$ avec $s = 0,013 \text{ } \mu\text{m}$.

Il semble donc qu'un allongement brusque, de l'ordre de 130 nm, de l'intervalle principal 0-1000 mm de cette règle se soit produit entre avril 1976 et avril 1978, suivi, d'après nos résultats ultérieurs, d'un allongement de 6,2 nm par an (écart-type 4,6 nm/an) entre 1978 et 1984.

Il est possible que l'aspect du trait 0 ou du trait 1000 mm ait été modifié entre 1976 et 1978, soit par suite des nettoyages soit par incrustation d'une poussière.

L'examen des rapports des autres laboratoires indique une augmentation de la courbure de la règle entre 1976 et 1978, mais il semble difficile d'établir une relation entre cette déformation et la discontinuité observée.

Tableau 1
Règle N° 12924 (avril 1976)

				à 20 °C		
				comptage	mesure statique	
					laser μm	Kr μm
°C				μm		
1 AB D 19,8642	+ 0,605	}+ 0,608	+ 0,601	}+ 0,600	+ 0,582	}+ 0,586
2 AB D 19,8440	+ 0,611		+ 0,598		+ 0,591	
3 AB G 19,8770	+ 0,588	}+ 0,598	+ 0,612	}+ 0,615	+ 0,608	}+ 0,606
4 AB G 19,9488	+ 0,607		+ 0,618		+ 0,604	
5 BA G 20,1778	+ 0,608	}+ 0,598	+ 0,621	}+ 0,614	+ 0,629	}+ 0,620
6 BA G 20,1441	+ 0,589		+ 0,608		+ 0,610	
7 BA D 20,0825	+ 0,617	}+ 0,620	+ 0,619	}+ 0,624	+ 0,632	}+ 0,634
8 BA D 20,1336	+ 0,624		+ 0,630		+ 0,637	
Moyenne s(moy.)	20,0090	+ 0,606 0,004	+ 0,613 0,004		+ 0,612 0,007	
D : moy. (AB,BA)		+ 0,614	+ 0,612		+ 0,610	
G : moy. (AB,BA)		+ 0,598	+ 0,614		+ 0,613	

Tableau 2
Règle N° 12924 (avril - mai 1978)

				à 20 °C		
				comptage	mesure statique	
					laser μm	Kr μm
°C				μm		
1 AB D 19,9424	+ 0,717	}+ 0,719	+ 0,726	}+ 0,727	+ 0,706	}+ 0,708
2 AB D 19,9771	+ 0,721		+ 0,728		+ 0,710	
3 AB G 20,0223	+ 0,755	}+ 0,753	+ 0,755	}+ 0,756	+ 0,756	}+ 0,760
4 AB G 20,2018	+ 0,751		+ 0,756		+ 0,763	
5 BA G 20,0432	+ 0,747	}+ 0,757	+ 0,755	}+ 0,766	+ 0,724	}+ 0,748
6 BA G 19,8668	+ 0,767		+ 0,778		+ 0,772	
7 BA D 19,9077	+ 0,745	}+ 0,756	+ 0,749	}+ 0,760	+ 0,747	}+ 0,762
8 BA D 19,9473	+ 0,767		+ 0,772		+ 0,778	
Moyenne s(moy.)	19,9886	+ 0,746 0,007	+ 0,752 0,006		+ 0,744 0,010	
D : moy. (AB,BA)		+ 0,738	+ 0,744		+ 0,735	
G : moy. (AB,BA)		+ 0,755	+ 0,761		+ 0,754	

Tableau 3
Règle N° 12924 (septembre 1980)

à 20 °C				
		comptage	mesure statique	
			laser	Kr
		°C	µm	µm
1	AB D	19,9102	+ 0,692	+ 0,713
2	AB D	20,0639	+ 0,725	+ 0,736
3	AB G	20,0112	+ 0,776	+ 0,773
4	AB G	19,9715	+ 0,754	+ 0,762
5	BA G	19,9546	+ 0,808	+ 0,797
6	BA G	19,9608	+ 0,811	+ 0,806
7	BA D	19,9426	+ 0,817	+ 0,831
8	BA D	19,9674	+ 0,811	+ 0,824
Moyenne		19,9728	+ 0,774	+ 0,780
s(moy.)			0,016	0,015
D : moy. (AB,BA)			+ 0,761	+ 0,776
G : moy. (AB,BA)			+ 0,787	+ 0,784

Tableau 4
Règle N° 12924 (octobre - novembre 1983)

à 20 °C				
		comptage	mesure statique	
			laser	Kr
		°C	µm	µm
1	AB D	19,9222	+ 0,788	+ 0,802
2	AB D	19,9337	+ 0,747	+ 0,764
3	AB G	19,9859	+ 0,791	+ 0,791
4	AB G	19,9249	+ 0,790	+ 0,791
5	BA G	19,9950	+ 0,834	+ 0,827
6	BA G	20,1262	+ 0,828	+ 0,829
7	BA D	20,1520	+ 0,829	+ 0,848
8	BA D	20,1820	+ 0,792	+ 0,820
Moyenne		20,0277	+ 0,800	+ 0,809
s(moy.)			0,010	0,010
D : moy. (AB,BA)			+ 0,789	+ 0,808
G : moy. (AB,BA)			+ 0,811	+ 0,810

Tableau 5
Règle N° 12924 (octobre 1984)

				à 20 °C		
				comptage	mesure statique	
				μm	laser μm	Kr μm
1	AB	G	19,8789	+ 0,770	+ 0,773	+ 0,773
2	AB	G	20,0325	+ 0,768	+ 0,771	+ 0,772
3	AB	D	20,0231	+ 0,709	+ 0,732	+ 0,739
4	AB	D	20,0624	+ 0,690	+ 0,711	+ 0,707
5	BA	D	20,1418	+ 0,796	+ 0,817	+ 0,809
6	BA	D	19,9672	+ 0,807	+ 0,829	+ 0,831
7	BA	G	19,9731	+ 0,790	+ 0,790	+ 0,790
8	BA	G	19,9660	+ 0,796	+ 0,800	+ 0,787
Moyenne				+ 0,766	+ 0,778	+ 0,776
s(moy.)				0,015	0,014	0,014
D : moy. (AB,BA)				+ 0,750	+ 0,772	+ 0,772
G : moy. (AB,BA)				+ 0,781	+ 0,784	+ 0,780

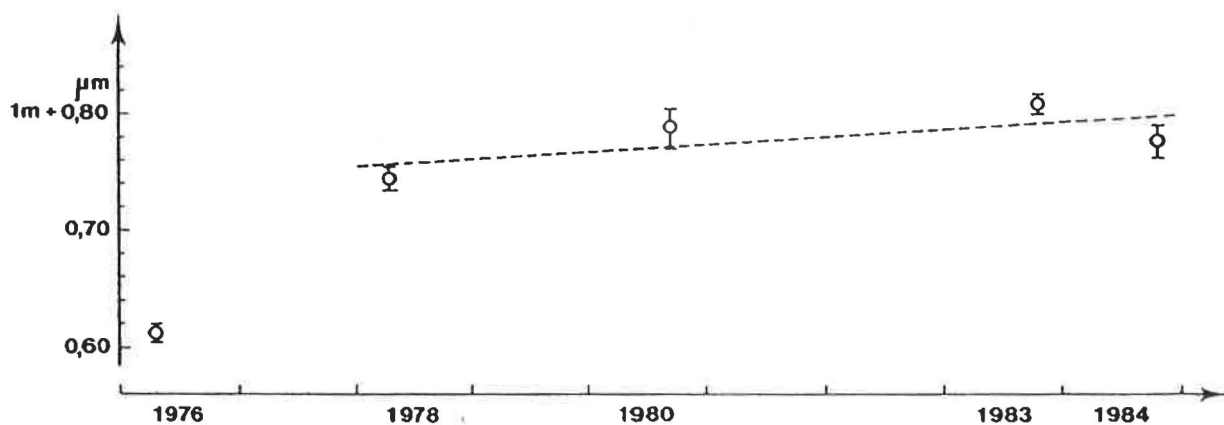


Fig. 1.- Règle N° 12924, incertitude statistique seule : ± 1 écart-type. Entre 1976 et 1978, discontinuité d'environ 130 nm ; depuis 1978, pente de 6,2 nm par an.

II b - Etalonnage des traits décimétriques

Au cours des huit séries de mesures de l'intervalle principal, les traits décimétriques sont rattachés aux traits 0 et 1000 mm. Dans les tableaux 6 à 10 sont portés les résultats de toutes les mesures faites au cours des cinq déterminations. La 1^{ère} colonne indique le numéro de la mesure, la 2^e indique la position de la règle (AB ou BA), la 3^e indique le microscope utilisé (gauche ou droit).

On remarque, dans chaque tableau, que la dispersion va croissant des extrémités vers le milieu de la règle. Cet effet peut être attribué à la courbure de la règle dans le plan vertical qui entraîne un défaut de focalisation du trait sous le microscope, défaut maximal au milieu de la règle. On peut, en effet, s'attendre à ce que cette défocalisation se traduise par des écarts notables lors du changement de microscope et surtout lors du retournement de la règle.

On peut noter, aussi, une augmentation sensible des écarts-types de 1976 à 1984. Bien que n'ayant pas de preuves, on peut soupçonner un dérèglement progressif du système photoélectrique de nos microscopes qui accentuerait l'effet de défocalisation, mais qui doit se trouver éliminé par le retournement de la règle : c'est d'ailleurs bien ce que montre le tableau 11.

Les résultats des cinq déterminations, qui résultent chacune de la moyenne de huit mesures, sont résumés dans le tableau 11 et la figure 2 (a et b). A la dernière ligne de ce tableau on a calculé l'écart-type s d'une détermination, d'après la dispersion des cinq déterminations.

Tableau 6
Règle N° 12924 - Etalonnage des traits décimétriques
unité : nm

avril 1976

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1 m
1 AB D	0	248	167	337	702	823	580	632	708	246	0
2 AB D	0	252	164	331	704	830	581	636	716	252	0
3 AB G	0	217	148	330	689	820	569	629	696	253	0
4 AB G	0	231	148	329	692	820	568	618	691	241	0
5 BA G	0	255	275	514	835	972	728	772	811	310	0
6 BA G	0	202	259	504	824	969	724	768	812	309	0
7 BA D	0	205	243	479	807	947	691	739	788	292	0
8 BA D	0	199	241	478	803	943	688	736	780	289	0
Moyenne	0	226	206	413	757	890	641	691	750	274	0
s(moy.)	0	8	19	31	23	26	26	24	18	10	0

Tableau 7
Règle N° 12924 - Etalonnage des traits décimétriques
unité : nm

avril - mai 1978

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1 m
1 AB D	0	68	100	254	668	811	578	607	691	245	0
2 AB D	0	70	112	264	672	821	591	616	700	248	0
3 AB G	0	93	159	349	758	910	666	687	726	259	0
4 AB G	0	90	148	331	725	885	647	670	715	261	0
5 BA G	0	162	241	442	801	983	746	787	821	333	0
6 BA G	0	156	215	405	761	943	697	755	801	326	0
7 BA D	0	177	269	489	862	1042	780	822	835	334	0
8 BA D	0	183	276	498	869	1044	794	824	838	336	0
Moyenne	0	125	190	379	764	930	687	721	766	293	0
s(moy.)	0	17	25	34	27	32	29	31	23	15	0

Tableau 8
Règle N° 12924 - Etalonnage des traits décimétriques
unité : nm

<u>septembre 1980</u>												
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1 m	
1 AB D	0	108	96	250	642	758	533	581	678	240	0	
2 AB D	0	101	101	252	652	756	524	576	665	234	0	
3 AB G	0	158	214	420	818	928	682	721	752	283	0	
4 AB G	0	153	233	462	883	978	726	761	770	291	0	
5 BA G	0	164	179	339	700	838	607	682	743	272	0	
6 BA G	0	170	189	330	699	841	603	680	738	275	0	
7 BA D	0	231	335	553	937	1061	802	841	837	323	0	
8 BA D	0	231	324	538	931	1054	787	833	830	317	0	
Moyenne	0	164	209	393	783	902	658	709	752	279	0	
s(moy.)	0	17	31	42	44	43	38	36	22	11	0	

Tableau 9
Règle N° 12924 - Etalonnage des traits décimétriques
unité : nm

<u>octobre - novembre 1983</u>												
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1 m	
1 AB D	0	70	22	158	559	694	350	512	600	189	0	
2 AB D	0	67	19	158	562	698	343	513	602	190	0	
3 AB G	0	201	274	511	947	1079	722	833	799	300	0	
4 AB G	0	199	270	507	940	1070	718	829	797	299	0	
5 BA G	0	157	154	328	702	873	551	721	731	263	0	
6 BA G	0	166	168	340	710	875	545	709	722	257	0	
7 BA D	0	267	383	629	1040	1193	886	962	895	346	0	
8 BA D	0	269	382	639	1045	1199	905	973	902	350	0	
Moyenne	0	174	209	409	813	960	628	756	756	274	0	
s(moy.)	0	27	51	68	72	72	77	63	41	22	0	

Tableau 10
Règle N° 12924 - Etalonnage des traits décimétriques
unité : nm

<u>octobre 1984</u>												
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1 m	
1 AB G	0	196	280	496	918	1042	790	814	783	295	0	
2 AB G	0	188	269	482	908	1042	790	811	790	295	0	
3 AB D	0	68	45	167	561	599	461	516	588	177	0	
4 AB D	0	72	45	169	558	604	460	518	592	179	0	
5 BA D	0	264	381	622	1018	1170	901	931	888	348	0	
6 BA D	0	259	374	614	1014	1163	900	928	888	348	0	
7 BA G	0	145	149	294	639	797	559	623	680	232	0	
8 BA G	0	145	150	294	640	799	563	625	683	235	0	
Moyenne	0	167	212	392	782	902	678	721	736	264	0	
s(moy.)	0	26	47	66	71	83	66	61	42	24	0	

Tableau 11
Règle N° 12924
Résumé de l'étalonnage des traits décimétriques
unité : nm

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1 m
1976	0	226	206	413	757	890	641	691	750	274	0
1978	0	125	190	379	764	930	687	721	766	293	0
1980	0	164	209	393	783	902	658	709	752	279	0
1983	0	174	209	409	813	960	628	756	756	274	0
1984	0	167	212	392	782	902	678	721	736	264	0
(1 $\frac{s}{\text{détermination}}$)		36	9	14	22	28	25	24	11	11	

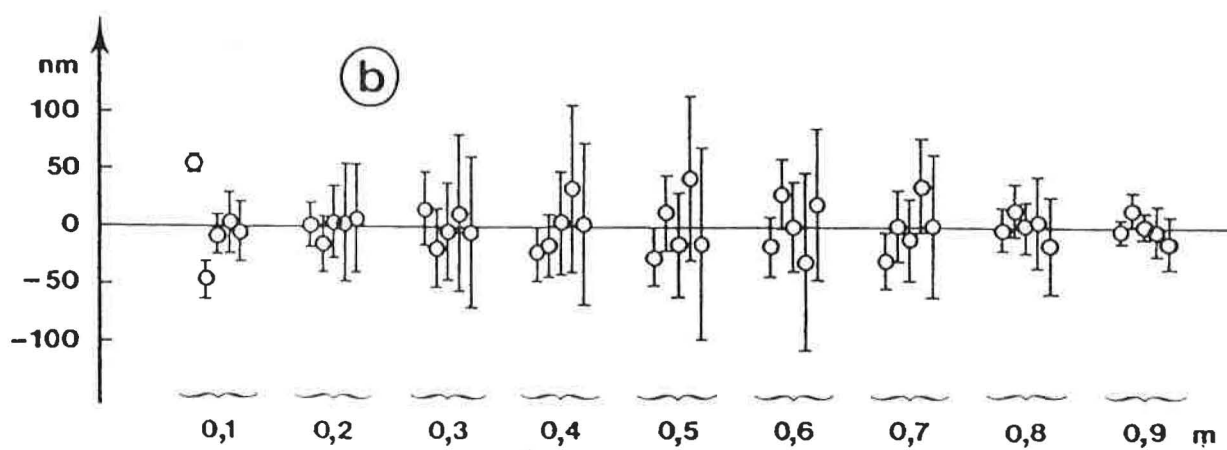
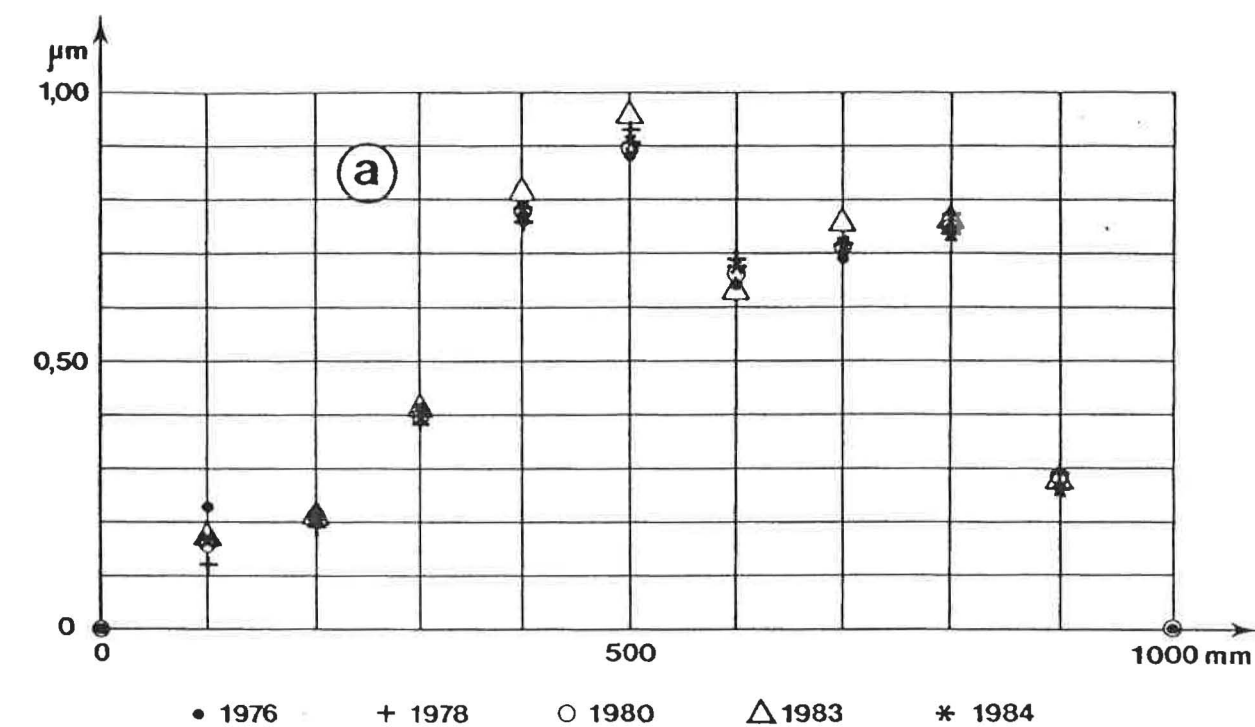


Fig. 2.- Règle N° 12924, étalonnage des traits décimétriques.
 a. Valeurs obtenues, pour chaque trait, au cours des cinq déterminations.
 b. Dispersion des valeurs obtenues autour de la moyenne des cinq déterminations (barres d'incertitude : ± 1 écart-type).

La reproductibilité des moyennes des pointés de ces traits, caractérisée par les valeurs de l'écart-type $\underline{s}$ (tableau 11), est satisfaisante, sauf pour le trait 0,1 m dont l'aspect s'est probablement modifié, peut-être à la suite de nettoyages ; en particulier, cette reproductibilité est meilleure que ne le laisseraient prévoir les incertitudes de chacune des cinq déterminations, incertitudes calculées d'après la dispersion des huit mesures constituant chacune de ces déterminations.

II c - Etalonnage des traits centimétriques, millimétriques et déci-millimétriques

Les traits centimétriques du premier et du dernier décimètre, les traits millimétriques du premier et du dernier centimètre et les traits déci-millimétriques des deux millimètres supplémentaires ont été rattachés aux traits décimétriques. Ces rattachements ont été faits au cours de mesures complémentaires ; ils ont été effectués pour les deux positions de la règle par rapport au comparateur et avec les deux microscopes, après chaque mesure de l'intervalle principal et étalonnage des traits décimétriques, sans modification des réglages. Les résultats (moyennes des quatre déterminations) apparaissent dans les tableaux 12 à 16, dans la colonne ETALONNAGE.

II d - Résultats finaux : intervalle principal et étalonnage

Aux tableaux 12 à 16, dans la colonne ETALONNAGE, sont donnés les écarts de position des traits par rapport à une échelle régulière s'appuyant sur les traits 0 et 1000 mm. En combinant ces résultats avec la valeur à 20 °C de l'intervalle principal 0-1000 mm, on obtient les écarts des traits étudiés par rapport à leurs positions nominales : ces écarts sont donnés dans la colonne POSITION.

II e - Coefficient de dilatation linéique

Deux études de ce coefficient ont été faites : l'une en avril et mai 1968, l'autre en avril et mai 1978.

En 1968, ne disposant pas encore de la méthode du comptage de franges d'une radiation de laser, la longueur de la règle était mesurée en deux fois : 0-500 mm et 500-1000 mm avec quatre radiations du krypton 86. Treize mesures ont été effectuées entre 17,26 °C et 22,73 °C.

On a obtenu $\underline{\alpha}_{20} = 11,740 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ avec un écart-type $\underline{s} = 0,0035 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

En 1978, on a utilisé la méthode décrite en I c -. Les treize mesures ont été effectuées entre 17,13 °C et 23,45 °C.

Tableau 12

Règle N° 12924

à 20 °C

avril 1976

TRAIT	ETALONNAGE	POSITION
-3,0 mm	0,521 μm	0,519 μm
-2,9	0,505	0,503
-2,8	0,463	0,461
-2,7	0,503	0,501
-2,6	0,450	0,448
-2,5	0,532	0,530
-2,4	0,394	0,393
-2,3	0,469	0,468
-2,2	0,439	0,438
-2,1	0,514	0,513
-2,0	0,382	0,381
0,0	0,000	0,000
1,0	0,043	0,044
2,0	-0,003	-0,002
3,0	0,011	0,013
4,0	-0,026	-0,024
5,0	-0,095	-0,092
6,0	-0,024	-0,020
7,0	0,041	0,045
8,0	0,094	0,099
9,0	0,096	0,102
10,0	0,114	0,120
20,0	0,216	0,228
30,0	0,225	0,243
40,0	0,095	0,119
50,0	-0,010	0,021
60,0	0,213	0,250
70,0	0,124	0,167
80,0	-0,040	0,009
90,0	0,112	0,167
100,0	0,226	0,287
200,0	0,206	0,328
300,0	0,413	0,596
400,0	0,757	1,002
500,0	0,890	1,196

TRAIT	ETALONNAGE	POSITION
500,0 mm	0,890 μm	1,196 μm
600,0	0,641	1,008
700,0	0,691	1,120
800,0	0,750	1,240
900,0	0,274	0,825
910,0	0,239	0,796
920,0	0,148	0,711
930,0	0,192	0,761
940,0	0,015	0,590
950,0	0,119	0,700
960,0	-0,011	0,577
970,0	0,205	0,799
980,0	0,145	0,745
990,0	0,003	0,609
991,0	0,032	0,638
992,0	-0,045	0,562
993,0	-0,043	0,565
994,0	-0,039	0,569
995,0	-0,083	0,526
996,0	0,027	0,637
997,0	0,001	0,611
998,0	0,024	0,635
999,0	0,015	0,626
1000,0	0,000	0,612
1002,0	-0,252	0,361
1002,1	-0,075	0,538
1002,2	-0,326	0,287
1002,3	-0,051	0,562
1002,4	-0,377	0,236
1002,5	-0,131	0,483
1002,6	-0,370	0,244
1002,7	-0,110	0,504
1002,8	-0,393	0,221
1002,9	-0,166	0,448
1003,0	-0,445	0,169

Tableau 13

Règle N° 12924

à 20 °C

avril - mai 1978

TRAIT	ETALONNAGE	POSITION	TRAIT	ETALONNAGE	POSITION
-3,0 mm	0,498 μ m	0,496 μ m	500,0 mm	0,930 μ m	1,302 μ m
-2,9	0,476	0,474	600,0	0,687	1,134
-2,8	0,425	0,423	700,0	0,721	1,242
-2,7	0,461	0,459	800,0	0,766	1,361
-2,6	0,424	0,422	900,0	0,293	0,963
-2,5	0,497	0,495	910,0	0,255	0,932
-2,4	0,365	0,363	920,0	0,125	0,809
-2,3	0,430	0,428	930,0	0,201	0,893
-2,2	0,407	0,405	940,0	0,020	0,719
-2,1	0,489	0,487	950,0	0,122	0,829
-2,0	0,344	0,343	960,0	-0,016	0,698
0,0	0,000	0,000	970,0	0,185	0,907
1,0	0,005	0,006	980,0	0,137	0,866
2,0	-0,023	-0,022	990,0	0,015	0,752
3,0	-0,019	-0,017	991,0	-0,002	0,735
4,0	-0,052	-0,049	992,0	-0,038	0,700
5,0	-0,108	-0,104	993,0	-0,049	0,690
6,0	-0,049	-0,045	994,0	-0,036	0,704
7,0	0,011	0,016	995,0	-0,072	0,668
8,0	0,035	0,041	996,0	0,028	0,769
9,0	0,057	0,064	997,0	0,006	0,748
10,0	0,089	0,096	998,0	0,030	0,773
20,0	0,166	0,181	999,0	0,018	0,761
30,0	0,181	0,203	1000,0	0,000	0,744
40,0	0,068	0,098	1002,0	-0,244	0,501
50,0	-0,047	-0,010	1002,1	-0,094	0,652
60,0	0,189	0,234	1002,2	-0,322	0,424
70,0	0,096	0,148	1002,3	-0,054	0,692
80,0	-0,075	-0,015	1002,4	-0,383	0,363
90,0	0,065	0,132	1002,5	-0,131	0,615
100,0	0,125	0,199	1002,6	-0,370	0,376
200,0	0,190	0,339	1002,7	-0,090	0,656
300,0	0,379	0,602	1002,8	-0,391	0,355
400,0	0,765	1,062	1002,9	-0,171	0,575
500,0	0,930	1,302	1003,0	-0,444	0,302

Tableau 14

Règle N° 12924

à 20 °C

septembre 1980

TRAIT	ETALONNAGE	POSITION	TRAIT	ETALONNAGE	POSITION
-3,0 mm	0,548 μ m	0,546 μ m	500,0 mm	0,902 μ m	1,295 μ m
-2,9	0,514	0,512	600,0	0,658	1,130
-2,8	0,480	0,478	700,0	0,709	1,260
-2,7	0,513	0,511	800,0	0,752	1,381
-2,6	0,467	0,465	900,0	0,280	0,988
-2,5	0,673	0,671	910,0	0,239	0,955
-2,4	0,404	0,402	920,0	0,145	0,869
-2,3	0,488	0,486	930,0	0,189	0,921
-2,2	0,506	0,504	940,0	0,001	0,741
-2,1	0,534	0,532	950,0	0,137	0,885
-2,0	0,391	0,389	960,0	-0,021	0,735
0,0	0,000	0,000	970,0	0,181	0,944
1,0	0,185	0,186	980,0	0,118	0,889
2,0	0,060	0,062	990,0	0,009	0,788
3,0	0,025	0,027	991,0	-0,002	0,778
4,0	0,095	0,098	992,0	-0,049	0,732
5,0	-0,167	-0,163	993,0	-0,065	0,716
6,0	-0,010	-0,005	994,0	-0,056	0,726
7,0	0,051	0,057	995,0	-0,087	0,696
8,0	0,085	0,091	996,0	0,097	0,881
9,0	0,102	0,109	997,0	-0,016	0,769
10,0	0,122	0,130	998,0	0,017	0,802
20,0	0,213	0,229	999,0	0,004	0,790
30,0	0,225	0,249	1000,0	0,000	0,787
40,0	0,109	0,140	1002,0	-0,216	0,573
50,0	0,000	0,039	1002,1	-0,104	0,685
60,0	0,236	0,283	1002,2	-0,330	0,459
70,0	0,123	0,178	1002,3	-0,066	0,723
80,0	-0,037	0,026	1002,4	-0,399	0,390
90,0	0,095	0,166	1002,5	-0,146	0,643
100,0	0,164	0,243	1002,6	-0,313	0,476
200,0	0,209	0,366	1002,7	-0,123	0,666
300,0	0,393	0,629	1002,8	-0,409	0,380
400,0	0,783	1,098	1002,9	-0,194	0,595
500,0	0,902	1,295	1003,0	-0,461	0,328

Tableau 15

Règle N° 12924

à 20 °C

octobre - novembre 1983

TRAIT	ETALONNAGE	POSITION	TRAIT	ETALONNAGE	POSITION
-3,0 mm	0,557 μ m	0,555 μ m	500,0 mm	0,960 μ m	1,364 μ m
-2,9	0,543	0,541	600,0	0,627	1,112
-2,8	0,492	0,490	700,0	0,756	1,322
-2,7	0,526	0,524	800,0	0,756	1,402
-2,6	0,458	0,456	900,0	0,275	1,002
-2,5	0,555	0,553	910,0	0,231	0,966
-2,4	0,401	0,399	920,0	0,141	0,884
-2,3	0,480	0,478	930,0	0,193	0,944
-2,2	0,478	0,476	940,0	0,017	0,777
-2,1	0,533	0,531	950,0	0,118	0,886
-2,0	0,415	0,413	960,0	-0,022	0,754
0,0	0,000	0,000	970,0	0,159	0,943
1,0	0,057	0,058	980,0	0,102	0,894
2,0	0,031	0,033	990,0	-0,020	0,780
3,0	0,024	0,026	991,0	-0,002	0,799
4,0	-0,010	-0,007	992,0	-0,058	0,744
5,0	-0,070	-0,066	993,0	-0,064	0,738
6,0	-0,009	-0,004	994,0	-0,055	0,748
7,0	0,073	0,079	995,0	-0,078	0,726
8,0	0,092	0,098	996,0	0,023	0,828
9,0	0,102	0,109	997,0	-0,035	0,771
10,0	0,151	0,159	998,0	-0,029	0,777
20,0	0,239	0,255	999,0	0,003	0,810
30,0	0,234	0,258	1000,0	0,000	0,808
40,0	0,105	0,137	1002,0	-0,238	0,572
50,0	0,026	0,066	1002,1	-0,121	0,689
60,0	0,236	0,284	1002,2	-0,350	0,460
70,0	0,150	0,207	1002,3	-0,036	0,774
80,0	-0,029	0,036	1002,4	-0,398	0,412
90,0	0,112	0,185	1002,5	-0,170	0,640
100,0	0,174	0,255	1002,6	-0,388	0,422
200,0	0,209	0,370	1002,7	-0,124	0,686
300,0	0,409	0,651	1002,8	-0,431	0,379
400,0	0,813	1,136	1002,9	-0,194	0,616
500,0	0,960	1,364	1003,0	-0,460	0,350

Tableau 16

Règle N° 12924

à 20 °C

octobre 1984

TRAIT	ETALONNAGE	POSITION	TRAIT	ETALONNAGE	POSITION
-3,0 mm	0,532 μm	0,530 μm	500,0 mm	0,902 μm	1,290 μm
-2,9	0,515	0,513	600,0	0,678	1,143
-2,8	0,471	0,469	700,0	0,721	1,264
-2,7	0,506	0,504	800,0	0,736	1,357
-2,6	0,463	0,461	900,0	0,264	0,962
-2,5	0,536	0,534	910,0	0,210	0,916
-2,4	0,398	0,396	920,0	0,141	0,855
-2,3	0,481	0,479	930,0	0,194	0,916
-2,2	0,450	0,448	940,0	-0,001	0,728
-2,1	0,529	0,527	950,0	0,108	0,845
-2,0	0,387	0,385	960,0	-0,024	0,721
0,0	0,000	0,000	970,0	0,152	0,905
1,0	0,043	0,044	980,0	0,110	0,870
2,0	0,010	0,012	990,0	-0,013	0,755
3,0	-0,001	0,001	991,0	-0,020	0,749
4,0	-0,033	-0,030	992,0	-0,063	0,707
5,0	-0,098	-0,094	993,0	-0,070	0,701
6,0	-0,023	-0,018	994,0	-0,069	0,702
7,0	0,043	0,048	995,0	-0,092	0,680
8,0	0,083	0,089	996,0	0,013	0,786
9,0	0,100	0,107	997,0	-0,016	0,758
10,0	0,125	0,133	998,0	-0,018	0,756
20,0	0,215	0,231	999,0	0,004	0,779
30,0	0,239	0,262	1000,0	0,000	0,776
40,0	0,108	0,139	1002,0	-0,270	0,508
50,0	0,030	0,069	1002,1	-0,115	0,663
60,0	0,230	0,277	1002,2	-0,350	0,428
70,0	0,135	0,189	1002,3	-0,045	0,733
80,0	-0,042	0,020	1002,4	-0,407	0,371
90,0	0,102	0,172	1002,5	-0,170	0,608
100,0	0,167	0,245	1002,6	-0,391	0,387
200,0	0,212	0,367	1002,7	-0,128	0,650
300,0	0,392	0,625	1002,8	-0,417	0,361
400,0	0,782	1,093	1002,9	-0,195	0,583
500,0	0,902	1,290	1003,0	-0,459	0,319

On a obtenu $\alpha_{20} = 11,749 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ avec un écart-type $s = 0,0029 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Ces écarts-types représentent la composante statistique des incertitudes.

II f - Défaut de planéité de la surface tracée

Cette étude a été faite en 1980 et recommencée en 1983.

Le tableau 17 indique les cotes des traits décimétriques par rapport à l'axe horizontal joignant les traits 0 et 1000 mm.

Tableau 17

Traits	1980	1983	(1983) - (1980)
0 mm	0 μm	0 μm	0 μm
100	- 16	- 12	+ 4
200	- 32	- 33	- 1
300	- 40	- 40	0
400	- 43	- 46	- 3
500	- 44	- 41	+ 3
600	- 44	- 36	+ 8
700	- 36	- 35	+ 1
800	- 24	- 25	- 1
900	- 10	- 12	- 2
1000	0	0	0

L'incertitude de ces cotes étant de l'ordre de 2 μm (écart-type), la courbure de la règle ne semble pas avoir évolué de façon significative pendant les trois dernières années.

III - Règle N° 12924 - Incertitudes

Dans les paragraphes précédents, les résultats sont indiqués avec un écart-type calculé d'après la dispersion des mesures ; les composantes correspondantes de l'incertitude appartiennent donc au type A.

III a - Examen complémentaire des causes d'incertitude et évaluations

Dans ce qui suit, nous nous sommes efforcés, conformément à la Recommandation 1 (CI-1981) du CIPM, d'appliquer les propositions du Groupe de travail sur les incertitudes réuni au BIPM en 1980.

En particulier, en considérant la liste que nous avons donnée aux pages 18 et 19 de notre circulaire du 3 novembre 1976, nous avons été amenés à reconnaître que certaines

incertitudes qui y sont mentionnées sont du type A et sont incluses dans l'incertitude statistique évaluée à partir de la dispersion des mesures ; nous dirons qu'elles sont du type A', alors que quelques autres, bien qu'aussi du type A, n'y sont pas incluses ; nous dirons qu'elles sont du type A" et dans ce cas, nous indiquerons la méthode d'évaluation. Quant à celles qui appartiennent certainement au type B, elles ont été estimées. Les valeurs indiquées doivent, dans tous les cas être considérées comme des écarts-types relatifs.

Au cours de cette estimation, nous avons été amenés à identifier des effets systématiques qui doivent, en principe, donner lieu à une correction. Les valeurs correspondantes sont repérées par l'indicateur (C).

1 - Mesure de l'intervalle principal

1-1 - Détermination de la variation de l'ordre d'interférence pendant le déplacement :

- mesure des excédents fractionnaires avant et après le déplacement : incertitude du type A' ;
- défaut de centrage du diaphragme de sortie :
valeur estimée de la moyenne - $1,4 \times 10^{-9}$ (C)
valeur estimée de l'écart-type :
 $1,2 \times 10^{-9}$; le réglage étant effectué
plusieurs fois par série, cette
incertitude est du type A'.

1-2 - Détermination du déplacement :

- longueur d'onde de la radiation du krypton 86 :
incertitude admise à la suite de comparaisons
entre réalisations dans divers
laboratoires (type A") $1,3 \times 10^{-9}$
- mesure de l'indice de réfraction de l'air :
 - longueur de la chambre à vide :
incertitude estimée d'après notre
expérience dans ce genre de mesures de
longueur (B) 5×10^{-9}
 - mesure des excédents fractionnaires (A').
 - influence des glaces de fermeture :
incertitude de la correction déterminée
au cours d'expériences auxiliaires (B) 5×10^{-9}
 - imperfection du vide : valeur de la
moyenne calculée d'après la moyenne de
la pression résiduelle mesurée + 2×10^{-9} (C)
valeur de l'écart-type estimée d'après
les écarts par rapport à la pression
moyenne : $0,3 \times 10^{-9}$ (A') ;
 - inhomogénéité de l'indice dans le caisson :
incertitude estimée d'après des
expériences antérieures (B) 10×10^{-9}

- dérive du trajet optique de référence :
incertitude en majeure partie annulée par la symétrie des séries ; le résidu est supposé être du type statistique (A') ;
- différence entre le déplacement mesuré et le déplacement réel due au défaut de parallélisme entre l'axe optique et la direction de la translation : cette incertitude évaluée d'après la valeur des retouches à effectuer à chaque nouveau réglage est nettement inférieure à 1×10^{-9} ; elle peut être négligée.

1-3 - Mesures auxiliaires

- étalonnage du microscope photoélectrique :
incertitude du type A' en raison des multiples pointés effectués sur chaque trait ; le résidu (C) est négligé du fait de la très faible valeur des lectures moyennes ;
- défaut de verticalité de l'axe optique du microscope combiné au défaut de mise au point des traits : incertitude du type A', le réglage de mise au point étant refait à chaque série ;
- défaut de mise au point du trait combiné à la réponse du microscope en fonction de ce défaut : incertitude de moyenne nulle et du type A' du fait du retournement de la règle.

1-4 - Correction d'obliquité (ou d'étendue géométrique) :

- incertitude évaluée de façon statistique d'après les écarts résiduels lors de la représentation par une fonction linéaire de la différence de marche apparente en fonction de l'aire du diaphragme circulaire de sortie (A'') 5×10^{-9}

1-5 - Correction de dilatation :

a) Mesure de la température

- étalonnage du thermomètre à résistance de platine, réalisation de l'EIPT-68 : selon la section de thermométrie, 0,3 mK (A'' et B) 4×10^{-9}
- écart entre la température du thermomètre à résistance de platine et celle du bloc de cuivre, estimation : 0,3 mK (B) 4×10^{-9}
- étalonnage des thermocouples combiné avec la valeur moyenne de l'indication de ces appareils : 0,2 mK (A'') 2×10^{-9}
- forces électromotrices parasites : estimation 0,5 mK (B) 6×10^{-9}

- b) Coefficient de dilatation de la règle
combiné avec l'écart entre 20 °C et la
température moyenne des mesures (A'') 1×10^{-9}

Les deux seules corrections résiduelles (non prises en compte en I a) à effectuer correspondent donc au défaut de centrage du diaphragme ($+ 1,4 \times 10^{-9}$) et à l'imperfection du vide dans la chambre du réfractomètre ($- 2 \times 10^{-9}$) ; la somme, égale à $- 0,6 \times 10^{-9}$, a été considérée comme négligeable.

La somme quadratique des incertitudes des types A'' et B correspond à un écart-type relatif de :
 16×10^{-9} .

2 - Etalonnage

Selon le principe même des "étalonnages", l'incertitude est nulle aux deux extrémités de la règle. Les facteurs considérés : inhomogénéité de l'indice de réfraction de l'air, dérive du trajet optique de référence, dérive de la longueur d'onde du laser, inhomogénéité de la température le long de la règle, peuvent entraîner des effets comportant une composante "systématique" ; le défaut de verticalité des microscopes combiné à la courbure de la règle dans le plan vertical donne un effet presque exclusivement systématique. Ces effets sont nuls aux extrémités de la règle et maximaux vers son milieu, mais ils prennent des valeurs opposées lors du retournement de la règle. Ils sont donc déjà inclus dans l'incertitude statistique précédemment évaluée. L'effet de l'incertitude de l'étalonnage des microscopes photoélectriques peut présenter aussi une composante "systématique" du fait que les lectures sont directement liées à la position des traits. En fait, au cours de deux séries distinctes, les conditions ambiantes sont différentes et les lectures ne présentent qu'une très faible corrélation. De plus, l'effet systématique résiduel prend aussi une valeur opposée lors du retournement de la règle. Il nous semble donc que l'incertitude statistique évaluée d'après la dispersion des mesures soit la seule à prendre en compte, elle est d'ailleurs d'autant plus grande que le trait considéré est plus proche du milieu de la règle, conformément à ce que le raisonnement précédent laisse prévoir.

3 - Coefficient de dilatation

Les facteurs qui affectent systématiquement de quantités égales les diverses mesures entraînent naturellement une incertitude nulle sur le coefficient de dilatation mesuré. On peut citer : la valeur vraie de la longueur d'onde utilisée, la longueur de la chambre à vide du réfractomètre, l'effet des glaces de fermeture, l'imperfection du vide, la corrélation entre l'inhomogénéité de l'indice de l'air et la position du chariot porte-règle, le défaut de parallélisme entre la direction de la translation et l'axe optique.

Par ailleurs, la méthode de réduction (ajustement d'une fonction linéaire) élimine les effets non corrélés avec la température par exemple l'incertitude de l'étalonnage des microscopes combinée à la différence des lectures moyennes pour les traits extrêmes de la règle, l'incertitude de l'étalonnage des thermocouples combinée à la lecture moyenne de ces appareils.

Il semble donc qu'il faille seulement considérer les facteurs suivants :

- réalisation de l'EIPT-68 (incertitude sur la "grandeur du kelvin" au voisinage de 20 °C)
(A" et B) (0,3 mK pour $t - 20\text{ °C} = 3\text{ K}$) (B) 2×10^{-5}
- corrélation de la température du thermomètre à résistance avec l'écart entre cette température et celle du bloc de cuivre
(0,3 mK pour $t - 20\text{ °C} = 3\text{ K}$) (B) 1×10^{-4}
- étalonnage des thermocouples et corrélation entre les forces électromotrices parasites et la température (0,6 mK pour $t - 20\text{ °C} = 3\text{ K}$) (B) .. 2×10^{-4}

La somme quadratique des incertitudes des types A" et B correspond à un écart-type relatif de $2,2 \times 10^{-4}$, soit un écart-type absolu de

$$2,6 \times 10^{-9}\text{ K}^{-1}$$

III b - Incertitudes composées

1 - Intervalle principal (écart-type)

Pour chacune des cinq déterminations on obtient les valeurs suivantes :

	1976	1978	1980	1983	1984
Incertainitude statistique (type A')	7 nm	10 nm	16 nm	9 nm	14 nm
Incertainitude complémentaire (types A" et B)	16	16	16	16	16
Somme quadratique	17 nm	19 nm	23 nm	18 nm	21 nm

2 - Etalonnage

Au paragraphe III a - 2, on explique que l'incertitude statistique (type A') seule est à prendre en compte pour l'"étalonnage" des traits intermédiaires.

2 a - Traits décimétriques - Récapitulation des incertitudes tirées des tableaux 6 à 10 (écarts-types)

Tableau 18

	1976	1978	1980	1983	1984
0,1 m	8 nm	17 nm	17 nm	27 nm	26 nm
0,2	19	25	31	51	47
0,3	31	34	42	68	66
0,4	23	27	44	72	71
0,5	26	32	43	72	83
0,6	26	29	38	77	66
0,7	24	31	36	63	61
0,8	18	23	22	41	42
0,9	10	15	11	22	24

2 b - traits centimétriques

L'écart-type (type A') sur tous ces traits est sensiblement le même dans chaque détermination. Les moyennes sont portées ci-après :

1976	1978	1980	1983	1984
8 nm	13 nm	15 nm	21 nm	20 nm

2 c - traits millimétriques et décimillimétriques

L'écart-type (type A') sur tous ces traits est sensiblement le même dans chaque détermination :

1976	1978	1980	1983	1984
3,5 nm	4,5 nm	8 nm	7 nm	5 nm

3 - Coefficient de dilatation (écarts-types)

	1968	1978
Incertitude statistique (type A')	$3,5 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$	$2,9 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$
Incertitude complémentaire (types A'' et B)	$2,6 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$	$2,6 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$
Somme quadratique	$4,4 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$	$3,9 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$

IV - Règle de 500 mm N° 16806 - Résultats et incertitudes

La règle N° 16806 a été étudiée deux fois : en mars et avril 1975 et en avril 1978.

IV a - Intervalle principal

Durant son étude, la règle reposait sur deux supports (couteau et rouleau oscillant) placés à l'aplomb des traits gravés sur les faces latérales de la règle et distants d'environ 291 mm. La mise au point a toujours été faite, sous le microscope photoélectrique, avec les traits extrêmes de l'intervalle principal. La région de chaque trait qui a été pointée était limitée par la longueur du spot des microscopes correspondant à l'écartement des repères d'alignement de la règle : environ 0,16 mm.

La détermination de 1975 comporte douze mesures : trois pour chacune des deux positions de la règle par rapport au comparateur et pour chacun des deux microscopes. La détermination de 1978 comporte huit mesures : deux pour chacune des deux positions de la règle et pour chacun des microscopes.

Dans les tableaux 19 et 20, on trouve dans la 1^{ère} colonne le numéro de la mesure, dans la 2^e la position de la règle, dans la 3^e le microscope utilisé, dans la 4^e la température de la règle, dans les 5^e, 7^e, 9^e les écarts par rapport à la valeur nominale obtenus successivement par comptage de franges, par mesure statique avec la radiation du laser et par mesure statique avec la radiation du krypton 86. Dans les colonnes 6, 8 et 10 apparaissent les moyennes partielles. Au bas des colonnes sont indiquées les moyennes des 12 ou 8 mesures suivies de leur écart-type calculé d'après la dispersion des mesures : c'est la partie aléatoire de l'incertitude des résultats.

Enfin, on a aussi mentionné, à titre indicatif les résultats obtenus avec chaque microscope.

La différence entre les résultats (radiation orangée du krypton 86) de 1975 et 1978 est de 0,517 μm . C'est une variation très importante et difficilement explicable, si ce n'est par le fait que le tracé est très fragile et probablement très vulnérable aux nettoyages.

Cette instabilité, confirmée par d'autres observations, a conduit à l'abandon de cette règle pour la suite de la comparaison.

Tableau 19
Règle N° 16806 (mars - avril 1975)

				à 20 °C			
				comptage		mesure statique	
°C				μm		laser μm	Kr μm
1	AB	D	20,0259	+ 0,381	+ 0,387	+ 0,372	+ 0,373
2	AB	D	20,0415	+ 0,398		+ 0,386	+ 0,376
3	AB	D	20,0533	+ 0,383		+ 0,370	+ 0,372
4	AB	G	20,0140	+ 0,384	+ 0,406	+ 0,372	+ 0,374
5	AB	G	20,0373	+ 0,411		+ 0,400	+ 0,395
6	AB	G	20,0452	+ 0,423		+ 0,414	+ 0,414
7	BA	G	19,7787	+ 0,465	+ 0,443	+ 0,462	+ 0,464
8	BA	G	19,8348	+ 0,440		+ 0,431	+ 0,440
9	BA	G	19,8395	+ 0,425		+ 0,426	+ 0,423
10	BA	D	19,9214	+ 0,455	+ 0,455	+ 0,459	+ 0,460
11	BA	D	19,9981	+ 0,452		+ 0,441	+ 0,452
12	BA	D	20,0158	+ 0,457		+ 0,455	+ 0,456
Moyenne			19,9671	+ 0,423		+ 0,416	+ 0,417
s(moy.)				0,009		0,010	0,010
D : moy. (AB,BA)				+ 0,421		+ 0,414	+ 0,416
G : moy. (AB,BA)				+ 0,425		+ 0,418	+ 0,418

Tableau 20
Règle N° 16806 (juillet 1978)

				à 20 °C		
				comptage	mesure statique	
				°C	µm	laser µm Kr µm
1	AB	D	19,9483	+ 0,917	}+ 0,894	+ 0,921
2	AB	D	19,9687	+ 0,871		+ 0,871 }+ 0,896
3	AB	G	19,9762	+ 0,891	}+ 0,884	+ 0,880
4	AB	G	19,9904	+ 0,877		+ 0,870 }+ 0,875
5	BA	G	19,9754	+ 0,996	}+ 1,003	+ 0,987
6	BA	G	19,9767	+ 1,010		+ 1,009 }+ 0,998
7	BA	D	20,0094	+ 1,018	}+ 0,962	+ 1,015
8	BA	D	20,0153	+ 0,905		+ 0,898 }+ 0,956
Moyenne				19,9826	+ 0,936	+ 0,931
s(moy.)					0,022	0,022
D : moy. (AB,BA)					+ 0,928	+ 0,928
G : moy. (AB,BA)					+ 0,944	+ 0,938

IV b - Etalonnage des traits décimétriques

Au cours des douze (ou huit) séries de mesures de l'intervalle principal, les traits décimétriques sont rattachés aux traits 0 et 500 mm. Dans les tableaux 21 et 22 sont portés les résultats de toutes les mesures faites au cours des deux déterminations. On trouve dans la 1^{ère} colonne le numéro de la mesure, dans la 2^e la position de la règle, dans la 3^e le microscope utilisé.

Les différences entre les deux déterminations, particulièrement sur le trait 100 mm, sont grandes et ne sont pas cohérentes avec la dispersion à l'intérieur de chaque détermination

(1978) - (1975)

100 mm	+ 0,103 μ m
200	+ 0,022
300	- 0,039
400	- 0,050

IV c - Etalonnage des traits centimétriques et millimétriques

Les traits centimétriques du premier et du dernier décimètre et les traits millimétriques du premier et du dernier centimètre ont été rattachés aux traits décimétriques au cours de huit mesures spéciales en 1975 et quatre mesures en 1978. Ces rattachements ont été faits pour les deux positions de la règle et, successivement, avec les deux microscopes. Les résultats apparaissent dans le tableau 23 dans les colonnes Etalonnage.

IV d - Résultats finaux : intervalle principal et étalonnage

Le tableau 23 présente les résultats de 1975 et 1978. Dans la colonne Etalonnage sont donnés les écarts de position des traits par rapport à une échelle régulière s'appuyant sur les traits 0 et 500 mm. En combinant ces résultats avec la valeur à 20 °C de l'intervalle principal 0-500 mm, on obtient les écarts des traits étudiés par rapport à leurs positions nominales : ces écarts sont donnés dans la colonne Position.

Le tableau 24 indique les différences entre les valeurs de 1978 et celle de 1975. Bien évidemment, on remarque, dans la colonne Position, la grande variation de longueur de l'intervalle principal déjà signalée. Mais on constate aussi que dans la colonne Etalonnage (où une variation régulière globale d'ensemble de longueur de la règle se trouve éliminée) une douzaine de traits ont subi un "déplacement" de $\pm 0,15$ à $\pm 0,21$ μ m, ce qui suggère que les traits ne sont pas "vus" par les microscopes photoélectriques de façon reproductible.

Tableau 21
Règle N° 16806 - Etalonnage des traits décimétriques
unité : nm

mars - avril 1975

			0	100	200	300	400	500 mm
1	AB	D	0	87	30	187	371	0
2	AB	D	0	89	35	194	372	0
3	AB	D	0	96	43	196	401	0
4	AB	G	0	79	3	173	454	0
5	AB	G	0	54	- 1	156	440	0
6	AB	G	0	65	- 9	153	439	0
7	BA	G	0	58	45	161	301	0
8	BA	G	0	71	46	177	307	0
9	BA	G	0	69	47	177	309	0
10	BA	D	0	35	12	152	337	0
11	BA	D	0	40	20	151	335	0
12	BA	D	0	48	18	152	339	0
Moyenne			0	66	24	169	367	0
s(moy.)			0	6	6	5	16	0

Tableau 22
Règle N° 16806 - Etalonnage des traits décimétriques
unité : nm

avril 1978

			0	100	200	300	400	500 mm
1	AB	D	0	180	12	167	328	0
2	AB	D	0	199	31	180	354	0
3	AB	G	0	181	49	174	356	0
4	AB	G	0	182	50	185	364	0
5	BA	G	0	138	61	71	270	0
6	BA	G	0	123	67	64	275	0
7	BA	D	0	165	48	90	289	0
8	BA	D	0	185	48	109	297	0
Moyenne			0	169	46	130	317	0
s(moy.)			0	9	6	18	14	0

Tableau 23

Règle N° 16806

à 20 °C

mars - avril 1975			avril 1978	
Trait	Etalonnage	Position	Etalonnage	Position
0 mm	0,000 μm	0,000 μm	0,000 μm	0,000 μm
1	0,350	0,351	0,397	0,399
2	0,073	0,075	0,236	0,240
3	0,073	0,076	0,176	0,182
4	0,165	0,168	0,342	0,349
5	0,439	0,443	0,573	0,582
6	0,252	0,257	0,334	0,345
7	0,235	0,241	0,337	0,350
8	0,430	0,437	0,391	0,406
9	0,582	0,590	0,539	0,556
10	0,357	0,365	0,317	0,336
20	0,215	0,232	0,305	0,342
30	0,289	0,314	0,434	0,490
40	0,221	0,254	0,300	0,375
50	0,092	0,134	0,274	0,367
60	0,026	0,076	0,160	0,272
70	0,081	0,139	0,216	0,347
80	- 0,013	0,054	0,105	0,254
90	- 0,011	0,064	0,094	0,262
100	0,066	0,149	0,169	0,356
200	0,024	0,191	0,046	0,420
300	0,169	0,419	0,130	0,690
400	0,367	0,701	0,317	1,063
410	0,727	1,069	0,635	1,401
420	0,277	0,627	0,158	0,943
430	0,156	0,515	0,012	0,815
440	0,221	0,588	0,069	0,891
450	0,174	0,549	0,041	0,882
460	0,536	0,920	0,443	1,302
470	0,281	0,673	0,125	1,003
480	0,200	0,600	0,005	0,902
490	- 0,094	0,315	- 0,241	0,674
491	0,050	0,459	- 0,037	0,880
492	0,220	0,630	0,010	0,929
493	0,229	0,640	0,087	1,008
494	- 0,089	0,323	- 0,153	0,770
495	0,143	0,556	0,043	0,968
496	- 0,036	0,378	- 0,223	0,704
497	- 0,283	0,131	- 0,362	0,566
498	0,031	0,446	- 0,117	0,813
499	- 0,179	0,237	- 0,160	0,772
500	0,000	0,417	0,000	0,934

Tableau 24

Règle N° 16806

à 20 °C

Différence (1978) - (1975)

Trait	Etalonnage	Position
0 mm	0,000 μm	0,000 μm
1	0,047	0,048
2	0,163	0,165
3	0,103	0,106
4	0,177	0,181
5	0,134	0,139
6	0,082	0,088
7	0,102	0,109
8	- 0,039	- 0,031
9	- 0,043	- 0,034
10	- 0,040	- 0,029
20	0,090	0,110
30	0,145	0,176
40	0,079	0,121
50	0,182	0,233
60	0,134	0,196
70	0,135	0,208
80	0,118	0,200
90	0,105	0,198
100	0,103	0,207
200	0,022	0,229
300	- 0,039	0,271
400	- 0,050	0,362
410	- 0,092	0,332
420	- 0,119	0,316
430	- 0,144	0,300
440	- 0,152	0,303
450	- 0,133	0,333
460	- 0,093	0,382
470	- 0,156	0,330
480	- 0,195	0,302
490	- 0,147	0,359
491	- 0,087	0,421
492	- 0,210	0,299
493	- 0,142	0,368
494	- 0,064	0,447
495	- 0,100	0,412
496	- 0,187	0,326
497	- 0,079	0,435
498	- 0,148	0,367
499	0,019	0,535
500	0,000	0,517

IV e - Coefficient de dilatation linéique

Deux études ont été faites : l'une en 1975, l'autre en 1978.

En 1975, treize mesures ont été faites entre 17,55 et 22,54 °C ; en 1978, douze mesures ont été faites entre 17,65 et 23,01 °C. Voici les résultats obtenus :

	1975	1978
α_{20}	$11,697 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$11,692 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
écart-type s	$0,004 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$0,004 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

IV f - Incertitudes

L'estimation des incertitudes du type B a été faite au paragraphe III a ; en utilisant ces valeurs nous donnons ci-après les incertitudes composées des résultats des mesures de la règle N° 16806 :

- Intervalle principal (écarts-types)

	1975	1978
Incertitude statistique (type A')	10 nm	22 nm
Incertitude complémentaire (types A" et B)	8	8
Somme quadratique	13 nm	23 nm

- Etalonnage des traits décimétriques

Le tableau suivant indique les moyennes des écarts-types du type A', les seuls à prendre en compte.

	100	200	300	400 mm
1975	0,006 μm	0,006 μm	0,005 μm	0,016 μm
1978	0,009	0,006	0,018	0,014

- Etalonnage des traits centimétriques et millimétriques : écarts-types du type A', les seuls à prendre en compte

	Traits centimétriques	Traits millimétriques
1975	0,011 μm	0,012 μm
1978	0,016	0,024

- Coefficient de dilatation

L'incertitude est la même en 1975 et en 1978.

Incertitude statistique (type A')	$4 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$
Incertitude complémentaire (types A" et B)	$2,6 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$
Somme quadratique	$4,8 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$