9 octobre 1985

Rapport BIPM-85/3

Errata

- Page 5, 6ème alinéa - ASMW, au lieu de lire :

"Le rapport de ce laboratoire ne présente que les valeurs des intervalles partiels, par exemple 0-1, 1-2..., 0-10, 10-20..., 0-100, 100-200 etc.

il faut lire :

" Pour les intervalles décimétriques, le rapport de ce laboratoire ne présente que les valeurs des intervalles partiels 0-100, 100-200... etc."

- Page 10, Tableau 2, à la ligne ASMW, à la place de

"(calcul non explicité pour les intervalles intermédiaires)"

il faut lire les trois valeurs suivantes :

dans la colonne dixièmes de millimètres 0,0 ; 1,0 : 0,03

dans la colonne millimètres 0 ; 10 : 0,03

dans la colonne centimètres 0 ; 100 : 0,03 à 0,04

- Page 11, Tableau 2 (suite) à la ligne ASMW, à la place de

"(calcul non explicité pour les intervalles intermédiaires)"

il faut lire, dans les colonnes 100, 200 ... 900, respectivement, les valeurs suivantes :

0,04 0,05 0,06 0,07 0,08 0,09 0,10 0,11 0,12

## Légendes

Figure 1.- Règle N° 12924. Intervalle principal à 20 °C : écart mesuré par rapport à la valeur nominale de 1 mètre. Résultats des différents laboratoires dans l'ordre chronologique. Les barres d'incertitude en trait plein correspondent à ± 3 écarts-types ; en pointillé elles correspondent à la valeur donnée par le laboratoire.

Figure 2.- Règle N° 12924. Valeur corrigée de l'intervalle principal : (Laboratoire)-(Moyenne)
Les barres d'incertitude en trait plein correspondent à ± 3 écarts-types. La valeur IMM (1979) est exclue.

Figure 3.- Règle N° 12924. Histogramme des écarts-types entre laboratoires ; a : "Etalonnage relatif", b : "Position".

Figure 4.- Règle N° 12924. Ecart-type entre laboratoires, pour les traits décimétriques.
• "Position"
o "Etalonnage relatif".

Figure 5.- Règle N° 12924. a : défaut de planéité ; b : évolution de la flèche au trait 500 mm.

Figure 6.- Règle N° 16806. Valeur de l'intervalle principal à 20 °C.
Les barres d'incertitude correspondent à ± 3 écarts-types.

Figure 7.- Règle N° 12924. Déplacement de certains traits au cours de la comparaison. Ecart de chaque laboratoire par rapport à la moyenne de l'ensemble des laboratoires pour les traits voisins du trait 0 (valeurs extraites du Tableau 6).

Bureau International des Poids et Mesures

Rapport BIPM-85/3

# Rapport sur la Comparaison Internationale de mesures de règles divisées 1976-1984

par J. Hamon, P. Giacomo et P. Carré

Mai 1985
(révision : octobre 1985)

# Comparaison internationale de mesures de règles divisées 1976-1984

---


1 - Introduction

1 a - Organisation de la comparaison.

1 b - Caractéristiques des règles.

1 c - Plan du rapport.

2 - Règle de 1 mètre, N° 12924

2 a - Résultats fournis par les laboratoires.
2 a1 - Position des traits par rapport à leur position nominale.
2 a2 - Incertitudes.

2 b - Intervalle principal.
2 b1 - Valeurs mesurées par les laboratoires.
2 b2 - Allongement de la règle ; essai de correction.

2 c - Position des traits intermédiaires par rapport à l'intervalle principal.

2 d - Coefficient de dilatation.

2 e - Etude de la planéité.

3 - Règle de 500 mm, N° 16806

3 a - Résultats fournis par les laboratoires.
3 a1 - Position des traits par rapport à leur position nominale
3 a2 - Incertitudes.

3 b - Intervalle principal.

3 c - Position des traits intermédiaires par rapport à l'intervalle principal.

3 d - Coefficient de dilatation.

4 - Conclusions

Annexe : Déplacements temporaires de certains traits de la règle de 1 mètre N° 12924.

# Comparaison internationale de mesures de règles divisées 1976-1984

## 1 - Introduction

### 1 a - Organisation de la comparaison

Lors de sa 4e session (1970), le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) a adopté la Recommandation suivante :

Recommandation M 3 (1970)

Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre,

CONSIDERANT qu'il est nécessaire d'éprouver les appareils et les méthodes tels qu'ils sont employés dans les divers laboratoires pour les étalonnages courants, en vue d'évaluer avec certitude l'exactitude atteinte,

RECOMMANDE que soient organisées des comparaisons internationales d'étalons matériels de longueur.

A la suite de cette Recommandation, le BIPM a proposé, lors de la 5e session du CCDM (1973) de faire circuler deux règles en acier nickelé, divisées en millimètres, l'une de 1 m et l'autre de 500 mm.

Six laboratoires ont alors déclaré désirer prendre part, avec le BIPM, à une comparaison internationale. Par la suite, plusieurs autres laboratoires ont manifesté le même désir. Finalement, outre le BIPM, onze laboratoires ont participé à cette comparaison.

En accord avec les laboratoires intéressés, un plan de circulation a été établi. Malheureusement, des retards imprévus n'ont pas permis de respecter les délais fixés.

Trois circuits ont été organisés, les étalons devant revenir au BIPM à la fin de chacun. Les mesures dans les laboratoires participants se sont déroulées aux époques suivantes :

| | |
|---|---|
| Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) | mars-mai 1975 et avril 1976 |
| **1er circuit** | |
| *National Measurement Laboratory (NML) devenu CSIRO, Lindfield, Australie | juillet 1976 à janvier 1977 |
| Conseil National de Recherches (NRC), Ottawa | mars-août 1977 |
| National Bureau of Standards (NBS), Washington | août à novembre 1977 |
| National Research Laboratory of Metrology (NRLM), Ibaraki | octobre 1977 à mai 1978 |
| BIPM | avril-mai 1978 et juin-juillet 1978 |
| **2e circuit** | |
| National Physical Laboratory (NPL), Teddington | novembre-décembre 1978 |
| Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW), Berlin | janvier-mars 1979 |
| **Institut de Métrologie D.I. Mendéléev (IMM), Leningrad | avril-juin 1979 |
| Physikalisch- Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig | mai-juin 1980 |
| BIPM | août-septembre 1980 |
| **3e circuit** | |
| Istituto di Metrologia G. Colonnetti (IMGC), Turin | avril-mai 1981 |
| Institut National de Métrologie (NIM), Beijing | juillet-août 1981 |
| CSIRO | avril 1982 |
| Office Fédéral de Métrologie (OFMET), Wabern | août 1983 |
| BIPM | octobre-novembre 1983 |
| **Transfert supplémentaire** | |
| Institut de Métrologie D.I. Mendéléev (IMM), Leningrad | avril-juin 1984 |
| BIPM | octobre 1984 |

* Sur sa demande, le CSIRO a participé aussi au troisième circuit.
** Sur sa demande, l'IMM a refait une mesure en 1984.

On remarquera que certaines périodes du 1er circuit se recouvrent. En effet, les deux règles alors en étude circulaient indépendamment. Au vu des résultats du premier circuit, la règle de 500 mm a été retirée de la circulation.

Chaque laboratoire a fait parvenir au BIPM un rapport sur l'exécution et les résultats de ses mesures.

Après chacun des trois circuits, tous les laboratoires qui avaient effectué les mesures précédemment ont reçu tous les rapports disponibles des autres laboratoires. Les envois ont été faits par le BIPM dès qu'il a été en possession des rapports en question, aux dates suivantes : le 21 septembre 1979, le 12 décembre 1980, le 20 mars 1984 et le 8 février 1985 ; à cette dernière date a été envoyé, en même temps que le rapport de l'IMM sur ses mesures de 1984, le rapport du BIPM sur l'ensemble de ses propres mesures. Ainsi, chaque laboratoire ayant la possibilité d'examiner le travail effectué par tous les autres laboratoires, le présent rapport ne s'étendra ni sur les détails de l'exécution des mesures, ni sur ceux du calcul des incertitudes.

### 1 b - Caractéristiques des règles

Les deux règles que le BIPM a proposées pour cette comparaison internationale sont la règle de 1 m, N° 12924 et la règle de 500 mm, N° 16806. Toutes deux sont en acier à 0,15 % de carbone recouvert d'une couche de nickel (épaisseur 0,8 à 1 mm) obtenue par dépôt électrochimique ; elles ont une section en H inscriptible dans un carré de 24 mm de côté environ. La règle de 1 m a des traits gravés de largeur 4 µm environ et de profil en V. La règle de 500 mm a des traits de largeur 6 µm environ, constitués chacun de 7 traits élémentaires parallèles et juxtaposés.

Les traits de la règle de 500 mm apparaissent bien définis sous les microscopes visuels mais donnent un signal assez faible dans les microscopes photoélectriques. Dès le 1er circuit, cette règle a donné des résultats excessivement dispersés ; elle a été retirée de la circulation pour les circuits suivants.

Dans la suite, par raison de commodité, les traits de la graduation principale seront repérés par leur distance nominale au trait zéro, distance exprimée en millimètres ; ainsi les traits qui délimitent l'intervalle principal de la règle de 1 m seront appelés "trait 0" et "trait 1000".

### 1 c - Plan du rapport

Les résultats sont présentés dans le chapitre 2 pour la règle de 1 m, N° 12924 et dans le chapitre 3 pour la règle de 500 mm, N° 16806. Pour chaque règle, les résultats des différents laboratoires sont rassemblés et comparés de plusieurs points de vue.

Au paragraphe a -, on a rassemblé, pour chaque trait, les différences "(position réelle) - (position nominale)", à 20 °C, et les incertitudes indiquées par chaque laboratoire.

Au paragraphe b -, on a regroupé les résultats relatifs à l'intervalle principal "trait 0 - trait 1000" ou "trait 0 - trait 500".

Au paragraphe c -, on a comparé les résultats relatifs aux traits intermédiaires sous une forme réduite que nous dénommons "étalonnage relatif". Pour cela, on a rapporté la position de chaque trait à celle du trait correspondant dans une échelle idéale qui diviserait régulièrement l'intervalle principal. Cette méthode a l'avantage d'éliminer de la comparaison les effets des erreurs proportionnelles à la longueur mesurée, par exemple celles provenant de la dilatation de la règle, de l'indice de réfraction de l'air, de la longueur d'onde de la radiation utilisée, ou d'une dérive homogène de la longueur de la règle.

Au paragraphe d -, on a regroupé les résultats relatifs au coefficient de dilatation.

Enfin, pour la règle de 1 m, on a rassemblé au paragraphe e -, les mesures du défaut de planéité.

## 2 - Règle de 1 m, N° 12924

### 2 a - Résultats fournis par les laboratoires

#### 2 a1 - Position des traits par rapport à leur position nominale

Ces résultats sont rassemblés dans le tableau 1 "Position" tels qu'ils apparaissent dans les rapports des laboratoires. Cependant, il convient de faire les remarques suivantes :

- Les onze premiers traits de ce tableau : 0,0 ; 0,1 ; ... 1,0 correspondent à la division en dixièmes de millimètre du millimètre supplémentaire, située approximativement entre les abscisses - 3,0 mm (trait 0,0) et - 2,0 mm (trait 1,0) par rapport au trait 0 de l'intervalle principal ; le trait 0,0 est considéré comme origine pour cette division supplémentaire.

- CSIRO : Ce laboratoire a demandé d'éliminer les valeurs de 1976 concernant les décimètres.

- NBS : Dans le tableau de l'étude des centimètres la valeur de l'intervalle 0 - 10 mm est + 0,13 µm ± 0,01 µm, mais dans le tableau des millimètres cette valeur est + 0,12 µm ± 0,03 µm. Nous adoptons la première valeur.

- NPL : Au paragraphe "Length interval, main scale" de son rapport, la valeur de l'intervalle principal 0 - 1000 mm est + 0,52 µm. Au paragraphe "Calibration of intervals", dans le tableau des décimètres, la valeur indiquée est + 0,49 µm. Dans le tableau 1 nous adoptons + 0,52 µm.

- ASMW : Pour les intervalles décimétriques, le rapport de ce laboratoire ne présente que les valeurs des intervalles partiels 0 - 100, 100 - 200 etc. Par souci d'uniformité de présentation, nous avons calculé les valeurs des intervalles à partir du trait 0. D'autre part, toutes les valeurs sont indiquées, séparément, pour la règle en position AB et en position BA ; dans le même souci, nous avons calculé la moyenne [AB ; BA]. D'après les valeurs de l'intervalle principal, on trouve ainsi 1 m + 672 nm alors que, d'après les tableaux des décimètres, on obtient 1 m + 667 nm ; nous avons adopté la première valeur.

- PTB : Dans le tableau des centimètres, la valeur de l'intervalle 0 - 10 mm est + 0,12 µm ± 0,02 µm, dans le tableau des millimètres, cette valeur est + 0,13 µm ± 0,03 µm. Nous adoptons la première valeur.

- IMGC : Par lettre du 10 juin 1982 (transmise aux participants avec le rapport de ce laboratoire), les valeurs des intervalles décimétriques ont été modifiées et celle de l'intervalle 0 - 500 mm supprimée. Les valeurs des intervalles centimétriques du premier décimètre parues dans le rapport de ce laboratoire ont été légèrement corrigées pour tenir compte de ces modifications.

## Tableau 1

### Règle N° 12924

### Position

### Unité : µm

| TRAIT mm | BIPM | CSIRO | NRC | NBS | NRLM | BIPM | NPL | ASMW | IMM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | -0,016 | -0,005 | ***** | -0,04 | -0,07 | -0,022 | -0,01 | -0,018 | 0,00 |
| 0,2 | -0,058 | -0,074 | ***** | -0,10 | -0,06 | -0,073 | -0,06 | -0,057 | -0,04 |
| 0,3 | -0,018 | -0,024 | ***** | -0,03 | -0,05 | -0,037 | -0,04 | -0,014 | -0,02 |
| 0,4 | -0,071 | -0,089 | ***** | -0,09 | -0,15 | -0,074 | -0,12 | -0,068 | -0,08 |
| 0,5 | 0,011 | -0,021 | ***** | -0,02 | -0,09 | -0,001 | -0,06 | 0,012 | 0,02 |
| 0,6 | -0,126 | -0,151 | ***** | -0,15 | -0,12 | -0,133 | -0,18 | -0,111 | -0,13 |
| 0,7 | -0,051 | -0,074 | ***** | -0,06 | -0,11 | -0,068 | -0,14 | -0,036 | -0,14 |
| 0,8 | -0,081 | -0,101 | ***** | -0,11 | -0,08 | -0,091 | -0,18 | -0,076 | -0,12 |
| 0,9 | -0,006 | -0,026 | ***** | -0,02 | -0,06 | -0,009 | -0,14 | 0,012 | -0,06 |
| 1,0 | -0,138 | -0,181 | ***** | -0,18 | -0,16 | -0,153 | -0,25 | -0,126 | -0,17 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,044 | 0,016 | ***** | 0,06 | -0,02 | 0,006 | 0,05 | 0,026 | -0,05 |
| 2 | -0,002 | 0,020 | ***** | 0,01 | -0,09 | -0,022 | 0,00 | 0,006 | -0,05 |
| 3 | 0,013 | 0,016 | ***** | 0,03 | -0,06 | -0,017 | 0,00 | -0,016 | -0,05 |
| 4 | -0,024 | -0,023 | ***** | 0,01 | -0,11 | -0,049 | -0,02 | -0,028 | -0,06 |
| 5 | -0,092 | -0,099 | ***** | -0,07 | -0,12 | -0,104 | -0,10 | -0,080 | -0,16 |
| 6 | -0,020 | -0,054 | ***** | 0,01 | -0,05 | -0,045 | -0,03 | -0,026 | -0,01 |
| 7 | 0,045 | -0,008 | ***** | 0,06 | 0,01 | 0,016 | 0,02 | 0,020 | 0,00 |
| 8 | 0,099 | 0,076 | ***** | 0,11 | 0,02 | 0,041 | 0,07 | 0,060 | 0,03 |
| 9 | 0,102 | 0,064 | ***** | 0,10 | 0,04 | 0,064 | 0,06 | 0,090 | 0,04 |
| 10 | 0,120 | 0,130 | 0,12 | 0,13 | 0,03 | 0,096 | 0,12 | 0,124 | 0,06 |
| 20 | 0,228 | 0,222 | 0,20 | 0,23 | 0,14 | 0,181 | 0,18 | 0,211 | 0,13 |
| 30 | 0,243 | 0,287 | 0,21 | 0,27 | 0,19 | 0,203 | 0,20 | 0,234 | 0,15 |
| 40 | 0,119 | 0,205 | 0,10 | 0,14 | 0,05 | 0,098 | 0,10 | 0,080 | 0,07 |
| 50 | 0,021 | 0,068 | 0,00 | 0,04 | -0,03 | -0,010 | -0,03 | 0,015 | -0,08 |
| 60 | 0,250 | 0,299 | 0,24 | 0,27 | 0,17 | 0,234 | 0,21 | 0,220 | 0,12 |
| 70 | 0,167 | 0,230 | 0,18 | 0,21 | 0,10 | 0,148 | 0,12 | 0,164 | 0,12 |
| 80 | 0,009 | 0,066 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | -0,015 | -0,04 | -0,016 | -0,09 |
| 90 | 0,167 | 0,054 | 0,16 | 0,15 | 0,10 | 0,132 | 0,11 | 0,154 | 0,10 |
| 100 | 0,287 | ****** | 0,21 | 0,20 | 0,16 | 0,199 | 0,16 | 0,209 | 0,19 |
| 200 | 0,328 | ****** | 0,31 | 0,34 | 0,31 | 0,339 | 0,26 | 0,315 | 0,21 |
| 300 | 0,596 | ****** | 0,54 | 0,63 | 0,58 | 0,602 | 0,52 | 0,613 | 0,32 |
| 400 | 1,002 | ****** | 0,94 | 1,02 | 1,05 | 1,062 | 0,90 | 1,077 | 0,67 |
| 500 | 1,196 | ****** | 1,12 | 1,28 | 1,25 | 1,302 | 1,10 | 1,269 | 0,88 |
| 600 | 1,008 | ****** | 0,94 | 1,09 | 1,14 | 1,134 | 0,92 | 1,113 | 0,58 |
| 700 | 1,120 | ****** | 1,06 | 1,21 | 1,11 | 1,242 | 1,02 | 1,169 | 0,61 |
| 800 | 1,240 | ****** | 1,18 | 1,27 | 1,25 | 1,361 | 1,13 | 1,305 | 0,62 |
| 900 | 0,825 | ****** | 0,78 | 0,88 | 0,85 | 0,963 | 0,72 | 0,909 | 0,16 |
| 910 | 0,796 | ****** | 0,77 | ***** | 0,84 | 0,932 | ***** | ****** | ***** |
| 920 | 0,711 | ****** | 0,69 | ***** | 0,70 | 0,809 | ***** | ****** | ***** |
| 930 | 0,761 | ****** | 0,76 | ***** | 0,79 | 0,893 | ***** | ****** | ***** |
| 940 | 0,590 | ****** | 0,59 | ***** | 0,65 | 0,719 | ***** | ****** | ***** |
| 950 | 0,700 | ****** | 0,71 | ***** | 0,71 | 0,829 | ***** | ****** | ***** |
| 960 | 0,577 | ****** | 0,60 | ***** | 0,65 | 0,698 | ***** | ****** | ***** |
| 970 | 0,799 | ****** | 0,80 | ***** | 0,79 | 0,907 | ***** | ****** | ***** |
| 980 | 0,745 | ****** | 0,72 | ***** | 0,77 | 0,866 | ***** | ****** | ***** |
| 990 | 0,609 | ****** | 0,60 | ***** | 0,64 | 0,752 | ***** | ****** | ***** |
| 991 | 0,638 | ****** | ***** | ***** | 0,62 | 0,735 | ***** | ****** | ***** |
| 992 | 0,562 | ****** | ***** | ***** | 0,64 | 0,700 | ***** | ****** | ***** |
| 993 | 0,565 | ****** | ***** | ***** | 0,59 | 0,690 | ***** | ****** | ***** |
| 994 | 0,569 | ****** | ***** | ***** | 0,57 | 0,704 | ***** | ****** | ***** |
| 995 | 0,526 | ****** | ***** | ***** | 0,56 | 0,668 | ***** | ****** | ***** |
| 996 | 0,637 | ****** | ***** | ***** | 0,67 | 0,769 | ***** | ****** | ***** |
| 997 | 0,611 | ****** | ***** | ***** | 0,65 | 0,748 | ***** | ****** | ***** |
| 998 | 0,635 | ****** | ***** | ***** | 0,65 | 0,773 | ***** | ****** | ***** |
| 999 | 0,626 | ****** | ***** | ***** | 0,67 | 0,761 | ***** | ****** | ***** |
| 1000 | 0,612 | 0,548 | 0,61 | 0,63 | 0,60 | 0,744 | 0,52 | 0,672 | -0,19 |

Tableau 1 (suite)

Règle N° 12924

Position

Unité : µm

| TRAIT mm | PTB | BIPM | IMGC | NIM | CSIRO | OFMET | BIPM | IMM | BIPM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | -0,05 | -0,034 | -0,05 | 0,03 | ***** | -0,029 | -0,014 | -0,002 | -0,017 |
| 0,2 | -0,04 | -0,068 | -0,05 | -0,03 | ***** | -0,066 | -0,065 | -0,017 | -0,061 |
| 0,3 | -0,05 | -0,035 | -0,07 | 0,00 | ***** | -0,034 | -0,031 | 0,001 | -0,026 |
| 0,4 | -0,09 | -0,081 | -0,16 | -0,08 | ***** | -0,085 | -0,099 | -0,004 | -0,069 |
| 0,5 | 0,29 | 0,125 | 0,15 | -0,01 | ***** | -0,003 | -0,002 | -0,109 | 0,004 |
| 0,6 | -0,14 | -0,144 | -0,17 | -0,11 | ***** | -0,133 | -0,156 | -0,095 | -0,134 |
| 0,7 | -0,08 | -0,060 | -0,10 | -0,01 | ***** | -0,060 | -0,077 | -0,065 | -0,051 |
| 0,8 | 0,07 | -0,042 | -0,09 | -0,11 | ***** | -0,097 | -0,079 | -0,085 | -0,082 |
| 0,9 | 0,01 | -0,014 | -0,03 | -0,09 | ***** | 0,020 | -0,024 | -0,095 | -0,003 |
| 1,0 | -0,11 | -0,157 | -0,14 | -0,13 | ***** | -0,149 | -0,142 | -0,125 | -0,145 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,34 | 0,186 | 0,24 | 0,01 | ***** | -0,001 | 0,058 | -0,001 | 0,044 |
| 2 | 0,11 | 0,062 | 0,05 | -0,03 | ***** | 0,051 | 0,033 | -0,012 | 0,012 |
| 3 | -0,02 | 0,027 | 0,04 | -0,02 | ***** | -0,010 | 0,026 | 0,038 | 0,001 |
| 4 | 0,13 | 0,098 | 0,01 | -0,06 | ***** | -0,030 | -0,007 | -0,019 | -0,030 |
| 5 | -0,24 | -0,163 | -0,19 | -0,07 | ***** | -0,096 | -0,066 | -0,080 | -0,094 |
| 6 | -0,02 | -0,005 | -0,02 | -0,02 | ***** | -0,025 | -0,004 | -0,090 | -0,018 |
| 7 | 0,03 | 0,057 | 0,01 | 0,00 | ***** | 0,025 | 0,079 | -0,021 | 0,048 |
| 8 | 0,04 | 0,091 | 0,07 | 0,02 | ***** | 0,053 | 0,098 | 0,078 | 0,089 |
| 9 | 0,06 | 0,109 | 0,08 | 0,05 | ***** | 0,045 | 0,109 | 0,072 | 0,107 |
| 10 | 0,12 | 0,130 | 0,12 | 0,09 | ***** | 0,160 | 0,159 | 0,171 | 0,133 |
| 20 | 0,19 | 0,229 | 0,21 | 0,19 | ***** | 0,251 | 0,255 | 0,207 | 0,231 |
| 30 | 0,22 | 0,249 | 0,22 | 0,19 | ***** | 0,254 | 0,258 | 0,263 | 0,262 |
| 40 | 0,06 | 0,140 | 0,14 | 0,08 | ***** | 0,065 | 0,137 | 0,109 | 0,139 |
| 50 | 0,01 | 0,039 | 0,00 | 0,03 | ***** | 0,037 | 0,066 | 0,066 | 0,069 |
| 60 | 0,39 | 0,283 | 0,25 | 0,20 | ***** | 0,244 | 0,284 | 0,221 | 0,277 |
| 70 | 0,14 | 0,178 | 0,03 | 0,16 | ***** | 0,165 | 0,207 | 0,217 | 0,189 |
| 80 | 0,01 | 0,026 | 0,00 | 0,02 | ***** | 0,017 | 0,036 | -0,007 | 0,020 |
| 90 | 0,16 | 0,166 | 0,13 | 0,12 | ***** | 0,148 | 0,185 | 0,144 | 0,172 |
| 100 | 0,23 | 0,243 | 0,20 | 0,22 | 0,22 | 0,215 | 0,255 | 0,240 | 0,245 |
| 200 | 0,28 | 0,366 | 0,28 | 0,33 | 0,40 | 0,328 | 0,370 | 0,271 | 0,367 |
| 300 | 0,54 | 0,629 | 0,51 | 0,55 | 0,62 | 0,631 | 0,651 | 0,521 | 0,625 |
| 400 | 1,01 | 1,098 | 0,94 | 1,02 | 1,16 | 1,113 | 1,136 | 0,931 | 1,093 |
| 500 | 1,24 | 1,295 | ***** | 1,23 | 1,33 | 1,359 | 1,364 | 1,332 | 1,290 |
| 600 | 1,06 | 1,130 | 0,96 | 1,12 | 1,13 | 1,203 | 1,112 | 1,100 | 1,143 |
| 700 | 1,20 | 1,260 | 1,02 | 1,06 | 1,22 | 1,275 | 1,322 | 1,232 | 1,264 |
| 800 | 1,27 | 1,381 | 1,17 | 1,23 | 1,35 | 1,354 | 1,402 | 1,434 | 1,357 |
| 900 | 0,86 | 0,988 | 0,70 | 0,80 | 0,98 | 0,973 | 1,002 | 0,952 | 0,962 |
| 910 | ***** | 0,955 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,966 | ****** | 0,916 |
| 920 | ***** | 0,869 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,884 | ****** | 0,855 |
| 930 | ***** | 0,921 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,944 | ****** | 0,916 |
| 940 | ***** | 0,741 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,777 | ****** | 0,728 |
| 950 | ***** | 0,885 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,886 | ****** | 0,845 |
| 960 | ***** | 0,735 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,754 | ****** | 0,721 |
| 970 | ***** | 0,944 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,943 | ****** | 0,905 |
| 980 | ***** | 0,889 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,894 | ****** | 0,870 |
| 990 | ***** | 0,788 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,780 | ****** | 0,755 |
| 991 | ***** | 0,778 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,799 | ****** | 0,749 |
| 992 | ***** | 0,732 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,744 | ****** | 0,707 |
| 993 | ***** | 0,716 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,738 | ****** | 0,701 |
| 994 | ***** | 0,726 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,748 | ****** | 0,702 |
| 995 | ***** | 0,696 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,726 | ****** | 0,680 |
| 996 | ***** | 0,881 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,828 | ****** | 0,786 |
| 997 | ***** | 0,769 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,771 | ****** | 0,758 |
| 998 | ***** | 0,802 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,777 | ****** | 0,756 |
| 999 | ***** | 0,790 | ***** | ***** | ***** | ****** | 0,810 | ****** | 0,779 |
| 1000 | 0,77 | 0,787 | 0,47 | 0,58 | 0,73 | 0,777 | 0,808 | 0,801 | 0,776 |

2 a2 - Incertitudes

Les incertitudes correspondant aux valeurs du tableau 1 sont résumées au tableau 2 (p. 10 et 11) telles qu'elles apparaissent dans les rapports des laboratoires (ou telles qu'elles peuvent être calculées d'après les indications fournies). Le calcul des incertitudes n'est pas toujours décrit en détail dans ces rapports et, en général, les informations les plus complètes concernent les incertitudes pour la valeur particulière de l'intervalle principal 0 - 1000 mm.

Dans le tableau 2, dans un souci de clarté, on a résumé les incertitudes pour chaque groupe de traits intermédiaires en indiquant la valeur minimale et la valeur maximale.

Les informations puisées dans les rapports sont résumées ci-après.

CSIRO - 1976. Intervalle principal : 44 mesures avec 42 degrés de liberté ; l'écart-type d'une mesure est 0,090 µm, l'écart-type de la moyenne est 0,014 µm, l'intervalle de confiance à un niveau de confiance de 99 % est ± 0,037 µm. L'incertitude estimée due à la combinaison des erreurs systématiques est, en valeur relative, $70 \times 10^{-9}$. L'incertitude ("overall uncertainty") 0,079 µm est la somme quadratique des composantes des deux types.

- 1982. 28 mesures avec 26 degrés de liberté ; l'écart-type d'une mesure est 0,070 µm, l'écart-type de la moyenne est 0,013 µm, l'intervalle de confiance à un niveau de confiance de 99 % est de ± 0,037 µm. En incluant la composante systématique, l'incertitude ("overall uncertainty") devient 0,075 µm.

NRC - Ni le calcul de l'incertitude ni le nombre de mesures ne sont précisés.

NBS - L'incertitude est la somme de la composante aléatoire et de la composante systématique. La composante aléatoire est égale à 3 fois l'écart-type de la moyenne :

$$3\,\underline{\sigma}_m = 3\sqrt{\frac{\Sigma\,\underline{r}^2}{\underline{n}-1}} \Big/ \sqrt{\underline{n}}$$

où $\underline{r}$ est l'écart d'une mesure par rapport à la moyenne, $\underline{n}$ est le nombre de mesures et $\underline{n} - 1$ est le nombre de degrés de liberté ; $\underline{n} = 12$ pour les intervalles décimétriques et $\underline{n} = 8$ pour les autres intervalles. La composante systématique est, en valeur relative, $1 \times 10^{-7}$.

NRLM - 14 mesures ont été faites. L'incertitude ("overall error in standard deviation") est donnée ainsi : $\underline{\sigma} = (0{,}054 + 0{,}027 \times 10^{-6}\ \underline{L})$ µm où $\underline{L}$ est la longueur mesurée en mètre.

NPL - 16 mesures ont été faites de l'intervalle principal et 4 mesures des subdivisions. L'incertitude ("total combined uncertainty") est obtenue par addition des variances des composantes aléatoires et systématiques. Toutes les incertitudes sont données avec un niveau de confiance de 0,99.

ASMW - 119 mesures ont été faites avec la règle en position AB et 36 en position BA. L'incertitude aléatoire sur la valeur de l'intervalle principal (écart-type d'une mesure) est : $\underline{s}_{AB}$ = 69 nm et $\underline{s}_{BA}$ = 53 nm ; en combinant la composante aléatoire et la composante systématique on obtient, pour un niveau de confiance de 0,99, $\underline{u}_{AB}$ = 0,13 µm et $\underline{u}_{BA}$ = 0,13 µm. Pour un intervalle $\underline{L}$, on indique, pour une position de la règle et pour un niveau de confiance de 0,99 une incertitude de (0,03 + 0,1 $\underline{L}$) µm avec $\underline{L}$ en mètre.

IMM - En 1979, 30 séries de 5 mesures de l'intervalle principal ont été faites ; l'écart-type de la moyenne est $\underline{\sigma}$ = 0,045 µm. On a fait 15 à 20 séries de 5 mesures des intervalles intermédiaires. Le laboratoire donne les incertitudes pour les intervalles successifs, par exemple 0 - 0,1 ; 0,1 - 0,2 ; ... 0 - 1 ; 1 - 2 ; ... 0 - 10 ; 10 - 20 ; ...

- En 1984, 21 séries de 5 mesures de l'intervalle principal ont été faites ; l'écart-type de la moyenne est 0,020 µm ; l'incertitude composée est 0,037 µm (écart-type). On a fait 5 à 19 séries de mesures des intervalles intermédiaires.

PTB - 11 mesures ont été faites : 4 avec le krypton et 7 avec un laser. La partie aléatoire (écart-type d'une mesure) est $\left[\left(\Sigma_{\underline{i}=1}^{\underline{n}} (\underline{x}_i - \overline{\underline{x}})^2\right)/\underline{n} - 1\right]^{\frac{1}{2}}$ où $\overline{\underline{x}}$ est la valeur moyenne ; cette composante aléatoire est égale à 0,03 µm pour la valeur de l'intervalle principal et la composante systématique est égale à 0,05 µm. L'incertitude "totale" est la somme de ces deux composantes.

IMGC - 74 mesures ont été faites. L'incertitude indiquée dans la lettre rectificative du 10 juin 1982 pour l'intervalle principal 0 - 1000 mm est 0,14 µm avec un niveau de confiance de 0,95 ; elle est obtenue par addition quadratique de la composante systématique dont la valeur maximale est assimilée à l'écart-type multiplié par $\sqrt{3}$.

NIM - 8 mesures ont été faites. La valeur de la composante aléatoire de l'incertitude pour l'intervalle principal est $\underline{\sigma}_m$ = 0,03 µm, écart-type de la moyenne des 8 séries. La valeur maximale de la composante systématique est 0,1 µm. Pas d'indications pour les intervalles intermédiaires.

Tableau 2

Règle N° 12924
Résumé des incertitudes

Unité : µm

| | | dixièmes de millimètre 0,0 ; 1,0 | millimètres 0 ; 10 | millimètres 990 ; 1000 | centimètres 0 ; 100 | centimètres 900 ; 1000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CSIRO (1976) | a | 0,051 | 0,083 à 0,122 | | 0,059 à 0,122 | |
| | b | 0,015 | 0,024 à 0,035 | | 0,017 à 0,032 | |
| | c | 0,039 | 0,063 à 0,093 | | 0,045 à 0,086 | |
| NRC | | | | | 0,060 | |
| NBS | d | 0,01 à 0,02 | 0,01 à 0,04 | | 0,01 à 0,03 | |
| | e | 0 | 0 | | 0 à 0,01 | |
| | f | 0,01 à 0,02 | 0,01 à 0,04 | | 0,01 à 0,04 | |
| NRLM | | 0,054 | 0,054 | 0,081 | 0,054 à 0,056 | 0,078 à 0,081 |
| NPL | g | 0,04 | 0,04 | | 0,04 | |
| | h | 0,06 | 0,06 | | 0,08 | |
| | i | 0,08 | 0,08 | | 0,09 | |
| ASMW | | 0,03 | 0,03 | | 0,03 à 0,04 | |
| IMM (1979) | j | 0,020 à 0,030 | 0,019 à 0,034 | | 0,021 à 0,042 | |
| PTB | a | 0,01 à 0,03 | 0,01 à 0,02 | | 0,01 à 0,03 | |
| | e | 0,01 | 0,01 | | 0,01 | |
| | f | 0,02 à 0,04 | 0,02 à 0,04 | | 0,02 à 0,04 | |
| IMGC | r | 0,04 | 0,01 à 0,06 | | 0,01 à 0,08 | |
| NIM | | (pas d'indications pour les intervalles intermédiaires) | | | | |
| OFMET | g | 0,009 à 0,018 | 0,010 à 0,016 | | 0,012 à 0,018 | |
| | k | 0,025 | 0,025 à 0,026 | | 0,026 à 0,037 | |
| IMM (1984) | d' | | 0,014 à 0,038 | | 0,017 à 0,035 | |
| BIPM (1976) | 1 | 0,004 | 0,004 | 0,019 | 0,008 | 0,017 à 0,018 |
| (1978) | 1 | 0,004 | 0,004 | 0,023 | 0,013 | 0,022 à 0,023 |
| (1980) | 1 | 0,008 | 0,008 | 0,023 | 0,015 | 0,026 à 0,027 |
| (1983) | 1 | 0,007 | 0,007 | 0,019 | 0,021 | 0,027 |
| (1984) | 1 | 0,005 | 0,005 | 0,022 | 0,020 | 0,028 à 0,029 |

a : écart-type d'une mesure
b : écart-type de la moyenne
c : "associated uncertainty" (P = 0,99)
d : aléatoire (3 écarts-types)
d' : aléatoire (1 écart-type)
e : systématique
f : somme
g : aléatoire (P = 0,99)
h : systématique (P = 0,99)
i : "total combined uncertainty"
j : incertitudes des intervalles successifs : ex. : 0 - 1 ; 1 - 2 ; 2 - 3 etc. (écart-type)
k : incertitude "totale" : (0,025 + 0,122 l) µm avec l en mètre
l : composée, écart-type de la moyenne
r : niveau de confiance 0,95 et lettre du 10 juin 1982

Tableau 2 (suite)

Règle N° 12924
Résumé des incertitudes

Unité : µm

| | | décimètres | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| CSIRO (1976) | | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | 0,079 |
| NRC | | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| NBS | d | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,03 | 0,03 | 0,04 |
| | e | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 |
| | f | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,11 | 0,12 | 0,14 |
| NRLM | | 0,057 | 0,059 | 0,062 | 0,065 | 0,068 | 0,070 | 0,073 | 0,076 | 0,078 | 0,081 |
| NPL | g | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| | h | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,10 |
| | i | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,11 |
| ASMW | | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,13 |
| IMM (1979) | | (écart-type des intervalles successifs 100-200, 200-300, etc. : de 0,018 à 0,047) | | | | | | | | | 0,045 |
| PTB | a | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,03 |
| | e | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| | f | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,09 | 0,12 | 0,08 |
| IMGC | r | 0,14 | 0,14 | 0,28 | 0,28 | xxx | 0,28 | 0,28 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| NIM | q | (pas d'indications pour les intervalles intermédiaires) | | | | | | | | | 0,04 |
| CSIRO | a | 0,142 | 0,144 | 0,149 | 0,154 | 0,162 | 0,170 | 0,179 | 0,189 | 0,200 | |
| | b | 0,050 | 0,056 | 0,057 | 0,065 | 0,068 | 0,071 | 0,074 | 0,078 | 0,082 | |
| | c | 0,18 | 0,20 | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,25 | 0,27 | 0,28 | 0,30 | 0,075 |
| OFMET | g | 0,012 | 0,017 | 0,011 | 0,013 | 0,018 | 0,013 | 0,018 | 0,022 | 0,021 | 0,008 |
| | k | 0,037 | 0,049 | 0,062 | 0,074 | 0,086 | 0,098 | 0,110 | 0,123 | 0,135 | 0,135 |
| IMM (1984) | t | 0,019 | 0,045 | 0,034 | 0,065 | 0,036 | 0,056 | 0,065 | 0,059 | 0,053 | 0,037 |
| BIPM (1976) | 1 | 0,008 | 0,020 | 0,031 | 0,024 | 0,027 | 0,028 | 0,027 | 0,023 | 0,019 | 0,017 |
| (1978) | 1 | 0,017 | 0,025 | 0,034 | 0,028 | 0,033 | 0,031 | 0,034 | 0,028 | 0,023 | 0,019 |
| (1980) | 1 | 0,017 | 0,031 | 0,043 | 0,045 | 0,045 | 0,040 | 0,039 | 0,034 | 0,023 | 0,023 |
| (1983) | 1 | 0,027 | 0,051 | 0,069 | 0,072 | 0,073 | 0,078 | 0,064 | 0,043 | 0,027 | 0,018 |
| (1984) | 1 | 0,026 | 0,047 | 0,066 | 0,071 | 0,084 | 0,067 | 0,063 | 0,045 | 0,031 | 0,021 |

q : aléatoire : s = 0,03 ; systématique maximale : 0,1 ;
somme quadratique : $\left[ (0,03)^2 + (0,1/3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \approx 0,04$.

t : composante aléatoire (écart-type) pour tous les décimètres ;
écart-type composé pour l'intervalle principal 0-1000.

OFMET - 72 mesures ont été faites, 36 pour chacune des deux positions de la règle.
L'incertitude aléatoire de la moyenne est quasiment indépendante de la longueur mesurée et, à un niveau de confiance de 99 % et pour un nombre de mesures $\geq$ 15, inférieure à $\pm$ 25 nm. L'incertitude systématique relative, à un niveau de confiance de 99 %, est $\pm$ 12,2 $\times$ $10^{-8}$. L'incertitude ("total uncertainty") est inférieure à $\pm$ (25 + 122 $\underline{L}$) nm, où $\underline{L}$ est la longueur mesurée en mètre. Une valeur spéciale a été calculée pour l'intervalle principal : 0,135 $\mu$m.

BIPM - Pour chacune des cinq déterminations, 8 mesures ont été faites de l'intervalle principal et des intervalles décimétriques et 4 mesures pour les autres intervalles en utilisant les deux positions de la règle et les deux microscopes.
La composante statistique (de type A) de l'incertitude est déduite de la dispersion des 8 mesures et caractérisée par l'écart-type de la moyenne. Une composante complémentaire est calculée en additionnant quadratiquement les écarts-types estimés des composantes (généralement du type B) de l'incertitude qui sont dues aux divers effets systématiques.
Pour l'intervalle principal, on obtient les valeurs suivantes :

| | 1976 | 1978 | 1980 | 1983 | 1984 |
|---|---|---|---|---|---|
| Composante statistique (du type A) | 7 nm | 10 nm | 16 nm | 9 nm | 14 nm |
| Composante complémentaire (principalement du type B) | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Somme quadratique (écart-type) | 17 nm | 19 nm | 23 nm | 18 nm | 21 nm |

## 2 b - Intervalle principal

### 2 b1 - Valeurs mesurées par les laboratoires

Les résultats obtenus par les laboratoires pour la valeur à 20 °C (arrondie au centième de micromètre) de l'intervalle principal (intervalle entre le trait 0 et le trait 1000) sont regroupés au tableau 3 avec leurs incertitudes. Dans les cas où, à partir des indications fournies par les laboratoires, on a pu exprimer sans ambiguïté l'incertitude sous forme d'un écart-type, nous avons fait figurer cet écart-type. Dans les autres cas, nous avons reproduit, entre crochets, la valeur indiquée par le laboratoire ; des notes de bas de page rappellent les informations données par les laboratoires au sujet de ces valeurs entre crochets.

L'ensemble de ces résultats est résumé sur la figure 1 (p. 15), dans l'ordre chronologique.

Il nous a semblé raisonnable de représenter dans cette figure des incertitudes dont la signification ne soit pas trop hétérogène. Or certains laboratoires ne précisent pas le mode d'évaluation de leur incertitude ; nous avons dans ce cas simplement utilisé la valeur donnée par le laboratoire et nous avons admis que cette valeur correspond vraisemblablement à l'ordre de grandeur de trois fois l'écart-type. En conséquence, pour les autres laboratoires, nous avons reconstitué, à partir des données du tableau 3, des incertitudes globales correspondant approximativement à 3 fois l'écart-type, comme suit :

| | | | |
|---|---|---|---|
| CSIRO (1976) | : $(0{,}079 / 2{,}6) \times 3$ | = | 0,09 µm |
| NRC | : (calcul non précisé) | = | [0,06] |
| NBS | : valeur indiquée | = | [0,14] |
| NRLM | : $\left((0{,}054)^2 + (0{,}027)^2\right)^{\frac{1}{2}}$ | = | 0,18 |
| NPL | : $(0{,}11 / 2{,}6) \times 3$ | = | 0,13 |
| ASMW | : $\left[\left((0{,}03)^2 + (0{,}10)^2\right)^{\frac{1}{2}} / 2{,}6\right] \times 3$ | = | 0,12 |
| IMM (1979) | : $0{,}045 \times 3$ | = | 0,135 |
| PTB | : valeur indiquée | = | [0,08] |
| IMGC | : $(0{,}14 / 2) \times 3$ | = | 0,21 |
| NIM | : $\left((0{,}03 \times 3)^2 + (0{,}1)^2\right)^{\frac{1}{2}}$ | = | 0,14 |
| CSIRO (1982) | : $(0{,}075 / 2{,}6) \times 3$ | = | 0,09 |
| OFMET | : $(0{,}135 / 2{,}6) \times 3$ | = | 0,16 |
| IMM (1984) | : $0{,}037 \times 3$ | = | 0,11 |
| BIPM (1976) | : $0{,}017 \times 3$ | = | 0,05 |
| (1978) | : $0{,}019 \times 3$ | = | 0,06 |
| (1980) | : $0{,}023 \times 3$ | = | 0,07 |
| (1983) | : $0{,}018 \times 3$ | = | 0,05 |
| (1984) | : $0{,}021 \times 3$ | = | 0,06 |

Tableau 3

Règle N° 12924
Valeur de l'intervalle principal à 20 °C

| Labo. | Date | Valeur à 20 °C | Incertitude µm | |
|---|---|---|---|---|
| BIPM | avril 1976 | 1 m + 0,61 µm | 0,017 | (9) |
| CSIRO | novembre 1976 | + 0,56 | [± 0,079] | (1) |
| NRC | mars-août 1977 | + 0,61 | [± 0,06] | (2) |
| NBS | juillet-sept. 1977 | + 0,63 | [0,14] | (3) |
| NRLM | janvier-février 1978 | + 0,60 | [0,08] | (4) |
| BIPM | avril-mai 1978 | + 0,74 | 0,019 | (9) |
| NPL | novembre-déc. 1978 | + 0,52* | [± 0,11] | (1) |
| ASMW | janvier-mars 1979 | + 0,67** | [± 0,13] | (5) |
| IMM | avril-juin 1979 | - 0,19 | 0,045 | (9) |
| PTB | mai-juin 1980 | + 0,77 | [0,08] | (6) |
| BIPM | septembre 1980 | + 0,79 | 0,023 | (9) |
| IMGC | avril-mai 1981 | + 0,47 | [± 0,14] | (7) |
| NIM | juillet-août 1981 | + 0,58 | [0,03 ; 0,1] | (8) |
| CSIRO | avril 1982 | + 0,73 | [± 0,075] | (1) |
| OFMET | août 1983 | + 0,78 | [± 0,135] | (1) |
| BIPM | octobre-nov. 1983 | + 0,81 | 0,018 | (9) |
| IMM | avril-juin 1984 | + 0,80 | 0,037 | (9) |
| BIPM | octobre 1984 | + 0,78 | 0,021 | (9) |

Moyenne sans IMM 1979 { avec poids égaux + 0,67 µm ; $\underline{s}$ = 0,109 µm
avec poids 0,2 pour BIPM + 0,65 µm ; $\underline{s}$ = 0,107 µm

* Dans le rapport du NPL, paragraphe "Length interval, main scale", la valeur indiquée est + 0,52 µm ; dans le paragraphe "Calibration of intervals", tableau des décimètres, la valeur est + 0,49 µm.

** Dans le rapport de l'ASMW, les valeurs à 20 °C sont données dans les deux positions de la règle :

AB : 1 m + 0,689 µm
BA : 1 m + 0,656 µm.

Dans ce tableau, nous avons fait figurer la moyenne arithmétique (AB ; BA).

(1) Intervalle de confiance pour un niveau de confiance de 0,99.
(2) Pas d'indication sur le calcul.
(3) Somme arithmétique de la composante aléatoire (3 écarts-types) et de la composante systématique.
(4) Somme arithmétique de la composante proportionnelle à la longueur (écart-type) et de la composante indépendante de la longueur (écart-type).
(5) Somme arithmétique de la composante proportionnelle à la longueur et de la composante indépendante de la longueur ; pour chaque composante, intervalle de confiance pour un niveau de confiance de 99 %.
(6) Somme arithmétique de la partie aléatoire (écart-type d'une mesure) et de la partie systématique.
(7) Intervalle de confiance pour un niveau de confiance de 95 %.
(8) Partie aléatoire (écart-type) ; partie systématique (valeur maximale).
(9) Ecart-type.

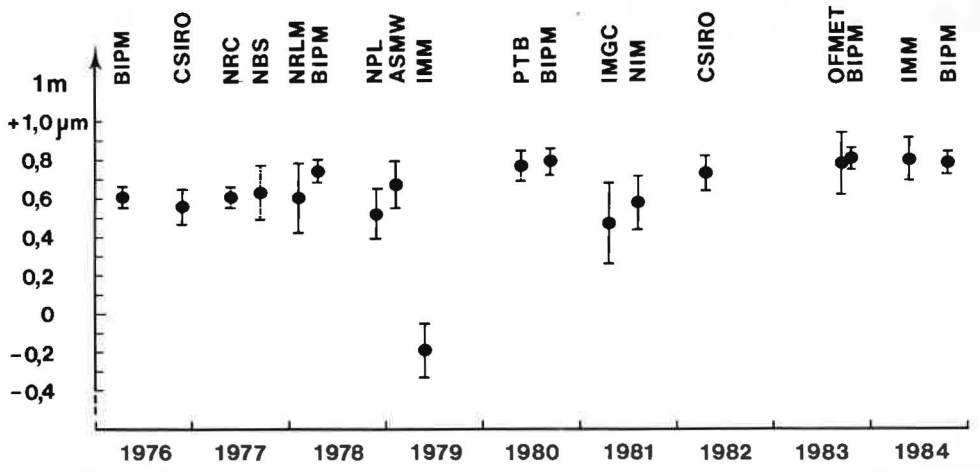


Fig. 1.- Règle N° 12924. Intervalle principal à 20 °C : écart mesuré par rapport à la valeur nominale de 1 mètre. Résultats des différents laboratoires dans l'ordre chronologique. Les barres d'incertitude en trait plein correspondent à ± 3 écarts-types ; en pointillé, elles correspondent à la valeur donnée par le laboratoire (NRC, NBS et PTB).

2 b2 - Allongement de la règle ; essai de correction

Il apparaît, d'après les mesures faites au BIPM, que la règle s'est légèrement allongée entre avril-mai 1978 et octobre 1984, en moyenne de 6,2 nm par an. Cet allongement est à peine significatif : il est déterminé avec un écart-type de 4,6 nm par an.

Malheureusement, il apparaît aussi qu'entre avril 1976 et avril-mai 1978 la valeur de l'intervalle principal de la règle a subi une discontinuité. En effet, une détermination préliminaire (4 mesures seulement) faite au BIPM en décembre 1975 avait donné 1 m + 0,624 µm avec un écart-type statistique $s_m$ = 0,013 µm ; cette valeur de 1975 conforte bien la valeur d'avril 1976 : 1 m + 0,612 µm avec $s_m$ = 0,007 µm. Par contre en 1978, on a obtenu 1 m + 0,744 µm, valeur compatible avec les trois suivantes, compte tenu des incertitudes statistiques.

Cette discontinuité est encore confirmée par les deux déterminations faites au CSIRO en 1976 et 1982.

La valeur de la discontinuité calculée d'après les mesures du BIPM et du CSIRO est de 0,138 µm.

Nous n'avons aucune explication évidente de cette discontinuité. Le seul fait anormal qui se soit manifesté, vers 1978, c'est l'augmentation du défaut de planéité de la règle que l'on peut constater sur la figure 5 b (voir plus loin 2 e), mais on voit mal comment il pourrait expliquer cet écart de 0,138 µm.

Il paraît exclu que cette discontinuité soit due à un déplacement accidentel du trait 0 ou du trait 1000, ou des deux, comme on en a observé pour quelques traits intermédiaires (voir plus loin 2 c). En effet, dans ce cas, on devrait trouver un déplacement apparent en sens contraire pour les traits voisins ; déplacement positif au

voisinage du trait 0 ou négatif au voisinage du trait 1000. Aucun effet permanent de ce genre ne s'est manifesté ni au voisinage du trait 0, ni au voisinage du trait 1000 (pour ce dernier, outre les valeurs du tableau 6, on dispose de mesures de la graduation en dixièmes de millimètre du millimètre supplémentaire 1002-1003, mesures qui ont été faites à chaque passage au BIPM.

Quelle qu'en soit la cause, on peut admettre que la règle a eu d'une part un allongement lent et régulier, fonction linéaire du temps, d'autre part un allongement brusque entre février et avril 1978. En admettant que les cinq mesures du BIPM et les deux mesures du CSIRO, correspondent en outre respectivement à deux valeurs moyennes différentes et en ajustant les paramètres par la méthode des moindres carrés, on trouve un allongement lent de 6,1 nm/an et un allongement brusque de 138 nm.

On peut alors réduire les mesures en tenant compte de leur date. C'est ce que l'on a fait au tableau 4 (p. 17) où l'on a ramené tous les résultats à la date du 1er janvier 1980. Les écarts résiduels entre chaque laboratoire et la moyenne sont résumés à la figure 2, où les barres d'incertitude ont la même signification qu'à la figure 1.

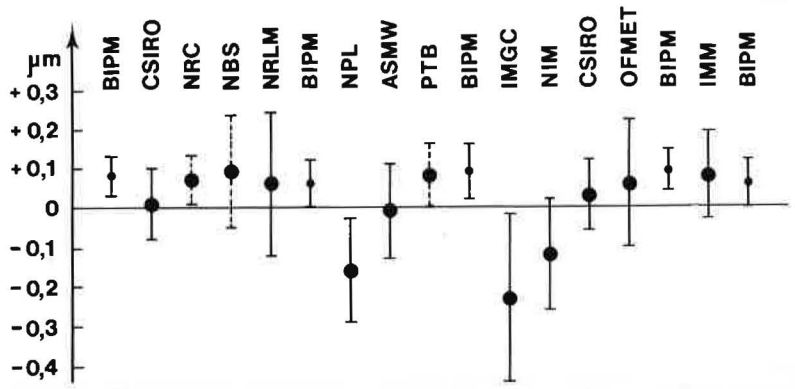


Fig. 2.- Règle N° 12924. Valeur corrigée de l'intervalle principal : (laboratoire)-(moyenne). Les barres d'incertitude en trait plein correspondent à ± 3 écarts-types. La valeur IMM (1979) est exclue.

En comparant le tableau 4 au tableau 3, on trouve que la correction appliquée ne diminue pas l'écart-type de façon significative. Les corrections de dérive et de discontinuité ne semblent donc pas justifiées. Cependant, il apparaît nettement sur la figure 2 ou sur le tableau 4 que trois mesures sur les 17 retenues présentent des écarts négatifs importants, alors que les 13 autres restent bien groupées. En mettant de côté les mesures du NPL, de l'IMGC et du NIM, on trouve que l'écart-type d'une mesure passe de 0,089 µm avant correction à 0,031 µm après correction. Un tel écart-type serait bien compatible avec les incertitudes estimées par les différents laboratoires, en moyenne de l'ordre de 0,12 µm pour trois fois l'écart-type. On verra plus loin qu'il est aussi bien compatible avec les écarts observés sur les "étalonnages relatifs" (voir 2 c).

Il est surprenant que les quatre mesures qui paraissent comporter un écart accidentel (IMM 1979, NPL, IMGC et NIM) conduisent toutes les quatre à une valeur faible. Seule une étude détaillée permettrait peut-être d'identifier l'origine de cette coïncidence.

Tableau 4

Règle N° 12924
Résultats corrigés pour l'allongement de la règle.

Résultats ramenés au 1er janvier 1980 en admettant un allongement régulier annuel de 6,1 nm (a) et un allongement brusque de 138 nm en février 1978 (b).

Unité : µm

| | | indiqué l m + | correction a | correction b | corrigé l m + | (Lab.)-(Moy.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| BIPM | (1976,3) | 0,612 | + 0,023 | + 0,138 | 0,77 | + 0,08 |
| CSIRO | (1976,9) | 0,548 | + 0,019 | + 0,138 | 0,70 | + 0,01 |
| NRC | (1977,4) | 0,61 | + 0,016 | + 0,138 | 0,76 | + 0,07 |
| NBS | (1977,7) | 0,63 | + 0,014 | + 0,138 | 0,78 | + 0,09 |
| NRLM | (1978,1) | 0,60 | + 0,012 | + 0,138 | 0,75 | + 0,06 |
| BIPM | (1978,3) | 0,744 | + 0,010 | | 0,75 | + 0,06 |
| NPL | (1978,9) | 0,52 | + 0,007 | | 0,53 | - 0,16 |
| ASMW | (1979,1) | 0,672 | + 0,006 | | 0,68 | - 0,01 |
| IMM | (1979,4) | - 0,19 | | | | |
| PTB | (1980,4) | 0,77 | - 0,002 | | 0,77 | + 0,08 |
| BIPM | (1980,7) | 0,787 | - 0,004 | | 0,78 | + 0,09 |
| IMGC | (1981,3) | 0,47 | - 0,008 | | 0,46 | - 0,23 |
| NIM | (1981,6) | 0,58 | - 0,010 | | 0,57 | - 0,12 |
| CSIRO | (1982,3) | 0,734 | - 0,014 | | 0,72 | + 0,03 |
| OFMET | (1983,7) | 0,777 | - 0,023 | | 0,75 | + 0,06 |
| BIPM | (1983,8) | 0,808 | - 0,023 | | 0,78 | + 0,09 |
| IMM | (1984,4) | 0,801 | - 0,027 | | 0,77 | + 0,08 |
| BIPM | (1984,8) | 0,776 | - 0,029 | | 0,75 | + 0,06 |

Moyenne (avec poids 0,2 pour chacune des cinq valeurs du BIPM et poids 0 pour IMM 1979) ..... 0,693 µm
Ecart-type d'un laboratoire ..... 0,105 µm

2 c - Position des traits intermédiaires par rapport à l'intervalle principal

Pour comparer les mesures concernant les traits intermédiaires, il nous a semblé souhaitable de faire apparaître leur position relative par rapport à l'intervalle principal : ce que nous appellerons "étalonnage relatif".

Le but de cette méthode est d'éliminer les composantes de l'incertitude qui sont proportionnelles à la longueur et proviennent de divers effets systématiques : incertitudes sur l'indice de réfraction de l'air, sur la dilatation de la règle (température et coefficient de dilatation) sur la longueur d'onde de la radiation utilisée et sur une éventuelle dérive, supposée homogène, de la longueur de la règle.

Le terme principal de l'incertitude résiduelle est alors celui qui provient du pointé des traits.

Par exemple, une règle dont les traits seraient vus par deux laboratoires de façon identique pourrait conduire à des valeurs différentes de l'intervalle principal mais devrait conduire au même étalonnage relatif.

Les valeurs de cet étalonnage relatif données au tableau 5 (p. 20 et 21) sont les écarts de position de chaque trait par rapport à celle du trait correspondant dans une échelle idéale qui diviserait régulièrement l'intervalle principal 0-1000 mm. Pour le millimètre supplémentaire divisé en dixièmes de millimètre, on a pris comme référence une échelle régulière en dix-millièmes de l'intervalle principal, en partant du trait 0,0.

Les écarts de l'étalonnage de chaque laboratoire par rapport à la moyenne des étalonnages de l'ensemble des laboratoires ayant étudié l'intervalle considéré sont donnés dans le tableau 6 p. 22 et 23.

Dans le tableau 7 (p. 24), on peut comparer les écarts-types du résultat d'un laboratoire par rapport à la moyenne de l'ensemble des laboratoires lorsqu'on considère la position (tableau 1, en excluant la valeur IMM 1979) ou l'étalonnage relatif (tableau 6, y compris la valeur IMM 1979).

Les écarts-types des valeurs de l'étalonnage relatif sont plus faibles que ceux des valeurs des positions, ce qui est naturel puisque ces dernières incluent les effets d'erreurs proportionnelles à la longueur. Il nous a paru intéressant de présenter les histogrammes correspondants (fig. 3).

En ce qui concerne les écarts-types de l'étalonnage relatif, les valeurs se groupent autour de 0,03 µm sauf deux valeurs de 0,10 µm. Ces deux valeurs correspondent au trait 0,5 mm du millimètre supplémentaire et au trait 1 mm de l'intervalle principal ; tous deux présentent un déplacement d'environ 0,3 µm à partir de la mesure de mai-juin 1980 (colonne PTB des tableaux 5 et 6) pour revenir ensuite à leur position première (à ce sujet, voir l'annexe).

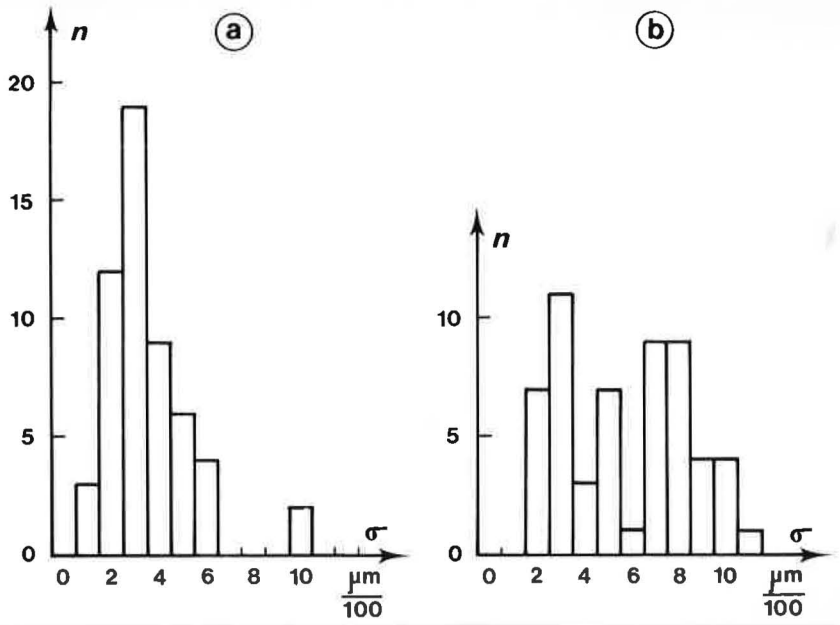


Fig. 3.- Règle N° 12924. Histogramme des écarts-types entre laboratoires ; a : "étalonnage relatif", b : "position".

Dans le tableau 7, les écarts-types tirés du tableau 1 "Position" incluent les effets de la dérive de longueur de la règle et, éventuellement de sa discontinuité. En toute rigueur, il convient d'éliminer ces effets ; c'est ce que nous avons fait, pour les intervalles décimétriques seulement, au tableau 8 (p. 25) qui donne les valeurs corrigées de la "position" des traits décimétriques. L'avant-dernière colonne indique les écarts-types d'un résultat (peu différents de ceux du tableau 7). La dernière colonne rappelle, pour comparaison, les écarts-types de l'"étalonnage relatif" tirés du tableau 7 (avec une décimale de plus). Les graphiques de la figure 4 illustrent la répartition de ces écarts-types.

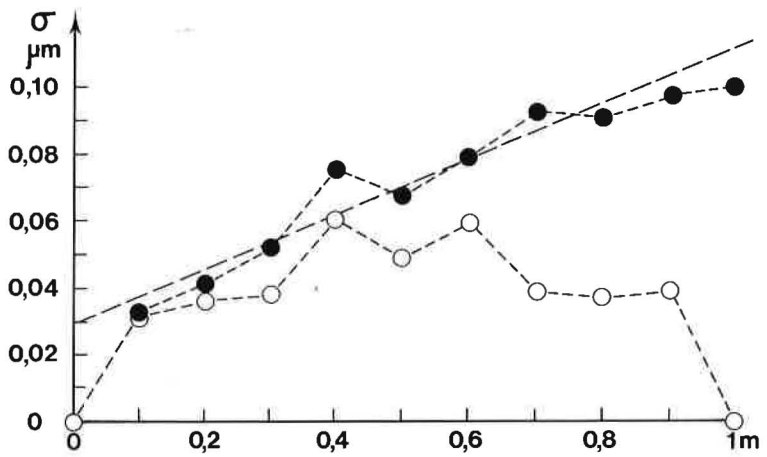


Fig. 4.- Règle N° 12924. Ecart-type entre laboratoires, pour les traits décimétriques ; ● : "position", o : "étalonnage relatif".

Tableau 5

Règle N° 12924

Etalonnage relatif

Unité : µm

| TRAIT mm | BIPM | CSIRO | NRC | NBS | NRLM | BIPM | NPL | ASMW | IMM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | -0,02 | -0,01 | ***** | -0,04 | -0,07 | -0,02 | -0,01 | -0,02 | 0,00 |
| 0,2 | -0,06 | -0,07 | ***** | -0,10 | -0,06 | -0,07 | -0,06 | -0,06 | -0,04 |
| 0,3 | -0,02 | -0,02 | ***** | -0,03 | -0,05 | -0,04 | -0,04 | -0,01 | -0,02 |
| 0,4 | -0,07 | -0,09 | ***** | -0,09 | -0,15 | -0,07 | -0,12 | -0,07 | -0,08 |
| 0,5 | 0,01 | -0,02 | ***** | -0,02 | -0,09 | 0,00 | -0,06 | 0,01 | 0,02 |
| 0,6 | -0,13 | -0,15 | ***** | -0,15 | -0,12 | -0,13 | -0,18 | -0,11 | -0,13 |
| 0,7 | -0,05 | -0,07 | ***** | -0,06 | -0,11 | -0,07 | -0,14 | -0,04 | -0,14 |
| 0,8 | -0,08 | -0,10 | ***** | -0,11 | -0,08 | -0,09 | -0,18 | -0,08 | -0,12 |
| 0,9 | -0,01 | -0,03 | ***** | -0,02 | -0,06 | -0,01 | -0,14 | 0,01 | -0,06 |
| 1,0 | -0,14 | -0,18 | ***** | -0,18 | -0,16 | -0,15 | -0,25 | -0,13 | -0,17 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,04 | 0,02 | ***** | 0,06 | -0,02 | 0,01 | 0,05 | 0,03 | -0,05 |
| 2 | 0,00 | 0,02 | ***** | 0,01 | -0,09 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | -0,05 |
| 3 | 0,01 | 0,01 | ***** | 0,03 | -0,06 | -0,02 | 0,00 | -0,02 | -0,05 |
| 4 | -0,03 | -0,03 | ***** | 0,01 | -0,11 | -0,05 | -0,02 | -0,03 | -0,06 |
| 5 | -0,10 | -0,10 | ***** | -0,07 | -0,12 | -0,11 | -0,10 | -0,08 | -0,16 |
| 6 | -0,02 | -0,06 | ***** | 0,01 | -0,05 | -0,05 | -0,03 | -0,03 | -0,01 |
| 7 | 0,04 | -0,01 | ***** | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 |
| 8 | 0,09 | 0,07 | ***** | 0,10 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 0,03 |
| 9 | 0,10 | 0,06 | ***** | 0,09 | 0,03 | 0,06 | 0,06 | 0,08 | 0,04 |
| 10 | 0,11 | 0,12 | 0,11 | 0,12 | 0,02 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,06 |
| 20 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,22 | 0,13 | 0,17 | 0,17 | 0,20 | 0,13 |
| 30 | 0,22 | 0,27 | 0,19 | 0,25 | 0,17 | 0,18 | 0,18 | 0,21 | 0,16 |
| 40 | 0,09 | 0,18 | 0,08 | 0,11 | 0,03 | 0,07 | 0,08 | 0,05 | 0,08 |
| 50 | -0,01 | 0,04 | -0,03 | 0,01 | -0,06 | -0,05 | -0,06 | -0,02 | -0,07 |
| 60 | 0,21 | 0,27 | 0,20 | 0,23 | 0,13 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,13 |
| 70 | 0,12 | 0,19 | 0,14 | 0,17 | 0,06 | 0,10 | 0,08 | 0,12 | 0,13 |
| 80 | -0,04 | 0,02 | -0,04 | -0,02 | -0,04 | -0,07 | -0,08 | -0,07 | -0,07 |
| 90 | 0,11 | 0,09 | 0,11 | 0,09 | 0,05 | 0,07 | 0,06 | 0,09 | 0,12 |
| 100 | 0,23 | ***** | 0,15 | 0,14 | 0,10 | 0,12 | 0,11 | 0,14 | 0,21 |
| 200 | 0,21 | ***** | 0,19 | 0,21 | 0,19 | 0,19 | 0,16 | 0,18 | 0,25 |
| 300 | 0,41 | ***** | 0,36 | 0,44 | 0,40 | 0,38 | 0,36 | 0,41 | 0,38 |
| 400 | 0,76 | ***** | 0,70 | 0,77 | 0,81 | 0,76 | 0,69 | 0,81 | 0,75 |
| 500 | 0,89 | ***** | 0,81 | 0,96 | 0,95 | 0,93 | 0,84 | 0,93 | 0,97 |
| 600 | 0,64 | ***** | 0,57 | 0,71 | 0,78 | 0,69 | 0,61 | 0,71 | 0,69 |
| 700 | 0,69 | ***** | 0,63 | 0,77 | 0,69 | 0,72 | 0,66 | 0,70 | 0,74 |
| 800 | 0,75 | ***** | 0,69 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,71 | 0,77 | 0,77 |
| 900 | 0,27 | ***** | 0,23 | 0,31 | 0,31 | 0,29 | 0,25 | 0,30 | 0,33 |
| 910 | 0,24 | ***** | 0,21 | ***** | 0,29 | 0,25 | ***** | ***** | ***** |
| 920 | 0,15 | ***** | 0,13 | ***** | 0,15 | 0,12 | ***** | ***** | ***** |
| 930 | 0,19 | ***** | 0,19 | ***** | 0,23 | 0,20 | ***** | ***** | ***** |
| 940 | 0,01 | ***** | 0,02 | ***** | 0,09 | 0,02 | ***** | ***** | ***** |
| 950 | 0,12 | ***** | 0,13 | ***** | 0,14 | 0,12 | ***** | ***** | ***** |
| 960 | -0,01 | ***** | 0,01 | ***** | 0,07 | -0,02 | ***** | ***** | ***** |
| 970 | 0,21 | ***** | 0,21 | ***** | 0,21 | 0,19 | ***** | ***** | ***** |
| 980 | 0,15 | ***** | 0,12 | ***** | 0,18 | 0,14 | ***** | ***** | ***** |
| 990 | 0,00 | ***** | 0,00 | ***** | 0,05 | 0,02 | ***** | ***** | ***** |
| 991 | 0,03 | ***** | ***** | ***** | 0,03 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 992 | -0,05 | ***** | ***** | ***** | 0,04 | -0,04 | ***** | ***** | ***** |
| 993 | -0,04 | ***** | ***** | ***** | -0,01 | -0,05 | ***** | ***** | ***** |
| 994 | -0,04 | ***** | ***** | ***** | -0,03 | -0,04 | ***** | ***** | ***** |
| 995 | -0,08 | ***** | ***** | ***** | -0,04 | -0,07 | ***** | ***** | ***** |
| 996 | 0,03 | ***** | ***** | ***** | 0,07 | 0,03 | ***** | ***** | ***** |
| 997 | 0,00 | ***** | ***** | ***** | 0,05 | 0,01 | ***** | ***** | ***** |
| 998 | 0,02 | ***** | ***** | ***** | 0,05 | 0,03 | ***** | ***** | ***** |
| 999 | 0,01 | ***** | ***** | ***** | 0,07 | 0,02 | ***** | ***** | ***** |
| 1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 5 (suite)

Règle N° 12924

Etalonnage relatif

Unité : µm

| TRAIT mm | PTB | BIPM | IMGC | NIM | CSIRO | OFMET | BIPM | IMM | BIPM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | -0,05 | -0,03 | -0,05 | 0,03 | ***** | -0,03 | -0,01 | 0,00 | -0,02 |
| 0,2 | -0,04 | -0,07 | -0,05 | -0,03 | ***** | -0,07 | -0,07 | -0,02 | -0,06 |
| 0,3 | -0,05 | -0,04 | -0,07 | 0,00 | ***** | -0,03 | -0,03 | 0,00 | -0,03 |
| 0,4 | -0,09 | -0,08 | -0,16 | -0,08 | ***** | -0,09 | -0,10 | 0,00 | -0,07 |
| 0,5 | 0,29 | 0,12 | 0,15 | -0,01 | ***** | 0,00 | 0,00 | -0,11 | 0,00 |
| 0,6 | -0,14 | -0,14 | -0,17 | -0,11 | ***** | -0,13 | -0,16 | -0,10 | -0,13 |
| 0,7 | -0,08 | -0,06 | -0,10 | -0,01 | ***** | -0,06 | -0,08 | -0,07 | -0,05 |
| 0,8 | 0,07 | -0,04 | -0,09 | -0,11 | ***** | -0,10 | -0,08 | -0,09 | -0,08 |
| 0,9 | 0,01 | -0,01 | -0,03 | -0,09 | ***** | 0,02 | -0,02 | -0,10 | 0,00 |
| 1,0 | -0,11 | -0,16 | -0,14 | -0,13 | ***** | -0,15 | -0,14 | -0,13 | -0,15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,34 | 0,19 | 0,24 | 0,01 | ***** | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,04 |
| 2 | 0,11 | 0,06 | 0,05 | -0,03 | ***** | 0,05 | 0,03 | -0,01 | 0,01 |
| 3 | -0,02 | 0,02 | 0,04 | -0,02 | ***** | -0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,00 |
| 4 | 0,13 | 0,09 | 0,01 | -0,06 | ***** | -0,03 | -0,01 | -0,02 | -0,03 |
| 5 | -0,24 | -0,17 | -0,19 | -0,07 | ***** | -0,10 | -0,07 | -0,08 | -0,10 |
| 6 | -0,02 | -0,01 | -0,02 | -0,02 | ***** | -0,03 | -0,01 | -0,09 | -0,02 |
| 7 | 0,02 | 0,05 | 0,01 | 0,00 | ***** | 0,02 | 0,07 | -0,03 | 0,04 |
| 8 | 0,03 | 0,08 | 0,07 | 0,02 | ***** | 0,05 | 0,09 | 0,07 | 0,08 |
| 9 | 0,05 | 0,10 | 0,08 | 0,04 | ***** | 0,04 | 0,10 | 0,06 | 0,10 |
| 10 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,08 | ***** | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,13 |
| 20 | 0,17 | 0,21 | 0,20 | 0,18 | ***** | 0,24 | 0,24 | 0,19 | 0,22 |
| 30 | 0,20 | 0,23 | 0,21 | 0,17 | ***** | 0,23 | 0,23 | 0,24 | 0,24 |
| 40 | 0,03 | 0,11 | 0,12 | 0,06 | ***** | 0,03 | 0,10 | 0,08 | 0,11 |
| 50 | -0,03 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | ***** | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 60 | 0,34 | 0,24 | 0,22 | 0,17 | ***** | 0,20 | 0,24 | 0,17 | 0,23 |
| 70 | 0,09 | 0,12 | 0,00 | 0,12 | ***** | 0,11 | 0,15 | 0,16 | 0,13 |
| 80 | -0,05 | -0,04 | -0,04 | -0,03 | ***** | -0,05 | -0,03 | -0,07 | -0,04 |
| 90 | 0,09 | 0,10 | 0,09 | 0,07 | ***** | 0,08 | 0,11 | 0,07 | 0,10 |
| 100 | 0,15 | 0,16 | 0,15 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,17 | 0,16 | 0,17 |
| 200 | 0,13 | 0,21 | 0,19 | 0,21 | 0,25 | 0,17 | 0,21 | 0,11 | 0,21 |
| 300 | 0,31 | 0,39 | 0,37 | 0,38 | 0,40 | 0,40 | 0,41 | 0,28 | 0,39 |
| 400 | 0,70 | 0,78 | 0,75 | 0,79 | 0,87 | 0,80 | 0,81 | 0,61 | 0,78 |
| 500 | 0,85 | 0,90 | ***** | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,93 | 0,90 |
| 600 | 0,60 | 0,66 | 0,68 | 0,77 | 0,69 | 0,74 | 0,63 | 0,62 | 0,68 |
| 700 | 0,66 | 0,71 | 0,69 | 0,65 | 0,71 | 0,73 | 0,76 | 0,67 | 0,72 |
| 800 | 0,65 | 0,75 | 0,79 | 0,77 | 0,76 | 0,73 | 0,76 | 0,79 | 0,74 |
| 900 | 0,17 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,32 | 0,27 | 0,27 | 0,23 | 0,26 |
| 910 | ***** | 0,24 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,23 | ***** | 0,21 |
| 920 | ***** | 0,14 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,14 | ***** | 0,14 |
| 930 | ***** | 0,19 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,19 | ***** | 0,19 |
| 940 | ***** | 0,00 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,02 | ***** | 0,00 |
| 950 | ***** | 0,14 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,12 | ***** | 0,11 |
| 960 | ***** | -0,02 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,02 | ***** | -0,02 |
| 970 | ***** | 0,18 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,16 | ***** | 0,15 |
| 980 | ***** | 0,12 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,10 | ***** | 0,11 |
| 990 | ***** | 0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,02 | ***** | -0,01 |
| 991 | ***** | 0,00 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,00 | ***** | -0,02 |
| 992 | ***** | -0,05 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,06 | ***** | -0,06 |
| 993 | ***** | -0,07 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,06 | ***** | -0,07 |
| 994 | ***** | -0,06 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,06 | ***** | -0,07 |
| 995 | ***** | -0,09 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,08 | ***** | -0,09 |
| 996 | ***** | 0,10 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,02 | ***** | 0,01 |
| 997 | ***** | -0,02 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,03 | ***** | -0,02 |
| 998 | ***** | 0,02 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,03 | ***** | -0,02 |
| 999 | ***** | 0,00 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,00 | ***** | 0,00 |
| 1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 6

Règle N° 12924

Etalonnage relatif :
écarts (laboratoire) - (moyenne)

Unité : µm

| TRAIT mm | BIPM | CSIRO | NRC | NBS | NRLM | BIPM | NPL | ASMW | IMM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | 0,01 | 0,02 | ***** | -0,02 | -0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 |
| 0,2 | 0,00 | -0,02 | ***** | -0,04 | 0,00 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| 0,3 | 0,01 | 0,01 | ***** | 0,00 | -0,02 | -0,01 | -0,01 | 0,02 | 0,01 |
| 0,4 | 0,02 | 0,00 | ***** | 0,00 | -0,06 | 0,01 | -0,03 | 0,02 | 0,01 |
| 0,5 | -0,01 | -0,04 | ***** | -0,04 | -0,11 | -0,02 | -0,08 | -0,01 | 0,00 |
| 0,6 | 0,01 | -0,01 | ***** | -0,01 | 0,02 | 0,00 | -0,04 | 0,03 | 0,01 |
| 0,7 | 0,02 | 0,00 | ***** | 0,01 | -0,04 | 0,01 | -0,07 | 0,04 | -0,07 |
| 0,8 | 0,00 | -0,02 | ***** | -0,03 | 0,00 | -0,01 | -0,10 | 0,01 | -0,03 |
| 0,9 | 0,03 | 0,01 | ***** | 0,01 | -0,03 | 0,02 | -0,11 | 0,05 | -0,03 |
| 1,0 | 0,02 | -0,03 | ***** | -0,03 | -0,01 | 0,00 | -0,10 | 0,03 | -0,02 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | -0,02 | -0,05 | ***** | 0,00 | -0,08 | -0,06 | -0,01 | -0,04 | -0,11 |
| 2 | -0,01 | 0,01 | ***** | 0,00 | -0,10 | -0,03 | -0,01 | 0,00 | -0,06 |
| 3 | 0,01 | 0,02 | ***** | 0,03 | -0,06 | -0,02 | 0,00 | -0,02 | -0,05 |
| 4 | -0,01 | -0,01 | ***** | 0,02 | -0,10 | -0,04 | -0,01 | -0,01 | -0,04 |
| 5 | 0,02 | 0,02 | ***** | 0,04 | -0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | -0,04 |
| 6 | 0,01 | -0,03 | ***** | 0,04 | -0,02 | -0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| 7 | 0,02 | -0,03 | ***** | 0,04 | -0,01 | -0,01 | 0,00 | 0,00 | -0,02 |
| 8 | 0,03 | 0,01 | ***** | 0,04 | -0,05 | -0,03 | 0,01 | -0,01 | -0,03 |
| 9 | 0,03 | -0,01 | ***** | 0,03 | -0,03 | -0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,03 |
| 10 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | -0,09 | -0,02 | 0,00 | 0,01 | -0,05 |
| 20 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | -0,06 | -0,03 | -0,02 | 0,00 | -0,06 |
| 30 | 0,01 | 0,06 | -0,02 | 0,04 | -0,04 | -0,03 | -0,03 | 0,00 | -0,06 |
| 40 | 0,01 | 0,10 | -0,01 | 0,03 | -0,06 | -0,01 | 0,00 | -0,03 | -0,01 |
| 50 | 0,00 | 0,05 | -0,02 | 0,02 | -0,05 | -0,03 | -0,04 | -0,01 | -0,06 |
| 60 | 0,01 | 0,06 | 0,00 | 0,02 | -0,07 | -0,02 | -0,03 | -0,03 | -0,08 |
| 70 | 0,01 | 0,07 | 0,02 | 0,05 | -0,06 | -0,02 | -0,03 | 0,00 | 0,02 |
| 80 | 0,00 | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | -0,03 | -0,04 | -0,03 | -0,03 |
| 90 | 0,03 | -0,08 | 0,02 | 0,01 | -0,04 | -0,02 | -0,02 | 0,01 | 0,03 |
| 100 | 0,07 | ***** | 0,00 | -0,02 | -0,05 | -0,03 | -0,05 | -0,01 | 0,06 |
| 200 | 0,01 | ***** | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | -0,04 | -0,01 | 0,06 |
| 300 | 0,03 | ***** | -0,02 | 0,06 | 0,02 | 0,00 | -0,02 | 0,03 | 0,00 |
| 400 | 0,00 | ***** | -0,07 | 0,01 | 0,05 | 0,00 | -0,07 | 0,05 | -0,02 |
| 500 | -0,03 | ***** | -0,11 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | -0,08 | 0,01 | 0,05 |
| 600 | -0,03 | ***** | -0,10 | 0,04 | 0,11 | 0,01 | -0,07 | 0,04 | 0,02 |
| 700 | -0,01 | ***** | -0,07 | 0,07 | -0,01 | 0,02 | -0,04 | 0,00 | 0,04 |
| 800 | 0,00 | ***** | -0,06 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | -0,04 | 0,02 | 0,02 |
| 900 | 0,00 | ***** | -0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | -0,02 | 0,03 | 0,06 |
| 910 | 0,00 | ***** | -0,03 | ***** | 0,05 | 0,01 | ***** | ***** | ***** |
| 920 | 0,01 | ***** | -0,01 | ***** | 0,01 | -0,01 | ***** | ***** | ***** |
| 930 | -0,01 | ***** | -0,01 | ***** | 0,03 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 940 | -0,01 | ***** | -0,01 | ***** | 0,06 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 950 | -0,01 | ***** | 0,01 | ***** | 0,02 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 960 | -0,01 | ***** | 0,02 | ***** | 0,07 | -0,02 | ***** | ***** | ***** |
| 970 | 0,02 | ***** | 0,02 | ***** | 0,02 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 980 | 0,01 | ***** | -0,01 | ***** | 0,05 | 0,01 | ***** | ***** | ***** |
| 990 | 0,00 | ***** | -0,01 | ***** | 0,04 | 0,01 | ***** | ***** | ***** |
| 991 | 0,03 | ***** | ***** | ***** | 0,02 | -0,01 | ***** | ***** | ***** |
| 992 | -0,01 | ***** | ***** | ***** | 0,08 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 993 | 0,01 | ***** | ***** | ***** | 0,04 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 994 | 0,01 | ***** | ***** | ***** | 0,02 | 0,01 | ***** | ***** | ***** |
| 995 | -0,01 | ***** | ***** | ***** | 0,04 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 996 | -0,02 | ***** | ***** | ***** | 0,03 | -0,02 | ***** | ***** | ***** |
| 997 | 0,00 | ***** | ***** | ***** | 0,05 | 0,01 | ***** | ***** | ***** |
| 998 | 0,01 | ***** | ***** | ***** | 0,04 | 0,02 | ***** | ***** | ***** |
| 999 | 0,00 | ***** | ***** | ***** | 0,05 | 0,00 | ***** | ***** | ***** |
| 1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 6 (suite)

Règle N° 12924

Etalonnage relatif :
écarts (laboratoire) - (moyenne)

Unité : µm

| TRAIT mm | PTB | BIPM | IMGC | NIM | CSIRO | OFMET | BIPM | IMM | BIPM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | -0,03 | -0,01 | -0,03 | 0,05 | ***** | -0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 |
| 0,2 | 0,02 | -0,01 | 0,01 | 0,03 | ***** | -0,01 | -0,01 | 0,04 | 0,00 |
| 0,3 | -0,02 | -0,01 | -0,04 | 0,03 | ***** | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 |
| 0,4 | 0,00 | 0,01 | -0,07 | 0,01 | ***** | 0,00 | -0,01 | 0,08 | 0,02 |
| 0,5 | 0,27 | 0,11 | 0,13 | -0,03 | ***** | -0,02 | -0,02 | -0,13 | -0,01 |
| 0,6 | 0,00 | -0,01 | -0,03 | 0,03 | ***** | 0,00 | -0,02 | 0,04 | 0,00 |
| 0,7 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,06 | ***** | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,02 |
| 0,8 | 0,15 | 0,04 | -0,01 | -0,03 | ***** | -0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| 0,9 | 0,04 | 0,02 | 0,00 | -0,06 | ***** | 0,05 | 0,01 | -0,06 | 0,03 |
| 1,0 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | ***** | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,01 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,28 | 0,12 | 0,18 | -0,05 | ***** | -0,06 | -0,01 | -0,06 | -0,02 |
| 2 | 0,10 | 0,05 | 0,04 | -0,04 | ***** | 0,04 | 0,02 | -0,02 | 0,00 |
| 3 | -0,02 | 0,03 | 0,04 | -0,02 | ***** | -0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,00 |
| 4 | 0,14 | 0,11 | 0,02 | -0,05 | ***** | -0,02 | 0,01 | -0,01 | -0,02 |
| 5 | -0,13 | -0,05 | -0,08 | 0,04 | ***** | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 0,02 |
| 6 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | ***** | 0,00 | 0,02 | -0,06 | 0,01 |
| 7 | 0,00 | 0,03 | -0,01 | -0,02 | ***** | 0,00 | 0,05 | -0,05 | 0,02 |
| 8 | -0,03 | 0,02 | 0,01 | -0,04 | ***** | -0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,02 |
| 9 | -0,02 | 0,03 | 0,01 | -0,02 | ***** | -0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 |
| 10 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | -0,03 | ***** | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,01 |
| 20 | -0,02 | 0,02 | 0,01 | -0,01 | ***** | 0,04 | 0,05 | 0,00 | 0,02 |
| 30 | -0,01 | 0,01 | -0,01 | -0,04 | ***** | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 |
| 40 | -0,05 | 0,03 | 0,04 | -0,03 | ***** | -0,05 | 0,02 | -0,01 | 0,02 |
| 50 | -0,02 | 0,01 | -0,01 | 0,01 | ***** | 0,01 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 60 | 0,14 | 0,03 | 0,01 | -0,04 | ***** | -0,01 | 0,03 | -0,03 | 0,02 |
| 70 | -0,03 | 0,01 | -0,12 | 0,00 | ***** | -0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,02 |
| 80 | -0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | ***** | 0,00 | 0,02 | -0,03 | 0,00 |
| 90 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | -0,01 | ***** | 0,00 | 0,03 | -0,01 | 0,02 |
| 100 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | -0,01 | -0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| 200 | -0,07 | 0,02 | -0,01 | 0,02 | 0,06 | -0,02 | 0,02 | -0,08 | 0,02 |
| 300 | -0,07 | 0,01 | -0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | -0,10 | 0,01 |
| 400 | -0,06 | 0,02 | -0,01 | 0,03 | 0,11 | 0,04 | 0,05 | -0,15 | 0,02 |
| 500 | -0,07 | -0,02 | ***** | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | -0,02 |
| 600 | -0,08 | -0,02 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,06 | -0,05 | -0,05 | 0,00 |
| 700 | -0,04 | 0,01 | -0,01 | -0,05 | 0,01 | 0,03 | 0,06 | -0,03 | 0,02 |
| 800 | -0,10 | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | -0,02 | 0,01 | 0,04 | -0,01 |
| 900 | -0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | -0,04 | -0,01 |
| 910 | ***** | 0,00 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,01 | ***** | -0,03 |
| 920 | ***** | 0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,00 | ***** | 0,00 |
| 930 | ***** | -0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,01 | ***** | 0,00 |
| 940 | ***** | -0,02 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,00 | ***** | -0,02 |
| 950 | ***** | 0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,01 | ***** | -0,02 |
| 960 | ***** | -0,02 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,02 | ***** | -0,02 |
| 970 | ***** | 0,00 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,03 | ***** | -0,03 |
| 980 | ***** | -0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,03 | ***** | -0,02 |
| 990 | ***** | 0,00 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,03 | ***** | -0,02 |
| 991 | ***** | -0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,01 | ***** | -0,03 |
| 992 | ***** | -0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,02 | ***** | -0,03 |
| 993 | ***** | -0,02 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,01 | ***** | -0,02 |
| 994 | ***** | -0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,01 | ***** | -0,02 |
| 995 | ***** | -0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | 0,00 | ***** | -0,02 |
| 996 | ***** | 0,05 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,02 | ***** | -0,03 |
| 997 | ***** | -0,01 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,03 | ***** | -0,01 |
| 998 | ***** | 0,00 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,04 | ***** | -0,03 |
| 999 | ***** | -0,02 | ***** | ***** | ***** | ***** | -0,02 | ***** | -0,02 |
| 1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 0 |

Tableau 7

Règle N° 12 924

Ecarts-types "Position" et "Etalonnage relatif"

Unité : µm

| TRAIT mm | ECARTS-TYPES POSITION * | ETALONNAGE |
|---|---|---|
| 0,0 | 0 | 0 |
| 0,1 | 0,02 | 0,02 |
| 0,2 | 0,02 | 0,02 |
| 0,3 | 0,02 | 0,02 |
| 0,4 | 0,04 | 0,04 |
| 0,5 | 0,10 | 0,10 |
| 0,6 | 0,02 | 0,02 |
| 0,7 | 0,03 | 0,03 |
| 0,8 | 0,05 | 0,05 |
| 0,9 | 0,05 | 0,04 |
| 1,0 | 0,03 | 0,03 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,10 | 0,10 |
| 2 | 0,05 | 0,05 |
| 3 | 0,03 | 0,03 |
| 4 | 0,06 | 0,06 |
| 5 | 0,05 | 0,05 |
| 6 | 0,02 | 0,02 |
| 7 | 0,03 | 0,03 |
| 8 | 0,03 | 0,03 |
| 9 | 0,02 | 0,02 |
| 10 | 0,03 | 0,03 |
| 20 | 0,03 | 0,03 |
| 30 | 0,03 | 0,03 |
| 40 | 0,04 | 0,04 |
| 50 | 0,03 | 0,03 |
| 60 | 0,05 | 0,05 |
| 70 | 0,05 | 0,05 |
| 80 | 0,02 | 0,03 |
| 90 | 0,03 | 0,03 |
| 100 | 0,03 | 0,03 |
| 200 | 0,04 | 0,04 |
| 300 | 0,05 | 0,04 |
| 400 | 0,08 | 0,06 |
| 500 | 0,08 | 0,05 |
| 600 | 0,08 | 0,06 |
| 700 | 0,10 | 0,04 |
| 800 | 0,09 | 0,04 |
| 900 | 0,10 | 0,04 |
| 910 | 0,08 | 0,03 |
| 920 | 0,09 | 0,01 |
| 930 | 0,08 | 0,01 |
| 940 | 0,08 | 0,03 |
| 950 | 0,09 | 0,01 |
| 960 | 0,07 | 0,04 |
| 970 | 0,07 | 0,02 |
| 980 | 0,07 | 0,03 |
| 990 | 0,08 | 0,02 |
| 991 | 0,07 | 0,02 |
| 992 | 0,07 | 0,04 |
| 993 | 0,07 | 0,02 |
| 994 | 0,08 | 0,02 |
| 995 | 0,08 | 0,02 |
| 996 | 0,09 | 0,03 |
| 997 | 0,07 | 0,03 |
| 998 | 0,07 | 0,03 |
| 999 | 0,07 | 0,03 |
| 1000 | 0,11 | 0,00 |

*sans la valeur IMM (1979).

## Tableau 8

Règle N° 12924
Traits décimétriques, position corrigée
de la dérive et de la discontinuité de la longueur de la règle

Unité : µm

| | BIPM | NRC | NBS | NRLM | BIPM | NPL | ASMW | PTB | BIPM | IMGC | NIM | CSIRO | OFMET | BIPM | IMM | BIPM | "Position" Ecart-type (1 labo) | "Etalonnage" Ecart-type (1 labo) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 100 | 0,30 | 0,22 | 0,21 | 0,17 | 0,20 | 0,16 | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,20 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,26 | 0,24 | 0,24 | 0,033 | 0,032 |
| 200 | 0,36 | 0,34 | 0,37 | 0,34 | 0,34 | 0,26 | 0,32 | 0,28 | 0,37 | 0,28 | 0,33 | 0,40 | 0,33 | 0,37 | 0,27 | 0,36 | 0,041 | 0,036 |
| 300 | 0,64 | 0,59 | 0,68 | 0,63 | 0,60 | 0,52 | 0,61 | 0,54 | 0,63 | 0,51 | 0,55 | 0,62 | 0,62 | 0,64 | 0,51 | 0,62 | 0,052 | 0,038 |
| 400 | 1,07 | 1,00 | 1,08 | 1,11 | 1,06 | 0,90 | 1,08 | 1,01 | 1,10 | 0,94 | 1,02 | 1,15 | 1,10 | 1,13 | 0,92 | 1,08 | 0,075 | 0,060 |
| 500 | 1,28 | 1,20 | 1,36 | 1,33 | 1,30 | 1,10 | 1,27 | 1,24 | 1,30 | xxxx | 1,23 | 1,32 | 1,35 | 1,35 | 1,32 | 1,27 | 0,068 | 0,049 |
| 600 | 1,10 | 1,03 | 1,18 | 1,23 | 1,14 | 0,92 | 1,11 | 1,06 | 1,13 | 0,96 | 1,11 | 1,12 | 1,19 | 1,10 | 1,08 | 1,13 | 0,079 | 0,059 |
| 700 | 1,23 | 1,17 | 1,32 | 1,22 | 1,25 | 1,02 | 1,17 | 1,20 | 1,26 | 1,01 | 1,05 | 1,21 | 1,26 | 1,30 | 1,21 | 1,24 | 0,093 | 0,039 |
| 800 | 1,37 | 1,30 | 1,49 | 1,37 | 1,37 | 1,14 | 1,30 | 1,27 | 1,38 | 1,16 | 1,22 | 1,34 | 1,33 | 1,38 | 1,41 | 1,33 | 0,091 | 0,037 |
| 900 | 0,97 | 0,92 | 1,02 | 0,99 | 0,97 | 0,73 | 0,92 | 0,86 | 0,99 | 0,69 | 0,79 | 0,97 | 0,95 | 0,98 | 0,93 | 0,94 | 0,097 | 0,039 |
| 1000 | 0,77 | 0,76 | 0,78 | 0,75 | 0,75 | 0,53 | 0,68 | 0,77 | 0,78 | 0,46 | 0,57 | 0,72 | 0,75 | 0,78 | 0,77 | 0,75 | 0,100 | |

L'examen de la figure 4 suggère quelques réflexions :

Les points représentant les écarts-types des résultats "Position" sont dispersés de part et d'autre d'une droite dont la pente est d'environ 0,08 µm par mètre et l'ordonnée à l'origine d'environ 0,03 µm. Cet écart-type de 0,03 µm est aussi celui des valeurs de l'étalonnage relatif du premier trait décimétrique ; c'est aussi la valeur moyenne des écarts-types sur les divisions en dixièmes de millimètre du millimètre supplémentaire indiqués au tableau 7 (si on excepte le trait 0,5 mm qui manifestement semble avoir subi un déplacement en 1979 avant de reprendre, peu à peu, sa position comme on peut le voir au tableau 1.

Cet écart-type de 0,03 µm semble bien caractériser l'incertitude de la mesure d'un intervalle lorsque seule l'incertitude des pointés des deux traits définissant cet intervalle intervient. La reproductibilité de "lecture" d'un seul trait par les divers microscopes utilisés par les laboratoires serait donc caractérisée par un écart-type de l'ordre de $\underline{s} = 0{,}03\ \mu m/\sqrt{2} = 0{,}02\ \mu m$.

Ce manque de reproductibilité peut être le fait, d'une part, des caractéristiques optiques et électroniques différentes des microscopes photoélectriques mais aussi, d'autre part, du manque de "stabilité" des traits eux-mêmes dont l'aspect peut être affecté par des dépôts de souillures que les nettoyages peuvent modifier sans les supprimer complètement. L'exemple du trait 0,5 mm cité plus haut est caractéristique.

La pente de 0,08 µm par mètre de la droite moyenne de la figure 4 caractériserait donc la composante de l'incertitude qui est proportionnelle à la longueur mesurée, composante résultant principalement de l'incertitude sur les corrections de dilatation et d'indice de réfraction de l'air. Cette composante inclut aussi, bien sûr, un terme provenant de la variation de la longueur de la règle elle-même, mais ce terme semble à peine significatif dans le cas présent.

On peut écrire que l'écart-type sur le résultat d'un laboratoire pour les intervalles mesurés est en moyenne

$$\underline{s} = (0{,}03 + 0{,}08\ \underline{L})\ \mu m$$

où $\underline{L}$ est la longueur mesurée en mètre.

L'écart-type sur l'intervalle principal 0-1000 mm est un peu plus petit parce qu'en général cet intervalle particulier a fait l'objet d'un plus grand nombre de mesures.

En ce qui concerne les écarts-types des valeurs de l'"étalonnage relatif", les incertitudes résiduelles sont essentiellement dues aux pointés des traits, avec un écart-type de 0,02 µm pour chaque trait au voisinage des extrémités de la règle.

Il est néanmoins compréhensible, du fait que la règle N° 12924 présente un défaut de planéité important, que les écarts-types puissent être supérieurs vers le milieu de la règle où la défocalisation est maximale.

2 d - Coefficient de dilatation linéique

Les résultats obtenus sont résumés au tableau 9.

Les valeurs entre crochets sont les incertitudes indiquées par les laboratoires lorsqu'elles ne sont pas exprimées sous la forme d'un écart-type.

Tableau 9

Règle N° 12924
Coefficient de dilatation

| laboratoire | $\alpha_{20}$ | écart-type ou incertitude |
|---|---|---|
| BIPM (1968)* | $11{,}740 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ | $0{,}004 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ |
| CSIRO (1976) | 11,67 | [± 0,07] |
| NBS (1977) | 11,72 | 0,012 |
| NRLM (1978) | 11,756 | (non indiquée) |
| BIPM (1978)* | 11,745 | 0,004 |
| NPL (1978) | 11,70 | [± 0,06] |
| PTB (1980) | 11,78 | [0,05] |
| IMGC (1981) | 11,82 | [± 0,12] |
| NIM (1981) | 11,794 | 0,019 |
| Moyenne | $11{,}748 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ | |
| Ecart-type d'une détermination : | $0{,}050 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ | |

* La moyenne des deux déterminations du BIPM est seule prise en compte.

CSIRO - 40 mesures ont été faites à des températures comprises entre 18,73 °C et 22,66 °C. La variance associée à la pente de la droite de régression est $6{,}00 \times 10^{-16}/°C^2$ et l'écart-type du résultat est $0{,}0245 \times 10^{-6}/°C$. Etant donnés les 38 degrés de liberté, l'incertitude du résultat est $\pm\ 0{,}07 \times 10^{-6}/°C$ avec un niveau de confiance de 99 %.

NBS - 20 mesures ont été faites à des températures comprises entre 18 °C et 24 °C. L'incertitude indiquée est 3 écarts-types = $3 \times (0{,}012\ 06 \times 10^{-6}) = 0{,}04 \times 10^{-6}/°C$.

NRLM - N'indique pas l'incertitude.

NPL - La détermination du coefficient de dilatation a été faite entre 0,28 °C et 37,46 °C par comparaison de la longueur de la règle N° 12924 à celle du Mètre N° 16, copie de l'ancien Mètre international, dans un comparateur à deux auges dont l'une était maintenue à 20 °C. Une équation quadratique de la forme $\Delta L_t = A + Bt + Ct^2$ est ajustée sur les variations de longueur observées. A partir de l'équation $\alpha_t = B + 2Ct$, on calcule $\alpha_{20}$.

Les écarts-types $\underline{\sigma}_A$, $\underline{\sigma}_B$, $\underline{\sigma}_C$ sur les coefficients peuvent être déduits de la somme des carrés des écarts résiduels entre les valeurs observées et calculées, divisée par le nombre résiduel de degrés de liberté et multipliée par un facteur dépendant des équations de condition qui décrivent les observations.
L'écart-type $\underline{\alpha}_{20}$ est

$$\left[\underline{\sigma}_B^2 \left(\frac{\partial \underline{\alpha}_{20}}{\partial \underline{B}}\right)^2 + \underline{\sigma}_C^2 \left(\frac{\partial \underline{\alpha}_{20}}{\partial \underline{C}}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \pm\ 0{,}015 \times 10^{-6}\ K^{-1}$$

L'intervalle de confiance, à un niveau de probabilité de 0,99, pour six observations, est obtenu en multipliant cet écart-type par le facteur 4,032, soit $\pm\ 0{,}06 \times 10^{-6}\ K^{-1}$.

PTB - La détermination a été faite par une méthode comparative. La longueur de la règle a été comparée à 12 températures comprises entre 15 °C et 25 °C à celle d'une règle en acier dont le coefficient de dilatation est lui-même connu par rapport à celui du Prototype N° 23 mesuré par le BIPM en 1955.

| | | |
|---|---|---|
| Incertitude | partie aléatoire | : $0{,}02 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ |
| | partie systématique | : $0{,}03 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ |
| | totale | : $0{,}05 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ |

IMGC - Le coefficient de dilatation a été déterminé par des mesures de la règle entre 19,5 °C et 20,5 °C. L'écart quadratique moyen des résultats aux différentes températures est 0,04 µm. Le coefficient de corrélation de la droite de régression vaut 0,999 42. L'écart quadratique moyen de la pente de la droite de régression est $0{,}057 \times 10^{-6}\ K^{-1}$.
En tenant compte des incertitudes systématiques, on obtient l'incertitude globale sur $\underline{\alpha}_{20}$ :
$\pm\ 0{,}12 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ pour un niveau de confiance de 95 %.

NIM - La mesure du coefficient de dilatation utilise une méthode comparative. La règle en cours d'étude et une règle de coefficient de dilatation connu sont placées respectivement dans les deux auges d'un comparateur. On a exécuté 18 mesures à des températures comprises entre 11,733 °C et 28,438 °C. On a obtenu ainsi les coefficients $\underline{\alpha}$ et $\underline{\beta}$ de la formule :

$$\underline{L}(\underline{t}) = \underline{L}\ (20\ °C)\left[1 + \underline{\alpha}\ (\underline{t} - 20\ °C) + \underline{\beta}\ (\underline{t} - 20\ °C)^2\right]$$
$$\underline{\alpha} = 11{,}794 \times 10^{-6}\ K^{-1}$$
$$\underline{\beta} = -\ 0{,}0046 \times 10^{-6}\ K^{-2}.$$

L'incertitude sur $\underline{\alpha}$ est $0{,}019 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ (écart-type) et sur $\underline{\beta}$ : $0{,}0039 \times 10^{-6}\ K^{-2}$ (écart-type).

BIPM - En 1968, treize mesures de l'intervalle 0-1000 mm ont été faites entre 17,26 et 22,73 °C ; en 1978, treize mesures ont été faites entre 17,13 et 23,45 °C.
L'incertitude composée a été calculée ainsi :

| | 1968 | 1978 |
|---|---|---|
| incertitude statistique (type A), écart-type : | $3,5 \times 10^{-9}$ $K^{-1}$ | $2,9 \times 10^{-9}$ $K^{-1}$ |
| incertitude complémentaire (type B), écart-type : | $2,6 \times 10^{-9}$ $K^{-1}$ | $2,6 \times 10^{-9}$ $K^{-1}$ |
| somme quadratique : | $4,4 \times 10^{-9}$ $K^{-1}$ | $3,9 \times 10^{-9}$ $K^{-1}$ |

2 e - Etude de la planéité

En 1976, notre attention n'avait pas été attirée par le défaut de planéité de la surface tracée de la règle N° 12924. Mais plusieurs laboratoires ont été gênés par ce défaut et en ont fait état dans leurs rapports.

Le tableau 10 suivant résume les divers résultats obtenus pour l'écart de la surface par rapport au plan passant par les traits 0 et 1000 ; pour plus de clarté, nous n'avons donné que les valeurs correspondant aux traits décimétriques. Trois laboratoires n'ont donné que la valeur de la flèche au trait 500 mm. Enfin, signalons que pour les laboratoires marqués d'un astérisque dans le tableau, les valeurs indiquées ont été relevées sur des graphiques.

La figure 5 illustre ces résultats ; en a) sont portées toutes les valeurs du tableau précédent qui, à part celles d'un laboratoire, paraissent assez cohérentes ; en b) on a porté, dans l'ordre chronologique, les valeurs de la flèche au trait 500 mm. Il semble que la courbure de la règle se soit accentuée entre 1976 et 1978-79, puis qu'elle soit restée à peu près stable.

Tableau 10

Règle N° 12924
Défaut de planéité de la surface tracée
(mesuré pour les traits décimétriques)

Unité : µm

| | CSIRO (1976) * | NBS (1977) | NPL (1978) * | ASMW (fév.79) | IMM (mai 79) | BIPM (1980) | IMGC (1981) | CSIRO (1982) * | BIPM (1983) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 mm | 0 | | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | - 13 | | - 18 | | | - 16 | - 1 | - 14 | - 12 |
| 200 | - 24 | | - 33 | | | - 32 | - 17 | - 28 | - 33 |
| 300 | - 32 | | - 40 | | | - 40 | - 31 | - 36 | - 40 |
| 400 | - 31 | | - 43 | | | - 43 | - 58 | - 41 | - 46 |
| 500 | - 30 | - 28 | - 42 | - 45 | - 40 à - 45 | - 44 | - 68 | - 38 | - 41 |
| 600 | - 28 | | - 37 | | | - 44 | - 62 | - 34 | - 36 |
| 700 | - 25 | | - 32 | | | - 36 | - 43 | - 31 | - 35 |
| 800 | - 18 | | - 23 | | | - 24 | - 58 | - 21 | - 25 |
| 900 | - 9 | | - 11 | | | - 10 | - 14 | - 11 | - 12 |
| 1000 | 0 | | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Incertitude | ± 2 | | ± 2 | | | ± 3 | ± 10 | ± 2 | ± 3 |

(* Les valeurs portées dans ces colonnes ont été relevées sur des graphiques.)

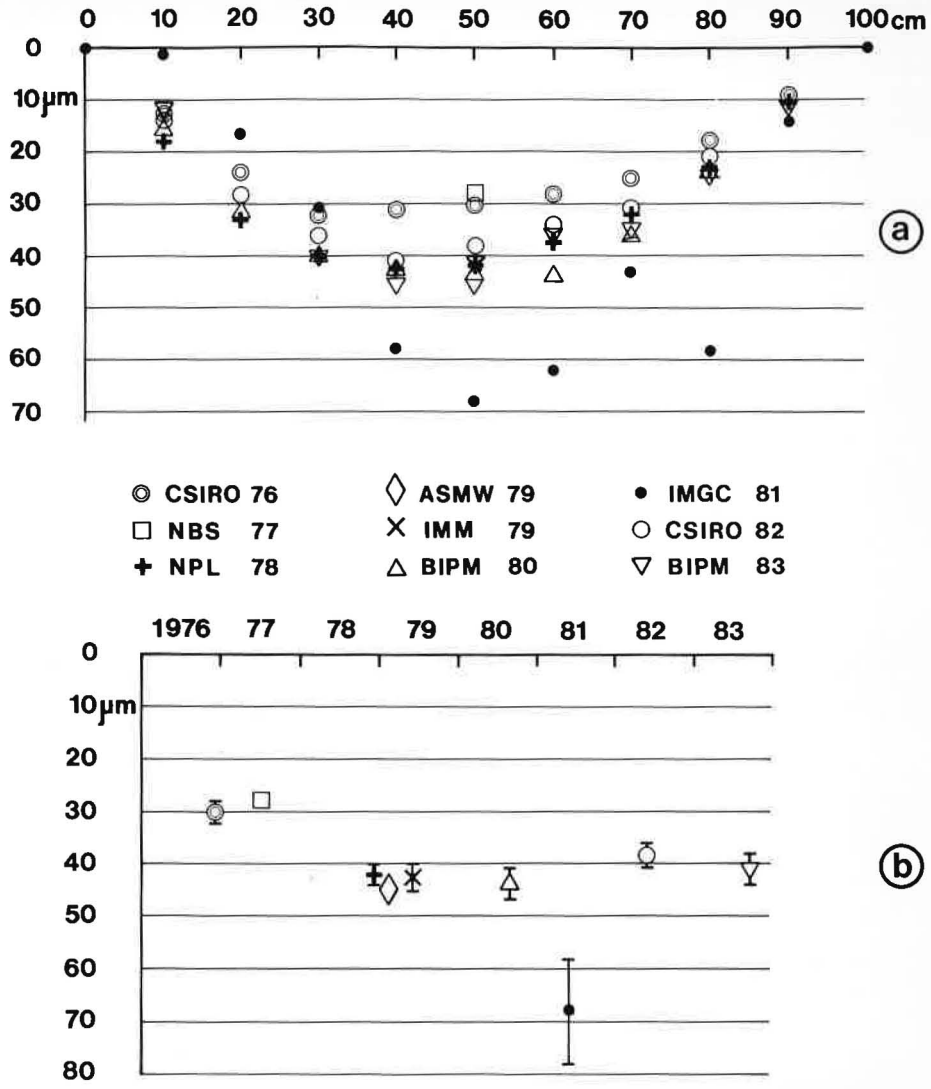


Fig. 5.- Règle N° 12924 ; a : défaut de planéité, b : évolution de la flèche au trait 500 mm.

32 page blanche

## 3 - Règle de 500 mm, N° 16806

### 3 a - Résultats fournis par les laboratoires

#### 3 a1 - Position des traits par rapport à leur position nominale

Les résultats qui sont rassemblés dans le tableau 11 expriment les écarts (position réelle) - (position nominale), tels qu'ils ont été mesurés par les différents laboratoires.

La moyenne, calculée sans pondération, et l'écart-type du résultat d'un laboratoire par rapport à la moyenne sont donnés dans les deux dernières colonnes. (Remarque : dans le rapport du NBS, la valeur pour l'intervalle 0 - 100 est 0,03 µm ± 0,03 µm dans le tableau des intervalles décimétriques et 0,01 µm ± 0,05 µm dans le tableau des intervalles centimétriques ; nous avons adopté la première valeur : 0,03 µm.)

#### 3 a2 - Incertitudes

Les incertitudes indiquées par les laboratoires sont résumées dans le tableau 12. Leur mode de calcul est déjà exposé au paragraphe 2 a2 pour la règle n° 12924 ; nous ne donnerons ici que quelques précisions complémentaires relatives à la règle n° 16806.

CSIRO - 20 mesures avec 18 degrés de liberté ; l'"overall uncertainty" est donnée pour un niveau de confiance de 0,99.

NBS - Nombre de mesures : $n = 8$.

NRLM - 18 mesures ; $\sigma = (0{,}054 + 0{,}027 \times 10^{-6}\ L)$ µm ; $L$ en mètre.

BIPM - 12 mesures en 1975 et 8 en 1978.
Pour l'intervalle principal, l'incertitude composée (écart-type de la moyenne) est calculée ainsi :

| | 1975 | 1978 |
|---|---|---|
| incertitude statistique (type A) | 10 nm | 22 nm |
| incertitude complémentaire (type B) | 8 | 8 |
| Somme quadratique | 13 nm | 23 nm |

### 3 b - Intervalle principal

Le tableau 13 (p. 36) donne le résumé des résultats obtenus par les différents laboratoires pour la valeur de l'intervalle principal ramenée à 20 °C et arrondie au centième de micromètre, avec les incertitudes indiquées par les laboratoires ; les incertitudes indiquées entre crochets ne sont pas équivalentes à l'écart-type : pour le CSIRO, l'incertitude correspond à un niveau de confiance de 99 % ; pour le NRC, le mode de calcul n'est pas indiqué ; pour le NBS, l'incertitude est la somme arithmétique de la composante aléatoire ($3\sigma$) et de la composante systématique.

Tableau 11

Règle N° 16806
Position

Unité : µm

| Trait mm | BIPM | CSIRO | NRC | NBS | NRLM | BIPM | Moyenne | Ecart-type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 1 | 0,351 | 0,140 | | 0,11 | 0,17 | 0,399 | 0,234 | 0,13 |
| 2 | 0,075 | 0,059 | | 0,00 | 0,07 | 0,240 | 0,089 | 0,09 |
| 3 | 0,076 | 0,050 | | 0,04 | 0,06 | 0,182 | 0,082 | 0,06 |
| 4 | 0,168 | 0,212 | | 0,13 | 0,02 | 0,349 | 0,176 | 0,12 |
| 5 | 0,443 | 0,254 | | 0,17 | 0,29 | 0,582 | 0,348 | 0,16 |
| 6 | 0,257 | 0,338 | | 0,26 | 0,33 | 0,345 | 0,306 | 0,04 |
| 7 | 0,241 | 0,290 | | 0,19 | 0,25 | 0,350 | 0,264 | 0,06 |
| 8 | 0,437 | 0,302 | | 0,22 | 0,31 | 0,406 | 0,335 | 0,09 |
| 9 | 0,590 | 0,318 | | 0,25 | 0,30 | 0,556 | 0,403 | 0,16 |
| 10 | 0,365 | 0,211 | 0,60 | 0,16 | 0,18 | 0,336 | 0,309 | 0,17 |
| 20 | 0,232 | 0,228 | 0,62 | 0,18 | 0,26 | 0,342 | 0,310 | 0,16 |
| 30 | 0,314 | 0,271 | 0,59 | 0,22 | 0,34 | 0,490 | 0,371 | 0,14 |
| 40 | 0,254 | 0,274 | 0,70 | 0,26 | 0,34 | 0,375 | 0,367 | 0,17 |
| 50 | 0,134 | 0,212 | 0,62 | 0,17 | 0,20 | 0,367 | 0,284 | 0,18 |
| 60 | 0,076 | 0,181 | 0,69 | 0,12 | 0,16 | 0,272 | 0,250 | 0,23 |
| 70 | 0,139 | 0,215 | 0,55 | 0,17 | 0,28 | 0,347 | 0,284 | 0,15 |
| 80 | 0,054 | 0,151 | 0,40 | 0,11 | 0,17 | 0,254 | 0,190 | 0,12 |
| 90 | 0,064 | 0,131 | 0,48 | 0,06 | 0,18 | 0,262 | 0,196 | 0,16 |
| 100 | 0,149 | 0,108 | 0,52 | 0,03* | 0,17 | 0,356 | 0,222 | 0,18 |
| 200 | 0,191 | 0,352 | 0,72 | 0,29 | 0,39 | 0,420 | 0,394 | 0,18 |
| 300 | 0,419 | 0,417 | 1,00 | 0,39 | 0,45 | 0,690 | 0,561 | 0,24 |
| 400 | 0,701 | 0,569 | 1,30 | 0,53 | 0,64 | 1,063 | 0,800 | 0,31 |
| 410 | 1,069 | | 1,71 | | 0,81 | 1,401 | 1,248 | 0,39 |
| 420 | 0,627 | | 1,28 | | 0,63 | 0,943 | 0,870 | 0,31 |
| 430 | 0,515 | | 1,02 | | 0,70 | 0,815 | 0,762 | 0,21 |
| 440 | 0,588 | | 1,19 | | 0,67 | 0,891 | 0,835 | 0,27 |
| 450 | 0,549 | | 1,03 | | 0,74 | 0,882 | 0,800 | 0,21 |
| 460 | 0,920 | | 1,51 | | 0,74 | 1,302 | 1,118 | 0,35 |
| 470 | 0,673 | | 1,26 | | 0,43 | 1,003 | 0,842 | 0,36 |
| 480 | 0,600 | | 1,07 | | 0,49 | 0,902 | 0,766 | 0,27 |
| 490 | 0,315 | | 0,93 | | 0,42 | 0,674 | 0,585 | 0,28 |
| 491 | 0,459 | | | | 0,53 | 0,880 | 0,623 | 0,23 |
| 492 | 0,630 | | | | 0,54 | 0,929 | 0,700 | 0,20 |
| 493 | 0,640 | | | | 0,54 | 1,008 | 0,729 | 0,25 |
| 494 | 0,323 | | | | 0,39 | 0,770 | 0,494 | 0,24 |
| 495 | 0,556 | | | | 0,49 | 0,968 | 0,671 | 0,26 |
| 496 | 0,378 | | | | 0,42 | 0,704 | 0,501 | 0,18 |
| 497 | 0,131 | | | | 0,41 | 0,566 | 0,369 | 0,22 |
| 498 | 0,446 | | | | 0,51 | 0,813 | 0,590 | 0,20 |
| 499 | 0,237 | | | | 0,46 | 0,772 | 0,490 | 0,27 |
| 500 | 0,417 | 0,491 | 0,97 | 0,45 | 0,60 | 0,934 | 0,644 | 0,25 |

* 0,03 ± 0,03 dans le tableau des décimètres, 0,01 ± 0,05 dans celui des centimètres.

Tableau 12

Règle N° 16806
Résumé des incertitudes

Unité : µm

| | | millimètres | | centimètres | | décimètres | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 10 | 490 500 | 0 100 | 400 500 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| BIPM | 1 | 0,012 | 0,017 | 0,011 | 0,015 à 0,017 | 0,007 | 0,008 | 0,009 | 0,019 | 0,013 |
| | a | 0,040 à 0,084 | xxx | 0,072 à 0,111 | xxx | 0,062 | 0,067 | 0,075 | 0,084 | 0,042 |
| CSIRO | b | 0,012 à 0,024 | xxx | 0,021 à 0,032 | xxx | 0,018 | 0,019 | 0,021 | 0,024 | 0,010 |
| | c | 0,031 à 0,064 | xxx | 0,054 à 0,086 | xxx | 0,050 | 0,058 | 0,069 | 0,082 | 0,045 |
| NRC | | xxx | xxx | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| | d | 0,01 à 0,03 | xxx | 0,04 à 0,07 | xxx | 0,02 | 0,07 | 0,03 | 0,06 | 0,03 |
| NBS | e | 0 | xxx | 0 à 0,01 | xxx | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 |
| | f | 0,01 à 0,03 | xxx | 0,04 à 0,07 | xxx | 0,03 | 0,09 | 0,06 | 0,10 | 0,08 |
| NRLM | | 0,054 | 0,067 | 0,054 à 0,056 | 0,065 à 0,067 | 0,057 | 0,059 | 0,062 | 0,065 | 0,068 |
| BIPM | 1 | 0,024 | 0,033 | 0,016 à 0,017 | 0,025 à 0,028 | 0,010 | 0,012 | 0,023 | 0,023 | 0,023 |

a : écart-type d'une mesure
b : écart-type de la moyenne
c : "associated uncertainty"

d : aléatoire
e : systématique
f : globale

1 : composée (écart-type de la moyenne)

Tableau 13

Règle N° 16806
Valeur de l'intervalle principal à 20 °C

| | | | incertitude |
|---|---|---|---|
| BIPM | (mars-avril 1975) | 0,5 m + 0,42 µm | 0,013 µm |
| CSIRO | (juillet 76-janvier 77) | + 0,49 | [0,045 µm] |
| NRC | (août 1977) | + 0,97 | [0,050 µm] |
| NBS | (août-novembre 1977) | + 0,45 | [0,08 µm] |
| NRLM | (février-mars 1978) | + 0,60 | 0,07 µm |
| BIPM | (juillet 1978) | + 0,93 | 0,013 µm |

La figure 6 illustre ces résultats. Les barres d'incertitude représentent ± 3 fois l'écart-type lorsque nous avons pu le calculer d'après les données des laboratoires :

| | | |
|---|---|---|
| CSIRO | : (0,045 / 2,6) × 3 | = 0,05 µm |
| NRC | : valeur indiquée | = 0,05 |
| NBS | : valeur indiquée | = 0,08 |
| NRLM | : $\left[(0{,}054)^2 + (0{,}014)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times 3$ | = 0,17 |
| BIPM | : 0,013 × 3 | = 0,04 |

La dispersion des résultats est anormalement grande même entre les mesures faites au BIPM en 1975 et 1978. Il semble que les traits, dont la gravure est très fine et peu profonde, soient très vulnérables à la pollution et aux nettoyages.

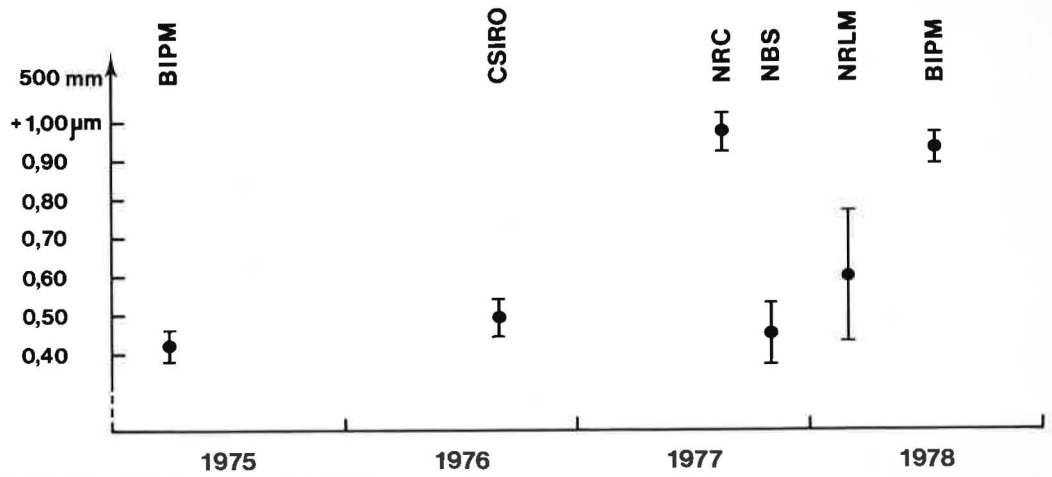


Fig. 6.- Règle N° 16806. Valeur de l'intervalle principal à 20 °C. Les barres d'incertitude correspondent à ± 3 écarts-types.

3 c - Intervalles intermédiaires

Les valeurs de l'étalonnage relatif des intervalles intermédiaires telles qu'elles sont définies au paragraphe 1 c sont rassemblées dans le tableau 14 ; la dernière colonne indique l'écart-type du résultat d'un laboratoire, calculé sans pondération. Ces écarts-types, bien que plus

## Tableau 14

### Règle N° 16806
### Etalonnage relatif
### Unité : µm

| Trait mm | BIPM 1975 a | BIPM 1975 b | CSIRO a | CSIRO b | NRC a | NRC b | NBS a | NBS b | NRLM a | NRLM b | BIPM 1978 a | BIPM 1978 b | Moyenne | Ecart-type de l résultat |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| 1 | + 0,35 | + 0,12 | + 0,14 | - 0,09 | | | + 0,11 | - 0,12 | + 0,17 | - 0,06 | + 0,40 | + 0,17 | + 0,23 | 0,13 |
| 2 | + 0,07 | - 0,02 | + 0,06 | - 0,03 | | | 0 | - 0,09 | + 0,07 | - 0,02 | + 0,24 | + 0,15 | + 0,09 | 0,09 |
| 3 | + 0,07 | - 0,01 | + 0,05 | - 0,03 | | | + 0,04 | - 0,04 | + 0,06 | - 0,02 | + 0,18 | + 0,10 | + 0,08 | 0,06 |
| 4 | + 0,16 | - 0,01 | +.0,21 | - 0,04 | | | + 0,13 | - 0,04 | + 0,02 | - 0,15 | + 0,34 | + 0,17 | + 0,17 | 0,12 |
| 5 | + 0,44 | + 0,10 | + 0,25 | - 0,09 | | | + 0,17 | - 0,17 | + 0,28 | - 0,06 | + 0,57 | + 0,23 | + 0,34 | 0,16 |
| 6 | + 0,25 | - 0,05 | + 0,33 | + 0,03 | | | + 0,25 | - 0,05 | + 0,32 | + 0,02 | + 0,33 | + 0,03 | + 0,30 | 0,04 |
| 7 | + 0,24 | - 0,02 | + 0,28 | + 0,02 | | | + 0,18 | - 0,08 | + 0,24 | - 0,02 | + 0,34 | + 0,08 | + 0,26 | 0,06 |
| 8 | + 0,43 | + 0,11 | + 0,29 | - 0,03 | | | + 0,21 | - 0,11 | + 0,30 | - 0,02 | + 0,39 | + 0,07 | + 0,32 | 0,09 |
| 9 | + 0,58 | + 0,19 | + 0,31 | - 0,08 | | | + 0,24 | - 0,15 | + 0,29 | - 0,10 | + 0,54 | + 0,15 | + 0,39 | 0,16 |
| 10 | + 0,36 | + 0,06 | + 0,20 | - 0,10 | + 0,58 | + 0,28 | + 0,15 | - 0,15 | + 0,17 | - 0,13 | + 0,32 | + 0,02 | + 0,30 | 0,16 |
| 20 | + 0,22 | - 0,06 | + 0,21 | - 0,07 | + 0,58 | + 0,30 | + 0,16 | - 0,12 | + 0,24 | - 0,04 | + 0,30 | + 0,02 | + 0,28 | 0,15 |
| 30 | + 0,29 | - 0,04 | + 0,24 | - 0,09 | + 0,53 | + 0,20 | + 0,19 | - 0,14 | + 0,30 | - 0,03 | + 0,43 | + 0,10 | + 0,33 | 0,13 |
| 40 | + 0,22 | - 0,10 | + 0,24 | - 0,08 | + 0,62 | + 0,30 | + 0,22 | - 0,10 | + 0,29 | - 0,03 | + 0,30 | - 0,02 | + 0,32 | 0,15 |
| 50 | + 0,09 | - 0,13 | + 0,16 | - 0,06 | + 0,52 | + 0,30 | + 0,13 | - 0,09 | + 0,14 | - 0,08 | + 0,27 | + 0,05 | + 0,22 | 0,16 |
| 60 | + 0,03 | - 0,14 | + 0,12 | - 0,05 | + 0,57 | + 0,40 | + 0,07 | - 0,10 | + 0,09 | - 0,08 | + 0,16 | - 0,01 | + 0,17 | 0,20 |
| 70 | + 0,08 | - 0,12 | + 0,15 | - 0,05 | + 0,41 | + 0,21 | + 0,11 | - 0,09 | + 0,20 | 0,00 | + 0,22 | + 0,02 | + 0,20 | 0,12 |
| 80 | - 0,01 | - 0,09 | + 0,07 | - 0,01 | + 0,24 | + 0,16 | + 0,04 | - 0,04 | + 0,07 | - 0,01 | + 0,10 | + 0,02 | + 0,08 | 0,08 |
| 90 | - 0,01 | - 0,09 | + 0,04 | - 0,04 | + 0,31 | + 0,23 | - 0,02 | - 0,10 | + 0,07 | - 0,01 | + 0,09 | + 0,01 | + 0,08 | 0,12 |
| 100 | + 0,07 | - 0,03 | + 0,01 | - 0,09 | + 0,33 | + 0,23 | - 0,06* | - 0,16 | + 0,05 | - 0,05 | + 0,17 | + 0,07 | + 0,10 | 0,14 |
| 200 | + 0,02 | - 0,12 | + 0,16 | + 0,02 | + 0,33 | + 0,19 | + 0,11 | - 0,03 | + 0,15 | + 0,01 | + 0,05 | - 0,09 | + 0,14 | 0,11 |
| 300 | + 0,17 | - 0,01 | + 0,12 | - 0,06 | + 0,42 | + 0,24 | + 0,12 | - 0,06 | + 0,09 | - 0,09 | + 0,13 | - 0,05 | + 0,18 | 0,12 |
| 400 | + 0,37 | + 0,08 | + 0,18 | - 0,11 | + 0,52 | + 0,23 | + 0,17 | - 0,12 | + 0,16 | - 0,13 | + 0,32 | + 0,03 | + 0,29 | 0,14 |
| 410 | + 0,73 | + 0,08 | | | + 0,91 | + 0,26 | | | + 0,32 | - 0,33 | + 0,64 | - 0,01 | + 0,65 | 0,25 |
| 420 | + 0,28 | + 0,02 | | | + 0,47 | + 0,21 | | | + 0,13 | - 0,13 | + 0,16 | - 0,10 | + 0,26 | 0,15 |
| 430 | + 0,16 | + 0,02 | | | + 0,19 | + 0,05 | | | + 0,18 | + 0,04 | + 0,01 | - 0,13 | + 0,14 | 0,08 |
| 440 | + 0,22 | + 0,03 | | | + 0,34 | + 0,15 | | | + 0,14 | - 0,05 | + 0,07 | - 0,12 | + 0,19 | 0,12 |
| 450 | + 0,17 | + 0,03 | | | + 0,16 | + 0,02 | | | + 0,20 | + 0,06 | + 0,04 | - 0,10 | + 0,14 | 0,07 |
| 460 | + 0,54 | + 0,09 | | | + 0,62 | + 0,17 | | | + 0,19 | - 0,26 | + 0,44 | - 0,01 | + 0,45 | 0,19 |
| 470 | + 0,28 | + 0,12 | | | + 0,35 | + 0,19 | | | - 0,13 | - 0,29 | + 0,12 | - 0,04 | + 0,16 | 0,21 |
| 480 | + 0,20 | + 0,14 | | | + 0,14 | + 0,08 | | | - 0,09 | - 0,15 | 0,00 | - 0,06 | + 0,06 | 0,13 |
| 490 | - 0,09 | + 0,04 | | | - 0,02 | + 0,11 | | | - 0,17 | - 0,04 | - 0,24 | - 0,11 | - 0,13 | 0,10 |
| 491 | + 0,05 | + 0,07 | | | | | | | - 0,06 | - 0,04 | - 0,04 | - 0,02 | - 0,02 | 0,06 |
| 492 | + 0,22 | + 0,16 | | | | | | | - 0,05 | - 0,11 | + 0,01 | - 0,05 | + 0,06 | 0,14 |
| 493 | + 0,23 | + 0,14 | | | | | | | - 0,05 | - 0,14 | + 0,09 | 0,00 | + 0,09 | 0,14 |
| 494 | - 0,09 | + 0,06 | | | | | | | - 0,20 | - 0,05 | - 0,15 | 0,00 | - 0,15 | 0,06 |
| 495 | + 0,14 | + 0,11 | | | | | | | - 0,10 | - 0,13 | + 0,04 | + 0,01 | + 0,03 | 0,12 |
| 496 | - 0,04 | + 0,11 | | | | | | | - 0,18 | - 0,03 | - 0,22 | - 0,07 | - 0,15 | 0,09 |
| 497 | - 0,28 | 0,00 | | | | | | | - 0,19 | + 0,09 | - 0,36 | - 0,08 | - 0,28 | 0,09 |
| 498 | + 0,03 | + 0,09 | | | | | | | - 0,09 | - 0,03 | - 0,12 | - 0,06 | - 0,06 | 0,08 |
| 499 | - 0,18 | - 0,02 | | | | | | | - 0,14 | + 0,02 | - 0,16 | 0,00 | - 0,16 | 0,02 |
| 500 | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |

a : étalonnage ; b : écart (labo.)-(moyenne) ; * Valeur calculée d'après celle tirée du tableau des décimètres du rapport NBS.

faibles que ceux du tableau 11, sont encore très grands, ce qui suggère que le pointé des traits par les microscopes photoélectriques n'est pas reproductible. Ceci est bien net d'après les seuls résultats du BIPM : les différences entre les mesures de 1975 et de 1978 sont anormalement élevées bien que ces mesures aient été faites avec le même appareillage.

On constate en outre des décalages systématiques difficilement explicables : au NRC, pour l'ensemble des traits mesurés, l'écart moyen par rapport à la moyenne des laboratoires est de l'ordre de + 0,2 µm ; il est de l'ordre de - 0,1 µm pour le NBS ; il est de l'ordre de + 0,1 µm pour les traits 490 à 499 lors de la première mesure du BIPM et pour les traits 1 à 10 lors de la seconde mesure du BIPM ; pour le NRLM, les positions relatives des traits 410 à 490 sont anormalement dispersées. On notera d'ailleurs que les écarts supérieurs à 0,1 µm par rapport à la moyenne sont très nombreux.

Le groupement des écarts par régions de la règle fait penser à des effets dus à des salissures, comme on en a observé sur la règle N° 12924. Cependant il s'agit ici d'écarts considérables, étendus à presque tous les traits, alors que de tels écarts ne se sont manisfestés que de façon exceptionnelle sur la règle N° 12924.

3 d - Coefficient de dilatation linéique

Trois laboratoires ont effectué la mesure de ce coefficient de dilatation :

| Laboratoire | $\alpha_{20}$ | Incertitude |
|---|---|---|
| BIPM (1975) | $11{,}698 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ | $0{,}004 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ |
| CSIRO (1976) | $11{,}58 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ | $[0{,}06 \times 10^{-6}\ K^{-1}]$ |
| NRLM (1978) | $11{,}698 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ | |
| BIPM (1978) | $11{,}692 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ | $0{,}004 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ |

CSIRO - 45 mesures ont été faites à des températures échelonnées entre 18,52 °C et 22,52 °C. La variance associée à la détermination de la pente est $4{,}75 \times 10^{-16}/°C^2$ et l'écart-type du résultat est $0{,}0218 \times 10^{-6}/°C$. Compte tenu des 43 degrés de liberté, l'incertitude du résultat est $\pm\ 0{,}06 \times 10^{-6}/°C$, au niveau de confiance de 99 %.

NRLM - 25 mesures ont été faites ; l'incertitude n'est pas indiquée.

BIPM - En 1975, 13 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. L'écart-type est calculé ainsi :

| | 1975 | 1978 |
|---|---|---|
| incertitude statistique (type A) | $3{,}5 \times 10^{-9}\ K^{-1}$ | $2{,}9 \times 10^{-9}\ K^{-1}$ |
| incertitude complémentaire (type B) | 2,6 | 2,6 |
| Somme quadratique | $4{,}4 \times 10^{-9}\ K^{-1}$ | $3{,}9 \times 10^{-9}\ K^{-1}$ |

## 4 - Conclusions

De cette comparaison de mesures de règles, on peut essayer de tirer quelques conclusions.

- Tout d'abord on peut souligner l'intérêt qu'ont manifesté les laboratoires pour cette comparaison internationale malgré la surcharge de travail qu'elle représente pour chacun.

- On doit, par contre, regretter la durée prohibitive de cette opération : presque neuf années, soit près du triple de ce qui avait été prévu au départ. Des retards imprévus se sont accumulés, des laboratoires ont demandé à refaire leurs mesures, tout cela est explicable mais un si long délai fait certainement perdre une partie de l'intérêt d'une telle comparaison.

- Un résultat certain mais négatif, c'est la dispersion inattendue des résultats des mesures sur la règle de 500 mm N° 16806. Le nouveau type de tracé de cette règle avait suscité l'espoir d'une meilleure définition des étalons à traits. La forte dispersion des valeurs obtenues avec cet étalon peut être liée au faible contraste de ses traits vus par les microscopes photoélectriques. On peut aussi supposer que ces traits, formés d'une suite de traits fins juxtaposés, sont plus vulnérables aux salissures et plus difficiles à nettoyer que les traits de gravure classique.

- En ce qui concerne la règle de 1 m N° 12924, il est regrettable que le BIPM n'ait pas disposé d'une règle dont la planéité ne présente pas le défaut de celle-ci. Ce défaut entraîne une défocalisation des traits intermédiaires sous les microscopes. Cette défocalisation, particulièrement sensible lorsque le microscope a une faible profondeur de champ, contribue certainement à la dispersion des valeurs correspondant à ces traits intermédiaires.

Les résultats de la mesure de l'intervalle principal 0-1000 mm présentent une dispersion plus grande que celle qu'on pouvait attendre. En effet l'écart-type du résultat d'un laboratoire (par rapport à la moyenne de l'ensemble des laboratoires) est de 0,10 µm, ce qui correspond en moyenne au triple de l'écart-type estimé par chaque laboratoire pour son propre résultat.

Lorsqu'on essaie de tenir compte d'une dérive de la longueur de la règle, on ne réduit pas la dispersion de façon significative, à moins de négliger les résultats de trois laboratoires sur douze, ce qui est pour le moins discutable.

Si on examine les résultats de ce que nous avons appelé l'étalonnage relatif, il apparaît que la reproductibilité de "lecture" d'un trait bien au point sous le microscope, c'est-à-dire voisin des extrémités 0 ou 1000 mm, est caractérisée par un écart-type de 0,02 µm. Cet écart-type paraît un peu élevé par rapport à la répétabilité des lectures. Il inclut les déplacements apparents occasionnés par les salissures, malgré les nettoyages successifs qui peuvent eux-mêmes déplacer des salissures sans les enlever complètement.

Pour caractériser la cohérence de l'ensemble des mesures des intervalles de la règle de 1 m, N° 12924, on peut condenser les résultats en exprimant l'écart-type $s$ du résultat d'un laboratoire concernant la valeur d'un intervalle de longueur $L$ sous la forme :

$$s = (0{,}03 + 0{,}08 \times L)\ \mu m$$

$L$ étant exprimé en mètre.

- En tout état de cause, il semble évident que certaines composantes de l'incertitude sont évaluées trop faiblement par les laboratoires et demanderaient donc une étude plus approfondie.

En résumé, alors que l'incertitude sur la longueur d'onde des sources monochromatiques utilisées peut, actuellement, atteindre $10^{-10}$ en valeur relative en ce qui concerne les lasers He-Ne asservis sur l'iode par exemple, il est pour le moins décevant de constater que l'incertitude relative sur la mesure de la longueur d'un étalon matériel à traits de 1 mètre est de l'ordre de $10^{-7}$ .

- Les résultats des mesures du coefficient de dilatation de la règle N° 12924, exécutées par huit laboratoires y compris le BIPM, conduisent à un écart-type de $0{,}05 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ entre le résultat d'un laboratoire et la moyenne des résultats des laboratoires, ce qui correspond, en moyenne, à environ trois fois l'écart-type évalué par les laboratoires eux-mêmes.

- L'utilité de cette comparaison nous paraît certaine. Deux laboratoires qui avaient d'abord obtenu des résultats aberrants ont pu, grâce à cette comparaison internationale, identifier des causes d'erreur et y remédier. De plus, à l'occasion de ces mesures, plusieurs laboratoires ont révisé et amélioré leur appareillage, leur méthode de mesure ou leur évaluation des incertitudes. C'est l'un des buts d'une telle opération.

On peut raisonnablement penser qu'à la suite de cette comparaison de nouvelles études devraient être faites pour améliorer la cohérence des mesures d'étalons à traits.

Annexe

Déplacements temporaires de certains traits
de la règle de 1 mètre N° 12924

L'examen détaillé des écarts entre les "étalonnages relatifs" (tableau 6) révèle des déplacements temporaires de certains traits. Rappelons que l'étalonnage relatif donne la position des traits par rapport à une échelle régulière s'appuyant sur les traits 0 et 1000 ; le tableau 6 donne les écarts entre l'étalonnage relatif de chaque laboratoire et la moyenne de l'ensemble des laboratoires.

Des déplacements particulièrement nets des traits 0,5 et 1 ont été observés successivement par trois laboratoires au cours de la comparaison. Les traits en question sont ensuite revenus à leur position première.

L'évolution de la position (relative) des traits 0,5 et 1 au cours de la comparaison est résumée par les figures 7 a et 7 b ; les figures 7 c, 7 d, 7 e et 7 f permettent de la comparer à celle des traits voisins. Les mesures successives des différents laboratoires sont numérotées de 1 à 18, dans l'ordre chronologique ; en ordonnée figurent les écarts de chaque étalonnage par rapport à la moyenne des étalonnages pour les traits 0,1 à 1,0 et 1 à 10.

Les traits 0,5 et 1 ont subi un déplacement important, de l'ordre de 0,3 µm entre le laboratoire N° 9 et le laboratoire N° 10. Ce déplacement a subsisté, réduit de moitié, pour les laboratoires N° 11 et N° 12. Il a disparu ensuite.

A un degré moindre, on peut déceler un déplacement semblable des traits 2, 4 et 5 (fig. 7 e), ainsi que du trait 0,8 (fig. 7 d), pour les mêmes laboratoires.

D'autres déplacements accidentels de certains traits peuvent probablement être attribués à un phénomène du même genre. Par exemple, les traits 0,4, 0,5, 0,9, 6 et 7 paraissent avoir subi un déplacement temporaire pour le laboratoire N° 17, de même que les traits 1 pour le N° 9, 40 pour le N° 15, 60 pour le N° 10, 70 pour le N° 12, 90 pour le N° 2, 100 pour le N° 1, 400 pour le N° 14, 600 pour les N$^{os}$ 5 et 13.

On notera encore sur ces figures que les positions relatives de certains groupes de traits observés par un même laboratoire sont systématiquement décalées ou dispersées, alors que les traits voisins restent proches de la position relative moyenne. Par exemple, le laboratoire N° 7 a observé des écarts importants, de l'ordre de - 0,05 à - 0,1 µm pour les traits 0,5 à 1,0 (fig. 7 a et 7 d) alors que, pour les autres traits entre 0,0 et 10, les écarts observés par le même laboratoire restent au maximum de l'ordre de 0,01 µm. Un comportement analogue apparaît pour les traits 200, 300 et 400 au laboratoire N° 17.

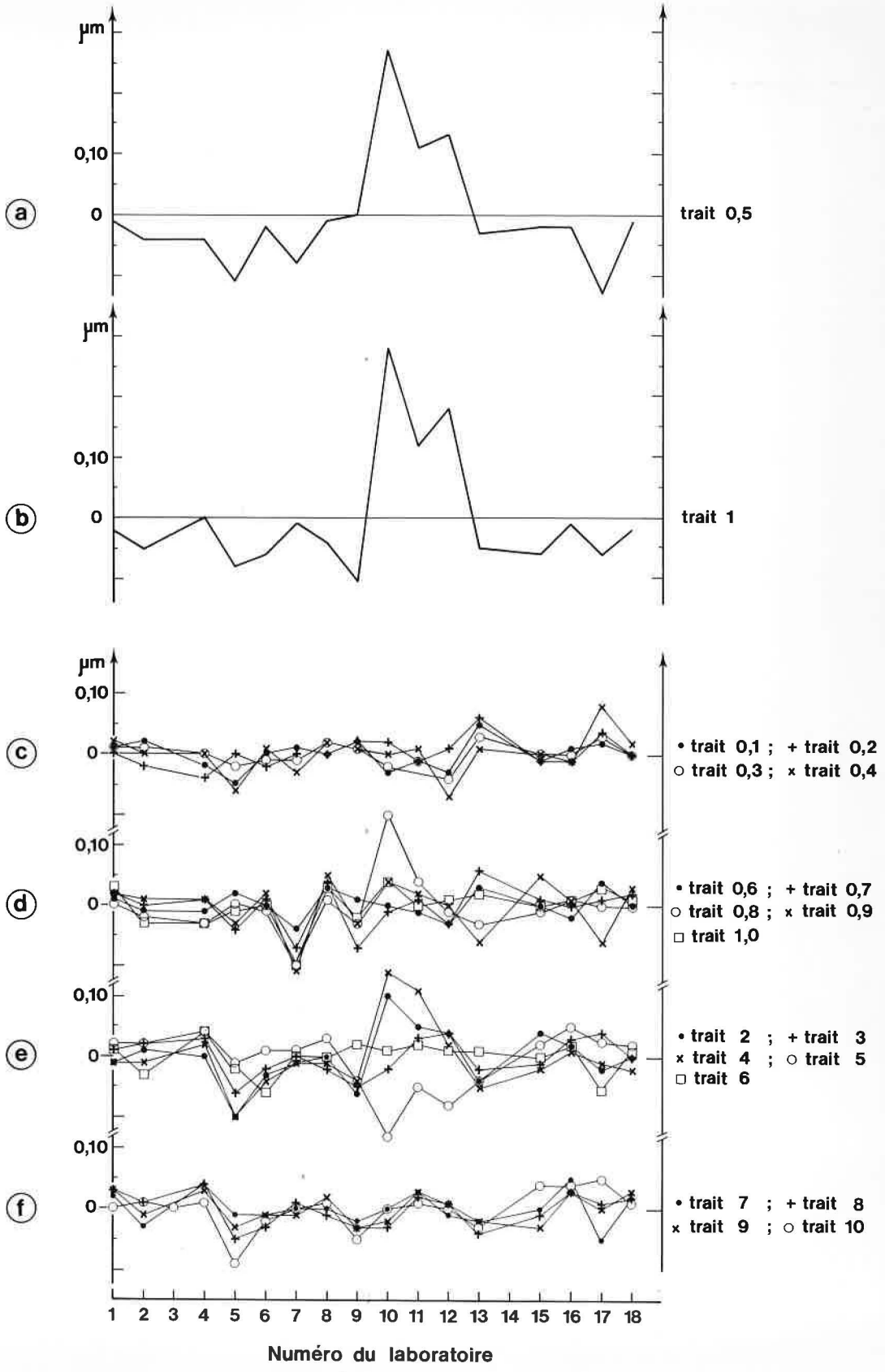


Fig. 7.- Règle N° 12924. Déplacement de certains traits au cours de la comparaison. Ecart de chaque laboratoire par rapport à la moyenne de l'ensemble des laboratoires pour les traits voisins du trait 0 (valeurs extraites du tableau 6).

Tous ces déplacements semblent pouvoir être attribués à l'apparition de salissures qui modifient temporairement l'aspect d'un ou plusieurs traits et qui se modifient ou disparaissent ultérieurement au cours des nettoyages. Il doit s'agir de salissures adhérentes, pour qu'elles aient pu subsister lors du passage dans trois laboratoires successifs. La corrélation des déplacements observés dans une même région de la règle indique qu'il peut s'agir non seulement du dépôt ponctuel d'une particule mais aussi d'un "nuage" pouvant couvrir un domaine étendu.

On peut penser à plusieurs origines pour ce genre de salissures :

1°) le dépôt résiduel d'impuretés dissoutes laissées par les liquides utilisés pour le nettoyage, après évaporation ;

2°) les résidus de graisse ou d'autres matériaux adhérents déposés sur la règle au cours des manipulations et transportés par les solvants au cours du nettoyage ;

3°) le dépôt de gouttelettes de goudrons en suspension dans l'atmosphère ;

4°) une combinaison de l'un des cas précédents avec le dépôt de poussières en suspension dans l'atmosphère, les autres résidus jouant le rôle de colle.

Il se peut encore que la forme des traits joue un rôle significatif dans leur aptitude à retenir certains types de salissures. Cela pourrait expliquer les résultats décevants obtenus avec la règle N° 16806 .

La conclusion principale que l'on peut tirer de ces observations est que l'importance du nettoyage des règles a probablement été sous-estimée jusqu'ici. Des déplacements exceptionnels de l'ordre de 0,1 ou même 0,3 $\mu$m peuvent être attribués, selon toute vraisemblance, aux salissures. Il y a tout lieu de penser que la même cause peut provoquer beaucoup plus souvent des déplacements de quelques dizaines de nanomètres. Ces déplacements peuvent donc apporter une contribution majeure au défaut de reproductibilité de la position apparente des traits.

De ce point de vue, la circulation d'une règle divisée, avec toutes les manipulations qu'elle implique, est certainement une épreuve très sévère. Il sera nécessaire, si une comparaison de ce genre devait être renouvelée, de prendre des précautions particulières pour assurer une meilleure protection de la règle contre tout type de salissure et pour la nettoyer de façon plus efficace.

Bureau International des Poids et Mesures

Rapport BIPM-85/3

Périmé

# Rapport sur la Comparaison Internationale de mesures de règles divisées 1976-1984

par J. Hamon, P. Giacomo et P. Carré

Mai 1985

## 2 - Règle de 1 m, N° 12924

### 2 a - Résultats fournis par les laboratoires

#### 2 a1 - Position des traits par rapport à leur position nominale

Ces résultats sont rassemblés dans le tableau 1 "Position" tels qu'ils apparaissent dans les rapports des laboratoires. Cependant, il convient de faire les remarques suivantes :

- Les onze premiers traits de ce tableau : 0,0 ; 0,1 ; ... 1,0 correspondent à la division en dixièmes de millimètre du millimètre supplémentaire, située approximativement entre les abscisses - 3,0 mm (trait 0,0) et - 2,0 mm (trait 1,0) par rapport au trait 0 de l'intervalle principal ; le trait 0,0 est considéré comme origine pour cette division supplémentaire.

- CSIRO : Ce laboratoire a demandé d'éliminer les valeurs de 1976 concernant les décimètres.

- NBS : Dans le tableau de l'étude des centimètres, la valeur de l'intervalle 0 - 10 mm est + 0,13 µm ± 0,01 µm, mais dans le tableau des millimètres cette valeur est + 0,12 µm ± 0,03 µm. Nous adoptons la première valeur.

- NPL : Au paragraphe "Length interval, main scale" de son rapport, la valeur de l'intervalle principal 0 - 1000 mm est + 0,52 µm. Au paragraphe "Calibration of intervals", dans le tableau des décimètres, la valeur indiquée est + 0,49 µm. Dans le tableau 1 nous adoptons + 0,52 µm.

- ASMW : Le rapport de ce laboratoire ne présente que les valeurs des intervalles partiels, par exemple 0 - 1, 1 - 2, ... 0 - 10, 10 - 20, ..., 0 - 100, 100 - 200 etc. Par souci d'uniformité de présentation, nous avons calculé les valeurs des intervalles à partir du trait 0. D'autre part, toutes les valeurs sont indiquées, séparément, pour la règle en position AB et en position BA ; dans le même souci, nous avons calculé la moyenne [AB ; BA]. D'après les valeurs de l'intervalle principal, on trouve ainsi 1 m + 672 nm alors que, d'après les tableaux des décimètres, on obtient 1 m + 667 nm ; nous avons adopté la première valeur.

- PTB : Dans le tableau des centimètres, la valeur de l'intervalle 0 - 10 mm est + 0,12 µm ± 0,02 µm, dans le tableau des millimètres, cette valeur est + 0,13 µm ± 0,03 µm. Nous adoptons la première valeur.

- IMGC : Par lettre du 10 juin 1982 (transmise aux participants avec le rapport de ce laboratoire), les valeurs des intervalles décimétriques ont été modifiées et celle de l'intervalle 0 - 500 mm supprimée. Les valeurs des intervalles centimétriques du premier décimètre parues dans le rapport de ce laboratoire ont été légèrement corrigées pour tenir compte de ces modifications.

## Tableau 2

### Règle N° 12924
### Résumé des incertitudes

Unité : µm

| | | dixièmes de millimètre | millimètres | | centimètres | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,0 ; 1,0 | 0 ; 10 | 990 ; 1000 | 0 ; 100 | 900 ; 1000 |
| CSIRO (1976) | a | 0,051 | 0,083 à 0,122 | | 0,059 à 0,122 | |
| | b | 0,015 | 0,024 à 0,035 | | 0,017 à 0,032 | |
| | c | 0,039 | 0,063 à 0,093 | | 0,045 à 0,086 | |
| NRC | | | | | 0,060 | |
| NBS | d | 0,01 à 0,02 | 0,01 à 0,04 | | 0,01 à 0,03 | |
| | e | 0 | 0 | | 0 à 0,01 | |
| | f | 0,01 à 0,02 | 0,01 à 0,04 | | 0,01 à 0,04 | |
| NRLM | | 0,054 | 0,054 | 0,081 | 0,054 à 0,056 | 0,078 à 0,081 |
| NPL | g | 0,04 | 0,04 | | 0,04 | |
| | h | 0,06 | 0,06 | | 0,08 | |
| | i | 0,08 | 0,08 | | 0,09 | |
| ASMW | | (calcul non explicité pour les intervalles intermédiaires) | | | | |
| IMM (1979) | j | 0,020 à 0,030 | 0,019 à 0,034 | | 0,021 à 0,042 | |
| PTB | a | 0,01 à 0,03 | 0,01 à 0,02 | | 0,01 à 0,03 | |
| | e | 0,01 | 0,01 | | 0,01 | |
| | f | 0,02 à 0,04 | 0,02 à 0,04 | | 0,02 à 0,04 | |
| IMGC | r | 0,04 | 0,01 à 0,06 | | 0,01 à 0,08 | |
| NIM | | (pas d'indications pour les intervalles intermédiaires) | | | | |
| OFMET | g | 0,009 à 0,018 | 0,010 à 0,016 | | 0,012 à 0,018 | |
| | k | 0,025 | 0,025 à 0,026 | | 0,026 à 0,037 | |
| IMM (1984) | d' | | 0,014 à 0,038 | | 0,017 à 0,035 | |
| BIPM (1976) | 1 | 0,004 | 0,004 | 0,019 | 0,008 | 0,017 à 0,018 |
| (1978) | 1 | 0,004 | 0,004 | 0,023 | 0,013 | 0,022 à 0,023 |
| (1980) | 1 | 0,008 | 0,008 | 0,023 | 0,015 | 0,026 à 0,027 |
| (1983) | 1 | 0,007 | 0,007 | 0,019 | 0,021 | 0,027 |
| (1984) | 1 | 0,005 | 0,005 | 0,022 | 0,020 | 0,028 à 0,029 |

a : écart-type d'une mesure
b : écart-type de la moyenne
c : "associated uncertainty" ($P = 0,99$)
d : aléatoire (3 écarts-types)
d' : aléatoire (1 écart-type)
e : systématique
f : somme
g : aléatoire ($P = 0,99$)
h : systématique ($P = 0,99$)
i : "total combined uncertainty"
j : incertitudes des intervalles successifs : ex. : 0 - 1 ; 1 - 2 ; 2 - 3 etc. (écart-type)
k : incertitude "totale" : $(0,025 + 0,122\ \underline{l})$ µm avec $\underline{l}$ en mètre
l : composée, écart-type de la moyenne
r : niveau de confiance 0,95 et lettre du 10 juin 1982

Tableau 2 (suite)

Règle N° 12924
Résumé des incertitudes

Unité : µm

| | | décimètres | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| CSIRO (1976) | | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | xxx | 0,079 |
| NRC | | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| NBS | d | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,03 | 0,03 | 0,04 |
| | e | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 |
| | f | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,11 | 0,12 | 0,14 |
| NRLM | | 0,057 | 0,059 | 0,062 | 0,065 | 0,068 | 0,070 | 0,073 | 0,076 | 0,078 | 0,081 |
| NPL | g | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| | h | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,10 |
| | i | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,11 |
| ASMW | | (calcul non explicité pour les intervalles intermédiaires) | | | | | | | | | 0,13 |
| IMM (1979) | | (écart-type des intervalles successifs 100-200, 200-300, etc. : de 0,018 à 0,047) | | | | | | | | | 0,045 |
| PTB | a | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,03 |
| | e | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| | f | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,09 | 0,12 | 0,08 |
| IMGC | r | 0,14 | 0,14 | 0,28 | 0,28 | xxx | 0,28 | 0,28 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| NIM | q | (pas d'indications pour les intervalles intermédiaires) | | | | | | | | | 0,04 |
| CSIRO | a | 0,142 | 0,144 | 0,149 | 0,154 | 0,162 | 0,170 | 0,179 | 0,189 | 0,200 | |
| | b | 0,050 | 0,056 | 0,057 | 0,065 | 0,068 | 0,071 | 0,074 | 0,078 | 0,082 | |
| | c | 0,18 | 0,20 | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,25 | 0,27 | 0,28 | 0,30 | 0,075 |
| OFMET | g | 0,012 | 0,017 | 0,011 | 0,013 | 0,018 | 0,013 | 0,018 | 0,022 | 0,021 | 0,008 |
| | k | 0,037 | 0,049 | 0,062 | 0,074 | 0,086 | 0,098 | 0,110 | 0,123 | 0,135 | 0,135 |
| IMM (1984) | t | 0,019 | 0,045 | 0,034 | 0,065 | 0,036 | 0,056 | 0,065 | 0,059 | 0,053 | 0,037 |
| BIPM (1976) | 1 | 0,008 | 0,020 | 0,031 | 0,024 | 0,027 | 0,028 | 0,027 | 0,023 | 0,019 | 0,017 |
| (1978) | 1 | 0,017 | 0,025 | 0,034 | 0,028 | 0,033 | 0,031 | 0,034 | 0,028 | 0,023 | 0,019 |
| (1980) | 1 | 0,017 | 0,031 | 0,043 | 0,045 | 0,045 | 0,040 | 0,039 | 0,034 | 0,023 | 0,023 |
| (1983) | 1 | 0,027 | 0,051 | 0,069 | 0,072 | 0,073 | 0,078 | 0,064 | 0,043 | 0,027 | 0,018 |
| (1984) | 1 | 0,026 | 0,047 | 0,066 | 0,071 | 0,084 | 0,067 | 0,063 | 0,045 | 0,031 | 0,021 |

q : aléatoire : s = 0,03 ; systématique maximale : 0,1 ;
somme quadratique : $[(0,03)^2 + (0,1/3)^2]^{\frac{1}{2}} \approx 0,04$.

t : composante aléatoire (écart-type) pour tous les décimètres ;
écart-type composé pour l'intervalle principal 0-1000.