

Dispositif numérique d'affichage  
des indications des microscopes photoélectriques

P. Carré

---

Le comparateur photoélectrique et interférentiel du BIPM, étudié dès 1952 et mis en service en 1964, est équipé de deux microscopes photoélectriques dont la fonction est de permettre la mesure, avec une résolution pouvant atteindre 1 nm, de la distance entre l'axe que chacun d'eux définit et l'axe du trait qu'il pointe. Un système analogique a été conçu à l'origine pour l'affichage du résultat de cette mesure.

Rappelons le principe du fonctionnement de ces dispositifs.

I. - Les microscopes photoélectriques et le système analogique associé<sup>(1)</sup>

Microscopes photoélectriques

Un spot rectangulaire (de largeur 8  $\mu\text{m}$ , voisine de celle des traits, et de longueur réglable, par exemple 160  $\mu\text{m}$ ) est projeté sur la surface tracée de la règle à étudier et animé d'un mouvement oscillatoire dans la direction de la longueur de la règle. La lumière réfléchie est reçue par un récepteur photoélectrique. Si la zone ainsi explorée comporte un trait, le récepteur fournit un signal à chaque passage du spot sur le trait. Lorsque celui-ci est centré sur la position moyenne du spot, ces signaux sont séparés par des intervalles de temps égaux, mais il n'en est plus de même si le trait est décentré (*fig. 1*).

A partir de ces signaux, un montage électronique produit un signal en créneaux que l'on supposera par exemple positif lorsque le spot est à gauche du trait et négatif lorsqu'il est à droite.

---

(1) PETAVEL (J.), Aperçu sur le développement actuel de la métrologie scientifique des longueurs. Microtecnic, 14, 1, 1960, pp. 1-13.

CARRÉ (P.), Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du BIPM. Metrologia, 2, 1, 1966, pp. 13-23.

"Le Bureau International des Poids et Mesures 1875-1975". BIPM, 1975, Chapitre III : Longueurs, p. 82.

## Système analogique

Le système analogique joue le rôle d'un microscope photoélectrique pointant un trait dont la position serait asservie de façon que le signal en créneaux auquel il donnerait naissance soit identique à celui qui provient du véritable microscope (*fig. 2*).

En fait, l'ensemble du spot et du trait est remplacé par une fente lumineuse dont on forme l'image sur un récepteur photoélectrique, à travers plusieurs lames à faces parallèles.

L'oscillation de l'une de ces lames produit un mouvement sinusoïdal de l'image de la fente qui remplace l'exploration du trait par le spot. Le déplacement de la position moyenne de cette image est obtenu par la rotation d'une autre lame, fixée à un secteur denté, lié cinématiquement aux tambours d'affichage, et dont la rotation est commandée par les signaux d'erreur issus de la comparaison des signaux en créneaux provenant d'une part du microscope et d'autre part du récepteur photoélectrique du système analogique. D'autres lames assurent diverses corrections, notamment de non-linéarité.

Trois domaines de mesure ont été prévus :  $\pm 500 \mu\text{m}$ ,  $\pm 100 \mu\text{m}$  et  $\pm 5 \mu\text{m}$  ; les résolutions correspondantes sont respectivement 100 nm, 20 nm et 1 nm.

## II. - Principe du dispositif numérique

Le système analogique est complexe notamment en raison de l'étendue de ses possibilités. Il comprend des parties mécaniques dont on peut redouter la défaillance. Il nous a donc semblé souhaitable de disposer d'un système de contrôle et éventuellement de secours pour le cas où le système analogique viendrait à présenter des anomalies fréquentes de fonctionnement.

Si on remarque qu'en pratique on n'utilise que la partie centrale du champ de  $\pm 5 \mu\text{m}$  (domaine de quelques dizaines de nanomètres lors des pointés interférentiels statiques, de - 200 nm à + 200 nm lors des mesures par comptage de franges), on peut envisager la réalisation d'un dispositif électronique simple, entièrement numérique, sans crainte des erreurs dues à la non-linéarité du balayage du microscope et à une éventuelle dérive du tarage de l'ensemble.

Le spot explorateur du microscope photoélectrique est animé d'un mouvement sinusoïdal dont nous désignons par  $a$  l'amplitude et par  $T$  la période ; son abscisse peut être représentée par

$$\xi = a \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Soit  $x$  l'abscisse du trait par rapport à la position moyenne du spot. Le spot passe sur le trait aux instants  $t$  tels que  $\xi = x$ , c'est-à-dire

$$a \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} = x$$

$$\text{ou } 2\pi \frac{t}{T} = \begin{cases} \text{Arc sin } (x/a) + 2 m\pi \\ \pi - \text{Arc sin } (x/a) + 2 m\pi \quad (m \text{ entier}). \end{cases}$$

Au cours d'une période ( $0 \leq t < T$ ), cela est réalisé aux instants

$$t_1 = \frac{T}{2\pi} \cdot \text{Arc sin } (x/a) \quad (\text{mouvement vers la droite})$$

et

$$t_2 = \frac{T}{2} - \frac{T}{2\pi} \cdot \text{Arc sin } (x/a) \quad (\text{mouvement vers la gauche}) ;$$

le spot est donc à droite du trait pendant la durée

$$\tau' = t_2 - t_1 = \frac{T}{2} - \frac{T}{\pi} \cdot \text{Arc sin } (x/a)$$

et à gauche pendant la durée

$$\tau = T - \tau' = \frac{T}{2} + \frac{T}{\pi} \cdot \text{Arc sin } (x/a).$$

La différence de ces deux durées est

$$\tau - \tau' = \frac{2T}{\pi} \cdot \text{Arc sin } (x/a) ;$$

sa mesure peut fournir la valeur de  $x$  :

$$x = a \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{\tau - \tau'}{2T}\right).$$

Or, selon que le spot est à gauche ou à droite du trait, le signal en créneaux fourni par le microscope est positif ou négatif. Ce signal peut être utilisé pour commander le comptage ou le décomptage d'impulsions de fréquence  $f$  fournies par un oscillateur stable. Si on cumule ces comptages et décomptages pendant  $p$  périodes du balayage, on obtient un compte résiduel  $n$  qui constitue une mesure de la différence  $\tau - \tau'$ .

$$\text{On a en effet } n = p \cdot (\tau - \tau') \cdot f,$$

$$\text{d'où } x = a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{p} \cdot \frac{n}{2fT}\right).$$

$$\text{Si } x \ll a, \text{ on peut écrire } x \approx \frac{\pi}{p} \cdot \frac{a}{2fT} \cdot n = k \cdot n ;$$

l'erreur due à la non-linéarité est

$$\Delta x = k \cdot n - a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{p} \cdot \frac{n}{2fT}\right) = k \cdot n - a \cdot \sin\frac{k \cdot n}{a} \approx \frac{a}{6} \left(\frac{k \cdot n}{a}\right)^3 \approx \frac{a}{6} \left(\frac{x}{a}\right)^3.$$

La durée d'une mesure est maintenant 10 s (une rangée de cinq voyants indiquent constamment dans quelle partie du cycle de mesure on se trouve ; le cycle peut être interrompu et un nouveau cycle lancé au moyen d'une commande manuelle). L'affichage de  $n'$  donne naturellement encore  $x$  exprimé directement en nanomètres. Les fluctuations ne dépassent pas une unité du dernier chiffre affiché.

L'affichage de  $n'$  est réduit à trois chiffres. Il existe donc une ambiguïté de lecture égale à un nombre entier de micromètres ; elle est aisément levée, si on convient de limiter le champ à 1  $\mu\text{m}$  (- 500 nm à + 500 nm), par un examen rapide du centrage du signal photoélectrique fourni par le microscope.

Dans ces conditions, les nombres 000 à 499 correspondent à  $0 \text{ nm} \leq x < 500 \text{ nm}$  alors que les nombres 500 à 999 correspondent à  $- 500 \text{ nm} \leq x < 0 \text{ nm}$ .

Il est toutefois aisément possible d'augmenter le domaine de mesure à condition de faire varier  $x$ , à partir d'une valeur faible, par pas suffisamment petits, et de corriger la lecture, par continuité, d'un nombre entier de micromètres. Ce mode opératoire peut être nécessaire pour l'étalonnage du dispositif ; nous l'avons utilisé aussi (jusqu'à  $x \approx \pm 20\,000 \text{ nm}$ ) pour vérifier l'expression donnée plus haut pour l'erreur de non-linéarité  $\Delta x$ .

### Résultats de l'étalonnage

Si l'erreur de non-linéarité reste négligeable, l'étalonnage du dispositif se réduit à la détermination globale du coefficient  $k'$ . On a étudié les variations de ce coefficient au cours de nombreux étalonnages. Le dispositif de comptage de franges d'interférence (radiation  $\lambda = 633 \text{ nm}$  d'un laser à hélium-néon stabilisé) dont est muni le comparateur permet de faire varier  $x$  de quantités connues à quelques nanomètres près ; on fait généralement défiler 16 franges, ce qui correspond à une variation de  $x$  entre les valeurs - 2530 nm et + 2530 nm environ. Ainsi, la moyenne de 16 étalonnages (avril 1975) a donné  $k' = 1,001\,7 \text{ nm}$  avec un écart-type d'une détermination de 0,004 2 nm et les valeurs extrêmes 0,994 7 nm et 1,008 0 nm, c'est-à-dire des écarts relatifs extrêmes de  $- 7,0 \times 10^{-3}$  et  $+ 6,3 \times 10^{-3}$ .

La bonne stabilité de ce coefficient, jointe au fait que le nouveau dispositif s'est révélé légèrement plus fidèle que le système analogique et d'emploi plus commode, nous a permis d'utiliser systématiquement le nouveau dispositif depuis juin 1975.

### Autres résultats

Du fait que ce nouveau dispositif utilise les signaux disponibles entre le microscope photoélectrique et le

d'entretien des oscillations de ce miroir, de la valeur de la tension alternative alimentant ce moteur, tension qui doit naturellement être stabilisée, et de la fréquence de cette alimentation. La suspension a une fréquence propre (environ 55 Hz) supérieure à la fréquence des oscillations forcées ; il en résulte que  $\partial a / \partial (1/T) > 0$ . Ainsi, l'influence des variations de  $1/T$  sur  $k'$  par l'intermédiaire de  $a$  est du même signe que leur influence directe : il convient donc de stabiliser  $T$  d'autant mieux. Quant aux caractéristiques de la suspension et du moteur électrodynamique, elles varient lentement, au cours du fonctionnement, notamment à cause d'un léger échauffement. Cela produit une dérive lente de  $k'$  que l'on pourrait déterminer.

#### IV. - Dispositif numérique à affichage analogique

La constante de temps élevée (10 s) du dispositif qui a été décrit ci-dessus ne convient pas pour centrer manuellement le trait sous le microscope, opération pour laquelle il est souhaitable d'avoir un dispositif auxiliaire rapide et dont les indications soient parfaitement cohérentes avec celles du dispositif principal. On a donc réalisé<sup>(4)</sup> un dispositif numérique de conception analogue au dispositif principal. Ses indications sont lues, après conversion numérique-analogique, sur un voltmètre à aiguille, à point milieu. Le domaine de lecture choisi s'étend de  $x = -1 \mu\text{m}$  à  $x = +1 \mu\text{m}$  ; ses limites correspondent à des tensions à la sortie du convertisseur de  $-2,5 \text{ V}$  et  $+2,5 \text{ V}$ , obtenues pour les comptes résiduels respectifs  $n = -500$  et  $n = +500$ <sup>(5)</sup>. On a adopté  $q = 1$ , d'où  $n' = n$  et par suite  $k' = x/n' = 2 \text{ nm}$  ; on a adopté aussi  $p = 1$ , de sorte que, si on se reporte à la formule donnant  $f$  (page 6), on voit que seul le dernier facteur est modifié puisque  $k'$  est doublé. La fréquence  $f$  doit donc être réglée à la valeur moitié de celle que l'on a alors calculée, soit  $1,4 \times 10^6 \text{ Hz}$ .

La constante de temps de la mesure est celle du voltmètre à aiguille, soit environ 1 s ; la résolution est environ 5 nm. Ces caractéristiques sont bien adaptées au but recherché.

Sèvres, 15 juillet 1976

---

(4) L'étude et la réalisation de ce second montage sont également dues à J. Hostache.

(5) En fait, les valeurs extrêmes des comptes résiduels sont  $-500$  et  $+499$  et les valeurs numériques correspondantes sur lesquelles travaille le convertisseur sont 0 et 999, le compteur d'impulsions étant non pas remis à zéro mais remis à la valeur initiale 500.