

Un «long» laboratoire de mesure

Michel Degoumois

Sans report de distance, le banc du „long“ laboratoire de mesure de l'OFMET, dont un aperçu est montré par la figure 1, permet d'étalonner des moyens ou instruments de mesure pour une portée maximale de cinquante mètres.

Les mesures souples en ruban constituent la majorité des moyens de mesure dont les étalonnages sont faits dans le laboratoire de cinquante mètres.

Il y est étalonné toute une gamme de mesures rigides, ou règles, qui sont employées comme références par les services techniques, ou de qualité, d'entreprises qui œuvrent dans les domaines les plus variés. Une grande variété de matériaux constituent les corps de ces règles, cela va du verre à l'acier en passant par le bois, et la fibre de carbone.

Citons également les instruments qui sont, encore, employés en topographie, les tachéomètres et les mires. Il faut voir que l'étalonnage des premiers nommés n'a qu'une portée limitée, puisque leur domaine de mesure va bien au-delà des cinquante mètres du laboratoire. Pour les mires, l'étalonnage est réalisé pour les deux genres que l'on rencontre, les mires chiffrées et à code-barre, dont les dimensions sont généralement comprises entre un et trois mètres.

Dans ce „long“ laboratoire, des systèmes d'interféromètres à laser employés dans l'industrie sont comparés avec celui qui équipe le laboratoire. Avec cette comparaison, il est possible de contrôler l'instrument dans son ensemble, dans des conditions de mesure réelles, et de vérifier l'influence des instruments qui servent à la détermination de l'indice de réfraction de l'air. Lorsque, le système d'interféromètre à laser à étudier possède des caractéristiques de construction semblables à celles du système d'interféromètre à laser du laboratoire, il est disposé de manière à ce que les axes de mesure des deux systèmes d'interféromètres coïncident. Il est alors possible d'utiliser les mêmes éléments op-

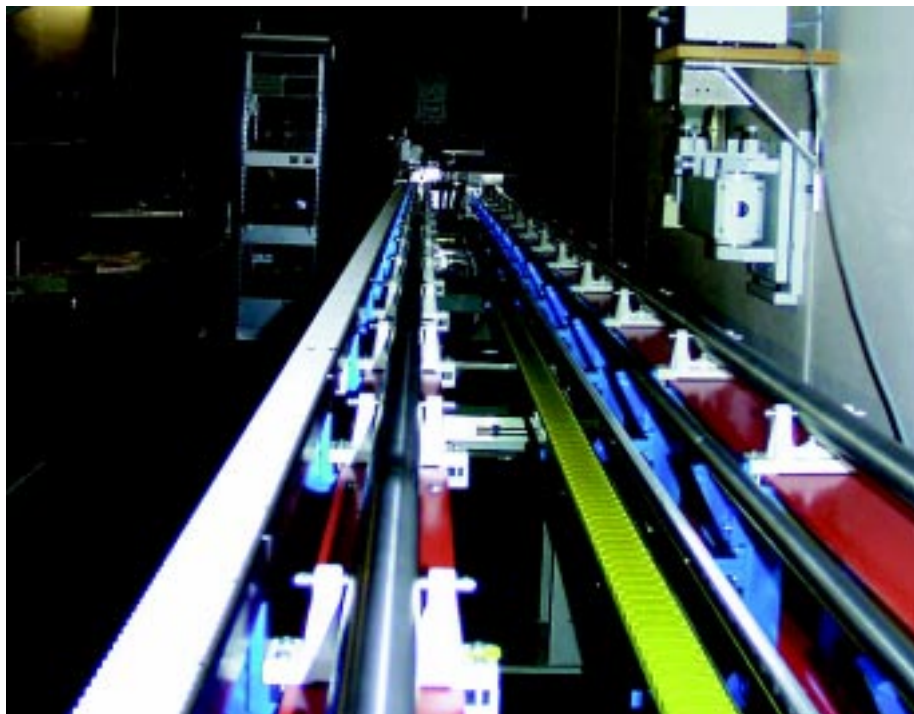


Figure 1 : Aperçu du banc de mesure de 50 mètres.

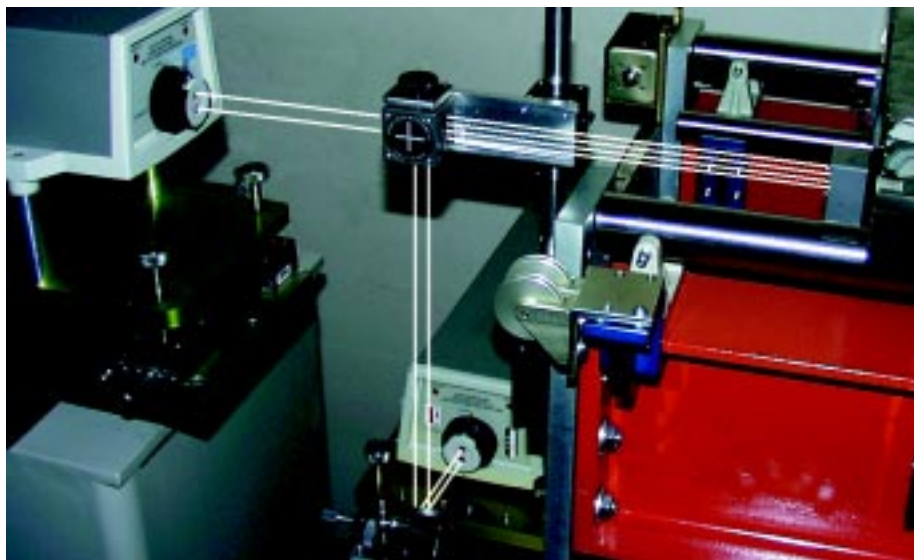


Figure 2 : Deux lasers montés de manière concomitante.

tiques, interféromètre et réflecteurs, pour une comparaison qui peut porter jusqu'à une distance de quarante mètres si, le système d'interféromètre à laser à étudier le permet. Les positions respectives des deux lasers et la marche des faisceaux lumineux sont illustrés par la figure 2.

Comme activité spéciale, on peut citer celle qui consiste à confectionner des câbles étalons pour bobineuses.

L'opération s'effectue en fixant d'abord sur le câble des repères, dont les intervalles sont ensuite mesurés. Le mesurage se fait après avoir installé correctement le câble sur la table du banc de mesure et lui avoir appliqué la force de traction adéquate. La longueur totale du câble peut être bien supérieure à cinquante mètres, on fait alors l'étalonnage en plusieurs tranches dont les résultats seront

cumulés pour l'énoncé des résultats.

La construction du banc.

La construction du banc se présente sous la forme de deux poutres de soutien métalliques en forme de „H“ couché, qui sont constituées de plusieurs éléments assemblés bout à bout de manière rigide. Ces poutres reposent sur des piliers qui sont en alternance, supports de guidage ou supports flexibles. Ces derniers permettent l'absorption de faibles déformations longitudinales de l'ensemble. Sur la face supérieure des poutres sont montés des rails en acier rectifié, ils sont de section circulaire, et ont un diamètre de quarante millimètres. Ces rails sont positionnés par un système de fixation à trois points de réglage, ce qui permet un alignement des rails dans les deux directions horizontale et verticale. Le schéma de principe du banc de mesure est représenté par la figure 3.

Un chariot en fonte d'acier, muni de roulements à billes de précision, peut être déplacé sur toute la longueur du banc, il est autoguidé par le montage adéquat desdits roulements. Ce chariot porte les systèmes de visée qui permettent de réaliser une lecture très précise de tous les traits à considérer lors d'un mesurage manuel ou automatique. Il est également le support du réflecteur mobile du système d'interféromètre à laser ainsi

que, du frein magnétique muni d'une vis micrométrique qui sert lors du mesurage manuel. Pour la nécessité du mesurage automatique, il y est aussi placé un coffret qui contient les éléments électroniques de commande indispensables.

Au niveau supérieur du rail, sur le côté antérieur du banc, et sur toute sa longueur, est fixé une table destinée à recevoir, à l'exception des mires et des instruments, les moyens de mesure qui doivent être étalonnés. Le dessus de la table est constitué d'un revêtement cannelé en téflon.

Lors de l'étalonnage d'une mesure en ruban, la qualité de la surface de la table fait que le frottement de contact entre celle-ci et la mesure en ruban, est réduit à son strict minimum. A l'extrémité gauche de la table, est fixée une première poulie de renvoi, sur celle-ci passe le lien qui lie le poids qui réalise par gravitation la traction spécifiée à la mesure en ruban. En plusieurs endroits de la table, des orifices sont aménagés pour permettre à une seconde poulie, de faire passer le lien qui lie le second poids, dont le rôle est d'équilibrer le premier, à l'autre extrémité de la mesure en ruban. Ainsi, celle-ci repose librement sur la table du banc de mesure tout en étant tendue correctement, et en respect des prescriptions d'usage.

Quinze capteurs de température sont disposés sur toute la longueur du

banc de mesure, six sont pour l'évaluation de la température de l'air et neuf pour l'évaluation de la température du matériau des moyens de mesure à étalonner. Le nombre de capteurs fixés par un adhésif au moyens de mesure, dépend de la longueur nominale de ce dernier.

Une fois toute la mise en place terminée, il est nécessaire d'attendre que la stabilisation thermique de l'ensemble soit réalisée pour passer à la pratique du mesurage. Les résultats de celui-ci représentent les valeurs d'étalonnage du moyen de mesure présenté.

Le système de mesure.

Tous les mesurages se font avec un système d'interféromètre à laser, dont le principe est illustré par la figure 4. Ce système de mesure se compose de la source du rayonnement de lumière, la tête laser munie d'un récepteur, de l'interféromètre, du réflecteur ainsi que, de l'élément de commande. Ce dernier, qui dans notre cas est équipé d'un affichage numérique, sert aussi à tenir compte dans les valeurs affichées de l'indice de réfraction de l'air.

Sans entrer dans trop de détails, il est intéressant de signaler que le laser est à deux fréquences (f_1 et f_2) polarisées à 90° qui, par leur battement, donnent lieu à la fréquence de référence ($f_2 - f_1$). L'interféromètre

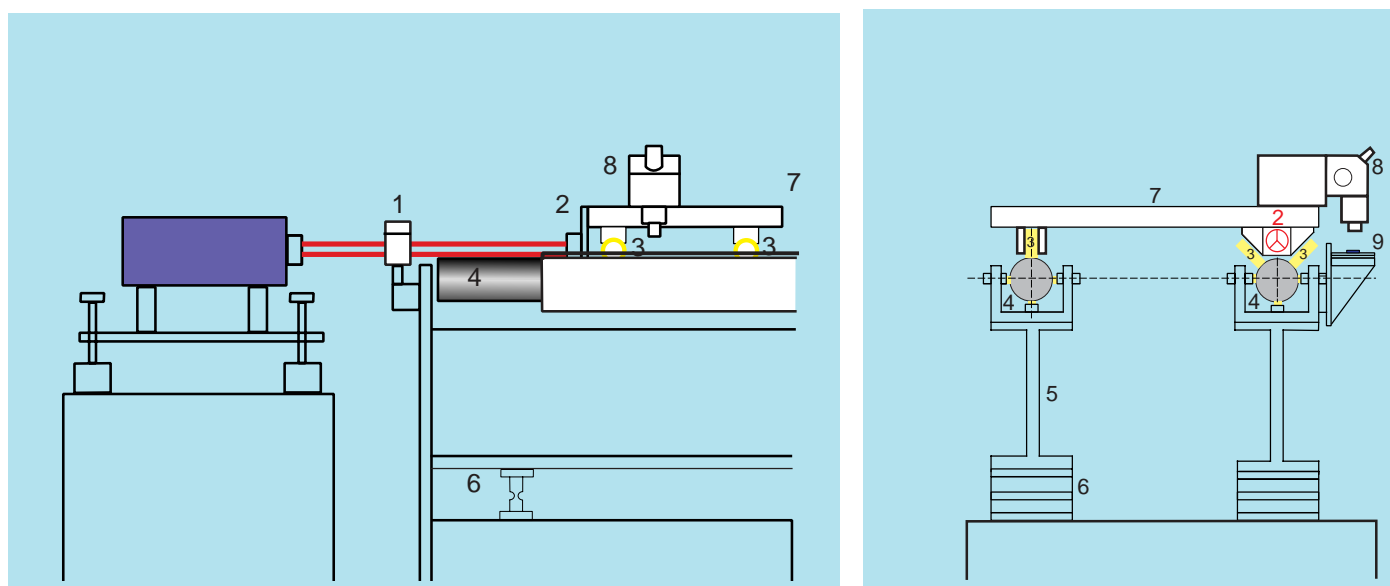


Figure 3 : Schéma de principe du banc de mesure: 1= interféromètre, 2= réflecteur du système d'interféromètre à laser, 3= roulements à billes, 4= rails, 5= poutre de soutien, 6= support flexible, 7=chariot mobile, 8=microscope, 9=règle, ruban.

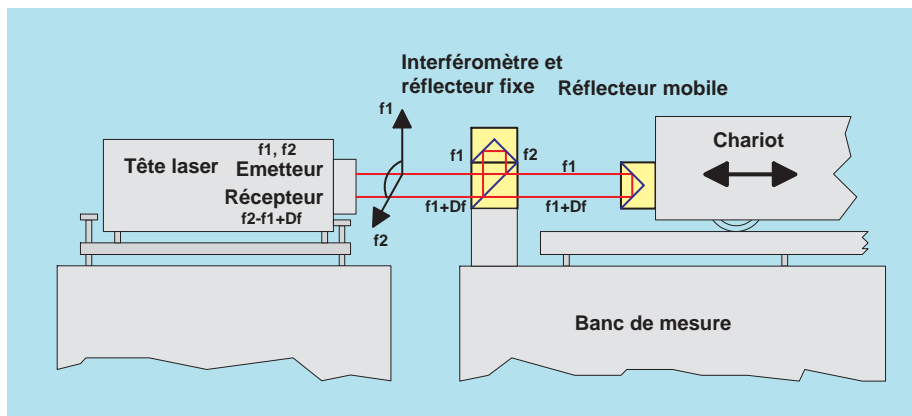


Figure 4 : Principe de mesure du système d'interféromètre à laser.

est un séparateur de faisceau polarisé qui réfléchit une polarisation et transmet l'autre. Le séparateur de faisceau est monté de telle façon que les faisceaux réfléchis et transmis se trouvent à 90° l'un par rapport à l'autre. Si le réflecteur mobile reste statique, la recombinaison de $f1$ et de $f2$ par le séparateur de faisceau crée également une fréquence de battement ($f2-f1$). Dans le cas où le réflecteur mobile est en mouvement, la fréquence détectée change instantanément de Df . Le compteur de l'instrument intègre sur la différence du signal détecté par le récepteur et du signal d'inter-

férence, alors sur Df . Une impulsion de comptage correspond à une demi longueur d'onde du laser ($0.316 \mu\text{m}$). avec l'œil tous les traits qui sont à considérer pour l'étalonnage d'une mesure matérialisée. La façon de se positionner pour la mesure est montrée par la figure 5.

Le mesurage est réalisé en déplaçant le chariot mobile jusqu'à la position du trait de la graduation à considérer pour l'étalonnage. Là, le trait est repéré avec l'œil à travers le microscope. Celui-ci possède un réticule formé de deux fils fins et parallèles, l'un est fixe alors que l'autre est mobile par l'intermédiaire d'une vis micrométrique. L'espacement de ces fils est réglé en fonction de la largeur

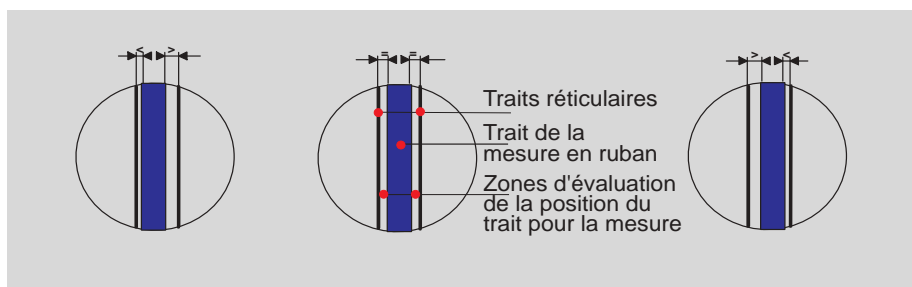


Figure 5 : Observation du trait avec l'œil au travers du microscope.

férence, alors sur Df . Une impulsion de comptage correspond à une demi longueur d'onde du laser ($0.316 \mu\text{m}$).

La tête laser est installée sur un socle situé à l'extrémité gauche du banc, elle est montée sur un support spécial qui aide à son alignement par rapport au banc. L'interféromètre est monté fixement à cette même extrémité du banc, tandis que le réflecteur est fixé au chariot mobile.

Mesurage manuel

Le chariot porte le microscope qui permet de situer très précisément

des traits de la graduation de la mesure matérialisée. C'est toujours l'œil, qui se charge d'évaluer la position centrale du trait par rapport aux deux marques du réticule, pour juger de la position correcte exigée pour la mesure de celle-ci. La position correcte de mesure est présentée par le schéma central de la figure 5.

L'étalonnage des mires est effectué par un mesurage manuel semblable, sauf qu'ici, le réflecteur n'est plus fixé au chariot mobile, qui n'est plus utilisé, mais directement au centre du pied en acier de la mire, au niveau du ruban de celle-ci. Pour son étalonnage, la mire est placée sur un chariot spécialement

adapté, elle est soutenue par les points de Bessel et est positionnée au centre du banc de mesure, entre les deux rails. Pour lire les traits des mires, dont l'épaisseur est beaucoup plus importante que celle des traits des mesures matérialisées, on se sert d'un projecteur avec écran de cent dix millimètres de diamètre. L'évaluation de la position pour la mesure est jugée avec l'œil de manière identique à ce qui a été décrit ci-dessus.

Le mesurage des intervalles des repères fixés sur un câble sont également mesurés par une estimation du regard de l'œil à travers le microscope. Au départ, on ne connaît pas suffisamment la position respective de chacun de ces repères, aussi, il faut aller les chercher en déplaçant le chariot mobile à l'aide de la commande manuelle.

Mesurage automatique

L'automatisation du banc de mesure, a consisté à réaliser un ensemble qui soit entièrement piloté par ordinateur. Pour ce faire, il a été nécessaire d'ajouter une motorisation au chariot mobile, ainsi qu'un microscope photoélectrique capable de lire les traits de la graduation d'une mesure matérialisée, ces différents compléments sont montrés sur la figure 6.

L'ensemble est complété par un canal dans lequel tous les câbles d'alimentation électrique, ou de transmission de signaux qui sont nécessaires ont été logés. Ces câbles sont montés de telle façon qu'ils s'adaptent aux déplacements du chariot mobile.

La solution adoptée pour le positionnement du chariot mobile est celle qui se sert de la valeur de la distance parcourue évaluée par le système d'interféromètre à laser. Cette solution a ses exigences. Il est ainsi nécessaire de considérer l'échelon, la classe de qualité, et les intervalles à mesurer de la mesure matérialisée de longueur. Il en résulte, que si l'on ne tient pas compte de ces paramètres, il y a très vite, un positionnement qui se fait ailleurs que sur le trait à considérer.

Pour son déplacement d'un intervalle à un autre, le chariot est piloté sur

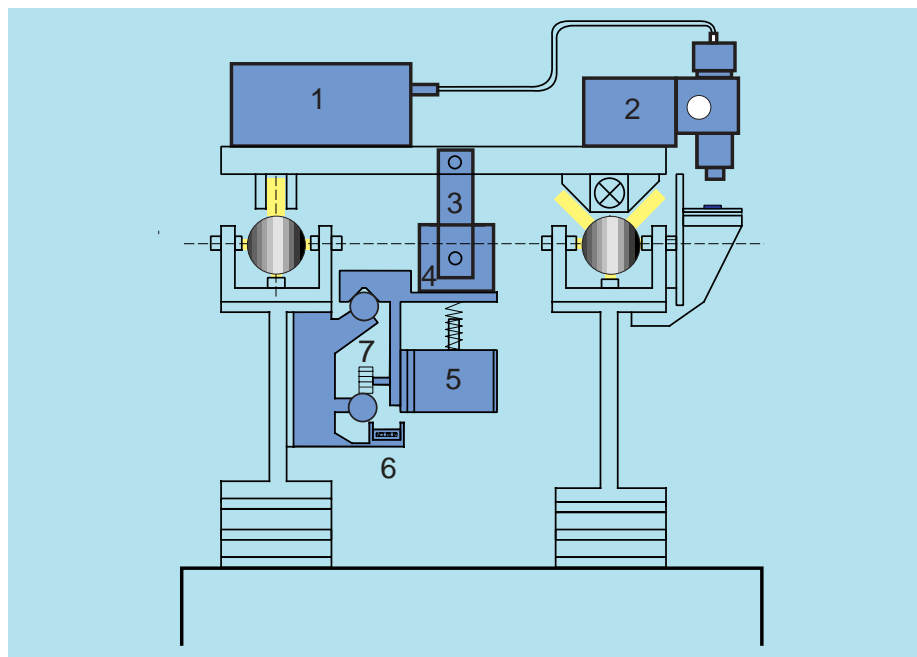


Figure 6 : Les compléments du banc pour le mesurage automatique: 1=boîtier de commande, 2= microscope photoélectrique, 3= levier de liaison d'entraînement, 4= moteur DC, 5= servo moteur, 6= gouttière porte câbles, 7=Entraînement à crémaillère.

la longueur de cet intervalle, par la valeur du déplacement indiquée par le système d'interféromètre à laser. Ce premier déplacement se fait par l'intermédiaire d'un servomoteur, l'exactitude de la position finale peut être réglée à partir du logiciel de commande, cette valeur est généralement fixée à 0.05 mm. A ce stade, malgré cette faible erreur relative de déplacement, la coïncidence nécessaire pour le mesurage, entre le positionnement du chariot et du trait à mesurer sur la mesure matérialisée, ne se réalise presque jamais. Aussi, il est impératif qu'à cet instant, le trait de la mesure matérialisée soit situé dans la zone de détection de la photodiode double qui équipe le microscope photoélectrique, si l'on veut que la position finale correcte soit réalisée. Pour terminer, c'est le signal électrique donné par la photodiode double,

qui pilote le système de déplacement fin pour réaliser le positionnement précis sur le trait à considérer de la mesure matérialisée. Ce fait est illustré par le schéma de la figure 7. Le positionnement final se fait avec le concours d'un moteur à courant continu équipé d'un réducteur à engrenages planétaires (rapport 1:200) associé à un élément mécanique de déplacement de précision, lui-même relié rigidement au chariot mobile par un dispositif de renvoi.

En émettant l'hypothèse, que la valeur indiquée par le système d'interféromètre à laser a une erreur négligeable dans le cas qui nous concerne, que la mesure matérialisée peut par contre présenter relativement vite un écart d'une certaine importance, conduit à la conséquence que la position d'arrêt du chariot pour le mesurage, est plus éloignée du trait à

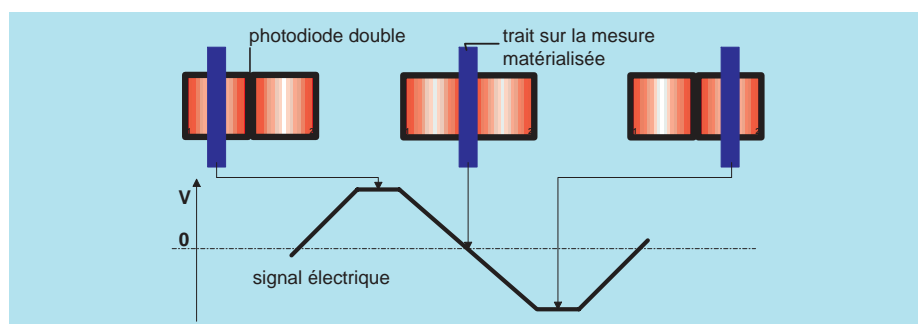


Figure 7 : Schéma de principe de la lecture par la photodiode double pour le positionnement automatique.

considérer que d'un trait voisin. Ainsi, la recherche finale de la position par le système automatique se fera sur ce dernier trait. Pour palier à cet inconvénient, il convient de ne faire que des déplacements relatifs courts, le dernier point mesuré servant de nouvelle origine pour le prochain déplacement. Il s'agit donc, d'augmenter le nombre de points de mesure pour diminuer l'éloignement entre deux points à mesurer, ce qui par voie de conséquence, diminue l'écart entre les positions respectives définies des deux moyens de mesure pour la même distance.

Avant un mesurage, un autre phénomène doit être maîtrisé, c'est celui de la perception des traits par le microscope photoélectrique. Cette lisibilité est fonction de l'orientation de la source lumineuse par rapport à la surface de la mesure matérialisée, et de la matière de celle-ci. Ainsi, la surface d'une mesure en ruban en acier inoxydable peut se présenter dans le microscope avec deux aspects totalement différents. Un premier aspect est celui où la réflexion provoque une vision en champ clair (figure 8), et un deuxième une vision en champ noir (figure 9). En champ



Figure 8: Contraste en champ clair.



Figure 9: Contraste en champ noir.

clair, par exemple, le contraste entre le trait et le support (ou le fond) n'est pas suffisant, le microscope photoélectrique n'arrive pas à situer le trait, tout est blanc ou brillant. Il est ainsi

nécessaire de trouver une incidence de la source lumineuse qui réalise la vision d'un trait bien noir se détachant nettement sur un fond clair (ou vice versa) pour garantir une bonne lecture, qui elle-même, évidemment, contribue à une bonne mesure.

Il est à remarquer que la brillance des surfaces des mesures en ruban en acier laqué, est plus gênante pour la lecture avec l'œil et le microscope, que pour celle avec le microscope photoélectrique. La qualité du trait

d'une mesure matérialisée a aussi son importance selon le mode de mesurage qui est envisagé. Un trait partiellement effacé, ou abîmé, dans la zone d'estimation de la position de mesure, est interprété différemment par l'œil d'une personne, que par le système automatique de mesure. Il peut alors résulter un décalage entre les deux positions estimées qui peut ne pas être négligeable. Aussi, les deux méthodes de mesure vont certainement perdurer.

Incertitude d'étalonnage

Les capacités de mesure du banc de 50 m sont le mieux représentées en détaillant le budget d'incertitude de mesure pour une mesure en ruban d'acier.

Le calcul de l'incertitude d'étalonnage ou de mesurage est réalisé pour un intervalle de longueur L de la mesure souple en ruban d'acier. La représentation est faite selon le document EAL-R2 et ses exemples

La mesure souple en ruban

Il n'est pas inutile de relever que selon les us et coutumes des lieux, la mesure souple en ruban est appelée chevillère (ou chevillière), ruban métrique, mètre à ruban, bande de mesure, ou encore, mesure souple. La dénomination de la mesure souple en ruban se complète par la désignation de la matière du ruban.

Les principales mesures en ruban ont des longueurs nominales, ou portées, de 10 m, de 20 m, de 30 m de 50 m, et encore de 100 m ou de 150 m. Elles ont un échelon de 1 mm, de 1 cm, de 1 dm. Aux voisinages des extrémités de la mesure souple, il est parfois adopté un échelon qui est un sous-multiple décimal de l'échelon principal.

Les mesures en ruban sont dans la majorité des cas, à traits, tous les repères sont des traits qui sont marqués sur le ruban (figure 1 en haut). Il s'en trouve aussi des mixtes, là, un des repères principaux est constitué par une surface, en l'occurrence la face du lest qui équipe la mesure souple (figure 1 en bas).

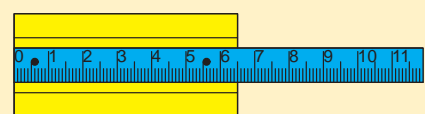
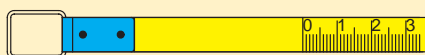


Figure 1 : Les mesures souples à traits et mixtes.

Cette dernière est, par exemple, employée pour la mesure du niveau du produit dérivé du pétrole dans un réservoir de stockage vertical.

Les mesures en ruban ont toutes un



Figure 2 : Exemple de mesures souples.

système semblable de rangement par enroulement. Pour ce faire, elles sont montées dans un boîtier, ou sur un support ouvert muni d'une poignée dont des exemples sont donnés par la figure 2. La mesure en ruban fait partie des mesures matérialisées de longueur qui sont définies dans plusieurs documents, dont les normes OIML No 35 et DIN 6403, ainsi que dans la directive CEE 73/362 et ses compléments. Les définitions des caractéristiques principales qui distinguent plus précisément la mesure en ruban, mais qui peuvent aussi être communes à toutes les mesures matérialisées, peuvent se résumer comme suit :

- Elle comporte des repères dont les distances sont indiquées en unité légale de longueur.
- Elle est désignée par sa longueur nominale.
- Elle est à traits ou mixte.
- La qualité de son matériau est telle que sa variation de longueur reste à l'intérieur des tolérances prescrites lors d'une utilisation dans les conditions ; d'une température de matériau de $(20 \pm 8) ^\circ\text{C}$, et d'une force de traction située dans la fourchette représentée par la valeur de la force de traction nominale spécifiée $\pm 10 \%$.
- **Obligatoirement**, elle porte en son

début l'indication de sa longueur nominale, une marque d'identification, l'indice de classe de précision, la force de traction et le signe d'approbation.

- **Accessoirement**, elle porte l'indication de la température de référence de $20 ^\circ\text{C}$, des indications non imposées à caractères non métrologiques, et éventuellement des inscriptions publicitaires.

- **Sous la responsabilité du fabricant**, accessoirement, elle porte l'indication du coefficient de dilatation. Les erreurs tolérées pour les mesures en ruban sont réparties en trois classes désignées par les indices I, II ou III qui indiquent alors le degré de précision de la mesure en ruban. Pour la vérification primitive, l'erreur maximale tolérée sur la longueur nominale et sur la distance comprise entre deux repères quelconques, non consécutifs, est exprimée par la formule :

$$\Delta L = \pm(a + b \cdot L) \text{ mm}$$

L est la longueur considérée en mètres, a et b des coefficients fixés pour chaque classe de précision. Les valeurs de ces coefficients sont données dans le tableau ci-dessous. Il faut relever que l'erreur maximale tolérée indiquée ci-dessus, est majorée dans le cas d'une mesure souple mixte. Cette majoration, qui est fonction de la classe de précision, s'applique à la longueur d'un intervalle qui comprend la face d'origine et un trait comme extrémités.

Classe de précision	a	b
I	0.1	0.1
II	0.3	0.2
III	0.6	0.4

ainsi que selon le guide ISO.

Modèle mathématique

$$L_x = N \frac{\lambda}{n} + \Delta L_m - \alpha \cdot L \cdot t_m + \delta L_{\cos} + \delta L_{Abbe} + \delta L_F$$

- L_x = longueur inconnue de l'intervalle ayant une longueur nominale L
 N = nombre de longueurs d'onde compté par l'interféromètre à laser lors du déplacement du chariot de mesure sur la longueur d de l'intervalle à mesurer
 λ = longueur d'onde de la source laser dans le vide
 n = indice de réfraction de l'air
 ΔL_m = écart mesuré sur le trait à l'aide du microscope
 α = coefficient de dilatation du ruban de la mesure souple
 t_m = écart de température du matériau T_m par rapport à la température de référence de 20° C, $t_m = T_m - 20^\circ$ C
 δL_{\cos} = correction due à l'erreur de cosinus
 δL_{Abbe} = correction due à l'erreur d'Abbe
 δL_F = correction due à la force de traction F

Examen des contributions

Mesure par interférométrie (N)

Le comptage du nombre de longueurs d'onde est admis sans erreur.

Les fluctuations observées sur l'affichage, dues aux perturbations atmosphériques et aux vibrations, sont considérées comme négligeables.

Longueur d'onde (λ)

Incertitude relative de l'étalonnage de la longueur d'onde du laser:

10^{-9} , écart type.

Stabilité pour un laps de temps d'une année:

écart maximum ± 2 MHz, distribution rectangulaire.

$u(\delta\lambda/\lambda) = 2.5 \times 10^{-9}$, incertitude type.

Indice de réfraction (n)

Le système d'interféromètre à laser doit tenir compte du climat dans lequel il est appelé à mesurer pour que ses indications soient acceptables. Il est ainsi corrigé en fonction de la température de l'air t_a , de la pression atmosphérique p et de l'humidité relative rH . Cette correction constitue l'adaptation de la longueur d'onde du faisceau laser dans le vide à celle dans l'air à l'aide de l'indice de réfraction de l'air n . Cet indice n est déterminé par la formule d'Edlen.

L'incertitude relative de n peut être exprimée comme suit :

$$(\delta n/n)^2 = c_t^2 (\delta t_a)^2 + c_p^2 (\delta p)^2 + c_{rH}^2 (\delta rH)^2$$

Température de l'air,

écart maximum: $\pm 0.1^\circ$ C, distribution rectangulaire.

Pression atmosphérique,

écart maximum: ± 0.3 hPa, distribution rectangulaire.

Humidité relative:

pas mesurée, régulée par la climatisation du laboratoire dans une fourchette de $\pm 5\%$ rH , distribution rectangulaire.

Coefficients de sensibilité:

$$c_t = -9.2 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; -9.2 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$c_p = 2.7 \times 10^{-7} \text{ (hPa)}^{-1};$$

$$c_{rH} = 10^{-8} \text{ (% } rH)^{-1}$$

Microscope photoélectrique (ΔL_M)

La valeur estimée de ΔL_M est égale à zéro par le fait que la position du chariot est automatiquement réglée sur le centre du trait.

Répétition de la position de mesure sur le trait de la mesure :

± 3 μ m, écart type.

Ecart systématique inconnu, dû à la qualité du trait (asymétrie) :

± 5 μ m, distribution rectangulaire.

$u(\Delta L_M) = 4$ μ m, incertitude type.

Température du matériau (α , t_m)

L'incertitude de t_m due à l'incertitude de mesure des capteurs de température, et à la répartition non uniforme de la température dans le ruban, est estimée à ± 0.15 $^\circ$ C, distribution rectangulaire.

Le coefficient de dilatation est admis à $11.5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (acier normal).

Erreur d'alignement (δL_{\cos})

L'erreur d'alignement résulte de l'écart de parallélisme qu'il peut y avoir entre le chemin du faisceau du laser, et la ligne de mesure sur la mesure en ruban. Cet écart est principalement provoqué par le minime louvoiement du chariot, et les courbures éventuelles du ruban.

La valeur estimée pour δL_{\cos} est égale à zéro, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de correction.

Ecart maximum de la direction d'alignement :

± 0.05 mm/m, distribution rectangulaire.

Erreur d'Abbe (δL_{Abbe})

L'erreur selon Abbe résulte du décalage s qui existe entre l'axe du faisceau laser et l'endroit où la mesure est réalisée et l'angle $\delta\varphi$ du tangage du chariot de mesure: $\delta L_{Abbe} = s \times \delta\varphi$.

La valeur estimée pour δL_{Abbe} est égale à zéro, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de correction. Angle (tangage) $\delta\varphi$ maximum: ± 50 μ m/m, distribution rectangulaire.

Distance entre le faisceau laser et la ligne de mesure : $s = 80$ mm.

Force de traction (δL_F)

Pour une mesure en ruban, il faut évidemment aussi tenir compte de la traction qui doit être appliquée à celle-ci. Elle agit en respectant la loi de Hooke sur la déformation élastique des corps. Le principe de la loi simplifiée est que l'allongement relatif apparaît ou disparaît en même temps que la force, et que cet allongement

Quantité	Incertitude type	Coefficient de sensibilité	Contribution à l'incertitude	
			constante	proportionnelle à L
$\delta\lambda/\lambda$	2.5×10^{-9}	L	-	$0.0025 \times 10^{-6} \times L$
t_a	0.087 $^\circ$ C	$-9.2 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C} \times L$	-	$0.080 \times 10^{-6} \times L$
p	0.29 hPa	$2.7 \times 10^{-7} \text{ (hPa)}^{-1} \times L$	-	$0.078 \times 10^{-6} \times L$
rH	2.9 % rH	$10^{-8} \text{ (% } rH)^{-1} \times L$	-	$0.029 \times 10^{-6} \times L$
ΔL_M	4 μ m	1	4 μ m	-
t_m	0.087 $^\circ$ C	$11.5 \times 10^{-6} \times L$	-	$1.01 \times 10^{-6} \times L$
alignement	0.035 mm/m	$1.7 \times 10^{-5} \times L$	-	$0.6 \times 10^{-9} \times L$
φ_{Abbe}	58 μ m/m	0.08 m	4.6 μ m	-
F	0.87 N	$1.5 \times 10^{-6} \times L$	-	$1.31 \times 10^{-6} \times L$
Incertitude type combinée:			6.1 μ m	$1.66 \times 10^{-6} \times L$

Tableau 1: Budget des incertitudes.

est indépendant du temps pendant lequel la force est appliquée.

$\delta L_F = L \times F / (E \times S)$, avec pour notre cas, $F=50\text{ N}$, $E=2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $S=3.25 \text{ mm}^2$.

La valeur estimée pour la correction est zéro, parce que l'étalonnage est fait avec la force de traction nominale spécifiée. En raison du frottement résiduel, l'écart de la force de traction est admis à :

$\pm 1.5 \text{ N}$, distribution rectangulaire.

Par exemple, la force de traction nominale de 50 N provoque un allongement du ruban de $7.3 \times 10^{-5} \times L$, soit 3.66 mm pour 50 m.

Budget des incertitudes

Incertitude de mesure élargie (tableau 1) :

$$I_{95} = k \cdot \sqrt{(6.1 \mu\text{m})^2 + (1.66 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$$

$k=2$ est le facteur d'élargissement.

Pour L grand, les contributions dépendantes de L sont dominantes. D'où la représentation de la formule ci-dessus sous une forme linéaire :

$$I_{95} = 0.012 \text{ mm} + 3.3 \times 10^{-6} \times L$$

Nous pouvons calculer que pour une longueur de cinquante mètres, l'incertitude de mesurage a une valeur de $\pm 0.18 \text{ mm}$, ce qui est tout à fait

correct en comparaison avec la plus petite tolérance admissible qui est celle de la classe I, et qui vaut $\pm 5.1 \text{ mm}$. ■

(e-mail: michel.degoumois @ eam.admin.ch; Tel. +41 (0)31 323 33 55)

Kurzfassung	Résumé	Riassunto	Summary
<p>Der Beitrag beginnt mit einer kurzen Darstellung der verschiedenen Messmöglichkeiten, die das „längste“ Labor des EAM bietet.</p> <p>Das Messlabor ist mit einer 50 Meter langen horizontalen Messbasis ausgerüstet. Deren Stahlkonstruktion bildet eine möglichst geradlinige Führung für den Messwagen, dessen Bewegung mit einem Laserinterferometer gemessen wird. Konstruktion und Prinzip der interferometrischen Lasermessung werden erklärt.</p> <p>Die Beschreibung des Messprinzips, beginnend mit der manuellen und visuellen Messtechnik, führt dann zur automatisierten Kalibrierung von Messbändern mit motorisierten Verschiebungen und elektronischer Lokalisierung der Teilstriche durch ein photoelektrisches Mikroskop. Insbesondere werden die Einflüsse der Oberflächeneigenschaft der Masskörper und der Strichqualität auf die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse diskutiert.</p> <p>Schliesslich wird die Messunsicherheit der Kalibrierung eines Messbandes ermittelt, und zwar unter Einbezug aller Einflussgrößen, die im Detail diskutiert werden.</p> <p>Der Artikel wird durch einen Kasten ergänzt, in dem die wichtigsten, meist durch internationale Richtlinien vorgeschriebenen Eigenschaften von Messbändern erläutert werden.</p>	<p>L'article commence par exposer de façon succincte, les différentes possibilités d'étalonnage qui peuvent être réalisées dans le „long“ laboratoire de mesure de l'OFMET.</p> <p>Le laboratoire est équipé d'un banc horizontal de mesure d'une capacité de cinquante mètres. Sa construction est métallique, et pour les mesurages, il est équipé d'un système d'interféromètre à laser. Le principe de mesure de ce système est brièvement expliqué.</p> <p>Le banc de mesure est décrit en évoquant son évolution, avec la motorisation des déplacements, et la possibilité de lire les traits de la graduation d'une mesure matérialisée avec un microscope photoélectrique. Les caractéristiques d'une prise de cote avec les influences qui peuvent contrarier celle-ci sont discutées en montrant notamment les influences des qualités de l'état de surface de la mesure matérialisée.</p> <p>L'incertitude de mesurage, pour l'étalonnage d'une mesure souple en ruban est établie en détaillant et en évaluant les différentes sources d'influence.</p> <p>L'article se complète par un encart qui donne les principales caractéristiques d'une mesure souple en ruban.</p>	<p>L'articolo inizia presentando succintamente le diverse possibilità di campionatura che si possono realizzare nel „lungo“ laboratorio di misura dell'UFMET.</p> <p>Il laboratorio è munito di un banco orizzontale di misura lungo 50 metri. Costruito in metallo, esso è fornito di un sistema d'interferometro a laser per le misurazioni. È spiegato il principio di misura di questo sistema.</p> <p>Il banco di misura è descritto rammentando la sua evoluzione, con la motorizzazione degli spostamenti e la possibilità di leggere i tratti della graduazione di una misura materializzata mediante microscopio fotoelettrico. Sono discusse le caratteristiche di un rilevamento di quota con le influenze che possono contrastare quest'ultima, mostrando in particolare le influenze delle qualità dello stato della superficie della misura materializzata.</p> <p>L'incertezza di misurazione per la campionatura di una misura duttile su nastro è stabilita considerando singolarmente, e valutandole, le differenti fonti d'influenza.</p> <p>Completa l'articolo una tabella che dà le principali caratteristiche di una misura duttile su nastro.</p>	<p>The article starts with a short presentation of the measurement possibilities which are offered by the „longest“ laboratory at OFMET.</p> <p>The laboratory is equipped with a 50 meter long test bench. The steel construction provides a straight guide for the measurement carriage, whose displacement is measured with a laser interferometer. The construction and the principle of the interferometric measurement are explained.</p> <p>The description of the measurement principle of the test bench, starting with the manual and visual measurement technique, leads then to the automatic calibration of measurement tapes using motorised displacements and electronic localisation of the scale lines with the photoelectric microscope. In particular, the influence of the surface characteristics of the material standards and the quality of the scale marks on the reliability and comparability of the measurement results are discussed.</p> <p>Finally the measurement uncertainty for the calibration of line scales is estimated, taking into account all relevant influence quantities, which are discussed in detail.</p> <p>The article is completed by a box containing the principle characteristics of tape measures, as they are described in international recommendations.</p>