

Instrumentus usuels de mesure de longueur

par **Bernard SCHATZ**
Ingénieur CNAM en métrologie
PDG SA Metroqual (Nîmes)

1. Instruments usuels en métrologie des longueurs	R 1 260 - 3
1.1 Place des instruments usuels dans l'industrie.....	— 3
1.2 Normalisation.....	— 3
1.3 Incertitudes de mesure.....	— 4
1.4 Guide de choix.....	— 5
2. Instruments à main	— 6
2.1 Instruments à coulisse.....	— 6
2.2 Micromètres à vis.....	— 10
2.3 Mesureurs d'alésage.....	— 18
2.4 Mesureurs spéciaux d'extérieur dits « C de mesure ».....	— 19
3. Mesureurs verticaux	— 20
3.1 Trusquins.....	— 20
3.2 Colonnes de mesure.....	— 20
3.3 Colonnes de mesure verticales.....	— 21
4. Compérateurs	— 22
4.1 Mécanique à tige rentrante radiale.....	— 22
4.2 Mécanique à levier.....	— 24
4.3 Affichage numérique.....	— 24
4.4 Supports de compérateur.....	— 26
5. Conclusions	— 26
Pour en savoir plus	Doc. R 1 260

Les instruments usuels de mesure de longueur sont par définition des instruments d'usage courant, ne nécessitant ni une formation trop longue ni un haut niveau de connaissance, et donc utilisant des principes de mesure simples. Les instruments dits usuels d'aujourd'hui sont généralement des instruments qui étaient déjà utilisés dans le courant du siècle dernier, voire avant pour le pied à coulisse ou le micromètre, dont les premiers instruments datent de la fin du XVIII^e siècle. Le principe du vernier consiste à placer une règle gravée, proche de la règle, le plus souvent sur une partie biseautée au-dessus de celle-ci. Le vernier le plus courant est le vernier au 1/50 mm, la règle est gravée tous les millimètres et le vernier est constitué de 50 traits sur 49 mm ; pour le vernier au 1/20 mm, il comporte 20 traits sur 19 mm, et enfin pour le vernier au 1/10 mm (qui n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui), il comporte 10 traits sur 9 mm.

Le micromètre, souvent encore appelé palmer du nom de son inventeur J.L. Palmer en 1848, est constitué d'une vis de précision, la lecture étant effectuée à l'aide d'un tambour gradué pour les instruments au 1/100 mm et parfois à l'aide d'un vernier pour les instruments au 1/1 000 mm.

Les compérateurs ont permis la mise au point de toute une métrologie. Il est vrai que toute mesure est une comparaison, mais les habitudes sont telles que l'appellation comparaison est plus réservée aux méthodes de mesure dans lesquelles la pièce à mesurer est « comparée » à un étalon de même nature, c'est-à-dire même forme de surface et dimension proche de la dimension de la

pièce. Cette dernière affirmation reste valable, dans son principe, pour les comparateurs à faible course, pour lesquels le principe de la mesure (dite méthode de Borda) consiste à régler le comparateur à « zéro » sur l'étalon et à venir mesurer la pièce pour déterminer l'écart par rapport à l'étalon. Pour les comparateurs ayant une course de mesure de plusieurs millimètres, par exemple le comparateur le plus courant ayant une course de 10 mm, celui-ci ne mesure donc pas un petit écart et constitue ainsi un mesureur de déplacement ; c'est pour cette raison que, pour ces instruments, l'appellation comparateur est parfois controversée.

Le développement de l'électronique a permis l'essor de nouveaux instruments, les capteurs électroniques de déplacements ou les interféromètres à comptage de franges. Mais les instruments usuels ont aussi évolué avec ces technologies, en particulier avec la génération des instruments dits à affichage numérique. Parmi les instruments usuels, tous ont aujourd'hui un type à affichage numérique. Les principes utilisés pour ces instruments sont de deux types. Les dispositifs les plus couramment utilisés sont du type capacitif (voir schéma). Le détecteur capacitif est solidaire de la règle pour les instruments à coulisseau (pied à coulisse et jauge de profondeur à coulisseau), le lecteur avec son électronique étant intégré dans le coulisseau ; pour certains comparateurs à affichage numérique, le même dispositif (détecteur et lecteur linéaire) est utilisé pour les instruments à vis, micromètre d'extérieur, jauge de profondeur à vis, jauge micrométrique ou alésomètre, le détecteur capacitif utilise le même principe mais est de forme circulaire. L'autre type est utilisé principalement pour des comparateurs à affichage numérique ayant des résolutions de $1 \mu\text{m}$, voire $0,1 \mu\text{m}$; il utilise une règle incrémentale avec un pas le plus souvent de $40 \mu\text{m}$ (schéma ci-dessous). Ce principe est plus souvent utilisé pour la mesure de déplacement des machines-outils, des machines à mesurer tridimensionnelles ou des bancs de mesure universels. Son application pour les comparateurs, ou plutôt pour les mesureurs de déplacement à affichage numérique, ouvre une voie nouvelle à la métrologie par comparaison, l'utilisation de comparateur à très faible résolution : $1 \mu\text{m}$ et même $0,1 \mu\text{m}$ sur des courses mesurantes de 30 mm, 60 mm et même 100 mm.

Ces instruments usuels à affichage numérique facilitent la lecture des mesures, mais leur principal intérêt est la possibilité de transmission des mesures vers un ordinateur pour traitements des résultats. Pour les comparateurs à affichage numérique, outre la possibilité de transmission des données, l'intérêt d'une faible résolution avec une grande course permet une utilisation plus universelle et évite la rigueur du principe de Borda, pièce et étalon de dimension proche. En effet, ces instruments, sur des multicotes ou outillages de contrôle spécifiques, évitent l'utilisation d'un étalon de forme complexe ; souvent une cale, un tampon ou une bague seront utilisés au moindre coût et avec des incertitudes de mesure plus faibles, compte tenu de la faible résolution du comparateur et d'une meilleure connaissance de l'étalon.

Avant de voir en détail la présentation de ces instruments, analysons leur place dans l'industrie, la normalisation, les causes d'incertitude et donnons un guide de choix.

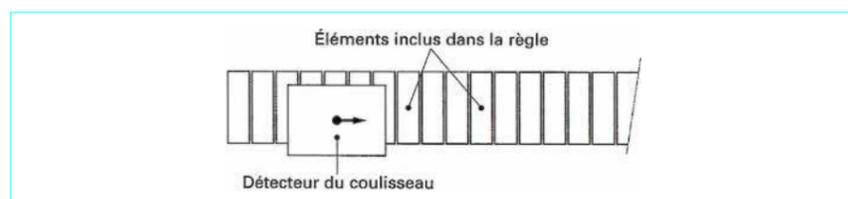


Figure A—Principe d'une règle capacitive

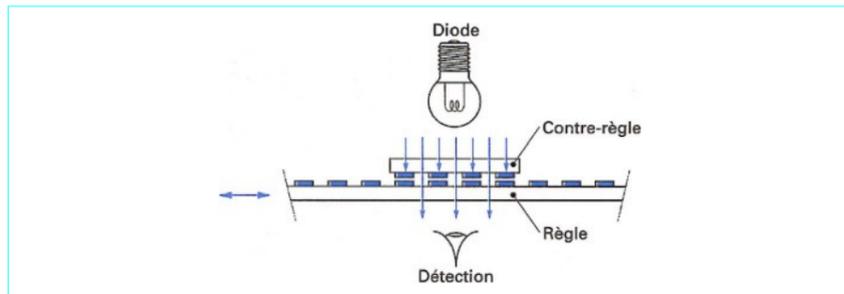


Figure B—Principe d'une règle incrémentale

1. Instruments usuels en métrologie des longueurs

1.1 Place des instruments usuels dans l'industrie

Avec l'invention de l'interféromètre à comptage de franges et la machine à mesurer tridimensionnelle, beaucoup voyaient la mise au musée des instruments usuels, eh bien non.

Aujourd'hui, les contrôleurs et métrologues utilisent toujours des pieds à coulisse, des micromètres et comparateurs en tout genre. Certes, beaucoup moins en métrologie ; ils sont toujours présents, mais bien souvent dans les armoires, ils ne sortent que pour lever un litige en fabrication ou pour un « hors tolérance » problématique.

Leur place est **en fabrication** ou au **contrôle atelier**, de la PMI (petite ou moyenne industrie) au grand groupe. Ils sont présents dans toutes les branches d'activités, automobile, armement, aéronautique, nucléaire... et même dans des branches d'activités hors mécanique : micromètre à plateaux pour les épaisseurs de papiers et cartons, micromètre de tréfileur pour la mesure du diamètre de fil, et divers montages de contrôle particuliers réalisés à partir de vis micrométrique ou bien de comparateurs mécaniques.

Ils sont dans l'atelier, certains sur les machines (suivi de position de tables ou d'avance de coupe avec des comparateurs mécaniques) ou au poste de travail en suivi de fabrication, ils mesurent en direct ou par comparaison à un étalon lorsque les conditions ambiantes sont trop mauvaises. Ils sont aussi de plus en plus utilisés soit pour le contrôle interopérations d'usinage, soit sur les lignes de fabrication de série sous maîtrise statistique des procédés (MSP, en anglais SPC : statistical process control). Pour ces mesures sous MSP, les instruments à affichage numérique avec sortie RS 232 sont les plus utilisés, mais les instruments à vernier ou analogiques sont aussi utilisés si le temps de process est tel qu'un opérateur peut mesurer et introduire le résultat manuellement dans l'ordinateur.

Les plus courants sont les **pieds à coulisse**, les **micromètres d'extérieur** et les **comparateurs mécaniques**. Ils sont parfois à 200 ou 300 exemplaires dans une entreprise de moins de 500 personnes. Moins répandus, car plus spécialisés, les micromètres d'intérieur, les jauges de profondeur, les trusquins et colonnes numériques ou à vernier.

La **colonne de mesure verticale** est une véritable machine à mesurer à un axe, son développement et son utilisation dans l'industrie ont été très rapides ces vingt dernières années. Cet instrument s'est placé comme instrument universel en contrôle, mais l'expérience a montré qu'il reste encore une large place pour l'ensemble des instruments usuels, à affichage numérique ou non.

Historique

L'invention du principe du pied à coulisse, avec sa règle gravée, est attribuée au Français Pierre Vernier (1580-1637), qui a donné la description de l'instrument ou plus précisément du principe qui porte son nom le « **vernier** » dans un ouvrage qui date de 1631, « Construction, usage et propriétés du quadrant nouveau de mathématiques ».

Les instruments usuels ont surtout été créés pour répondre au début du XIX^e siècle au besoin de l'industrie de l'armement. L'évolution de ces instruments a surtout porté sur la qualité et la précision de l'usinage des règles et des vis, puis conjointement à la création du mètre et, en particulier, avec la première définition en 1875 du mètre à section en X, les techniques de gravure des traits ont permis l'amélioration de la régularité de la division et de la largeur, donc une réduction des erreurs de lecture. Le développement des besoins industriels au début du XX^e siècle a permis la création de nouveaux instruments, les **jauges de profondeur**, les **mesureurs d'alésage** et surtout les **comparateurs** dits mécaniques ou montres comparateurs (compte tenu de la forme de l'indicateur, un cadran rond avec une aiguille comme une montre pour l'indication de l'heure).

1.2 Normalisation

La normalisation des instruments usuels en métrologie dimensionnelle a beaucoup évolué depuis le milieu des années 80. La normalisation internationale à l'ISO (Organisation internationale de normalisation) comme la normalisation européenne (pour laquelle dans ce domaine l'adoption d'une norme est liée à un vote ISO) est restée sans changement, sans évolution et surtout caractérisée par des critères normatifs généraux et sans rapport avec l'évolution des méthodes en métrologie.

L'aspect le plus problématique réside dans le fait que les spécifications normatives sur les instruments sont, pour les valeurs les plus faibles, du même ordre que la résolution de l'instrument, ce qui est totalement incompatible avec les méthodes d'étalonnage et de mesure. Les conséquences sont, pour un pied à coulisse de 150 mm au 1/50 mm par exemple, un écart toléré pour le point 100 mm de $\pm 20 \mu\text{m}$ avec donc une résolution de $20 \mu\text{m}$, soit une incertitude d'étalonnage à deux écarts-types de l'ordre de $\pm 30 \mu\text{m}$ et donc, dans les meilleures conditions d'utilisation du pied à coulisse, une incertitude de mesure à deux écarts-types supérieure à $\pm 40 \mu\text{m}$ (voir § 1.3 Incertitudes de mesure).

Si la normalisation française a subi de profonds changements durant cette période, c'est que les normalisateurs en France ont souhaité répercuter dans les normes les évolutions des méthodes

d'étalonnage, des besoins industriels et surtout des techniques de calculs des incertitudes du BIPM (Bureau international des poids et mesures, Recommandation INC-1, 1981). Si cette façon de normaliser purement française a conduit à quelques « aberrations » mineures, elle a surtout permis, côté normalisateur, une meilleure prise en compte des besoins industriels et, côté industriel, un intérêt plus important pour l'utilisation de ces documents, compte tenu des aspects non seulement normatifs mais étalonnage, vérification, précautions d'emploi que l'on trouve dans ces normes. Il faut dire, d'une manière plus générale, que la normalisation française, dans ce domaine, a contribué à l'amélioration de la qualité des mesures donc des produits industriels.

La situation aujourd'hui ne semble pas beaucoup évoluer à l'ISO, bien qu'il ait été créé un groupe de travail qui, en complément du guide sur les calculs d'incertitude [1], travaille sur des normes et des principes généraux devant être utilisés ensuite dans les normes particulières pour définir les tolérances et écarts tolérés en fonction des incertitudes d'étalonnage et des conditions d'acceptation retenues. En France, pour l'élaboration des normes, depuis les normes de décembre 1993 sur les micromètres d'extérieur et sur les micromètres d'intérieur à 3 touches, la tendance, d'une manière générale consiste :

- à respecter, dans la mesure du possible, les caractéristiques métrologiques retenues dans la norme ISO ;
- à éviter la multiplication des caractéristiques à contrôler, par exemple, pour le pied à coulisse, il doit être vérifié la justesse, la fidélité, la différence des moyennes, en ne retenant que l'erreur d'indication, avec des méthodes d'étalonnage permettant la mise en évidence éventuelle d'une erreur (par exemple, erreur d'indication pleine touche et contact partiel pour les micromètres d'extérieur) ;
- à limiter le nombre de points d'étalonnage à une valeur réaliste, à la fois du point de vue métrologique et du point de vue coût des étalonnages, afin d'éviter une situation semblable à celle de la précédente norme sur les comparateurs mécaniques qui recommandait, pour un comparateur de 10 mm au 1/100 mm, plus de 600 points d'étalonnage, ce qui n'a pratiquement jamais été appliqué ;
- à prendre en compte dans les valeurs des spécifications métrologiques les incertitudes d'étalonnage.

L'ensemble des points particuliers à la normalisation de chaque instrument sera traité avec la description de l'instrument aux paragraphes suivants.

1.3 Incertitudes de mesure

Ce paragraphe va traiter des incertitudes d'étalonnage et des incertitudes de mesure des instruments usuels, en se fondant, pour leurs déterminations, sur le guide ISO de calcul des incertitudes [1] ; en particulier, les valeurs des incertitudes élargies sont obtenues en multipliant les estimateurs d'écarts-types composés par un coefficient 2. Les valeurs des incertitudes élémentaires et élargies sont des ordres de grandeur fournis à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme des valeurs de référence reconnues pour des audits par exemple ; il est fortement conseillé de personnaliser ces calculs d'incertitude en se rapportant aux documents de références, Guide ISO (XP X-07-020 Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure) [1]. Recommandation du COFRAC (organisme d'accréditation des laboratoires), voir aussi l'article [4] ainsi que les logiciels d'aide aux calculs des incertitudes et de capabilité des moyens de contrôle qui évitent d'omettre certaines causes d'incertitude (WINSIC de Metroqual).

Pour l'ensemble des instruments usuels, la principale cause d'incertitude d'étalonnage et de mesure est la **résolution ou quantification de l'indication de l'instrument**. Elle est de 0,02 mm pour un pied à coulisse à vernier au 1/50 mm, de 0,01 mm pour un micromètre ou autre instrument à affichage numérique au 1/100 mm, et enfin de 0,001 mm pour un comparateur à affichage numérique à 1^{er} m. Si dans le tableau 1, qui donne, pour les principaux instruments, les incertitudes d'étalonnage et de mesure, on compare la

quantification à l'incertitude de mesure, il est évident qu'elle en représente la part principale (plus de 50 %). Les autres causes d'incertitude sont les suivantes.

§ **L'écart-type de répétabilité (incertitude évaluée avec une méthode de type A)** comprend l'ensemble des fluctuations aléatoires que subit l'instrument, fidélité, déformations mécaniques de l'instrument ou de son support, température, erreur de lecture de l'opérateur. La valeur de cet écart-type est, sauf anomalie de fonctionnement de l'instrument, très significativement plus faible que la quantification (de 3 à 10 fois) : il est très courant de trouver un écart-type de 2 à 3^{er} m avec un pied à coulisse au 1/50 mm, de l'ordre de 1^{er} m avec un micromètre d'extérieur à 1/100 mm. La procédure d'évaluation de la répétabilité doit toujours être le reflet du processus d'étalonnage ou de mesure, en particulier tenir compte de mesures répétées (la justesse d'un pied à coulisse est l'écart entre la moyenne de 5 mesures sur une cale et la valeur conventionnellement vraie de la cale), dans le cas du calcul d'incertitude de mesure, la répétabilité doit être évaluée sur les caractéristiques d'une pièce de la série à contrôler : par exemple, pour la mesure d'un diamètre extérieur avec un pied à coulisse, effectuer des essais de répétabilité sur un diamètre du même type.

§ **L'incertitude sur les étalons de référence** est une des incertitudes à considérer pour l'étalonnage des instruments, mais elle est, au moins pour des étendues de mesure inférieures ou égales à 300 mm, pratiquement négligeable. Cette incertitude ne doit cependant pas être oubliée, les étalons doivent être étalonnés et il doit être tenu compte, non pas des valeurs nominales, mais des valeurs mesurées et indiquées dans les documents d'étalonnage. Pour les faibles étendues de mesure (< 300 mm) et pour les instruments dont la quantification est supérieure ou égale à 0,01 mm, il est possible, après analyse du document d'étalonnage, de ne considérer pour l'étalonnage de l'instrument que la valeur nominale des étalons, cales, bagues ou bancs spécifiques d'étalonnage. La valeur de cette incertitude est égale à l'incertitude d'étalonnage I_{et} indiquée sur le certificat d'étalonnage des étalons ; les incertitudes d'étalonnage étant données avec un facteur d'élargissement de 2, l'appréciateur U_{ref} de cette incertitude est :

$$U_{ref} = I_{et}/2$$

§ **L'incertitude de quantification** est déterminée à partir de la résolution des instruments et en tenant compte des lois de distribution des lectures effectuées. Cette loi de distribution est telle que les lectures sont de pas en pas (numérique, vernier), la loi de distribution est dite « uniforme ou rectangulaire » dans ce cas, mais le résultat d'une mesure est souvent un écart entre deux lectures, compte tenu de la mise à zéro ou de la lecture de la position initiale. De ce fait, le résultat d'une mesure d'un instrument à affichage numérique ou à vernier suit une loi de distribution *triangle*, issue du produit de convolution de deux distributions *rectangles*. Par contre, pour les instruments à tambour ou à aiguille, la lecture est continue, la distribution est normale. L'appréciateur d'écart-type de quantification est donc :

—pour les instruments à vernier, la quantification q étant égale à la valeur du vernier, l'appréciateur d'écart-type de quantification U_q est donc ; pour une lecture du vernier :

$$U_q = q\sqrt{3}$$

—pour les instruments à affichage numérique, la quantification q étant égale à la valeur du dernier chiffre (*digit*), l'appréciateur d'écart-type de quantification U_q est donc (compte tenu du fait qu'il y a généralement deux lectures) :

$$U_q = q/6$$

—pour les instruments à aiguille ou à tambour, la quantification q est, par analogie aux autres cas, égale en terme d'incertitude maximale et par convention au tiers de la division ; l'appréciateur d'écart-

Tableau 1 – Les incertitudes sur les instruments de mesure

Type d'instrument	Étendue de mesure (mm)	Résolution (μm)	Incertitude d'étalonnage (μm)	Incertitude de mesure (μm)
Pied à coulisse	150	10	±20	±30
	150	20	±30	±40
	1 000	10	±25	±40
	1 000	20	±35	±50
Micromètre d'extérieur à vis	0-25	1	±2	±3
	0-25	10	±4	±6
	100-125	1	±3	±4
	100-125	10	±5	±7
Alésomètre	475-500	10	±9	±12
	8-10	10	±4	±6
Trusquin	100-125	10	±5	±7
	250	10	±10	±20
Colonne verticale	500	1	±5	±7
	1 000	1	±6	±8
Comparateur mécanique et numérique	1	1	±1	±1,5
	10	10	±4	±6
	30	0,1	±0,5	±0,7

type de quantification U_q est donc (compte tenu du fait qu'il y a généralement deux lectures) :

$$U_q = U_q \cdot \sqrt{2} / 3$$

5 Les incertitudes sur les effets de la température sont de trois ordres.

q **L'incertitude sur l'écart maximal de température entre les produits**, soit l'étalon et l'instrument dans le cas de l'incertitude d'étalonnage, soit la pièce et l'instrument dans le cas de l'incertitude de mesure ; pour limiter les effets de cette incertitude, il est fortement recommandé de ne réaliser les mesures qu'après stabilisation thermique des produits. La valeur maximale de cette incertitude élémentaire est fonction de l'écart maximal de température (δ_t), du coefficient de dilatation linéique le plus élevé entre les produits (α), de la grandeur (L), l'appréciateur d'écart-type correspondant (distribution considérée comme normale) s'exprime donc par la relation :

$$U_t = \delta_t \cdot \alpha \cdot L / 3$$

q **L'incertitude sur la différence des coefficients de dilatation linéique des produits**, étalon et instrument pour l'incertitude d'étalonnage, et pièce et instrument pour l'incertitude de mesure : la valeur maximale de cette incertitude élémentaire est fonction de l'écart maximal entre les coefficients de dilatation ($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$), de l'écart maximal de température par rapport à la température de référence de 20 °C (δ_{t20}) et de la grandeur (L), l'appréciateur d'écart-type correspondant (distribution considérée comme normale) s'exprime donc par la relation :

$$U_{\delta\alpha} = \delta_{t20} \cdot (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \cdot L / 3$$

$U_{\delta\alpha}$ est nul dans le cas, par exemple, de l'étalonnage d'un pied à coulisse en acier avec des cales étalon en acier. Dans de nombreuses applications en métrologie, cette incertitude est nulle car il est appliqué une correction de température, mais avec les instruments usuels, ce n'est pas réaliste.

q **L'incertitude sur la connaissance des coefficients de dilatation linéique des produits** : la valeur maximale de cette incertitude élémentaire est fonction des incertitudes sur les coefficients de dilatation ($\delta\alpha$), de l'écart maximal de température par rapport à la température de référence de 20 °C (δ_{t20}) et la grandeur (L), l'appréciateur d'écart-type correspondant (distribution considérée comme normale) s'exprime donc par la relation :

$$U_{\alpha} = \delta\alpha \cdot \delta_{t20} \cdot L / 3$$

Cette incertitude doit être considérée pour chaque produit, par exemple pour l'étalonnage d'un pied à coulisse en acier avec des cales étalons en acier avec $\delta\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ et avec un écart maximal de température de ± 2 °C par rapport à 20 °C, la valeur de l'incertitude élémentaire est :

$$U_{\alpha} = \sqrt{2} \cdot \delta\alpha \cdot \delta_{t20} \cdot L / 3 \text{ soit } 110 \cdot 10^{-6} L$$

5 **L'incertitude due aux défauts géométriques ou déformations des éléments mécaniques utilisés** : cette incertitude n'est à considérer que dans le cas où il est utilisé un banc de mesure ou des supports, elle est nulle par exemple dans le cas de l'étalonnage d'un pied à coulisse avec des cales étalons. Elle doit être prise en compte, par exemple, dans le cas de l'utilisation d'un banc d'étalonnage des comparateurs (parallélisme des plans de contact côté comparateur et côté capteur de référence), ou dans le cas de l'utilisation d'un banc d'étalonnage des instruments (géométrie des éléments assurant la simulation des étalons).

5 **L'incertitude due aux différences de déformations élastiques des contacts** est toujours négligeable avec les instruments usuels, sauf dans quelques cas particuliers (hors métrologie usuelle) de mesure de pièces avec un comparateur de résolution à 1 voire 0,1 μm. L'ensemble des valeurs des incertitudes d'étalonnage et de mesure pour les instruments usuels dans des conditions industrielles (température à ± 1 °C) pour l'étalonnage en métrologie et (température à ± 2 °C) pour les mesures, est donné dans le tableau 1. Ces valeurs devront être augmentées dans le cas d'utilisation pour des mesures supérieures à 100 mm dans des conditions d'ambiance défavorable.

1.4 Guide de choix

Le paragraphe 1.3 sur les calculs d'incertitude donne un ordre de grandeur, pour différents instruments, de l'incertitude de mesure dans des conditions industrielles ; il est possible, par application de la norme NF E 02-204, de déterminer l'intervalle de tolérance maximale IT_{\max} mesurable avec ces instruments en multipliant l'incertitude de mesure élargie U ($U = \pm 2 \cdot Sc$, c'est-à-dire en prenant deux fois l'écart-type composé Sc) par le coefficient 8, soit :

$$IT_{\max} = 8U$$

Tableau 2 – Tolérances maximales vérifiables

Type de mesure	Quantification (μm)	Longueur mesurée (mm)	Tolérance maximale vérifiable (mm)
Pied à coulisse	10	100	0,25
	20	100	0,35
	10	1 000	0,35
	20	1 000	0,40
Micromètre d'extérieur à vis	1	100	0,03
	10	100	0,06
	10	500	0,10
Trusquin	10	250	0,16
Colonne de mesure	1	500	0,055
	1	1 000	0,065
Mesure au marbre avec cales et comparateur	1	100	0,015
	1	500	0,04
	10	100	0,05
	10	500	0,08

Autrefois dans l'industrie, il était appliqué la règle dite « du rapport 10 ». Pour contrôler une tolérance de $10 \mu\text{m}$, cette règle recommandait d'utiliser un instrument dont la résolution était de $1 \mu\text{m}$, soit :

$$IT_{\max} = 10 q$$

En tenant compte du tableau 1 donnant un ordre de grandeur des incertitudes de mesure avec les instruments usuels, et par application de la norme sur les conditions d'acceptation, il est possible de considérer les données du tableau 2.

Les valeurs des tolérances maximales vérifiables données dans le tableau 2 ont été déterminées en considérant des conditions ambiantes à $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et des écarts-types de répétabilité obtenus sur des pièces mécaniques de bonne qualité.

Ces valeurs peuvent être utilisées *a priori* pour le choix d'un instrument et d'une méthode, mais dans tous les cas, il sera nécessaire d'effectuer les calculs pour s'assurer de la capacité du moyen.

2. Instruments à main

Les instruments dits « à main » sont utilisés pour diverses mesures de longueur directement à la main, donc sans support ni référence de longueur comme pour les mesures comparatives au marbre. Les règles de l'art requièrent une utilisation avec une main légère et relaxée car, en particulier avec les instruments à coulisse, l'effort de mesure exercé par l'opérateur peut avoir une influence importante. Cette influence de l'effort est significativement réduite pour les instruments à vis micrométrique munis d'un dispositif limiteur de couple, qui permet une mise à zéro sur l'étalon et une mesure avec un même effort.

2.1 Instruments à coulisse

2.1.1 Principes et description

Les instruments à coulisse sont de deux types, les **pieds à coulisse** et les **jauges de profondeur à coulisseau**. La mesure avec ces instruments, distance (longueur ou profondeur) entre plans, diamètre intérieur ou extérieur, est réalisée en comparant le déplacement d'un

coulisseau muni d'un élément mesurant (face de mesure du bec mobile du pied à coulisse ou face de mesure ou talon de la jauge de profondeur) à une face de référence (face de mesure du bec fixe du pied à coulisse ou face de la semelle de la jauge de profondeur). Le déplacement du coulisseau est obtenu manuellement avec un effort pour compenser le frottement des pièces mécaniques réalisant le guidage du coulisseau sur la règle gravée de l'instrument. La qualité du déplacement dépend de la rectitude du guidage et l'effort de mesure dépend du réglage du « lardon », pièce intermédiaire en métal tendre permettant le réglage du coulisseau pour obtenir un frottement dit « gras » sans point dur.

La mesure du déplacement du coulisseau est obtenue par lecture de la règle gravée et :

- du vernier solidaire du coulisseau, pour les instruments à vernier à $\pm 0,05 \text{ mm}$ et $\pm 0,02 \text{ mm}$ (figure 1) ;
- du comparateur pour les instruments à comparateur : l'aiguille du comparateur indique, sur un cercle divisé à $\pm 0,01 \text{ mm}$ ou $\pm 0,02 \text{ mm}$, le déplacement du coulisseau ; une crémaillère solidaire du coulisseau entraîne une série de pignons faisant tourner l'aiguille ;
- de l'afficheur numérique pour les instruments à indicateur numérique à $\pm 0,01 \text{ mm}$.

Il faut noter qu'il existe quelques instruments à vernier à $\pm 0,1 \text{ mm}$, ils sont hors normes, mais les méthodes d'étalonnage peuvent être calquées sur les autres, en prenant pour les spécifications métrologiques le double des valeurs normalisées pour les instruments à $\pm 0,05 \text{ mm}$.

Les figures 2, 3 et 4 donnent (suivant NF E 11-091) le schéma de principe des pieds à coulisse à vernier, à cadran et à affichage numérique.

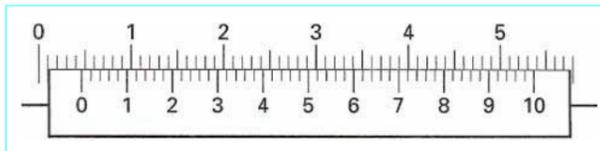


Figure 1—Exemple de vernier au 1/50 mm

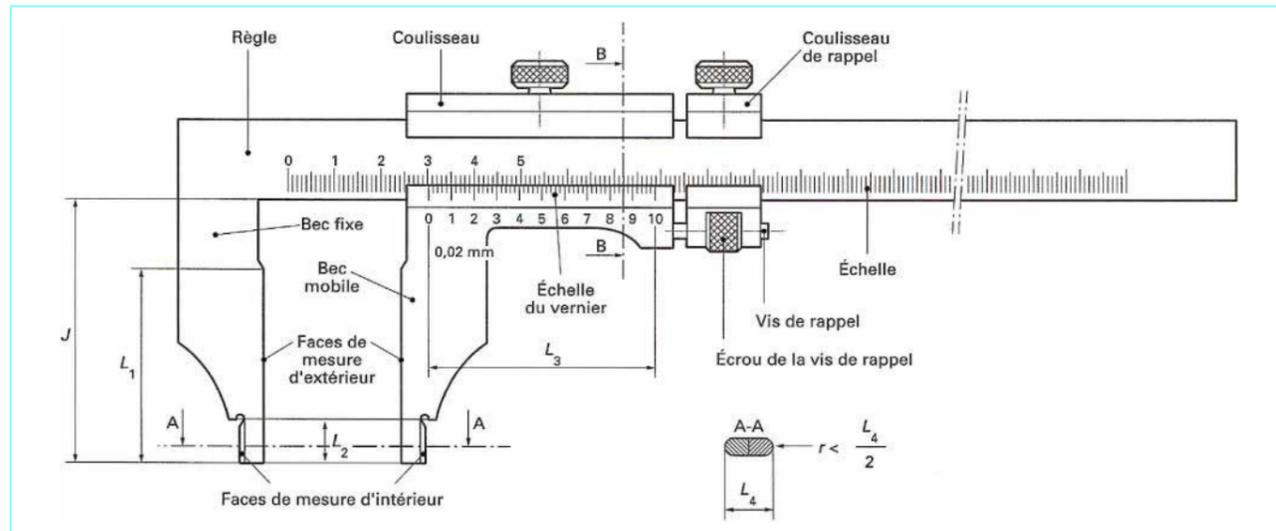


Figure 2—Pied à coulisse à vernier

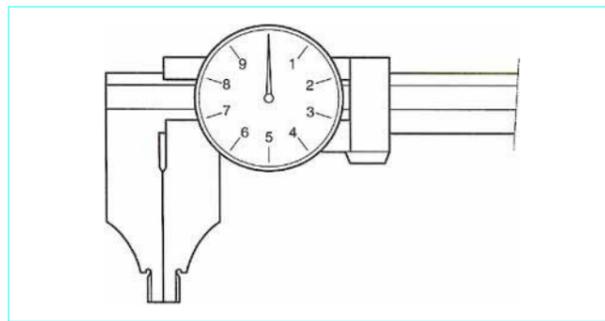


Figure 3—Pied à coulisse à comparateur

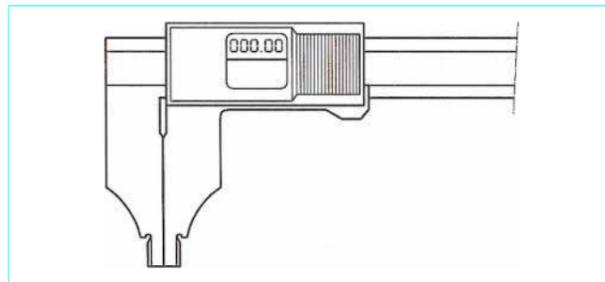


Figure 4—Pied à coulisse à affichage numérique

Les valeurs de L_1 , L_2 , L_3 , L_4 et J dépendent de l'étendue de mesure du pied à coulisse ou de sa résolution :

— L_1 est la longueur des faces de mesure d'extérieur et J la longueur totale des becs ; L_1 varie de 20 mm (avec $J = 30$ mm) pour un pied à coulisse de 150 mm jusqu'à 150 mm (avec $J = 200$ mm) pour un pied à coulisse de 2 000 mm ;

— L_2 est la longueur des faces de mesure d'intérieur, elle varie, lorsque ces faces existent, de 6 mm pour un pied à coulisse de 150 mm à 15 mm pour un pied à coulisse de 2 000 mm ;

— L_3 est la longueur du vernier des pieds à coulisse à vernier, cette longueur est de 49 mm pour les pieds à coulisse au 1/50 mm et de 19 ou 39 mm pour les pieds à coulisse au 1/20 mm ;

— L_4 est la largeur combinée des becs pour mesure d'intérieur, elle doit être, lorsque ces faces existent, de 5 mm pour un pied à coulisse de 150 mm, de 10 mm pour des pieds à coulisse de 200 à 400 mm et de 20 mm jusqu'à 2 000 mm.

La figure 5 donne (suivant NF E 11-096) le schéma de principe des jauges de profondeur à coulisseau à vernier, à cadran et à affichage numérique. Les dimensions de la semelle fixe dépendent de l'étendue de la jauge, 50 mm pour une jauge de 100 mm, 80 mm pour les jauges de 200 et 300 mm, 80 mm pour une jauge de 400 mm et 100 mm pour une jauge de 600 mm.

2.1.2 Caractéristiques métrologiques

Le pied à coulisse et la jauge de profondeur à coulisseau sont des instruments qui, par leur conception même, sont destinés à mesurer des **distances entre plans parallèles**. Les caractéristiques métrologiques et les méthodes de contrôle ne s'appliquent donc qu'à ces conditions normales d'utilisation. Pour des mesures particulières, mesure de diamètre avec un pied à coulisse, mesure d'épaisseur avec une jauge et autres mesures, des instruments avec des formes ou accessoires spéciaux ont été conçus. Pour ces instruments, les erreurs de justesse et de fidélité peuvent être supérieures (voir § 2.1.3).

Pour les pieds à coulisse et les jauges de profondeur à coulisseau, la conception d'instruments à affichage numérique à 0,01 mm permet une amélioration de la lecture, le zéro flottant, qui élimine l'éventuel décalage de zéro, et surtout la possibilité d'acquisition de données, par contre la structure mécanique reste la même et de ce fait, les caractéristiques métrologiques sont identiques pour les instruments au 1/50 mm et 1/100 mm.

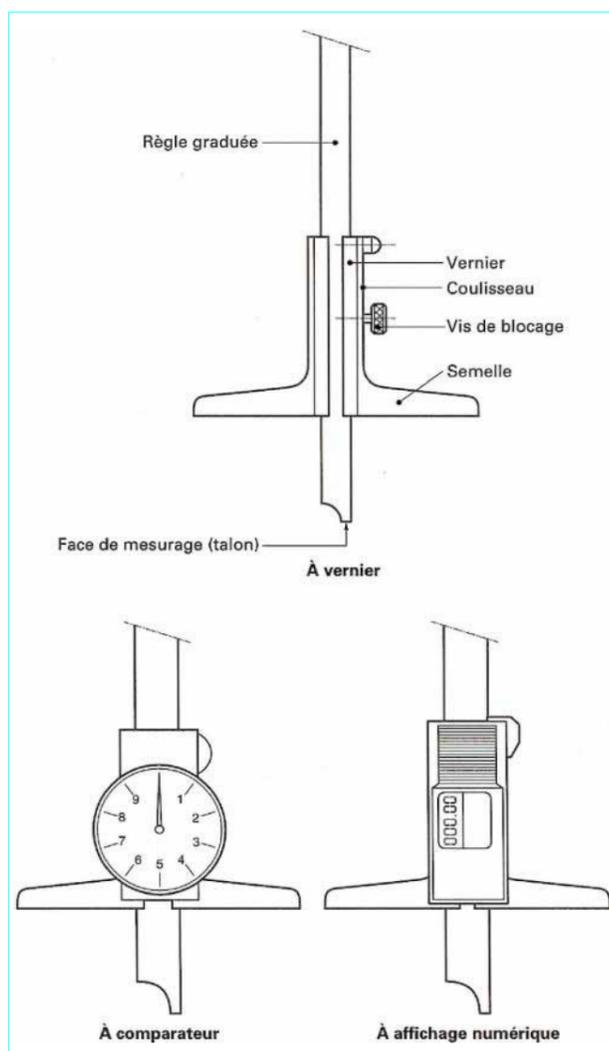


Figure 5—Schéma de principe des jauges de profondeur à coulisse

2.1.2.1 Caractéristiques métrologiques du pied à coulisse, méthodes d'étalonnage

5 Erreur de justesse

Elle est contrôlée à l'aide de cales étalons ou tous autres dispositifs de mesure de longueur équivalents, choisis de façon à mettre en évidence les erreurs de justesse du vernier (valeurs non entières). Le pied à coulisse repose à plat sur deux supports situés aux points de moindre déformation (recommandé pour les instruments d'étendue supérieure à 300 mm), et les cales sont placées en contact avec les becs, suivant la longueur de leurs faces mesurantes (35 mm) et telles que leur axe de mesure soit au milieu de la longueur des becs. La mesure doit être répétée cinq fois en chaque point en effectuant un déplacement du coulisseau entre chaque mesure (ne pas faire

uniquement cinq lectures) ; la répétabilité des mesures permet de limiter l'effet de l'erreur de fidélité. L'erreur de justesse E_j est définie par la formule :

$$E_j = V_{im} - V_C$$

où V_{im} est la moyenne des cinq mesures effectuées au même point, V_C est la valeur conventionnellement vraie des étalons utilisés.

Le nombre de points de mesure, en plus du zéro, est égal à $L/50$ avec un minimum de 10 en réception et $L/100$ avec un minimum de trois en vérification périodique (L étant l'étendu de mesure du pied à coulisse), soit par exemple, zéro inclus, 4 points pour un 150 mm, 6 pour un 500 mm, 11 pour un 1 000 mm et 21 pour un 2 000 mm.

5 Erreur de fidélité

Le pied à coulisse est placé dans les mêmes conditions que celles du contrôle de l'erreur de justesse, mais les cales étalons sont utilisées suivant la largeur de leurs faces mesurantes (9 mm) pour limiter la portée sur les becs et mettre ainsi en évidence leurs défauts éventuels. Aux points de mesure de l'erreur de justesse où a été constatée la plus grande dispersion des cinq mesures, effectuer la détermination de l'erreur de fidélité, en répétant la mesure des cales successivement cinq fois à l'extrémité de la face de mesure des becs la plus proche de la règle et cinq fois à l'autre extrémité des faces, en bout de becs. Pour chaque série, il est déterminé :

— d'une part, V_m la moyenne des cinq mesures, soit V_{mcr} (côté règle) et V_{mhb} (bout de becs) ;
— d'autre part, $E_f = \max \{V_i - V_m\}$ soit l'écart maximal entre la moyenne des cinq mesures et l'une des mesures, soit E_{fcr} et E_{fbb} .

La valeur de l'erreur de fidélité est :

$$E_f = \max \{E_{fcr}, E_{fbb}\}$$

La différence des moyennes est :

$$D_m = \text{abs} \{E_{fcr} - E_{fbb}\}$$

5 La différence des moyennes D_m est représentative du défaut de parallélisme des becs, sa détermination est très influencée par une variation de l'effort de mesure appliqué par l'opérateur lors des deux séries de mesure. La valeur de l'effort recommandée est entre 6 et 12 N. Cette valeur dépend de la qualité du réglage du coulisseau ; en effet, pour un bon réglage, l'effort est compris entre 3 et 7 N, ce qui permet de donner à l'opérateur une impression de glissement doux et, dans ces conditions, l'effort de mesure reste faible avec une influence minimale (dans ce cas, de l'ordre de 2×10^{-6} m pour un pied à coulisse de 300 mm). Par contre, s'il y a du jeu dans le coulisseau, l'effort reste faible mais il se produit un basculement du coulisseau par rapport à la règle et, si le coulisseau est réglé trop dur ou en cas de défauts sur la règle, l'opérateur aura tendance à augmenter son effort pour provoquer le déplacement.

Le nombre de points de mesure pour l'erreur de fidélité et la différence des moyennes est de trois en réception et de un en vérification périodique.

5 Planéité des faces de mesure

Elle peut être estimée à l'aide d'une règle à filament ou mesurée sur un banc de mesure en réalisant une rectitude sur chaque face. En pratique, une simple observation de la qualité des faces et du trait de lumière entre les becs reste suffisante ; en cas de doute, faire le contrôle. Par contre, pour une utilisation du pied à coulisse pour des mesures de diamètres, sur des arêtes, il sera dans ce cas nécessaire de s'assurer de la planéité et de réaliser une répétabilité des mesures pour tenir compte de cet éventuel défaut.

5 Largeur combinée des becs, becs spéciaux

La valeur de la largeur combinée, ainsi que la justesse des becs spéciaux, doit être déterminée en au moins un point de mesure. Les spécifications sont les spécifications au zéro pour la largeur

combinée des becs, pour les becs spéciaux, il est considéré 150 % des valeurs pour les becs d'extérieur. Pour les mesures d'intérieur, le contrôle est effectué avec un bague étalon de diamètre nominal compris entre 40 et 100 mm.

Les pieds à coulisse sont classés en quatre classes : la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs du tableau 3 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si, pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

2.1.2.2 Caractéristiques métrologiques de la jauge de profondeur à coulisseau, méthodes d'étalonnage

5 Erreur de justesse

Elle est contrôlée à l'aide de cale étalon ou tous autres dispositifs de mesure de longueur équivalents, choisis de façon à mettre en évidence les erreurs de justesse du vernier (valeurs non entières). La semelle de la jauge de profondeur est en appui sur deux cales ou sur un support de telle sorte que l'écart de parallélisme avec le plan de pose des cales reste compatible avec les spécifications. La mesure doit être répétée cinq fois en chaque point, en effectuant un déplacement du coulisseau entre chaque mesure (ne pas faire

uniquement cinq lectures), la répétabilité des mesures permet de limiter l'effet de l'erreur de fidélité. L'erreur de justesse E_j est définie par la formule :

$$E_j = V_{im} - V_c$$

où V_{im} est la moyenne des cinq mesures effectuées au même point, V_c est la valeur conventionnellement vraie des étalons utilisés.

Le nombre de points de mesure, en plus du zéro, est égal à 10 en réception et $L/100$ avec un minimum de 3 en vérification périodique (L étant l'étendue de mesure de la jauge), soit par exemple, zéro inclus, 4 points pour une jauge de 200 mm, 6 pour une de 500 mm et 7 pour une de 600 mm.

5 Erreur de fidélité

Au point de plus grande valeur de l'erreur de justesse, effectuer cinq nouvelles mesures, la jauge de profondeur étant placée dans les mêmes conditions que celles du contrôle de l'erreur de justesse. Soit V_m la moyenne des dix mesures V_i , on a :

$$E_f = \max \{V_i - V_m\}$$

soit l'écart maximal entre la moyenne des dix mesures et l'une des mesures.

Le nombre de points de mesure pour l'erreur de fidélité est de trois en réception et de un en vérification périodique.

Tableau 3 – Les spécifications des pieds à coulisse en classe 0

Pied à coulisse		au 1/20 mm			au 1/50 et 1/100 mm		
Mesure de (exclu) (mm)	Mesure à (inclus) (mm)	$\epsilon_{\max}^{\alpha_m}$	$\epsilon_{\max}^{\alpha_m}$	$D_m \max^{\alpha_m}$	$\epsilon_{\max}^{\alpha_m}$	$\epsilon_{\max}^{\alpha_m}$	$D_m \max^{\alpha_m}$
Étendue de mesure : 0 à 150 mm							
	0±50—±20—						
0	150	±50	±50	30	±20	±20	20
Étendue de mesure : 0 à 300 mm							
	0±50—±20—						
0	150	±50	±50	30	±20	±20	20
150	300	±80	±60	30	±30	±30	20
Étendue de mesure : 0 à 1 000 mm							
	0±50—±20—						
0	300	±80	±60	40	±30	±30	30
300	500	±80	±60	50	±30	±30	40
500	750	±100	±70	60	±40	±30	50
750	1 000	±130	±100	70	±50	±40	60
Étendue de mesure : 0 à 2 000 mm							
	0±50—±20—						
0	500	±100	±70	±60	±40	±30	±50
500	1 000	±130	±100	±70	±50	±40	±60
1 000	1 500	±180	±100	±80	±70	±40	±70
1 500	2 000	±230	±130	±90	±90	±50	±80

5 Planéité de la semelle

Elle peut être estimée à l'aide d'une règle à filament ou mesurée sur un banc de mesure en réalisant une rectitude sur la face de mesure. En pratique, une simple observation de la qualité des faces et du trait de lumière avec la règle à filament reste suffisant, en cas de doute faire le contrôle. La tolérance de planéité de la face d'appui de la semelle ne doit pas excéder $10 \mu\text{m}$ par 100 mm de longueur. Le défaut éventuel de planéité en doit pas être de nature convexe.

Les jauges de profondeur à coulisseau sont classées en quatre classes : la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs du tableau 4 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si, pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

2.1.3 Précautions d'emploi, maintenance

Les instruments à coulisseau doivent être utilisés, compte tenu de l'influence de l'effort de mesure sur les résultats, avec la plus grande souplesse possible (voir § 2.1.2.1 sur la fidélité du pied à coulisse), la qualité du réglage du coulisseau doit être vérifiée régulièrement pour limiter l'effort de mesure aux valeurs recommandées. La règle gravée est un des éléments essentiels de l'instrument, l'opérateur doit donc, comme pour les faces de mesure, prendre le maximum de soin lors de l'utilisation et du stockage, pour éviter les chocs. En cas de chocs, il faudra effectuer un pierrage de l'instrument, puis un nettoyage pour éliminer toutes particules abrasives pouvant marquer le coulisseau.

Enfin, comme pour tous les instruments à main, il est recommandé, pour effectuer des mesures avec une incertitude optimale, de limiter les effets thermiques en utilisant l'instrument avec des gants pour réduire la dilatation de la règle.

2.2 Micromètres à vis

Les micromètres à vis constituent une importante famille d'instruments à main, ayant pour point commun l'utilisation d'une vis dite « micrométrique », avec un pas de 0,5 mm ou 1 mm par tour de la vis. Ces instruments sont utilisés pour des mesures d'extérieur, ce sont les **micromètres d'extérieur à vis à touches normales** (NF E 11-095) et à **exécutions spéciales** (NF E 11-090), ainsi que les **jauges de profondeur à vis** (NF E 11-097) ou bien pour des mesures d'intérieur, ce sont les **micromètres d'intérieur à vis à deux touches** dits « **jauges micrométriques** » (NF E 11-098) et les **micromètres d'intérieur à trois touches** dits « **alésomètres** » (NF E 11-099).

2.2.1 Micromètres d'extérieur à vis

2.2.1.1 Principes et description

Le micromètre d'extérieur est constitué d'une vis micrométrique montés sur un corps en forme de C, dont les dimensions doivent permettre de mesurer un cylindre de diamètre égal à l'ouverture maximale. L'extrémité de la vis côté intérieur du C reçoit la touche de mesure dite *mobile* et l'autre côté du C la touche de mesure dite *fixe*. L'autre extrémité de la vis micrométrique est équipée d'un limiteur de couple, afin d'exercer sur la pièce à mesurer une force dont la valeur est strictement comprise entre 5 N et 20 N, avec une variation sur l'étendue qui ne doit pas excéder $\pm 2,5$ N. Les indicateurs sont :

- à tambour à 0,01 mm ;
- à compteur et vernier à 0,001 mm ;
- à affichage numérique à 0,001 mm.

5 Pour les **micromètres d'extérieur à touches normales** (figure 6), le diamètre des touches mobile et fixe doit être compris entre 6,5 mm et 8 mm, avec une tolérance de planéité de $1 \mu\text{m}$. La *capacité de mesure*, c'est-à-dire la course utile de la touche mobile, est définie par les valeurs des ouvertures minimale et maximale, par exemple 100-125 mm. L'étendue de mesure est presque toujours égale à 25 mm (sauf micromètres spéciaux non normalisés). Pour ces instruments, les capacités de mesure sont normalisées en France jusqu'à 1 000 mm, mais il existe des micromètres avec des capacités de 1 475-1 500 et même plus pour des réalisations spéciales.

5 Pour les **micromètres à exécutions spéciales**, on distingue les suivants.

▫ Les **micromètres à rallonges interchangeables** : le jeu de 4 rallonges permet d'obtenir une étendue de mesure de 100 mm (parfois 150 mm avec 6 rallonges) et pour des capacités jusqu'à 1 000 mm.

▫ Les **micromètres à touches interchangeables planes**, sphériques ou fines : ces instruments permettent, par la diversité des touches, de réaliser des mesures sur des pièces de formes différentes, surfaces planes, épaisseur de tubes, gorges, fonds de rainures, fonds de lamage. Leur capacité est souvent limitée à 0-25 mm.

▫ Les **micromètres à touches fixes sphériques**, fines ou tronconiques s'utilisent pour la mesure de formes diverses, épaisseurs de tubes, lentilles concaves, gorges annulaires, fonds de lamages, de cannelures ou fonds de rainures. Leur capacité est souvent limitée à 0-25 mm.

▫ Les **micromètres à touches effilées** (encore dites touches couteaux, voir figure 7) s'utilisent pour la mesure de fonds de gorge. Leur capacité est souvent limitée à 0-25 mm. Pour ces micromètres, la touche mobile est non tournante.

▫ Les **micromètres à touches à plateau** (voir figure 8), s'utilisent, en général, pour des mesures déportées (mesure d'engrenages), mais aussi parfois pour des mesures pleines touches dans l'axe de mesure (mesure d'épaisseur de pièces minces déformables). Il faut noter aussi que les micromètres à touches à plateau pour la mesure de l'épaisseur de papier font l'objet de la norme NF Q 03-016.

Tableau 4 – Les spécifications des jauges de profondeur à coulisseau en classe 0

Jauge de profondeur		au 1/20 mm		au 1/50 et 1/100 mm	
Mesure de (exclu) (mm)	Mesure à (inclus) (mm)	ϵ_{max} (μm)			
	0	± 50	± 50	± 20	± 20
0	200	± 50	± 50	± 30	± 30
200	400	± 80	± 80	± 40	± 40
400	600	± 100	± 100	± 60	± 50

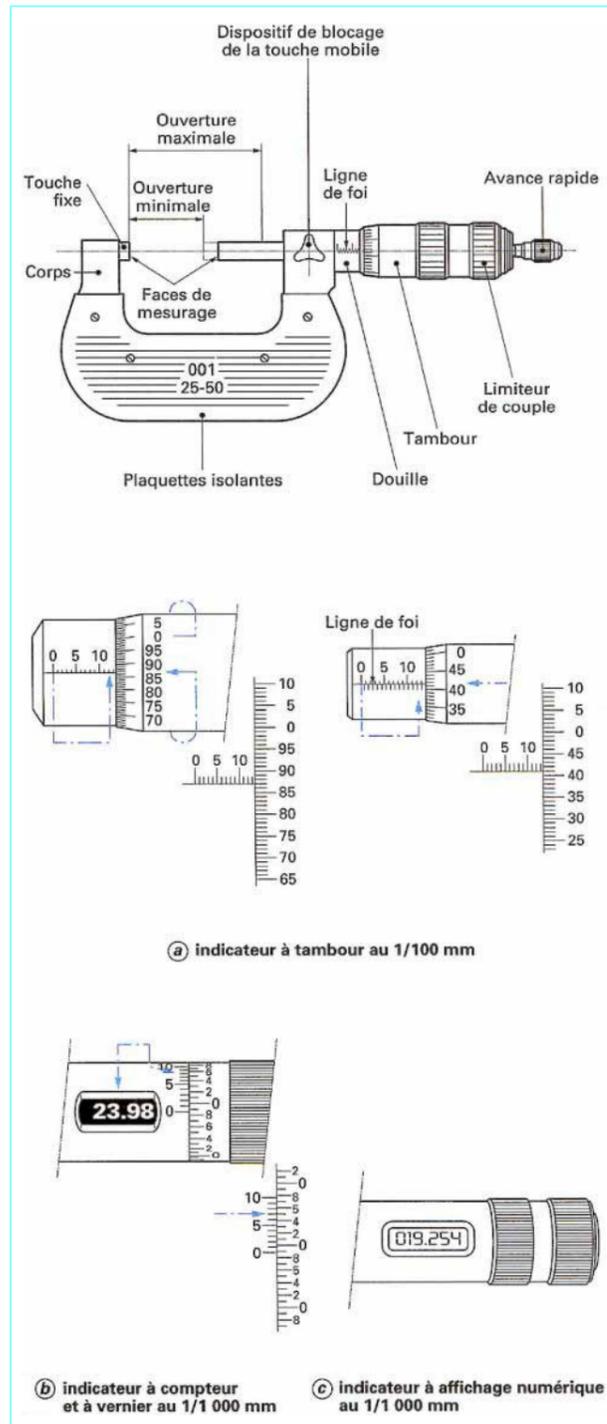


Figure 6—Schéma de principe des micromètres d'extérieur à vis

Les **micromètres à touches pour filetage extérieur** (figure 9), sont utilisés pour la détermination du diamètre sur flancs de filetage extérieur. Les instruments normalisés sont du type à touches interchangeables, les touches planes étant utilisées pour l'étalonnage de la vis, d'une part, et pour la mesure du diamètre extérieur du filetage d'autre part, et les touches pour filetage pour la détermination du diamètre sur flancs du profil symétrique ISO à 60° et pour des pas de 0,4 à 6 mm.

Il existe hors norme d'autres réalisations, notamment pour les filetages au profil gaz cylindrique ou unifié. Les capacités sont 0-25 mm, 25-50 mm, 50-75 mm et 75-100 mm.

Les **micromètres à corps spéciaux** : ces instruments, bien qu'étant de la famille des micromètres du fait de la vis micrométrique, sont bien différents :

- micromètres à étrier profond (étrier de profondeur maximale 125 mm) capacité 0-25 mm ;
- micromètres de lamineur pour la mesure d'épaisseur de tôles (figure 10), donc à étrier profond (125 mm) et capacité 0-15 mm ;
- micromètres pour la mesure de l'épaisseur des parois de tubes (figure 11) ; la touche fixe est bombée avec des diamètres de 3,5 à 5 mm ou de 8 à 9,5 mm, les capacités sont de 0-25 mm et de 25-50 mm ;
- micromètres pour la mesure de fils (figure 12), le corps du micromètre est un bloc en acier avec une vis micrométrique de faible capacité, 0-10 mm ;
- micromètres à touche fixe en vé (figure 13) ; ces micromètres sont utilisés pour la mesure du diamètre d'outils à lèvres :
 - pour les outils à 3 ou 9 lèvres : vé à 60° et pas de la vis 0,75 mm,
 - pour les outils à 5 lèvres : vé à 108° et pas de la vis 0,559 mm,
 - pour les outils à 7 lèvres : vé à $128^\circ 34'$ et pas de la vis 0,527 mm ;

ils peuvent être utilisés pour la mesure du diamètre d'arbre ;

—micromètres à becs pour la mesure d'intérieur (figure 14) : la capacité la plus courante est 5-55 mm, mais il en existe de capacité 50-75 à 175-200 mm ;

—micromètres à comparateur (figure 15) : le plus souvent utilisés pour des mesures par comparaison à un étalon, la mesure de l'écart étant effectuée sur le comparateur ; la capacité de mesure est en général de 0-25 mm.

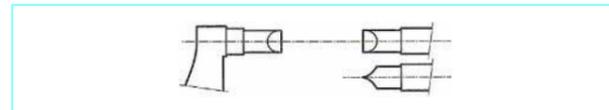


Figure 7—Micromètre à exécutions spéciales à touches fixes effilées

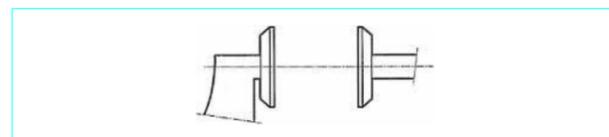


Figure 8—Micromètre à exécutions spéciales à touches à plateau

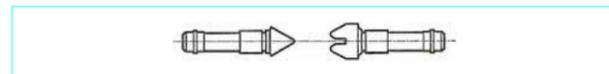


Figure 9—Micromètre à exécutions spéciales à touches pour filetage

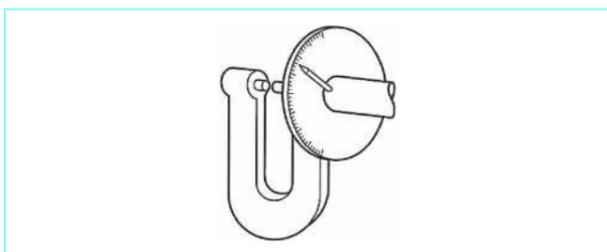


Figure 10—Micromètre à exécutions spéciales de lamineur

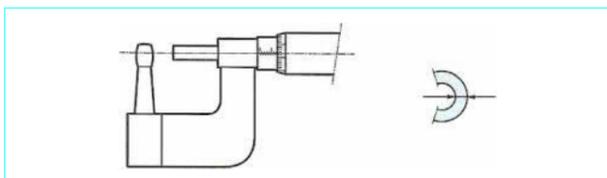


Figure 11—Micromètre à exécutions spéciales pour la mesure de parois de tubes

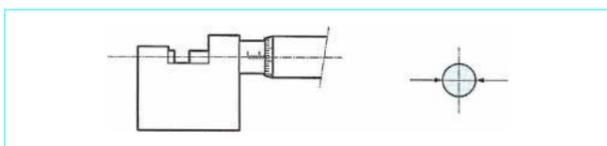


Figure 12—Micromètre à exécutions spéciales pour la mesure de fils

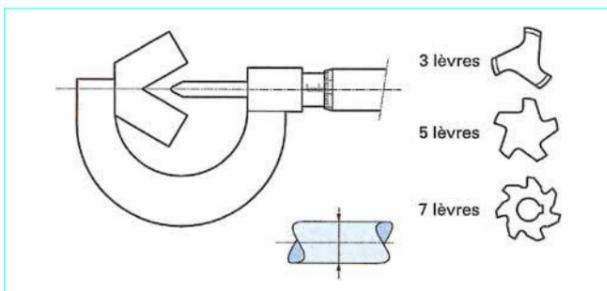


Figure 13—Micromètre à exécutions spéciales à touche fixe en vé

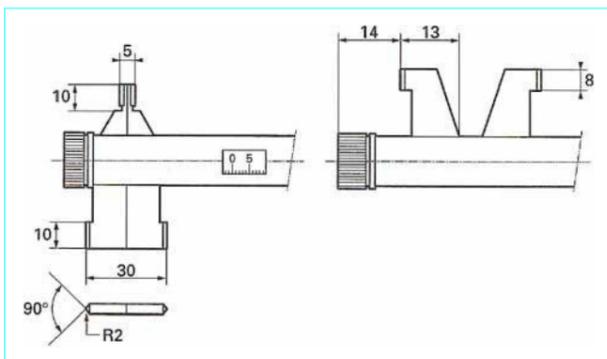


Figure 14—Micromètre d'intérieur à becs

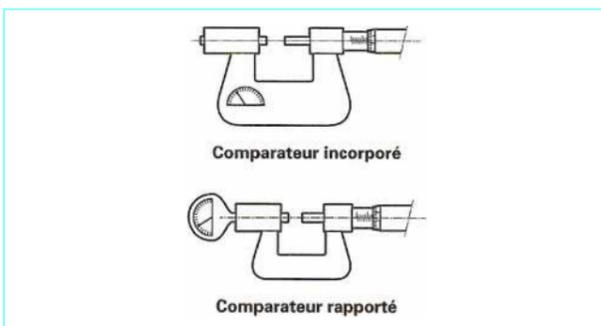


Figure 15—Micromètre à comparateur

2.2.1.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

Le micromètre d'extérieur est un instrument de mesure de longueur qui, par sa conception même, est destiné à mesurer les distances extérieures entre deux plans parallèles en contact avec la totalité de la surface des touches. Dans ces conditions normales d'utilisation, l'éventuel défaut de parallélisme des faces des touches est inclus dans l'erreur d'indication.

Lorsque le micromètre est utilisé pour la mesure de pièces de formes particulières, telles que diamètre d'arbre, distance entre arêtes ou mesure entre plans parallèles en contact partiel avec la surface des touches, l'éventuel défaut de parallélisme des faces des touches introduit des erreurs de mesure dépendant de la dimension et de la forme des surfaces mesurées. Afin d'estimer au mieux ces éventuels défauts, pour des instruments de capacité jusqu'à 300 mm, il est recommandé de déterminer l'erreur d'indication contact partiel.

Dans le cas où le micromètre est destiné à mesurer des pièces de forme connue préalablement, il est recommandé d'effectuer une répétabilité des mesurages sur une pièce type représentative de la pièce à mesurer.

2.2.1.2.1 Caractéristiques métrologiques des micromètres à touches normales

5 Erreur d'indication

Elle est déterminée à l'aide de cales étalons ou tout autre dispositif de mesure de longueur, sous réserve que les conditions de mesurage (effort de mesure) soient respectées. Il faut effectuer 3 séries de mesure en 11 points en réception et 6 points en vérification périodique, de façon à pouvoir vérifier l'erreur pour un déplacement complet de la touche mobile.

Pour cette détermination, il est recommandé de choisir, à titre d'exemple, la série de cotes suivantes, pour un micromètre 25-50 au pas de 0,5 mm, afin de répartir les points de mesure telle que la vis soit positionnée tous les 1/3 de tour (valeur en mm) :

25 – 27,5 – 30,1 – 32,7 – 35,3 – 37,9 – 40 – 42,6 – 45,2 – 47,8 – 50

Pour les micromètres de capacité 0-25 mm, dont la portée minimale correspond aux deux touches en contact, le zéro doit être vérifié avec une cale de 1 mm.

Pour chaque mesure, calculer :

$$E_i = V_i - V_c$$

avec V_i valeur lue sur le micromètre,

V_c valeur conventionnellement vraie des cales étalons.

L'erreur d'indication du micromètre est la plus grande des erreurs individuelles :

$$E_i = \max \{E_i\}$$

Cette valeur doit être inférieure à la valeur correspondante du tableau 5

Tableau 5 – Erreur maximale d'indication des micromètres à touches normales en classe 0

Micromètres		au 1/100 mm		au 1/1 000 mm	
ouverture de (exclu) (mm)	ouverture à (inclus) (mm)	☞ contact pleine touche (μm)	☞ contact partiel (μm)	☞ contact pleine touche (μm)	☞ contact partiel (μm)
	100	±5	±8	±4	±6
100	200	±7	±10	±5	±8
200	300	±8	±12	±6	±9
300	400	±14	–	±11	–
400	500	±14	–	±12	–
500	600	±16	–	–	–
600	700	±16	–	–	–
700	800	±21	–	–	–
800	900	±21	–	–	–
900	1 000	±26	–	–	–

5 Erreur d'indication contact partiel

Cette erreur n'est déterminée que pour les micromètres de capacité jusqu'à 300 mm, car au-delà elle n'est plus significative en regard des déformations élastiques de l'instrument. L'erreur est déterminée à l'aide, soit de cales (dans ce cas, la cale n'est en contact que sur une portion de 2 mm des touches), soit d'une association cales-pige (dans ce cas, la cale est pleine touche sur l'une des touches et la pige en contact avec l'autre touche à 2 mm du bord de touche).

La mesure doit être effectuée en 3 points (3 positions angulaires différentes de la vis, dont la position de plus grande erreur d'indication) de l'étendue de mesure en réception et en 1 point (la position de plus grande erreur d'indication) en vérification périodique. L'indication est relevée 3 fois pour 4 positions successives des étalons, réparties sur la circonférence des touches.

5 Planéité des touches

La planéité des touches planes doit être inférieure ou égale à $\pm 1 \mu\text{m}$ en réception et en vérification périodique.

Les micromètres sont classés en quatre classes, la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs du tableau 5 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si, pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

2.2.1.2.2 Caractéristiques métrologiques des micromètres à exécutions spéciales

Les micromètres à exécutions spéciales ont, pour certains, les mêmes caractéristiques métrologiques que les micromètres à touches normales ; par contre, certains ont des caractéristiques particulières propres à leurs utilisations.

5 Micromètres à rallonges interchangeables

Pour la première rallonge utilisée, les méthodes de vérification sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales ; pour chacune des autres rallonges, il est effectué 3 mesures à la position de la vis où a été constatée la plus grande erreur d'indication sur la première rallonge. Les erreurs d'indication pleine touche et contact partiel de l'instrument sont les plus grandes des erreurs déterminées, en restant inférieures ou égales à 150 % des valeurs du tableau 5.

5 Micromètres à touches interchangeables planes

Les méthodes de vérification sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales. Les erreurs

d'indication pleine touche et contact partiel de l'instrument sont les plus grandes des erreurs déterminées, en restant inférieures ou égales au double des valeurs du tableau 5.

5 Micromètres à touches interchangeables sphériques et fines

Les méthodes de vérification sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales, sans détermination d'erreur d'indication avec contact partiel. L'erreur d'indication de l'instrument est la plus grande des erreurs déterminées, en restant inférieure ou égale au double des valeurs du tableau 5.

5 Micromètres à touches fixes sphériques et tronconiques

Les méthodes de vérification sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales, sans détermination d'erreur d'indication avec contact partiel. L'erreur d'indication de l'instrument est la plus grande des erreurs déterminées, en restant inférieure ou égale aux valeurs du tableau 5.

5 Micromètre à touches fixes fines

Les méthodes de vérification sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales, sans détermination d'erreur d'indication avec contact partiel. L'erreur d'indication de l'instrument est la plus grande des erreurs déterminées, en restant inférieure ou égale à 150 % des valeurs du tableau 5.

5 Micromètres à touches fixes effilées

Les méthodes de vérification contact pleine touche sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales. Pour le contact partiel, aux trois points, en réception et au point, en vérification périodique, de plus grande valeur de l'erreur d'indication, effectuer une mesure aux deux positions haute et basse avec contact sur 2 mm des cales étalons. Les erreurs d'indication pleine touche et contact partiel de l'instrument sont les plus grandes des erreurs déterminées, en restant inférieures ou égales à 150 % des valeurs du tableau 5.

5 Micromètres à touches à plateau

Déterminer l'erreur d'indication E_i , comme pour les micromètres à touches normales, en mesurant les cales étalons en déportée, avec un contact de 3 mm sur les plateaux côté opposé au corps du micromètre. L'équivalent du contact partiel est réalisé, au point de plus grande valeur de l'erreur d'indication, en mesurant trois fois une cale en 3 positions déportées, avec 3 mm en contact côté opposé au corps et dans 2 positions à 90° , puis une position dans l'axe de mesure. Les erreurs d'indication doivent être inférieures ou égales aux valeurs correspondantes du tableau 6.

Tableau 6 – Erreur maximale d'indication des micromètres à touches à plateau en classe 0

Micromètres		au 1/100 mm		au 1/1 000 mm	
ouverture de (exclu) (mm)	ouverture à (inclus) (mm)	☒ contact une position (μm)	☒ contact toutes positions (μm)	☒ contact une position (μm)	☒ contact toutes positions (μm)
0	100	± 8	± 10	± 7	± 10
100	300	± 12	± 15	± 10	± 15

5 Micromètres à touches pour filetage extérieur

Les méthodes de vérification pleine touche et contact partiel, avec le jeu de touches planes interchangeable, sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales. Le jeu de touches pour filetage étant monté, effectuer 5 mesures sur un tampon fileté correspondant à la capacité et au pas du micromètre. L'erreur d'indication de l'instrument est la plus grande des erreurs déterminées, en restant inférieure ou égale au double des valeurs du tableau 5 pour les mesures avec le jeu de touches planes. Les limites de la classe 0 pour les mesures avec le jeu de touches pour filetage sont :

- de $\pm 18 \mu\text{m}$ pour une étendue de 0 à 25 mm ;
- de $\pm 25 \mu\text{m}$ pour une étendue à 25 à 50 mm ;
- de $\pm 32 \mu\text{m}$ pour une étendue de 50 à 75 mm ;
- de $\pm 40 \mu\text{m}$ pour une étendue de 75 à 100 mm.

5 Micromètres à étrier profond

Les méthodes de vérification sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales, avec cales pleine touche uniquement. L'erreur d'indication de l'instrument (lecture au 1/100 mm) est la plus grande des erreurs déterminées, en restant inférieure ou égale à $\pm 9 \text{ mm}$ en classe 0.

5 Micromètres de lamineur

Les méthodes de vérification sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales, avec cales pleine touche uniquement. L'erreur d'indication de l'instrument (lecture au 1/100 mm) est la plus grande des erreurs déterminées, en restant inférieure ou égale à $\pm 34 \mu\text{m}$ en classe 0.

5 Micromètres pour mesure de l'épaisseur des parois de tubes

Les méthodes de vérification sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales, sans détermination d'erreur d'indication avec contact partiel. L'erreur d'indication de l'instrument est la plus grande des erreurs déterminées, en restant inférieure ou égale à 150 % des valeurs du tableau 5.

5 Micromètres pour la mesure de fils

Les méthodes de vérification contact pleine touche sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales en ne retenant que cinq points répartis sur l'étendue de mesure. Pour le contact partiel, en trois points, en réception, et en un point, en vérification périodique, effectuer une mesure aux trois positions, haute, centrée et basse, avec une pige ou un tampon de diamètre le plus proche possible du point de plus grande valeur de l'erreur d'indication. Les erreurs d'indication pleine touche et contact partiel de l'instrument sont les plus grandes des erreurs déterminées, en restant inférieures ou égales aux valeurs du tableau 5.

5 Micromètres à touche fixe en vé

Pour déterminer l'erreur d'indication, effectuer trois mesures sur des tampons lisses en trois points de l'étendue de mesure. L'erreur d'indication de l'instrument est la plus grande des erreurs déterminées, en restant inférieure ou égale au double des valeurs du tableau 5.

5 Micromètres d'intérieur à becs

Pour déterminer l'erreur d'indication, effectuer trois mesures avec des bagues lisses en cinq points de l'étendue de mesure et pour chaque capacité avec la totalité des touches en contact avec la bague. Pour les instruments au 1/100 et 1/1 000 mm, les erreurs maximales d'indication pour la classe 0 sont :

- de $\pm 12 \mu\text{m}$ pour les étendues de 5 à 55 mm ;
- de $\pm 18 \mu\text{m}$ pour les étendues de 50-75 mm à 175-200 mm.

5 Micromètres à comparateur

Pour la partie micromètre, les méthodes de vérification pleine touche et contact partiel sont identiques aux méthodes de vérification des micromètres à touches normales, le limiteur de couple étant remplacé par la pression de mesure de la touche côté comparateur, ce dernier étant utilisé en méthode de zéro. Les erreurs maximales d'indication sont égales à celles données au tableau 5.

Pour la partie comparateur, et dans le cas des comparateurs incorporés, effectuer cinq mesures de cales étalons en sept points (zéro inclus) de l'étendue de mesure du comparateur, la vis micrométrique étant bloquée dans une position quelconque à l'intérieur de l'étendue de mesure du micromètre. Les erreurs maximales pour la justesse et la fidélité sont égales à 150 % de celles données pour les comparateurs à faible course au paragraphe 4.1.

Pour la partie comparateur, et dans le cas de comparateur rapporté, les méthodes de vérification sont identiques à celles décrites au paragraphe 4.1. Les erreurs maximales pour la justesse et la fidélité sont égales à celles données pour les comparateurs à faible course au paragraphe 4.1.

Les micromètres à exécutions spéciales sont classés en quatre classes, la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs des tableaux 5 et 6 et les valeurs indiquées pour les autres cas, en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

2.2.1.3 Précautions d'emploi, maintenance

Les micromètres d'extérieur doivent toujours être utilisés et étalonnés avec le limiteur de couple (friction). Les règles de l'art préconisent une approche de la pièce à mesurer avec la molette solidaire de la friction, puis, les touches étant au contact de la pièce, réaliser trois rotations successives pour la mise sous pression de mesure. La régularité de fonctionnement de la friction et la valeur de l'effort de mesure doivent être déterminées à chaque étalonnage, car les dérèglages de la friction sont les principales causes d'erreur des instruments à vis micrométrique. Suivant l'importance du dérèglement, les erreurs d'indication correspondantes peuvent être de l'ordre de 15 à 20 μm . Ce dérèglement éventuel est à vérifier avec encore plus d'attention avec les micromètres à exécutions spéciales à touches fines ou sphériques, car un accroissement de l'effort de mesure avec ces instruments peut conduire à un marquage possible des cales en cours d'étalonnage ou des pièces à mesurer. Il en est de même

pour les micromètres à touches à plateau, la mesure étant par principe déportée par rapport à l'axe de mesure de la vis, une augmentation de l'effort de mesure par dérèglement de la friction va provoquer un accroissement de la déformation élastique des touches et donc une erreur d'indication de l'instrument. Pour minimiser ces effets, après réglage ou réparation de la friction, il est fortement recommandé, pour une utilisation en mesure décalée, de réaliser la mise à zéro et l'étalonnage sur des cales étalons en mesure décalée.

Les micromètres à touches pour filetage, pour respecter la norme, doivent être à touches interchangeables, afin d'effectuer l'étalonnage de la vis avec les mêmes procédures que pour les micromètres à touches normales. Si ce n'est pas le cas, il est recommandé de mesurer plusieurs tampons filetés étalons (3 à 4 minimum) sur la capacité du micromètre. Attention avec ces instruments, ne jamais utiliser, pour réaliser la mise à zéro de l'indicateur, les étalons spécifiques pour filetage encore fournis par certains fabricants de micromètres ; utiliser un tampon fileté étalon. Ces étalons de longueur, avec des bouts adaptés aux touches pour filetage, dits « sardine », sont à rebuter, car il n'existe aucune méthode de raccordement ayant valeur métrologique pour ces étalons, leurs formes adaptées au contact sur les touches du micromètre ne permet pas un étalonnage comme pour un tampon fileté.

Pour les micromètres à comparateur rapporté, il est recommandé de réaliser l'étalonnage de l'ensemble avec les mêmes procédures que pour les micromètres à touches normales, le comparateur étant utilisé en méthode de zéro. Ce comparateur ne doit pas être changé, pour effectuer les mesures, même par un comparateur identique de même classe. En effet, non seulement les erreurs de justesse des comparateurs peuvent être différentes, mais les efforts et variations d'effort peuvent être différents, d'où des variations d'indication pour l'ensemble.

Il est enfin recommandé, pour les micromètres, d'effectuer une surveillance du réglage du zéro et du bon fonctionnement avec une broche à bouts (souvent fournie avec l'instrument).

2.2.2 Jauges de profondeur à vis

2.2.2.1 Principes et description

Les jauges de profondeur à vis sont des instruments de mesure destinés à mesurer des distances entre deux surfaces planes parallèles, par déplacement de l'extrémité d'une tige mobile par rapport à une semelle fixe, à l'aide d'une vis micrométrique (figure 16). La tige de mesure est, en général, interchangeable. Afin d'augmenter la capacité de l'instrument, avec une face de mesure plane ou sphérique, il est toutefois recommandé d'utiliser des tiges à bouts sphériques au-delà de 100 mm de profondeur. Les dimensions recommandées de la semelle sont un minimum de 15 mm pour la largeur et des longueurs de 50, 60, 80 ou 100 mm (voir NF E 11-097).

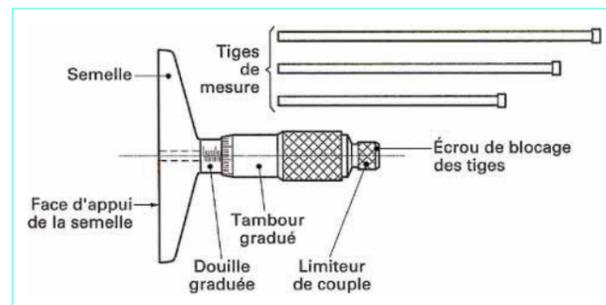


Figure 16—Schéma de principe d'une jauge de profondeur à vis

Les jauges de profondeur à vis sont avec des indicateurs :

- à tambour gradué divisé en 50 ou 100 parties égales, représentant chacune 0,01 mm suivant que la vis micrométrique a un pas de 0,5 ou 1 mm ; la mesure de la position des traits du tambour est effectuée à l'aide d'une *ligne de foi* gravée sur la douille ;
- à compteur et tambour gradué au 0,001 mm ;
- numérique au 0,001 mm.

2.2.2.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

Les caractéristiques métrologiques des jauges de profondeur à vis sont l'erreur d'indication et la planéité de la face d'appui de la semelle qui est estimée à l'aide d'une règle à filament ; en cas de doute, il est recommandé de réaliser une rectitude sur cette face avec un banc de mesure.

L'**erreur d'indication** est déterminée à l'aide de cales étalons ou d'autres étalons de longueur en respectant les mêmes conditions. La semelle de la jauge est posée en appui sur deux cales de longueur situées au centre des deux longueurs de l'extrémité de la semelle à l'axe de mesure, la tige de mesure venant en contact avec les cales étalons. La longueur de ces cales supports doit être égale à la profondeur maximale mesurable avec la tige de mesure utilisée. Si les cales support sont les cales de mesure, l'extrémité de la tige vient en contact avec le plan de référence.

5 Avec la plus petite tige de mesure, il est effectué trois séries de mesures en 11 points en réception et 6 points en vérification périodique, choisis de façon à vérifier l'erreur pour un déplacement complet de la tige de mesure. Pour cette détermination, il est recommandé de choisir, à titre d'exemple, la série de cotes suivantes, pour une jauge avec tige 0-25 au pas de 0,5 mm, afin de répartir les points de mesure tels que la vis soit positionnée tous les 1/3 de tour (valeur en mm) :

$$2,5 - 5,1 - 7,7 - 10,3 - 12,9 - 15 - 17,6 - 20,2 - 22,8 - 25$$

Pour chaque mesure, calculer :

$$E_i = V_i - V_c$$

avec V_i valeur lue sur la jauge,

V_c valeur conventionnellement vraie des cales étalons.

5 Au point de plus grande dispersion des trois valeurs calculées de E_i , effectuer deux mesures supplémentaires avec les cales supports disposées d'une part le plus proche de la tige de mesure et d'autre part, aux extrémités de la semelle, puis calculer les valeurs de E correspondantes.

5 Avec les autres tiges de mesure interchangeables, au même point de plus grande dispersion, effectuer trois mesures et calculer les valeurs de E_i .

L'erreur d'indication de la jauge de profondeur à vis E_i est la plus grande de toutes les valeurs déterminées, en tenant compte pour la détermination de la classe de la jauge des paliers de dimension indiqués du tableau 7.

Les jauges de profondeur à vis sont classées en quatre classes, la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs du tableau 7 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

2.2.2.3 Précautions d'emploi, maintenance

Les recommandations d'utilisation du limiteur de couple avec les micromètres d'extérieur à vis restent valables pour les jauges de profondeur à vis équipées d'un limiteur de couple.

Tableau 7 – Erreur maximale d'indication des jauges de profondeur à vis en classe 0		
Jauge de profondeur	Erreurs maximales d'indication	
	au 1/100 mm	au 1/1 000 mm
0 - 25	±8	±5
25 - 50	±8	±5
50 - 75	±10	±7
75 - 100	±10	±7
100 - 125	±12	±9
125 - 150	±12	±9
150 - 175	±14	±11
175 - 200	±14	±11
200 - 225	±16	±13
225 - 250	±16	±13
250 - 275	±18	±15
275 - 300	±18	±15

Dans le cas où la jauge n'a pas de limiteur de couple, il est recommandé de l'utiliser avec soin, pour éviter le flambage, surtout avec des tiges longues.

Il est, d'autre part, recommandé, lorsque l'on utilise des jauges avec tige interchangeable, de s'assurer de la fixation de la tige, et toutes les fois où cela est possible, de contrôler l'erreur d'indication avec une cale étalon au zéro de la capacité de la tige.

2.2.3 Micromètres d'intérieur à 2 touches ou jauges micrométriques

2.2.3.1 Principes et description

Les jauges micrométriques sont des mesureurs d'alésage ou de distance intérieure entre plans parallèles comme pour les mesureurs d'alésage qui seront traités au paragraphe 2.3. La particularité de la jauge micrométrique est l'utilisation d'une vis micrométrique avec, en général, 25 mm d'étendue de mesure, et des capacités de mesure pouvant dépasser, avec des rallonges, 1 000 mm, voire plusieurs mètres dans certains cas. Ces jauges sont de deux types, le type 1 sans possibilité de rallonge et le type 2 avec possibilité de rallonge (figure 17). Pour les jauges de type 1, le corps est fixe avec, à chaque extrémité, une touche de mesure. Par contre, pour les jauges de type 2, la touche de mesure côté rallonge est démontable, afin de permettre l'interchangeabilité des rallonges. Ces rallonges sont soit monobloc (longueur 25, 50, 75, 100, 125... mm), soit à manchons pouvant s'adapter les unes aux autres ; dans ce cas, les rallonges ont une extrémité plane et l'autre sphérique, ce qui permet un raccordement plan-sphère. Les surfaces de mesure des touches doivent être de forme sphérique avec un rayon de courbure inférieure à la moitié de la capacité de mesure minimale.

Les capacités de mesure des jauges sont en général limitées à un minimum de 25 mm et un maximum parfois de plusieurs mètres. La norme E 11-098, qui reste expérimentale dans l'attente d'un document ISO, limite les capacités à 500 mm sans rallonge. Pour les capacités de 25 mm à 50 mm, les étendues de mesure peuvent être de 5, 10 ou 15 mm ; au-delà de 50 mm de capacité, les étendues de mesure sont de 25 mm.

Les jauges micrométriques sont avec des indicateurs :

—à tambour gradué divisé en 50 ou 100 parties égales, représentant chacune 0,01 mm suivant que la vis micrométrique à un pas

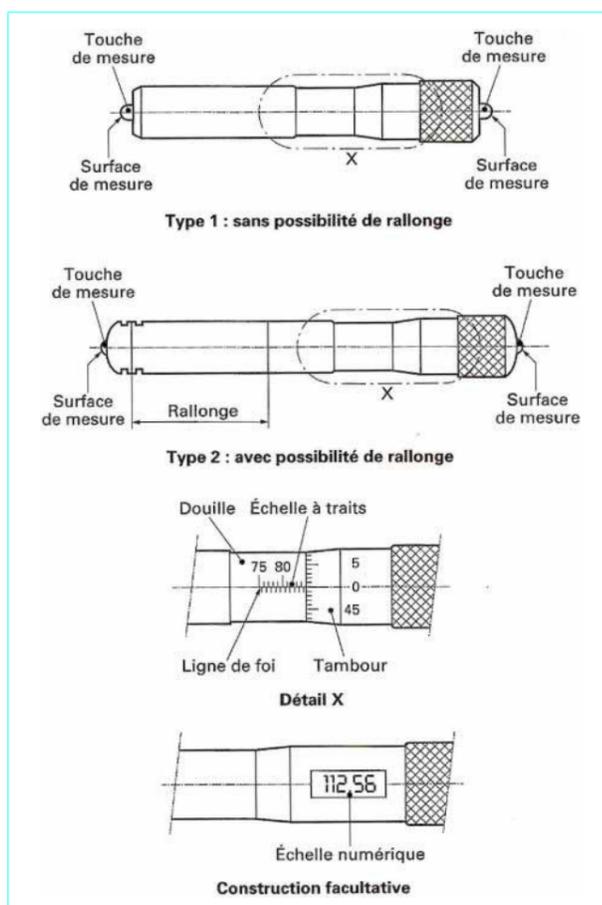


Figure 17—Schéma de principe des jauges micrométriques à deux touches

de 0,5 ou 1 mm ; la mesure de la position des traits du tambour est effectuée à l'aide d'une *ligne de foi* gravée sur la douille ;

—à compteur et tambour gradué au 0,001 mm ;
—numérique au 0,001 mm.

2.2.3.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

Les micromètres d'intérieur à deux touches dits « **jauges micrométriques** » sont caractérisés métrologiquement uniquement par l'erreur d'indication sur la longueur mesurée.

Pour des diamètres ou distances mesurés jusqu'à 100, voire 200 mm, il est possible d'utiliser des bagues étalons. Cependant, compte tenu du nombre de points de mesure, 5 points sur l'étendue plus la capacité minimale, et répartis de façon à mettre en évidence d'éventuelles variations dans la rotation de la vis (voir échelonnement recommandé au paragraphe précédent), il est le plus souvent utilisé un banc d'étalonnage.

La norme expérimentale E 11-098 d'octobre 1984 reste à ce jour la seule référence ; elle définit les erreurs maximales d'indication au zéro f_0 de la jauge et sur sa capacité f_{max} pour un point quelconque, et pour les instruments à 0,01 mm. Les spécifications du tableau 8 sont données pour l'instrument de type 1 ou de type 2 mais sans

rallonge, les spécifications des rallonges devant répondre aux tolérances de la qualité js2, ce qui est impossible à appliquer pour de nombreux cas, car il est souvent impossible d'étalonner certaines rallonges sans la tête de mesure. La norme donnant les formules de calcul de f_0 et f_{max} en μm pour L_1 exprimée en mm :

$$f_0 = \pm (2 + L_1/50) \text{ et } f_{max} = \pm (4 + L_1/50)$$

Tableau 8 – Erreur d'indication des jauges micrométriques à 2 touches en classe 0

Jauge micrométrique Capacité en mm de L_1 et L_2	Erreurs maximales d'indication	
	f_{max} (μm)	f_0 (μm)
de 25 à 50	±4	±2
de 50 à 75	±5	±3
de 75 à 100	±5	±3
de 100 à 125	±6	±4
de 125 à 150	±6	±4
de 150 à 175	±7	±5
de 175 à 200	±7	±5
de 200 à 225	±8	±6
de 225 à 250	±8	±6
de 250 à 275	±9	±7
de 275 à 300	±9	±7
de 300 à 325	±10	±8
de 325 à 350	±10	±8
de 350 à 375	±11	±9
de 375 à 400	±11	±9
de 400 à 425	±12	±10
de 425 à 450	±12	±10
de 450 à 475	±13	±11
de 475 à 500	±13	±11

Il est donc recommandé, pour les jauges de capacité avec rallonge, quelle que soit la capacité, d'appliquer ces formules.

Les jauges micrométriques sont classées en quatre classes, la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs du tableau 8 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

2.2.3.3 Précautions d'emploi, maintenance

Lors de l'étalonnage des jauges micrométriques avec un banc de mesure, il est indispensable que la poupée mobile du banc puisse être bloquée pour permettre la mise en place, le dégauchissage et l'approche par rotation de la vis, entre les touches planes du banc. La jauge doit être étalonnée avec un effort de mesure équivalent à l'effort qui sera appliqué pour la mesure sur une pièce.

Pour l'étalonnage, comme pour l'utilisation, pour les jauges de grande longueur (supérieures à 500 mm), il est souhaitable de respecter la position des points d'appui (points de raccourcissement minimum dits *points de Bessel* pour des extrémités sphériques, situés à 0,220 fois la longueur des extrémités) afin de limiter les effets de la flexion de l'instrument (erreur de quelques micromètres), à prendre en compte suivant la valeur des tolérances à vérifier.

2.2.4 Micromètres d'intérieur à 3 touches ou alésomètres

2.2.4.1 Principes et description

L'alésomètre est un instrument de mesure qui, par sa conception même, est destiné à mesurer des diamètres d'alésage, les trois touches étant en contact avec la surface de l'alésage. La forme de la tête permet des mesures dans des trous débouchants ou dans des trous borgnes (figure 18). Les touches sont placées à 120° , il faut noter qu'il a été réalisé des alésomètres dont deux des touches étaient à 110° , la troisième étant symétrique, ces instruments ne sont pas prévus dans la norme NF E 11-099.

L'alésomètre est un instrument de la famille des instruments à vis micrométrique, car le déplacement des 3 touches est réalisé par l'intermédiaire d'un cône dont l'angle assure la correspondance entre un déplacement d'un tour de vis de pas 0,5 mm ou 1 mm et une variation de diamètre de 0,5 ou 1 mm. Les dispositifs d'indication sont :

- à tambour ou à vernier à 0,01 mm ;
- à compteur et à vernier à 0,001 mm ;
- à affichage numérique à 0,001 mm.

Les capacités sont limitées à un minimum de 3,5 mm et un maximum de 300 mm. Les valeurs usuelles des étendues de mesure vont de 0,5 mm à 25 mm et même jusqu'à 100 mm avec touches interchangeables, dans ce cas, l'instrument sera étalonné pour chaque jeu de touches.

L'alésomètre doit être équipé d'un limiteur de couple qui doit, sauf cas particulier, exercer sur la pièce à mesurer une force :

- de 10 N à 15 N pour un alésomètre jusqu'à 30 mm de capacité ;
- de 15 N à 20 N pour un alésomètre de 30 à 100 mm de capacité ;
- de 20 N à 28 N pour un alésomètre de capacité supérieure à 100 mm.

D'autre part, la variation de l'effort de mesure sur l'étendue ne doit pas varier de plus de $\pm 2,5$ N.

Afin de permettre des mesures dans des alésages profonds, le corps d'un alésomètre peut être équipé d'une rallonge. Cette adjonction implique un réglage en au moins un point de l'étendue avant utilisation.

2.2.4.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

Les micromètres d'intérieur à trois touches dits « alésomètre » sont caractérisés métrologiquement uniquement par l'erreur d'indication sur l'étendue de mesure. Cette erreur doit être déterminée avec des bagues lisses étalons ou autre dispositif permettant la simulation de bague, comme le BMI 300 de Metroqual (figure 19).

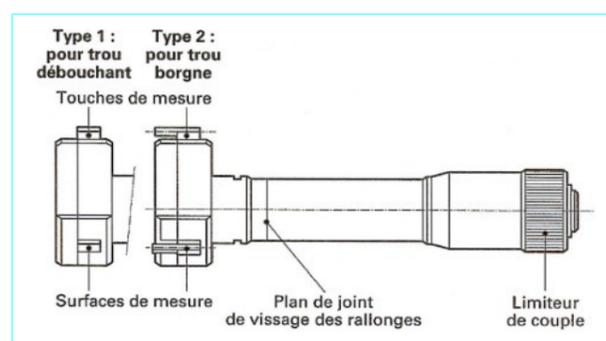


Figure 18—Schéma de principe des alésomètres (trois touches)



Ce banc de mesure spécifique est une réalisation unique dans son principe, il simule une bague parfaite par trois plans tangents, deux fixes constitués par deux règles en vé, un troisième mobile, appliquant un effort compatible avec l'instrument et mesurant le déplacement pour définir le diamètre conventionnellement vrai, avec une résolution de 0,1 μm .

Figure 19—Banc BMI 300 Metroqual pour l'étalonnage des alésomètres

La détermination de l'erreur doit être effectuée avec la totalité de la longueur des touches en contact avec la surface cylindrique de l'alésage. Dans les autres cas d'utilisation, avec les touches en contact partiel, il importe de réaliser un étalonnage dans les mêmes conditions, pour être certain de la validité des mesures. Il doit être effectué trois séries de mesures en plusieurs points choisis de façon à pouvoir vérifier l'erreur sur la totalité de l'étendue de mesure et en des positions angulaires différentes du tambour. Le nombre de points de mesure est :

- de 3 points pour les étendues de mesure inférieures ou égales à 10 mm ;
- de 5 points pour les étendues de mesure supérieures à 10 mm.

Pour chaque mesure, calculer :

$$E_i = V_i - V_c$$

avec V_i valeur lue sur la jauge,

V_c valeur conventionnellement vraie des cales étalons.

Le nombre de points de mesure sera le même en réception et en vérification périodique.

Les alésomètres sont classés en quatre classes, la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs du tableau 9 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

2.2.4.3 Précautions d'emploi, maintenance

Les recommandations d'utilisation dues à la présence du limiteur de couple pour les alésomètres sont les mêmes que pour les micromètres d'extérieur à vis : erreur d'indication due à la variation de l'effort de mesure, déformation des pièces à mesurer. L'alésomètre est un instrument qui, compte tenu de son principe, présente un effort de mesure important, 15 à 28 N, ce qui limite son utilisation

Tableau 9 – Erreur d'indication des alésomètres en classe 0

Alésomètre	Erreurs maximales d'indication	
	Lecture à 0,01 mm (μm)	Lecture à 0,001 mm (μm)
3,5 (inclus)-50	± 5	± 4
50-100	± 6	± 5
100-150	± 7	± 6
150-200	± 8	± 7
200-300	± 9	± 8

à des pièces présentant une raideur compatible avec la mesure. Enfin, la mesure en trois points à 120° oblige, pour déterminer un diamètre avec le minimum d'influence due à la forme de la pièce, à réaliser plusieurs mesures en faisant tourner la pièce par rapport à l'instrument, et en cas de doute suivant certaines fabrications, à utiliser un instrument à deux touches ou réaliser un relevé de forme avant de valider une méthode.

2.3 Mesureurs d'alésage

2.3.1 Principes et description

Les paragraphes précédents ont présenté deux types particuliers de mesureurs d'alésage, les micromètres d'intérieur à deux et trois touches, mais il existe d'autres mesureurs qui diffèrent par leur conception, leurs capacités de mesure ou par leurs étendues de mesure. Les plus courants sont les suivants.

5 Les **tampons pneumatiques** sont des calibres mesurant sur une étendue réduite, quelques dixièmes de millimètres. L'amplification est réalisée par la variation de pression d'une fuite d'air calibrée. Cette pression, mesurée autrefois par une colonne de liquide (colonne Solex), est aujourd'hui transformée en déplacement d'une membrane, mesurée par un comparateur mécanique avec une amplification adaptée ou un capteur électronique de déplacement. La résolution est à $\pm 0,01$ mm, voire $\pm 0,001$ mm, avec des erreurs d'indication de 1 à 3 % de l'étendue de mesure.

5 Les **tampons électroniques** sont les versions modernes des tampons pneumatiques ; ces mesureurs sont le plus souvent à deux touches, parfois à trois touches. La tête de mesure à 2 ou 3 touches est équipée d'une aiguille de mesure dont l'extrémité est constituée d'un cône de renvoi et sa tige assure la transmission du mouvement dans une poignée contenant directement un capteur électronique ou pouvant recevoir un comparateur mécanique ou électronique (figure 20). Certains de ces mesureurs sont équipés de 2 touches de précentrage dans l'alésage, évitant la recherche du point de rebroussement. La résolution est à $\pm 0,01$ mm, voire $\pm 0,001$ mm, avec des erreurs d'indication de 1 à 3 % de l'étendue de mesure.

5 Les **mesureurs d'alésage à comparateur intégré** sont équipés de 2 bras de mesure permettant la mesure dans l'alésage, un des bras est fixe par rapport au corps de l'instrument, l'autre, articulé sur un axe, réalise la mesure. Une mécanique simple, entraînant par fils et/ou pignons la rotation d'une aiguille indicatrice. La résolution est à $\pm 0,01$ mm avec des étendues de quelques millimètres, limitée car le mouvement n'est pas linéaire.

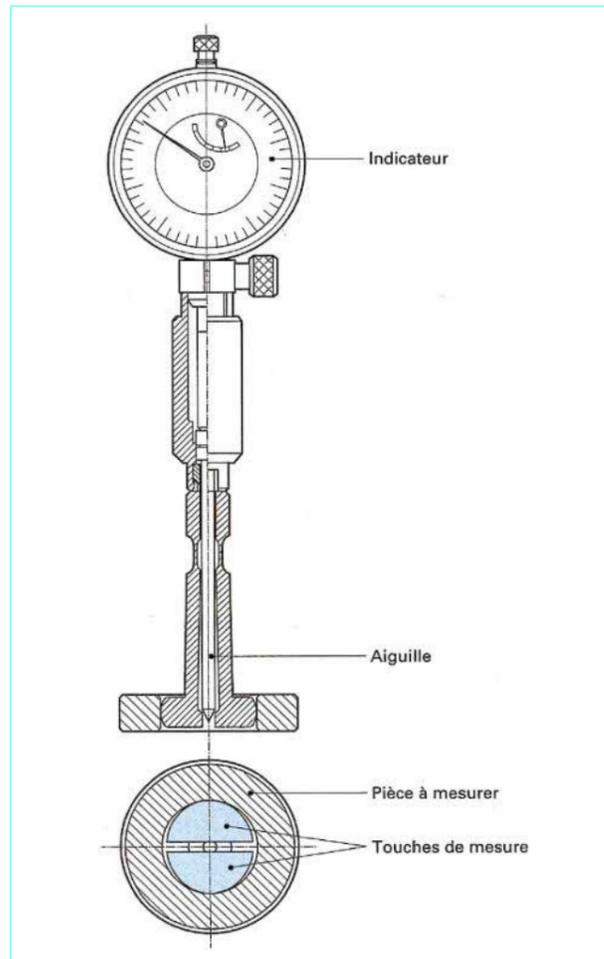


Figure 20—Mesureur d'alésage à aiguille

2.3.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

Il est indispensable de déterminer les erreurs d'indication de ces instruments, dont la principale cause d'erreur est une non-linéarité due au principe de mesure, pneumatique ou mécanique.

En l'absence de norme, il est recommandé de déterminer les erreurs d'indication comme pour les autres instruments en trois séries d'au moins 6 à 10 points de mesure répartis sur l'étendue. Pour l'acceptation, se reporter aux spécifications du constructeur ou aux besoins de l'utilisateur, le tableau 10 donne, à titre d'information, des valeurs d'erreurs maximales d'indication qui peuvent être prises en l'absence de spécifications particulières ; ces valeurs sont données pour des instruments à l'état neuf, avec la possibilité d'appliquer les règles normalisées de déclassement.

Les mesureurs d'alésage peuvent être classés en quatre classes, la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs du tableau 10 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

Tableau 10 – Erreur d'indication des mesureurs d'intérieur en classe 0

Mesureur d'alésages	Erreurs maximales d'indication		
	Capacité en mm der (exclu) à (inclus)	Lecture à 0,01 mm (μm)	Lecture à 0,001 mm (μm)
	3 (inclus) – 50	± 8	± 6
	50-100	± 10	± 8
	100-150	± 12	± 10
	150-200	± 14	± 12
	200-300	± 16	± 14

2.3.3 Précautions d'emploi, maintenance

Les mesureurs d'alésage, compte tenu de leur conception, sont des instruments très fragiles qui doivent être manipulés avec le maximum de précaution, en particulier pour les dispositifs à aiguille.

Les dispositifs pneumatiques sont influencés par l'état de surface des pièces ; la présence de traces de chocs, de rayures ou d'oxydation donnera des résultats plus ou moins incohérents, il sera, dans ce cas, indispensable d'augmenter les incertitudes de mesure.

Pour les mesureurs ne présentant pas de centreur, tampon cylindrique ou touches d'autocentrage, il est recommandé de s'assurer de la position du mesureur dans l'axe de l'alésage pour réaliser la recherche du diamètre maximum.

2.4 Mesureurs spéciaux d'extérieur dits « C de mesure »

5 Principes et description

Ces mesureurs (figure 21) sont des dérivés des micromètres d'extérieur à vis à comparateur rapporté, mais adaptés aux besoins en utilisant :

- soit une touche fixe, soit une butée micrométrique d'un côté du C ;
- soit un comparateur mécanique, soit un capteur de déplacement.

Le choix est fonction du besoin : mesure de petits écarts par rapport à un étalon, ou mesure directe du diamètre ou de la distance sur la pièce.

Les résolutions des capteurs ou comparateurs sont à 0,01 mm, à 0,001 mm, voire dans le cas de la mesure de petits écarts, à 0,1 μm .

Suivant le capteur ou le comparateur, les étendues sont inférieures au millimètre ou de plusieurs millimètres (10 mm à 60 mm) avec des capteurs incrémentaux à grande course comme Heidenhain (Allemagne) ou Compac Electronics (Suisse). Les capacités peuvent être de quelques millimètres à 500 mm.

5 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

En l'absence de norme, il est recommandé de déterminer les erreurs d'indication avec des cales étalons, comme pour les autres instruments, en trois séries d'au moins 6 à 10 points de mesure répartis sur l'étendue. Pour l'acceptation, se reporter aux spécifications du constructeur ou aux spécifications du capteur de déplacement ou au comparateur par exemple, mais la meilleure base normative est l'utilisation de la NF E 11-090 sur les micromètres à comparateur.

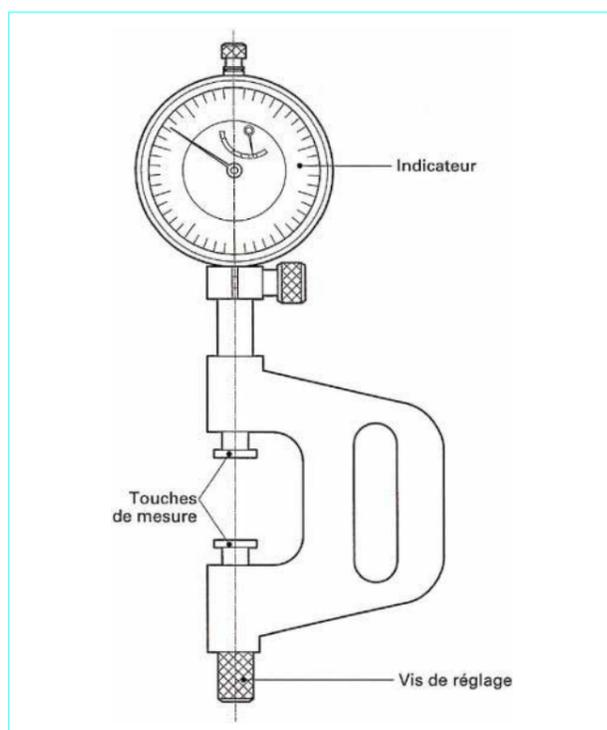


Figure 21—« C » de mesure à comparateur

5 Précautions d'emploi, maintenance

Pour les instruments à vis micrométrique, se reporter aux précautions d'emploi des micromètres, en particulier pour le limiteur de couple. Pour les autres instruments, il est recommandé de bien faire le choix des touches de mesure, planes (éventuellement une touche plane et l'autre sphérique) pour des mesures de diamètre et deux touches sphériques pour des mesures sur des pièces planes. Dans le cas de l'utilisation de deux touches planes, il sera nécessaire de vérifier périodiquement la planéité des touches (voir micromètre d'extérieur).

3. Mesureurs verticaux

Les mesureurs verticaux sont des instruments usuels très répandus. Contrairement aux instruments à main qui se suffisent à eux-mêmes pour réaliser des mesures, les mesureurs verticaux nécessitent un **plan de référence** pour effectuer les mesures. Quel que soit le type, ils seront toujours associés à un **marbre** pour réaliser des mesures suivant un axe vertical, normal au marbre. Ils permettent des mesures de hauteur, d'épaisseur, de profondeur, de diamètre intérieur ou extérieur, suivant la configuration du palpeur de mesure qui va lui être associé.

3.1 Trusquins

5 Principes et description

Le terme « **trusquin** » est utilisé pour désigner à la fois des instruments de traçage et des instruments de mesure. Le trusquin est

un instrument à coulisse. Il est constitué d'un socle reposant en trois plots sur un marbre, d'une règle verticale fixée au socle et d'un coulisseau solidaire d'un porte-palpeur (figure 22). Les palpeurs sont interchangeables afin de les adapter aux formes des pièces à mesurer.

Comme pour les pieds à coulisse, le coulisseau est équipé d'un afficheur :

- à vernier à 0,05 mm ou 0,02 mm ;
- à comparateur à 0,02 mm ou 0,01 mm ;
- numérique à 0,01 mm ou 0,001 mm.

Les étendues de mesure vont en général de 300 mm à 1 000 mm, voire 2 000 mm pour certains constructeurs.

5 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

En l'absence de normes spécifiques récentes (en effet, la NF E 11-106 de septembre 1983, *Trusquins à vernier*, est obsolète), il est recommandé de réaliser avec des cales étalons trois séries de mesure en 6 points de l'étendue de mesure et de calculer l'**erreur maximale d'indication** en prenant le maximum des erreurs élémentaires. L'autre caractéristique spécifique aux mesureurs verticaux qui doit être vérifiée est la **perpendicularité** de la règle par rapport au socle. Cette mesure peut être réalisée par comparaison à une équerre ou un cylindre équerre.

Pour les conditions d'acceptation, il est recommandé de suivre les spécifications des constructeurs, mais une bonne base pour des ordres de grandeur peut être donnée par la norme sur les pieds à coulisse. Les erreurs maximales de perpendicularité sont de l'ordre de 0,01 mm sur l'étendue de mesure.

5 Précautions d'emploi, maintenance

L'ensemble des recommandations donné sur les pieds à coulisse, concernant le réglage du coulisseau, est applicable aux trusquins. Les recommandations particulières aux trusquins et aux mesureurs verticaux sont de s'assurer régulièrement de la qualité des touches de palpées et de la stabilité des points d'appuis sur le marbre, donc d'une bonne perpendicularité.

Il faut néanmoins noter qu'un trusquin n'est pas une référence de perpendicularité, mais il peut servir de mesureur dans une comparaison à un étalon.

3.2 Colonnes de mesure

5 Principes et description

Les colonnes de mesure ont été beaucoup utilisées jusque dans les années 70, elles sont aujourd'hui de plus en plus remplacées par les colonnes de mesure verticales. Elles sont parfois appelées **colonnes étagées**, compte tenu de l'ensemble de cales à faces parallèles de 5 ou 10 mm qui constitue en général les 300 mm, voire plus suivant les modèles, de la partie étalon fixe de la colonne (figure 23). Certaines colonnes disposent de deux jeux de cales décalées angulairement, ce qui permet en tout point une approche de la surface de la cale par palpée de haut en bas ou de bas en haut.

Elles sont encore appelées **micromètre vertical**, compte tenu de la vis micrométrique de 25 mm qui permet le déplacement de l'ensemble des étages de cales, en constituant ainsi un micromètre de 325 mm d'étendue de mesure. Elles constituent ainsi une référence de hauteur, plus qu'un mesureur, mais associé à un comparateur à levier, l'ensemble va permettre diverses mesures, le comparateur étant utilisé en méthode de zéro. Elles sont équipées de vernier à 0,01 mm ou à 0,001 mm, le micromètre étant à tambour ou à compteur.

5 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

L'étalonnage des caractéristiques métrologiques consiste à étalonner la vis micrométrique par comparaison à des cales comme pour les micromètres d'extérieur, et l'ensemble des cales en réalisant l'étalonnage sur la cale et sous la cale par comparaison à des cales

étalons et empilages de cales étalons. Il est recommandé de vérifier le parallélisme des cales par rapport à la base de la colonne en déplaçant le comparateur sur les surfaces.

Les défauts de forme et de justesse des cales sont de $1 \text{ à } 2 \text{ } \mu\text{m}$ et les erreurs d'indication de la vis micrométrique sur l'étendue de $2 \text{ à } 3 \text{ } \mu\text{m}$. L'erreur totale d'indication sur l'étendue n'excède pas en général $\pm 5 \text{ } \mu\text{m}$.

5 Précautions d'emploi, maintenance

Comme pour tous les étalons, les colonnes de mesure doivent être parfaitement soignées : protéger les cales, vérifier régulièrement le jeu de la vis, éviter les chocs sur les cales.

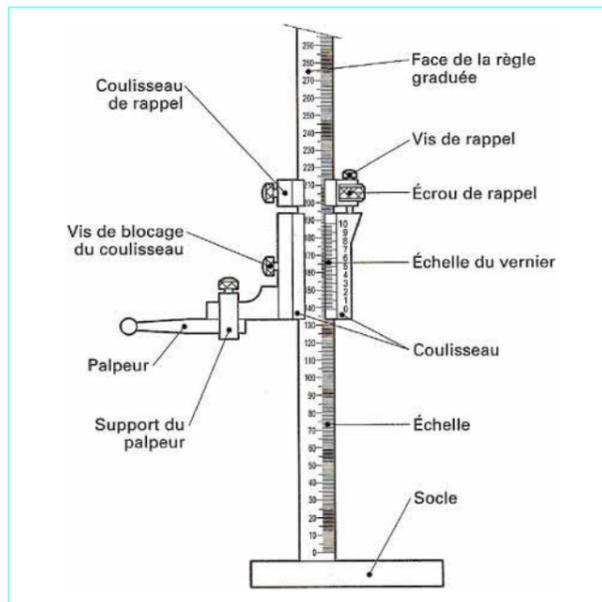


Figure 22—Trusquin de mesure à vernier

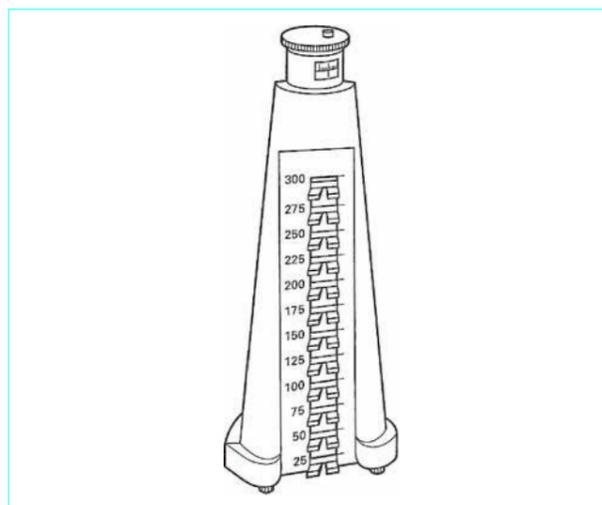


Figure 23—Schéma d'une colonne de mesure de 300 mm

3.3 Colonnes de mesure verticales

3.3.1 Principes et description

Les colonnes de mesure verticales (figure 24) constituent de véritables machines à mesurer un axe, assistées par microprocesseur, permettant un traitement des mesures, plus ou moins complet suivant les modèles. Elles sont constituées des éléments suivants :

- un socle composé de trois plots, souvent incluant un coussin d'air, pour faciliter le déplacement sur le marbre de référence ;
- un bâti vertical assurant le guidage et le déplacement d'un chariot de mesure ; le chariot est équipé d'un dispositif de blocage, avec une possibilité de mouvement fin pour permettre l'approche des pièces à mesurer ; le déplacement est facilité par un dispositif d'équilibrage qui assure l'effort de mesure sur la pièce ;

—les dispositifs de mesure du déplacement :

- soit du type à règle capacitive,
- soit du type à règle incrémentale en verre ou en acier ; les résolutions des afficheurs étant à $1 \text{ } \mu\text{m}$;
- un porte-palpeur solidaire du chariot de mesure, permettant l'interchangeabilité des palpeurs pour la réalisation de diverses mesures intérieure, extérieure, hauteur, diamètre... ;
- le calculateur qui permet au minimum :

- un affichage avec un zéro flottant, et une présélection de valeurs afin de permettre un étalonnage sur un étalon de référence,
- la détermination du diamètre d'un palpeur sphérique à partir d'un palpement sur un étalon, cale, bague, tampon ou sur l'étalon spécifique parfois fourni avec le mesureur, ou bien par introduction manuelle de la constante,
- le calcul d'un diamètre extérieur à partir d'un palpement sur un point haut et un point bas,
- idem pour la détermination d'un diamètre intérieur,
- le calcul d'un point de symétrie intérieur ou extérieur.

Certains constructeurs ont développé des algorithmes de traitement incluant des dégauchissements dans le plan, et même dans le volume avec certains accessoires.

Les capacités de mesure sont souvent 500 mm pour les plus petites et jusqu'à 1 000 mm, voire 1 500 mm pour certaines. Des rehausses de 300 mm ou 500 mm permettent d'accroître la capacité pour certaines mesures.

3.3.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

Les caractéristiques métrologiques à déterminer pour une colonne de mesure verticale sont les suivantes.

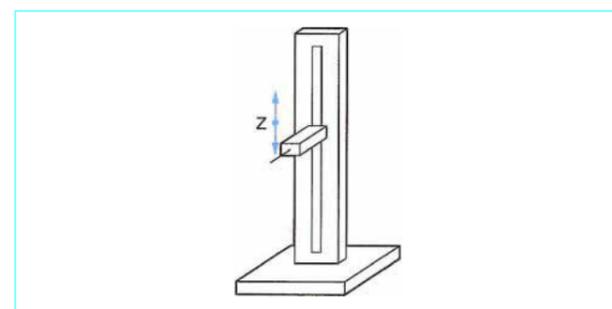


Figure 24—Schéma de principe d'une colonne de mesure verticale

5 La **justesse** et l'**hystérésis** du déplacement du chariot sur l'étendue de mesure : bien que n'étant pas indispensable, cette caractéristique permet de déterminer rapidement la qualité et le bon fonctionnement du dispositif de mesure du déplacement et, en particulier, de mettre en évidence une éventuelle erreur de comptage ou d'interpolation de l'électronique. Pour cet étalonnage, réaliser au moins deux aller retour en au moins 11 points régulièrement répartis sur l'étendue de mesure, sans mesurer des positions entières, par comparaison à l'indication d'un interféromètre à comptage de franges. Calculer à partir de la courbe d'étalonnage l'erreur maximale de justesse et d'hystérésis.

5 L'**erreur d'indication sur des mesures de longueur** : à l'aide de cales étalons ou d'empilages de cales étalons afin de mettre en évidence une éventuelle erreur d'interpolation électronique. Si la justesse du déplacement a été réalisée, limiter cette mesure à 3 à 5 cales sur l'étendue de mesure, sinon réaliser au moins 10 mesures répétées trois fois. Calculer l'erreur maximale d'indication sur l'ensemble des mesures :

$$E_i = V_i - V_c$$

avec V_i valeur lue corrigée éventuellement de la constante de palpé,

V_c valeur conventionnellement vraie des cales ou empilages de cales.

5 L'**erreur d'indication sur des mesures de diamètre intérieur et extérieur** : à l'aide de tampons lisses et de bagues lisses. Réaliser des mesures sur au moins deux tampons et deux bagues en réalisant les corrections de constantes de palpé avec le calculateur.

5 La **perpendicularité**, suivant deux plans perpendiculaires, de l'axe de mesure par rapport à la base, à l'aide d'une équerre ou un cylindre équerre. Compte tenu des spécifications faibles de cette caractéristique, il est recommandé d'utiliser une méthode par retournement, pour optimiser les incertitudes d'étalonnage [5].

L'ordre de grandeur des erreurs d'indication est de $\pm 5 \mu\text{m}$ à $\pm 10 \mu\text{m}$, et les écarts de perpendicularité inférieurs à $5 \mu\text{m}$ sur l'étendue.

3.3.3 Précautions d'emploi, maintenance

Les colonnes de mesure verticales sont des machines à mesurer et doivent donc être traitées comme ces machines. Il faut éviter les chocs thermiques, qui peuvent dérégler les dispositifs de mesure et donc augmenter les erreurs d'indication. Les autres recommandations sont :

—il est fortement recommandé d'utiliser la colonne sur un marbre très propre, non seulement pour la qualité des mesures, mais aussi pour éviter de colmater les patins à air et donc d'accroître les frottements avec le risque de marquer ces patins ;

—vérifier régulièrement la qualité des palpeurs, éviter les plats qui vont introduire des erreurs de palpé ;

—le bon fonctionnement des guidages du chariot doit être vérifié régulièrement et réglé par un spécialiste, car le moindre point dur peut provoquer un marquage des règles donc des erreurs nécessitant une réparation importante ;

—l'utilisation de ces colonnes, et, en particulier, l'utilisation du calculateur, nécessite une formation des opérateurs, pour la mise en œuvre de certains algorithmes. En particulier, vérifier le traitement des déterminations et corrections de constantes de palpé, ce sont les causes d'erreurs les plus souvent rencontrées.

4. Comparateurs

Les comparateurs mécaniques, et depuis quelques années électroniques, sont les instruments de mesure et de comparaison les plus utilisés, aussi bien en métrologie, en contrôle atelier, que dans l'atelier sur les machines ou sur des montages de contrôle.

4.1 Mécanique à tige rentrante radiale

4.1.1 Principes et description

C'est le comparateur **le plus courant**, toujours appelé par les gens du métier « **montre** », compte tenu de sa ressemblance avec une montre qui indique l'heure, ressemblance d'autant plus réaliste que la mécanique de cet instrument est de même conception qu'un mouvement horloger.

En effet, le comparateur à tige rentrante radiale est constitué d'un corps rond de diamètre de 40 à 60 mm suivant les modèles, avec un canon dans lequel est guidé la tige de mesure, qui comprend dans sa partie haute une crémaillère. Cette crémaillère va engrener une série de pignons réalisant l'amplification du mouvement afin d'obtenir la rotation d'une aiguille telle que par exemple, pour un comparateur de 10 mm de course avec une division de 0,01 mm, à un déplacement de 1 mm correspond un tour de l'aiguille. Le cadran est gradué dans cet exemple en 100 parties, d'où une lecture aisée du déplacement à 2 à 3 μm près. Pour les comparateurs à faible course et à course limitée, le déplacement du palpeur n'est transmis à l'aiguille que dans la zone limitée (figure 25).

Le guidage de la tige doit être de qualité, afin de conserver un effort de mesure de 1,5 N maximum, réalisé par un ressort, avec une variation maximale de 0,6 N sur la course. La touche de mesure est interchangeable, le plus souvent sphérique, elle est parfois à aiguille ou plane.

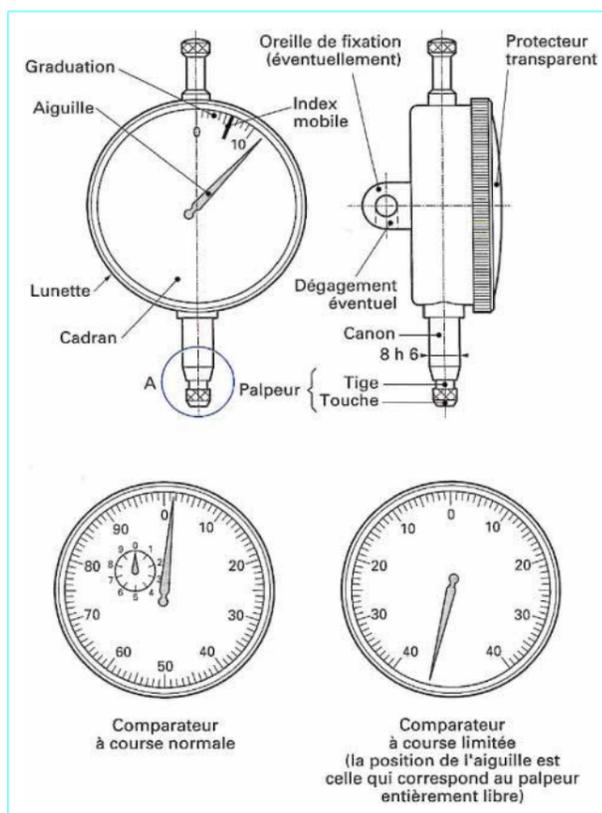


Figure 25—Schéma de principe de comparateur à tige rentrante radiale

Sur le cadran, un compteur indique le nombre de tours, en particulier pour les comparateurs dits à course normale et à grande course, afin de déterminer le déplacement sur toute l'étendue.

Les différents types de comparateurs sont :

- les **comparateurs à faible course**, à valeur d'échelon 0,001 mm ;
- les **comparateurs à course limitée**, à valeur d'échelon à 0,01 mm et 0,001 mm, qui sont avec les comparateurs à faible course, uniquement des comparateurs et non des mesureurs ; certains ayant un zéro au point du cadran opposé à la touche, ils sont dits à *course partagée*, $\pm 40 \mu\text{m}$, $\pm 80 \mu\text{m}$, $\pm 0,40 \text{ mm}$ ou $\pm 0,80 \text{ mm}$ pour les plus courants. Bien que la norme NF E 11-050 soit imprécise sur les limites des courses de mesure de ces comparateurs, les habitudes limitent ces deux types de comparateurs à 1 mm ;
- les comparateurs à course normale, à valeur d'échelon à 0,1 mm, à 0,01 mm et 0,001 mm ; ce sont les plus couramment utilisés dans l'industrie ;
- les courses limitées sont de 10 mm pour les comparateurs à 0,1 mm et à 0,01 mm, et de 5 mm pour les comparateurs à 0,001 mm ;
- les comparateurs à grande course, donc $> 10 \text{ mm}$, à valeur d'échelon à 0,1 mm et 0,01 mm ; les limites de la norme sont 100 mm pour les comparateurs à 0,01 mm et 30 mm pour ceux à 0,1 mm.

4.1.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

Les caractéristiques métrologiques des comparateurs sont les suivantes.

5 L'**erreur de justesse totale** est l'erreur de justesse sur la totalité de l'étendue de mesure du comparateur. Elle est calculée en effectuant la différence algébrique des ordonnées maximale et minimale de la courbe d'étalonnage. L'étalonnage d'un comparateur est réalisé en général sur un banc spécifique, qui comprend une vis micrométrique pour la génération des déplacements et un capteur de référence pour la détermination des déplacements. Pour minimiser l'incertitude d'étalonnage, il est recommandé d'effectuer l'étalonnage en 11 points minimum (pour les courses supérieures à plus de 10 tours, 1 point par tour) successivement pour les valeurs strictement croissantes et décroissantes du déplacement du comparateur, en visant le point d'étalonnage du comparateur, donc en réalisant une coïncidence du trait et de l'aiguille, le déplacement étant lu sur le capteur de référence. La position du comparateur pendant l'étalonnage, verticale ou horizontale, doit être indiquée sur le document d'étalonnage.

5 L'**erreur de justesse locale** est l'erreur de justesse déterminée sur une zone limitée de l'étendue de mesure du comparateur. C'est la plus grande différence algébrique des ordonnées de deux points successifs de la courbe d'étalonnage.

5 L'**erreur d'hystérésis** est la moitié de la plus grande différence algébrique des ordonnées d'un même point relevées respectivement sur les courses montante et descendante.

5 L'**erreur de fidélité** est déterminée aux deux points extrêmes de la courbe d'étalonnage, qui ont permis la détermination de l'erreur de justesse totale. En ces points, effectuer 10 mesures dans le même sens et calculer pour chaque série :

$$E_f = V_{\max} - V_{\text{moy}}$$

avec V_{moy} moyenne des écarts relevés,
 V_{\max} écart maximal constaté par rapport à V_{moy} .

L'erreur de fidélité est la plus grande des deux valeurs.

Ces caractéristiques doivent rester dans les limites données au tableau 11.

Les comparateurs mécaniques à cadran à tige rentrante radiale sont classés en deux classes, la classe 0 pour l'état neuf et la classe

1. La limite d'usure pour cette classe est obtenue à partir des valeurs du tableau 11 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 1, si pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 2, 3 ou 4.

4.1.3 Précautions d'emploi, maintenance

Les comparateurs mécaniques sont des instruments robustes ; néanmoins, il est recommandé de vérifier régulièrement, avec des périodicités plus rapprochées que l'étalonnage :

- la qualité des touches, absence de plat ou de chocs ;
- la régularité du déplacement de la tige, sans point dur ;
- la cohérence du déplacement de l'aiguille avec le déplacement de la touche de mesure d'une part, et d'autre part avec le totaliseur pour les comparateurs à course normale et grande course. En effet, une accélération importante peut provoquer le déchassage de l'aiguille ;
- la propreté de la lunette du cadran, afin de conserver une bonne lecture.

4.2 Mécanique à levier

4.2.1 Principes et description

Le **comparateur à levier** se différencie du comparateur à cadran à tige rentrante radiale sur plusieurs points :

- le cadran est toujours plus petit : 25 à 35 mm ;
- la tige de mesure est constituée d'un levier dont la longueur dépend de la résolution, elle peut varier de 10 mm à 40 mm pour les palpeurs longs ;
- le principe mécanique est très différent, la touche de mesure est montée sur un élément mécanique tournant autour d'un axe, et solidaire par l'intermédiaire d'une friction au corps de l'instrument. L'orientation de la touche va permettre la mesure de déplacement sur près de 360° et cela dans deux sens de déplacement, avec la particularité d'avoir une course faible jusqu'à $\pm 0,5 \text{ mm}$, voire jusqu'à $\pm 0,8 \text{ mm}$. Un dispositif mécanique assure la transformation du mouvement de rotation de la touche en rotation de l'aiguille (figure 26).

Les valeurs des graduations sont à 0,01 mm et 0,002 mm.

4.2.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

La norme NF 11-053 sur les comparateurs à levier est obsolète, elle ne doit plus être utilisée, dans l'attente des travaux ISO en cours. Dans cette attente, il est recommandé de déterminer les caractéristiques métrologiques des comparateurs à tiges rentrantes, avec leurs méthodes d'étalonnage. Les limites d'erreurs à prendre en compte peuvent être les valeurs pour les comparateurs à course limitée, pour l'instrument en classe 0 et en appliquant les mêmes règles de déclassement. Les méthodes d'étalonnage et les spécifications doivent être appliquées pour les deux sens de mesure du comparateur à levier.

4.2.3 Précautions d'emploi, maintenance

C'est un instrument fragile, sensible aux vibrations, qui doit être fixé de façon rigide. La transformation du mouvement de mesure du déplacement n'est pas linéaire, donc cet instrument ne doit jamais être utilisé pour la mesure de déplacement, mais uniquement pour la **mesure de faibles écarts**.

L'amplification du mouvement est calculée pour une certaine longueur du levier, il est donc impératif, en cas de plat ou de chocs sur la touche, de remplacer le levier par un levier du même fabriquant

Tableau 11 – Limites d'erreurs tolérées des comparateurs en classe 0					
Comparateurs à faible course					
Valeur de l'échelon (mm)	Erreur de justesse totale (unité de graduation)	Erreur de fidélité (unité de graduation)	Erreur d'hystérésis (unité de graduation)		
0,001	1,5	± 0,5	± 0,3		
Comparateurs à course limitée					
Valeur de l'échelon (mm)	Erreur de justesse totale (μm)	Erreur de fidélité (μm)	Erreur d'hystérésis (μm)		
0,001	2	±0,5	±0,3		
0,01	10	±3	±2		
Comparateurs à course normale et à grande course					
Valeur de l'échelon (mm)	Course (mm)	Erreur de justesse totale (μm)	Erreur de justesse locale (μm)	Erreur de fidélité (μm)	Erreur d'hystérésis (μm)
0,001	jusqu'à 1	6	3	±0,5	±1
	jusqu'à 5	10	3	±0,5	±1
0,01	jusqu'à 5	15	10	±3	±3
	jusqu'à 10	15	10	±5	±5
	jusqu'à 30	20	10	±10	±5
	jusqu'à 50	25	10	±10	±5
	jusqu'à 100	30	15	±10	±10
0,1	jusqu'à 30	150	100	±30	±30

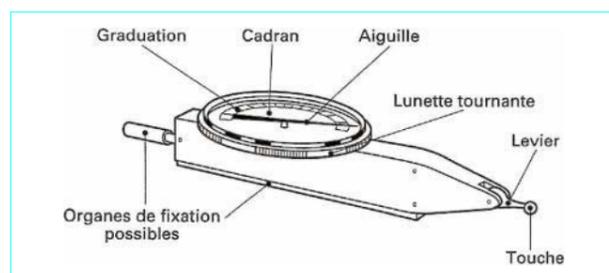


Figure 26—Schéma de principe d'un comparateur à levier

et de procéder à un étalonnage. De même, l'amplification est calculée pour une mesure du déplacement suivant une direction perpendiculaire à l'axe du levier. Toute utilisation suivant un angle décalé de α par rapport à la normale au levier va entraîner une erreur sur le déplacement mesuré proportionnelle à $\cos(\alpha)$.

4.3 Affichage numérique

4.3.1 Principes et description

Les comparateurs à affichage numérique sont essentiellement constitués de trois parties :

- une partie *capteur*, souvent de conception identique aux comparateurs mécaniques à cadran, et cela pour permettre le remplacement éventuel de l'un par l'autre ;
- une partie *traitement du signal*, la tige du capteur entraîne un dispositif de mesure transformant le déplacement en signal élec-

trique numérisé ; ces dispositifs sont essentiellement de deux types, à règle capacitive ou à règle incrémentale, en verre ou en acier ;

- une partie *affichage* à 0,01 mm, 0,001 mm, voire à 0,1 μm , avec au minimum une touche de mise à zéro (figure 27).

Il est important de noter que, par leur conception même et par le mode de lecture, les comparateurs à affichage numérique n'ont pas les mêmes caractéristiques mécaniques et métrologiques que les comparateurs mécaniques à aiguille et qu'il ne faut, en aucun cas, les considérer comme interchangeables sur un site de mesure. En cas de remplacement, il est fortement recommandé de remplacer un comparateur mécanique à 0,01 mm par un comparateur à affichage numérique à 0,001 mm, pour rester dans les mêmes limites d'erreur et d'incertitude.

L'effort de mesure pour les différents modèles de comparateurs ne doit pas excéder 1,5 N, avec une variation maximale sur l'étendue de mesure de 0,6 N.

Certains comparateurs à affichage numérique sont très sophistiqués, avec présélection de valeurs, introduction des tolérances, mémorisation du maximum, du minimum, sortie numérique type RS 232 pour l'acquisition des données, ce qui est aujourd'hui la principale raison de l'utilisation d'un comparateur à affichage numérique plutôt qu'un comparateur mécanique.

4.3.2 Caractéristiques métrologiques, méthodes d'étalonnage

Les caractéristiques métrologiques des comparateurs à affichage numérique données dans la norme NF E 11-056 sont les suivantes.

§ **L'erreur d'indication totale** est déterminée à partir de la courbe d'étalonnage. Le comparateur est placé, comme pour les compa-

rateurs mécaniques, sur un banc de mesure, il convient de générer des déplacements aléatoires de la touche de mesure puis de lire les indications sur le comparateur et sur le dispositif d'étalonnage. La position du comparateur pendant l'étalonnage doit être indiquée sur le document d'étalonnage.

Les relevés sont effectués en chaque point, successivement pour les valeurs strictement croissantes et décroissantes du déplacement du palpeur.

Le nombre minimum de points à relever course montante et descendante est :

- de 22 pour l'erreur totale et de 11 pour l'erreur locale pour une étendue de mesure 10 mm ;
- de 30 pour l'erreur totale et de 15 pour l'erreur locale pour une étendue de mesure entre 10 et 30 mm ;
- de 42 pour l'erreur totale et de 21 pour l'erreur locale pour une étendue de mesure > 30 mm.

En chaque point, il est calculé :

$$E_i = V_i - V_c$$

avec V_i indication du comparateur,

V_c indication du banc d'étalonnage considérée comme valeurs conventionnellement vraies. L'erreur d'indication totale est la plus grande valeur de E_i .

5 L'**erreur d'indication locale**, autour du point où a été constatée la plus grande erreur d'indication, sur une longueur fonction de l'étendue du comparateur (tableau 12), effectuer un étalonnage avec un nombre de points comme indiqué ci-dessus et calculer E_i en chaque point.

L'erreur d'indication locale est la plus grande valeur de E_i .

5 L'**erreur de fidélité**, au point où a été constatée la plus grande erreur d'indication ; effectuer 10 mesures successives dans le même sens et calculer :

$$E_f = |V_{\max} - V_{\min}|$$

avec V_{\min} indication minimale de l'instrument,

V_{\max} indication maximale de l'instrument.

Les limites de ces erreurs sont données au tableau 12.

Les comparateurs à affichage numérique sont classés en quatre classes, la classe 0 pour l'état neuf et les classes 1, 2 et 3. Les limites d'usure pour ces classes sont obtenues à partir des valeurs du tableau 12 en respectant la règle de déclassement des 150 %. Au-delà de la classe 3, si pour des besoins de l'entreprise, les spécifications restent suffisantes, il est recommandé d'appliquer la même règle pour des classes de précision 4, 5 ou 6.

4.3.3 Précautions d'emploi, maintenance

Les comparateurs à affichage numérique, comme les comparateurs mécaniques, sont des instruments robustes ; néanmoins, il est recommandé de vérifier régulièrement, avec des périodicités plus rapprochées que l'étalonnage :

- la qualité des touches, absence de plat ou de chocs ;
- la régularité du déplacement de la tige, sans point dur.

Il est aussi recommandé, compte tenu de la possibilité de différentes fonctionnalités, de visualiser l'afficheur afin de s'assurer, avant toutes mesures, d'être dans la configuration souhaitée. Par exemple, il est courant de mesurer des écarts en inch au lieu de mm, etc.

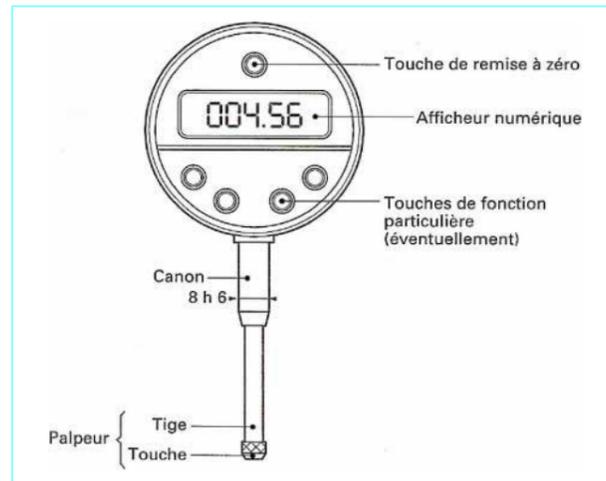


Figure 27—Schéma de principe d'un comparateur à affichage numérique

4.4 Supports de comparateur

Les supports de comparateur ne sont pas des instruments de mesure, mais des accessoires indispensables pour un grand nombre d'applications. D'autre part, ils contribuent à la qualité des mesures :

- par leur poids en donnant une bonne stabilité ainsi qu'une bonne rigidité, en rapport avec les efforts de mesure ;
- leur plan support en trois points ne doit pas boîter ;
- l'axe de mesure doit être géométriquement bien défini, pour éviter des erreurs en cosinus.

5. Conclusions

Comme cet article le prouve, la métrologie dimensionnelle dispose d'un grand nombre d'instruments usuels de mesure. La richesse de ces moyens doit permettre de faire le bon choix de l'instrument, suivant les critères à mesurer et la forme de la pièce. Dans l'utilisation de ces instruments par les contrôleurs, ce n'est pas la connaissance des moyens qui introduit des erreurs de mesure ou des incertitudes. C'est très souvent une erreur de **choix du moyen de mesure** et une totale méconnaissance des causes d'incertitude. La description exhaustive de ces instruments, avec leurs limites d'erreur, les précautions d'emploi, ainsi que l'inventaire des causes d'incertitude au paragraphe 1, devraient contribuer à une meilleure qualité des mesures, donc des produits.

La mise en place de l'assurance qualité, avec ou sans certification par un organisme officiel, est un challenge pour beaucoup d'industriels aujourd'hui. Le but ne sera vraiment atteint que lorsqu'il y aura une adéquation totale entre les besoins des clients, la transcription sur les plans, la fabrication, la mise en œuvre du contrôle, l'acceptation et les coûts. Le contrôle et l'acceptation des produits avec des règles assurant la compatibilité entre tolérances et incertitudes sont malheureusement trop souvent oubliés au profit de procédures administratives, utiles certes, mais pas indispensables. Les règles à appliquer sont souvent présentées de façon trop complexe pour la majorité des utilisateurs industriels, le guide ISO sur l'expression

Tableau 12 – Limites d'erreurs tolérées des comparateurs à affichage numérique en classe 0					
Comparateurs à affichage numérique					
Valeur de l'échelon (mm)	Étendue de mesure totale (mm)	Étendue de mesure limitée (mm)	Erreur d'indication totale (μ m)	Erreur d'indication locale (μ m)	Erreur de fidélité (μ m)
0,01	jusqu'à 10	0,5	30	20	20
	jusqu'à 30	1,5	40	20	20
	jusqu'à 50	2	40	20	20
	jusqu'à 100	2	60	30	20
0,001	jusqu'à 10	0,5	4	2	2
	jusqu'à 30	0,5	5	2	2
	jusqu'à 60	0,5	6	2	2

des incertitudes [1] est encore réservé à une minorité de spécialistes. De ce fait, ces techniques qui contribuent à la maîtrise de la qualité sont éludées par manque d'information et de formation à la portée des industriels.

Dans ce document, ces questions ont été traitées en choisissant des cas simples et usuels, afin de permettre aux utilisateurs de réaliser un premier pas vers la maîtrise des **calculs d'incertitude de mesure, des capacités des moyens de contrôle et des conditions d'acceptation des produits.**

Instrumentus usuels de mesure de longueur

par **Bernard SCHATZ**
Ingénieur CNAM en métrologie
PDG SA Metroqual (Nîmes)

Références bibliographiques

- [1] *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. ISO (1995).
- [2] SCHATZ (B.). – *Comment assurer la gestion des moyens de mesure dans une démarche ISO 9 000*. Conférence Interqualité, avril 1996.
- [3] SCHATZ (B.). – *Calcul des incertitudes et capacité des moyens de contrôle*. Conférence Sisqual-Qualitech, sept. 1996.
- Dans les Techniques de l'Ingénieur**
- [4] PRIEL (M.), GAZAL (L.P.) et SCHATZ (B.). – *Organisation d'un laboratoire d'étalonnage*. R 1 215, traité Mesures et Contrôle, avril 1995.
- [5] SCHATZ (B.). – *Contrôle des angles*. R 1 300, traité Mesures et Contrôle, juil. 1986.
- [6] LIPINSKI (G.). – *Mesures dimensionnelles par interférométrie laser*. R 1 320, traité Mesures et Contrôle, juil. 1995.

Normalisation

Association française de normalisation AFNOR

NF E 02-204	12.93	Vérification des tolérances des produits. Déclaration de conformité
XP E 11-053	4.80	Comparateurs à levier au 1/100 de millimètre. Spécifications et méthodes d'essais.
NF E 11-050	12.90	Instruments de mesure de longueur. Comparateurs mécaniques à cadran, à tige rentrante radiale. Spécifications. Méthodes d'essais.
XP E 11-056	9-96	Spécification géométrique des produits (GPS). Instruments de mesure de longueur. Comparateurs à affichage numérique à tige rentrante radiale. Spécifications. Méthodes d'essais.
NF E 11-090	12.93	Instruments de mesure. Micromètres d'extérieur et d'intérieur à vis. Exécutions spéciales.
NF E 11-091	7.91	Instruments de mesure de longueur. Pieds à coulisse (2 ^e tirage, octobre 1991).
NF E 11-095	12.93	Instruments de mesure de longueur. Micromètres d'extérieur à vis au 1/100 et au 1/1 000 de millimètre. Spécifications. Méthodes d'essais.

NF E 11-096	10.87	Instruments de mesure de longueur. Jauges de profondeur à coulisseau (2 ^e tirage, janvier 1989).
E 11-097	3.84	Instruments de mesure de longueur. Jauges de profondeur à vis micrométrique au 1/100 mm.
XP E 11-098	10.84	Instruments de mesure. Micromètres d'intérieur à vis à deux touches au 1/100 mm, dits jauges micrométriques.
NF E 11-099	12.93	Instruments de mesure de longueur. Micromètres d'intérieur à 3 touches dits « alésomètres ». Spécifications. Méthodes d'essais.
NF X 07-001	12.94	Normes fondamentales. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.
NF X 07-010	12.92	Métrologie. La fonction métrologique dans l'entreprise.
XP X 07-020	6.96	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.
NF EN 20 534	12.93	Papier et carton. Détermination de l'épaisseur et de la masse volumique des feuilles uniques ou des feuilles en liasse (NF Q 03-016).

Fabricants

Pieds à coulisse, jauges de profondeur à coulisseau

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Étalon (Suisse), groupe Brown et Sharp,
- Sylvac (Suisse) : pieds à coulisse à affichage numérique
- Mahr (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)
- Canon (Japon)

Micromètres d'extérieur

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Étalon (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Mahr (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Jauges de profondeur à vis

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Mahr (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Jauges micrométriques à deux touches

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Mahr (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Alésomètres

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Bowers (Grande-Bretagne)
- Mahr (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

INSTRUMENTS USUELS DE MESURE DE LONGUEUR

Mesureurs d'alésage

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Interapid (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Diatest (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Mesureurs spéciaux d'extérieur

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TSA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Diatest (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Trusquins de mesure

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Mitutoyo (Japon)

Colonnes de mesure

- Trimos (Suisse)
- Mahr (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Colonnes de mesure verticales

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Trimos (Suisse)
- Mahr (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Bancs d'étalonnage de comparateurs

- Sylvac (Suisse)
- Mahr (Allemagne)
- Métroqual (France)

Comparateurs mécaniques

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Compac (Suisse)
- Mahr et Käfer (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Comparateurs à leviers

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
- TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
- Compac (Suisse)
- Käfer (Allemagne)
- Mitutoyo (Japon)

Comparateurs à affichage numérique

- Roch Lunéville (France), groupe Brown et Sharp
 - TESA (Suisse), groupe Brown et Sharp
 - Sylvac (Suisse)
 - Compac Electronics SA (Suisse)
 - Mahr (Allemagne)
 - Mitutoyo (Japon)
-