

LA MESURE ÉLECTRONIQUE DES LONGUEURS

Dans la vie courante, et depuis l'invention du système métrique, on mesure les longueurs avec un double mètre, ou un double décimètre pour les petits objets, ou même un pied à coulisse pour les amateurs de mécanique. Mais on en était toujours à faire coïncider des traits sur une règle graduée. Dans l'industrie, ces méthodes n'ont plus cours : la mesure se fait par des procédés optiques, inductifs, capacitifs et autres, plus sûrs et plus précis. Avec le pied à coulisse à lecture digitale, ces méthodes sont maintenant à la portée de tous.

► Sans mesure précise de la longueur, il n'est pas d'ajustage possible, ni d'assemblage un peu complexe. Ce qui revient à dire que la mécanique fine ne peut exister sans cette évaluation des dimensions exactes de tous les constituants appelés à se mouvoir les uns par rapport aux autres. D'où il découle encore que toute la civilisation industrielle repose sur la mesure des angles et des distances, qui à son tour permet de connaître les surfaces et les volumes.

Certes, on sait aussi que notre époque dépend du pétrole, du charbon, de l'atome et de l'électricité, mais il s'agit d'une dépendance seconde ; la première est bien celle des distances : c'est une chose de découvrir que la pression de la vapeur pourrait déplacer un piston dans un cylindre, et faire tourner un volant grâce à une bielle, mais c'en est une autre de fabriquer la machine, ne serait-ce que le cylindre et son piston qui doivent être ajustés l'un par rapport à l'autre.

Avant l'invention des jauges, des comparateurs, des cercles gradués, des pieds à coulisse et des palmer, il n'existait que des mécanismes sommaires dont les pièces n'étaient jamais interchangeables. Les horloges du vieux temps, les astrolabes, les platines de fusil à pierre étaient œuvres d'artisans très habiles capables de fabriquer des gabarits et des règles graduées destinés uniquement à leur propre usage. Il n'y avait pas de réelle mesure de longueur, mais seulement comparaison des dimensions les unes par rapport aux autres et ajustage au coup d'œil.

Pour accéder à la mécanique industrielle telle qu'on la connaît aujourd'hui, il fallut attendre

l'uniformisation des unités de mesure, donc l'arrivée du système métrique, puis l'invention du pied à coulisse, des calibres, des jauges, des étalons, des comparateurs ou des cercles divisés. Les grandes distances, aussi bien terrestres qu'astronomiques, se faisaient par triangulation, une méthode qui associe le décimètre, pour les longueurs, et le théodolite pour les angles.

On sait que l'unité de longueur, maintenant, n'est plus la règle en platine iridié du Bureau des poids et mesures, mais la longueur d'onde d'une radiation lumineuse. De même la distance de la lune ou des planètes se fait plus souvent au radar, donc par ondes, que par triangulation. En topographie, on utilise couramment le laser ; et en océanographie, le sonar au lieu de la sonde.

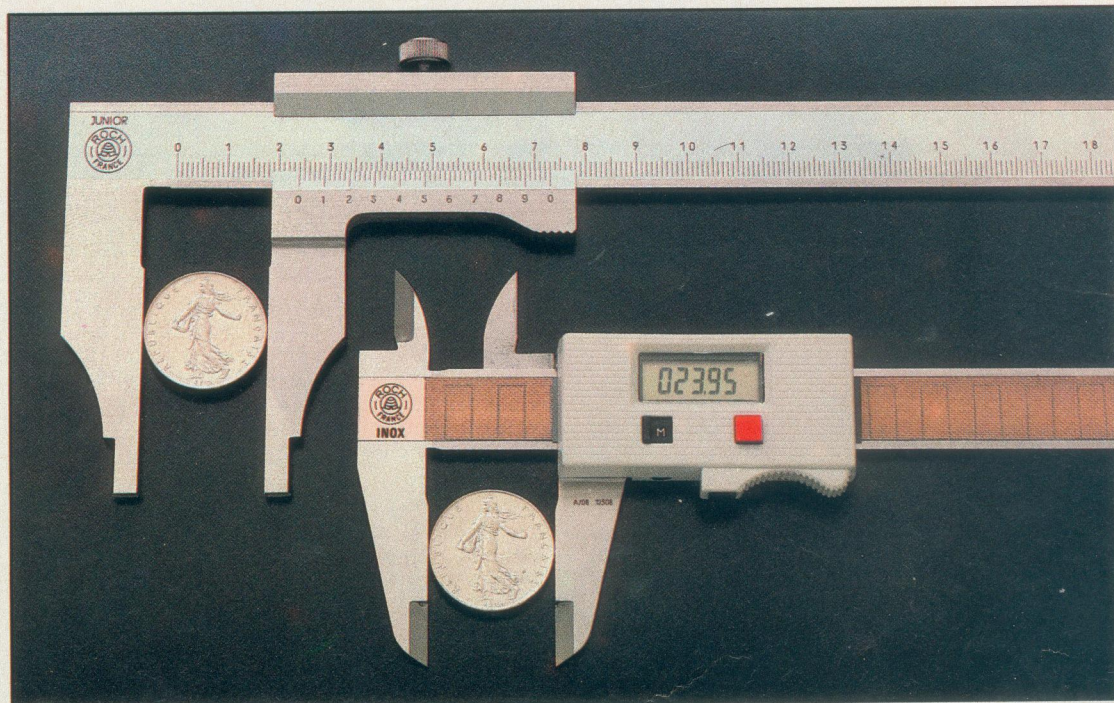
La mise en œuvre de procédés faisant appel à l'optique ou aux ondes radio a permis d'améliorer beaucoup la précision des mesures sur les grandes distances. Mais ce que l'on sait moins, c'est que même dans la mécanique industrielle, où il s'agit d'évaluer des écarts en centimètres ou en décimètres, la mesure des longueurs se fait aussi maintenant par des procédés électroniques. En particulier, l'outil numéro un de l'ajusteur, le pied à coulisse, n'est plus un instrument sur lequel on doit évaluer la coïncidence de graduations gravées sur l'acier, mais un appareil de même allure sur lequel on lit directement en chiffres la distance mesurée.

Le changement est du même ordre que celui qui a fait passer de la montre à cadran à la montre à quartz et lecture digitale. Dans la première, on sait déjà avant de la regarder si on est au milieu du jour

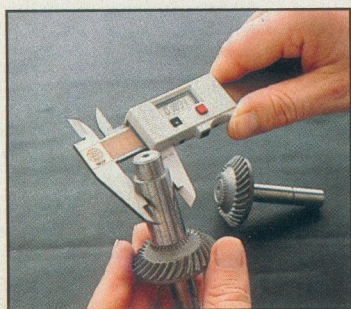
ou au milieu de la nuit, et à la position des aiguilles on voit qu'il est un peu plus de quatre heures et quart. En se penchant de plus près sur le cadran, on peut même préciser quatre heures dix-sept. Avec la montre digitale, la lecture est nettement moins intuitive, moins rapide, mais aussi nettement plus précise : 16.17.24, donc 16 heures 17 minutes 24

en 1600 la lecture des très petites fractions d'angle et de longueur. Invention géniale, d'ailleurs, et qui n'était nullement évidente a priori.

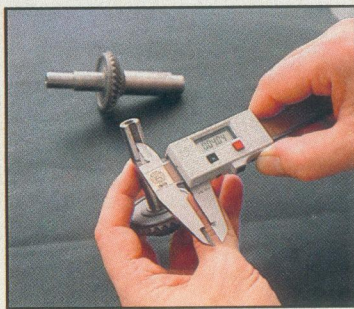
Tout le monde a eu, un jour ou l'autre, à mesurer la largeur d'une pièce, la hauteur d'une table, la diagonale d'un mur, ou même la taille d'un verre à vitre. Pour cela, on prend un double mètre, et on



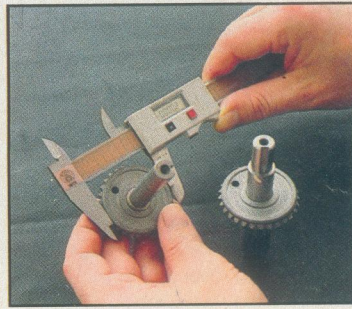
Avec un bon entraînement, on peut lire 24,02 mm sur le vernier d'un pied à coulisse classique. Sur le pied à coulisse à lecture digitale, plus besoin d'être métreur ni ajusteur pour voir directement le diamètre : 23,95. La mesure électronique des distances permet de déterminer immédiatement et sans erreur de lecture...



... le diamètre d'un axe,...



... la largeur d'une rainure,...



... la différence de diamètre entre deux couronnes d'engrenage.

secondes. Comme les secondes changent tout le temps, on perçoit que la lecture du temps exact est chose peu commode, chose qui était beaucoup moins évidente avec un cadran.

Il en va un peu de même avec la lecture digitale des longueurs, ce qui va nous amener à voir de plus près où se situe la réelle exactitude dans la mesure des dimensions. Pour commencer, il faut remonter à Pierre Vernier, géomètre bourguignon qui inventa

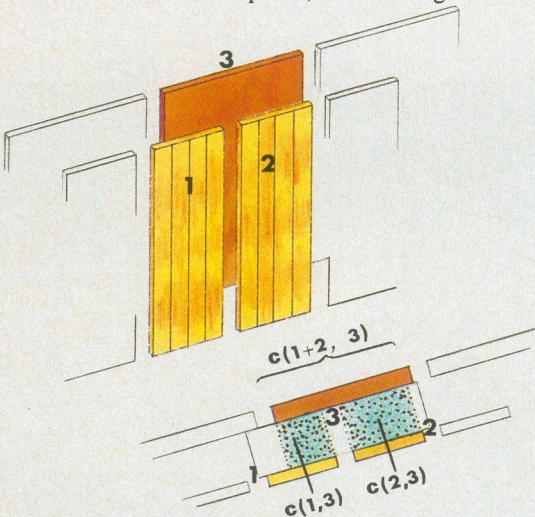
estime la longueur au centimètre près, parfois au demi-centimètre, ou même au millimètre pour les petites dimensions. Ce genre de travail amène à faire deux constatations scientifiquement très importantes.

La première concerne la précision relative : mesurer la largeur d'une chambre au millimètre près n'a aucun sens car les irrégularités des murs et du plancher dépassent le millimètre. On le constate fa-

cilement en reprenant le travail en quelques points différents. De plus, le sol n'étant jamais rigoureusement plat, on ne mesure pas une vraie ligne droite, mais une courbe.

La seconde constatation, c'est que même sur des petits objets, en utilisant un double-décimètre de bonne qualité, il est bien difficile d'évaluer les fractions de millimètre ; à l'œil nu, un mètreur très entraîné estime le quart de millimètre. Une loupe n'améliorerait pas beaucoup le résultat, car les traits de la graduation font déjà quelques dixièmes de millimètre, ce qui interdit a priori d'évaluer le dixième.

Nous disons bien a priori, car l'idée géniale de



Le condensateur différentiel, qui permet d'évaluer toute variation de distance par un courant électrique, est simple dans son principe. Deux armatures métalliques, minces et coplanaires (1 et 2) font face à une armature commune (3). Si l'on déplace l'ensemble 1 + 2 parallèlement à 3, les capacités parallèles $C(1, 3)$ et $C(2, 3)$ varient puisque les surfaces en regard (portion verte pointillée) varient, mais la capacité globale $C(1+2, 3)$ reste constante. Le rapport des capacités partielles à la capacité totale étant une fonction linéaire du déplacement de 1 + 2 par rapport à 3, il ne reste plus qu'à évaluer par des moyens électroniques ce rapport pour avoir une valeur du déplacement.

Pierre Vernier, c'est d'avoir découvert que l'œil peut estimer la coïncidence de deux traits, même relativement larges, avec une bonne précision. Nous disons bien la coïncidence, deux traits juste l'un en face de l'autre, et non l'écart entre deux traits non alignés. Pour cela, on fait coulisser deux repères gradués l'un en face de l'autre : l'un portant les divisions unitaires (millimètres, degrés d'angle, fractions de pouce chez les Anglais, etc.) ; l'autre des divisions similaires, mais légèrement plus petites au nombre de 10, 20, 50, 60 pour 9, 19, 49, 59 divisions unitaires.

Faire l'exposé de la lecture d'un vernier sortirait du cadre de cet article, et on doit seulement en retenir qu'il permet, sans aucun artifice grossissant ou autre, de repérer à l'œil nu des fractions d'unité absolument minuscules. Cela est surtout vrai pour les

unités de longueur, car pour les unités d'angles il est toujours possible, du moins en théorie, de faire des cercles ou des tambours énormes sur lesquels on peut mettre des milliers de divisions parfaitement visibles. Par exemple, on pourra lire à l'œil nu les minutes d'angle (21 600 divisions par cercle, soit une division par demi-millimètre) sur un cercle de 3,5 m de diamètre.

Restons-en aux longueurs, que l'œil ne peut estimer au-delà du quart de millimètre. Avec le système vernier, on évalue le cinquantième, ce qui est tout de même un immense progrès. Ce progrès est d'ailleurs dû pour une bonne part au Suisse Pierre Roch qui, au début du siècle, remplaça le coulisseau percé d'une petite fenêtre par un coulisseau ouvert sur toute la longueur. Cette innovation capitale, non seulement facilitait l'usinage, mais permettait d'obtenir une précision jamais atteinte jusqu'alors.

Il faut mentionner ici que la mesure précise des longueurs, en mécanique, ne se fait pas en comparant la pièce avec une règle graduée, mais en la mettant entre les deux becs d'un pied à coulisse. Il n'y a qu'en laboratoire, ou pour la fabrication d'étalons, qu'on fait des mesures, le plus souvent optiques, de concordance entre des traits repères d'une finesse microscopique.

Dans la pratique courante, même en mécanique fine, le pied à coulisse au cinquantième suffit amplement pour des dimensions qui vont du centimètre au mètre, ou même au-delà, mais il a un inconvénient : la lecture du vernier. Outre les erreurs subjectives, dues à l'acuité visuelle ou à la position de l'œil par rapport aux repères gradués, il devient difficile à lire hors de toute zone très bien éclairée. Enfin, il faut beaucoup d'entraînement pour faire une lecture précise et rapide.

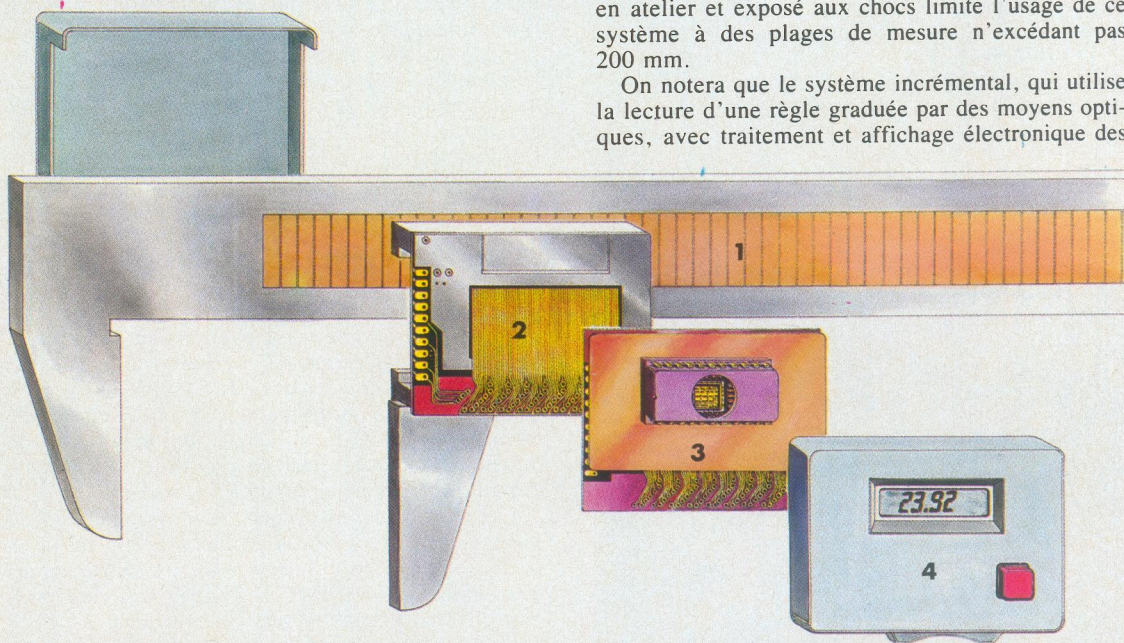
D'autre part, la généralisation, pour les grandes distances, de systèmes de mesure faisant appel à l'optique ou à l'électricité et affichant directement le résultat en chiffres a amené l'idée de faire la même chose en mécanique. La physique fournit un grand nombre de phénomènes mesurables où le résultat dépend directement de la distance. En magnétisme, par exemple, l'attraction qu'exerce un aimant sur un noyau de fer varie avec l'inverse du carré de la distance. On pourrait donc mesurer cette attraction, ou mieux, l'influence du champ magnétique sur une bobine parcourue par un courant — une variation de courant se mesure avec infiniment plus de précision et de facilité qu'une variation de force.

De même la résistance d'un conducteur dépend de sa longueur, la capacité d'un condensateur change avec l'écartement des armatures, l'influence d'un champ électrique diminue avec le carré de la distance, etc. Depuis quelques années, tous ces phénomènes ont été utilisés pour réaliser des systèmes de captage et d'affichage devenus réellement utilisables grâce aux progrès de l'électronique (circuits intégrés, diodes électroluminescentes, cristaux liquides, etc.). On utilise ainsi des systèmes de mesure des longueurs inductifs, capacitifs, potentiométriques, magnétiques ou opto-électroniques.

La plupart du temps il s'agit de dispositifs com-

plexes qui sont montés à demeure sur les machines-outils. Mais grâce à la miniaturisation des composants électroniques, deux de ces procédés ont pu être adaptés au pied à coulisse, à savoir l'opto-électronique et le capacitif. Ces deux procédés assurent une mesure sans contact, c'est-à-dire que la tête de lecture reçoit les informations d'un support sur lequel elle n'exerce aucun frottement mécanique.

Le système opto-électronique, dit aussi incrémental, est facile à suivre dans son principe : il comporte une règle de verre très finement graduée, et un lecteur à éléments photosensibles qui repère le passage des traits au centre d'une fenêtre ovale.



Sur la règle du pied à coulisse à affichage digital, une bande métallisée découpée en rectangles (1) constitue une série d'armatures fixes pour le condensateur différentiel. En face, sur le coulisseau, un groupe formé de 8 fois 8 bandes fines (2) constitue la série correspondante d'armatures mobiles. Deux de ces armatures sont toujours constituées de 4 bandes fines, suivies de 4 autres bandes immédiatement contiguës. Il y a toujours plusieurs rectangles fixes lus en même temps, c'est pourquoi il y a aussi plusieurs condensateurs différentiels, ce qui permet d'affiner encore la précision du résultat. Les variations de capacité sont traitées par le circuit électronique (3), qui commande l'affichage de la mesure par les cristaux liquides (4).

Tout déplacement de cette fenêtre se traduit par un défilement des traits, et le lecteur fait la somme de ces défilements plus la fraction de déplacement par rapport à un écart entier. Ce procédé peut être, en simplifiant, comparé à ce que serait la lecture optique d'un vernier classique.

En fait, les cellules photoélectriques sont sensibles aux franges de diffraction engendrées par le passage de la lumière à travers ce réseau de traits serrés et ces franges dépendent, au micron près ($1/1000^e$ de mm) de la position du réseau par rapport au lecteur. C'est donc un système très fin, comme tout ce qui fait appel à l'optique, et qui a fait ses preuves ; il est utilisé couramment sur les dispositifs de visualisation des cotes sur machines-outils et sur divers types de machines à mesurer.

La miniaturisation des composants a permis au

fabricant suisse Tesa d'appliquer ce procédé au pied à coulisse ; la règle en verre est logée dans la tige principale de l'instrument, tandis que le générateur et le capteur de lumière, les circuits électroniques, l'affichage et les batteries sont logés dans le coulisseau (voir dessin page 115). L'ensemble est assez encombrant, car il faut des piles puissantes qui sont fatalement volumineuses.

La précision du système incrémental, conçu pour donner généralement le millième de millimètre, est supérieure aux normes du pied à coulisse. Si celui-ci est mécaniquement correct, le résultat des mesures est très satisfaisant. Toutefois l'existence d'une règle en verre sur un instrument à main, à utiliser en atelier et exposé aux chocs limite l'usage de ce système à des plages de mesure n'excédant pas 200 mm.

On notera que le système incrémental, qui utilise la lecture d'une règle graduée par des moyens optiques, avec traitement et affichage électronique des

données, n'est pas encore une véritable jauge analogique indépendante de toute graduation. Par contre, le second système utilisé aussi sur des pieds à coulisse, en particulier par la firme française Roch, fait appel aux changements de capacité d'un condensateur quand les armatures se déplacent l'une par rapport à l'autre. Les distances sont donc estimées en fonction d'une loi de l'électrostatique et ne dépendent plus d'aucune graduation.

Le principe de base est celui du condensateur différentiel formé de deux armatures planes montées l'une à côté de l'autre, et placées en face d'une armature commune qui se déplace parallèlement au plan des deux premières (voir dessin ci-contre). Rappelons ici que deux plaques métalliques quelconques placées, sans se toucher, l'une en face de l'autre, et reliées à un générateur forment un

condensateur susceptible d'emmagasiner une certaine charge de courant.

L'énergie emmagasinée ne dépend que de trois facteurs : la tension appliquée aux armatures, la surface de ces armatures, et enfin leur écartement. Plus exactement, cette énergie est le demi-produit de la capacité par le carré de la tension ; la capacité, qui caractérise le condensateur, est, à une constante diélectrique près, le quotient de la surface des armatures par leur écartement ($C = k \cdot S/e$).

Les circuits électroniques permettent de mesurer les tensions et les énergies avec une extrême précision, donc les variations de capacité d'un condensateur. Or, pour modifier cette capacité, on peut jouer soit sur la surface, soit sur l'écartement. Dans le système Sylvac (système linéaire à variation de capacité) adopté par Roch, on va jouer sur la surface.

En se reportant au dessin de la page précédente, on voit qu'il y a trois capacités mesurables : celles du condensateur formé par l'armature commune et la première armature mobile ; même chose pour la seconde ; et enfin celle du condensateur constitué par l'armature commune et les deux armatures mobiles. L'évolution des capacités partielles est li-



Pour la lecture, la firme suisse Tesa a choisi le procédé opto-électronique. La précision est comparable à celle du système capacitif, mais l'encombrement dû aux piles est plus important.

néaire au milieu du champ de déplacement et insensible aux effets de bord (lors du passage d'une armature à l'autre). On peut alors mesurer facilement le rapport entre les capacités partielles et la capacité totale, et la valeur ainsi obtenue ne dépend que du déplacement des armatures mobiles. Les variations de la constante diélectrique n'ont pas d'influence notable dans la mesure où l'écartement des armatures reste constant et où l'isolant qui sépare les plaques est toujours le même.

Le rapport d'une capacité partielle par rapport à la somme des deux capacités étant une fonction linéaire du déplacement, on peut, par un montage électronique approprié, en tirer une tension qui sera, elle aussi, fonction linéaire du déplacement. Notons tout de suite qu'un tel dispositif ne constitue pas une échelle de longueur, mais un détecteur de

toute variation de distance, dans un sens ou dans l'autre, par rapport à la position des armatures mobiles au point de départ.

Dans un pied à coulisse, ce point de départ, qui va correspondre au zéro de l'affichage, peut être le zéro habituel — les deux becs sont en contact — ou tout écartement arbitraire qui servira de cote d'origine. Remarquons aussi que, dans la pratique on ne se contente pas d'un seul condensateur différentiel (3 armatures) car on rencontrerait vite des difficultés dès que la course de mesure est un peu longue. En fait, l'armature mobile est faite de 8 fois 8 bandes minces, tandis que l'armature fixe est faite de petits rectangles en cuivre logés dans la règle du pied. La mesure du déplacement correspond alors à la somme du nombre d'électrodes mobiles qui sont passées devant un petit rectangle, valeur à laquelle s'ajoute le déplacement relatif d'un groupe d'électrodes mobiles. Ce total correspond à la distance parcourue depuis le point de départ. En pratique l'armature fixe est réalisée selon la technique des circuits imprimés, cuivre sur résine époxyde. A l'origine, la bande de résine est entièrement cuivrée, mais on y trace de fines rainures où le cuivre est enlevé pour obtenir une succession de petits rectangles de 5 mm de large.

La bande est ensuite collée sur la règle, puis protégée par un tissu de verre imprégné de résine thermostable. La découpe en rectangle reste parfaitement visible à travers le verre, comme on peut le constater sur les photos de la page 111. Cette bande est isolée du reste de la surface, qui joue le rôle de masse, et chaque rectangle constitue la troisième armature d'un condensateur différentiel.

La tête de lecture, logée dans le coulisseau du pied, se trouve à environ un demi-millimètre de la règle ; elle comporte une série de 64 bandes larges d'un demi-millimètre. L'électrode 1 du condensateur différentiel est toujours constituée par 4 bandes contiguës, immédiatement suivies par 4 autres bandes formant l'électrode 2. Finalement, le condensateur différentiel est réalisé par l'un des 8 groupes de 8 bandes de la tête de lecture et l'électrode rectangulaire de la règle qui se trouve en face.

Etant donné que les rectangles dessinés sur la bande cuivrée de la règle sont électriquement isolés, seuls les rectangles faisant face à la partie active de la tête de lecture — donc ceux qui forment un condensateur différentiel avec les fines bandes de la tête de lecture — seront lus de façon capacitive par l'électrode de réception.

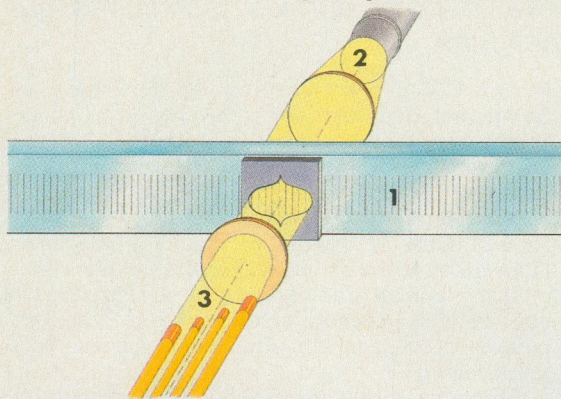
Le circuit électronique de traitement des signaux est situé au dos de la face lecture, et il est enfin recouvert par la plaquette à cristaux liquides qui assure l'affichage. Les piles sont de l'autre côté du coulisseau. Ainsi, toutes les connexions électriques sont logées dans le même ensemble et la configuration des armatures et du boîtier forme une cage de Faraday qui rend le montage insensible aux champs électriques extérieurs.

Par ailleurs, la lecture simultanée par plusieurs condensateurs différentiels ainsi formés par les 8 groupes d'électrodes de la tête de mesure et les rectangles qui leur font face, assure une réduction correspondante de l'influence d'une erreur fortuite de

découpe de la règle. Sur de grands instruments, la précision de mesure du système Sylvac est de l'ordre de 3 microns sur un demi-mètre. Appliqué au pied à coulisse Roch, instrument léger d'utilisation manuelle, la résolution atteint le centième de millimètre pour des règles allant de 20 cm à 1 m.

Mais il faut bien rappeler que ce système capacitif mesure essentiellement le déplacement du coulisseau d'une position à une autre ; l'ensemble calculatrice-affichage du système peut attribuer n'importe quelle valeur arbitraire, y compris zéro, à la position de départ. La mesure faite correspond seulement, et exactement, à la valeur du déplacement à partir de cette position de départ.

La première idée, sur un pied à coulisse, serait de régler le zéro à l'écartement zéro des becs et de ne plus toucher à rien. En fait cette solution serait mauvaise car l'affichage peut être influencé par l'usure des piles, par un déplacement trop rapide du coulisseau, par un choc, etc. ; à ce moment, toutes les lectures seraient fausses, et cela définitivement. En pratique, on procède différemment : le coulisseau porte un bouton de remise à zéro, celle-ci pouvant se faire à partir de n'importe quel écartement.



Dans la lecture optique, une règle en verre finement graduée (1) est éclairée par un système de diodes électroluminescentes (2). De l'autre côté, un groupe de cellules photosensibles (3) traduit les variations d'éclairement, dues au défilement des traits, en signaux électriques qui, après traitement par la partie calculatrice, seront affichés par les cristaux liquides.

Le plus souvent, bien sûr, on fera cette mise à zéro avec les becs fermés, et le pied à coulisse fonctionne alors comme un modèle habituel ; mais, s'il s'agit de vérifier des pièces par rapport à une pièce étalon, on fait la mise à zéro sur cet étalon et toute mesure faite sur les autres pièces indique alors l'écart, en plus ou en moins, par rapport à la pièce étalon. De même pour mesurer un diamètre, ou une profondeur dans un endroit peu accessible où la lecture directe serait impossible on appuie le bouton de remise à zéro au moment où les becs ont l'écartement voulu. Il suffit alors de retirer l'outil, puis de refermer complètement les becs pour lire, en valeur négative, la cote cherchée.

La lecture d'une valeur numérique directement sur un cadran est incomparablement plus commode, et nettement moins sujette à erreur, que l'estima-

tion à l'œil d'une coïncidence entre les traits de deux échelles graduées. Mais il faut rester prudent par rapport aux chiffres affichés, car il peut toujours y avoir un faible écart entre la cote réelle et la cote affichée. Pour commencer, l'appareil donne une valeur au centième de millimètre qui n'est valable que si la pièce mesurée ne présente pas d'irrégularités de surface supérieures au centième.

Il est par exemple courant qu'un axe cylindrique n'ait pas partout le même diamètre au centième de millimètre près. Par ailleurs, l'appareil lui-même présente une tolérance qui peut atteindre ± 1 centième ; enfin, la manière de prendre la cote, la pression exercée par la main sur le coulisseau, la moindre obliquité de la pièce entre les becs entraînent aussi des variations de l'ordre du centième. Aussi peut-on considérer le constructeur comme parfaitement réaliste quand il donne une marge $\pm 0,03$ mm entre la valeur affichée et la cote réelle.

Ainsi, quand l'appareil indique 84,28 est-on sûr que la dimension réelle se situe entre 84,25 et 84,31, et qu'elle a toute chance d'être inférieure à 84,30 et supérieure à 84,26. Comme avec les calculatrices, il faut se méfier des chiffres trop absolus : 84,28 cela signifie 84,28000... mm. Or, un instrument plus précis trouverait peut-être 84,287 qui, arrondi, donne 84,29.

Cela pour dire qu'il faut être prudent avec les valeurs numériques et, en ce sens, le pied à lecture digitale apporte un grand progrès : il mène à porter plus d'attention aux cotes réelles, et à se rappeler que la mécanique est l'art des tolérances. Avec les pieds à coulisse ordinaires à vernier, l'erreur pouvait être plus facilement escamotée et mise sur le compte d'une interprétation subjective.

Avec la lecture digitale, on sera plus prudent, et plus attentif. Il faut rappeler en plus qu'une lecture au centième est déjà d'une haute précision, et qu'il faut des outils et des conditions de mesures très spéciales pour atteindre le millième de millimètre (micron) : stabilisation de la pièce à mesurer, et de l'instrument de mesure pendant 48 heures dans une salle isotherme où la température est stabilisée à $20 \pm 0,1$ °C.

Toute autre prétention à atteindre le micron est illusoire ; le simple fait de manipuler à la main des cales étalon suffit à engendrer des tensions, dues à la dilatation thermique, qui modifient la longueur exacte au micron près. Atteindre le centième de millimètre avec un instrument standard est déjà un fort joli résultat, à condition que la partie mécanique de l'outil soit déjà usinée avec des tolérances encore plus serrées.

Il faut le dire, c'est le cas des pieds à coulisse fabriqués en France et en Suisse, mais ce n'est pas fatalement le cas d'autres pays. Les normes AFNOR (France) et VSM (Suisse) sont beaucoup plus sévères que les normes anglosaxonnes. A 100 mm, par exemple, la norme allemande DIN tolère une erreur de $\pm 0,06$ alors que les normes françaises et suisses ne tolèrent que $\pm 0,02$, soit trois fois moins. En matière de haute précision dans la mesure, qu'il s'agisse d'instruments classiques à vernier ou de lecteurs électroniques, la France et la Suisse restent toujours loin devant les autres pays.

Renaud de La TAILLE