

L'ELECTRONIQUE



COMMANDE

LA VIE MODERNE

RETRONIK.FR

FASCICULE N° 14

MESURES DE LONGUEURS OU D'ÉPAISSEURS

Nous avons dès 1953 consacré un de nos bulletins (N° 2) aux mesures de longueur et d'épaisseur par procédés électroniques.

L'évolution de la technique et l'apparition de nouveaux procédés de mesure justifient la nouvelle étude qui fait l'objet du présent bulletin.

L'évolution de la construction mécanique se traduit par la recherche d'une précision toujours plus grande. L'usinage des pièces mécaniques est effectué avec des tolérances de plus en plus réduites, de l'ordre de quelques microns. La mesure pratique en atelier de longueurs, d'épaisseurs, de diamètres ou alésages avec une précision de cet ordre pose des problèmes très délicats; l'emploi d'appareils de haute précision habituellement utilisés pour de telles mesures exige des opérateurs spécialement entraînés; les mesures sont relativement longues et la fidélité des appareils difficile à conserver.

L'électronique est venue apporter, ici encore, ses merveilleuses possibilités. Grâce à elle, la plus haute précision est sortie du laboratoire pour s'installer dans l'atelier.

L'appareil contrôlant au micron fait maintenant partie de l'outillage du fraiseur ou du tourneur, au même titre que le pied à coulisse. Mieux encore, incorporé à la machine elle-même, l'appareil de contrôle la commande et en provoque l'arrêt lorsque la cote exacte est atteinte.

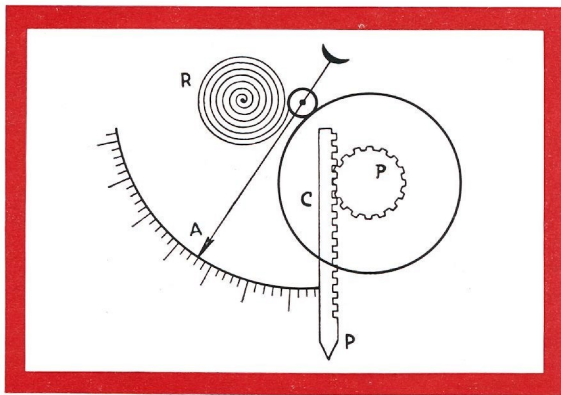


Fig 1. Principe du comparateur mécanique.

- P Palpeur.
- C Crémaillère.
- p Pignon.
- R Ressort de rappel.
- A Aiguille.

Le palpeur entraîne une crémaillère qui entraîne un pignon denté, lequel, par un train d'engrenages, déplace finalement une aiguille sur un cadran. Un ressort spiral agissant sur le dernier pignon maintient les engrenages en prise, supprime l'influence du jeu tout en assurant une pression à peu près constante sur le palpeur.

COMPARATEURS

Nous allons examiner rapidement les divers principes sur lesquels sont basées les méthodes électroniques de mesure de longueurs ou d'épaisseurs les plus fréquemment utilisées.

On peut d'abord ranger les méthodes électroniques en deux grandes catégories : celle dans laquelle un organe matériel ou palpeur vient prendre appui sur la pièce à mesurer, et celle dans laquelle la mesure est faite sans contact; la première est surtout utilisée pour le contrôle de pièces mécaniques, la deuxième pour le contrôle en cours de fabrication de produits défilant d'une façon continue (contrôle de diamètre de fil, d'épaisseur de feuillets, etc...).

Jusqu'ici, on utilisait des comparateurs mécaniques comportant essentiellement un système d'engrenages et de leviers déplaçant finalement une aiguille sur un cadran (fig. 1).

Ce genre d'appareil permet théoriquement d'obtenir une précision de l'ordre du centième de millimètre, mais il est prudent de ne pas toujours compter d'une façon absolue sur une telle précision.

Il existe également des comparateurs pneumatiques. Signalons que si leur précision est satisfaisante, leur rôle est strictement limité aux mesures; leur utilisation manque de souplesse : ils ne permettent, ni l'asservissement d'une machine-outil, ni la commande d'un système automatique de classement des pièces par dimensions : bonnes et hors cotes mini et maxi.

L'électronique apporte une solution rationnelle à ce problème. En effet, un tube électronique peut être comparé au levier amplificateur du comparateur mécanique. Plusieurs tubes électroniques en cascade constituent l'équivalent d'un système de leviers amplificateurs. L'amplification peut atteindre 100.000, sans que ce soit là une limite, et cela sans jeu, sans usure de pièces pouvant entraîner une perte de sensibilité ou de précision.

Un des avantages importants des comparateurs électroniques est que, faisant appel à une source d'énergie extérieure, ils permettent de mettre en œuvre, à la sortie, une énergie supérieure à celle qui est disponible au palpeur.

Cette énergie à la sortie permet donc d'actionner directement galvanomètres, relais, électrovannes ou moteurs.

Examinons comment peut être constitué un comparateur électronique (fig. 2). Il comprendra un palpeur P venant en contact avec la pièce à mesurer. Les déplacements du palpeur sont traduits par une variation d'une grandeur électrique. Un circuit électronique A amplifie cette variation et délivre un courant de sortie mesuré par un galvanomètre G. Ce galvanomètre peut être gradué directement en microns et fraction de micron.

Les comparateurs électroniques existants diffèrent selon le genre de grandeur électrique que les mouvements du palpeur doivent faire varier et suivant les types de circuits électroniques utilisés.

On peut imaginer des comparateurs électroniques utilisant la variation d'une capacité, d'une inductance ou d'une résistance, variation commandée par les déplacements du palpeur. La variation de la grandeur électrique choisie peut être mise en évidence par plusieurs procédés : il s'agit en somme de mesurer une capacité, une inductance, une résistance.

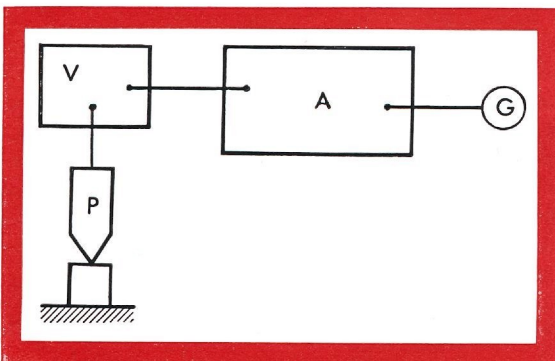


Fig. 2. P Palpeur.
V Circuit électrique comportant un élément de valeur variable avec la position du palpeur.
A Amplificateur électronique.
G Galvanomètre.

1) UTILISATION D'UN PONT DE SAUTY

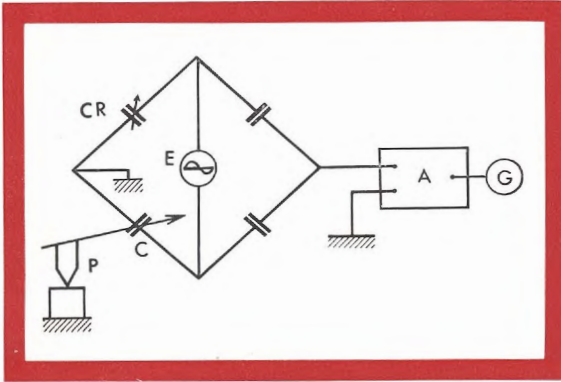


Fig. 3. Comparateur à pont de Sauty.

- E Générateur de courant alternatif.
- P Palpeur.
- C Condensateur actionné par le palpeur.
- CR Condensateur de réglage permettant d'équilibrer le pont.
- A Amplificateur.
- G Galvanomètre.

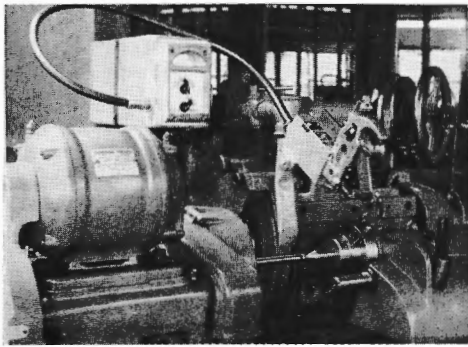
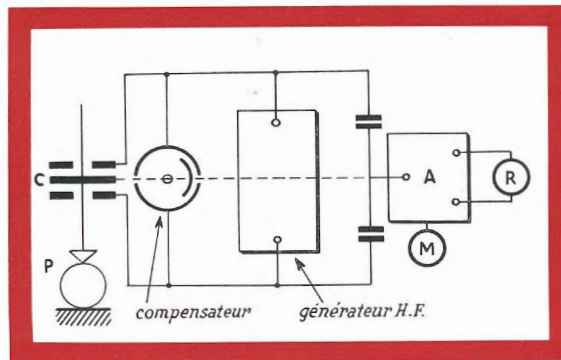


Fig. 4. Equipement Stop-Cote à deux temps sur rectifieuse universelle Gendron. Jauge en position relevée.



- P Palpeur.
- C Capacités variables.
- A Amplificateur.
- R Relais.
- M Milliampèremètre.

Comme ce sont les variations de la grandeur électrique qui doivent être décelées, il est particulièrement indiqué d'utiliser une méthode de zéro. La figure 3 montre le principe de l'utilisation d'un montage en pont de Sauty. Le palpeur est solidaire de l'armature mobile du condensateur variable C. Une cale étalon est placée sous le palpeur et le pont est équilibré par la manœuvre du condensateur de réglage CR. Si une pièce à mesurer est substituée à la cale, le déplacement du palpeur entraîne la variation du condensateur C : l'équilibre du pont est rompu et si l'appareil a été préalablement étalonné, la déviation du galvanomètre fait connaître la différence de hauteur entre la cale et la pièce à mesurer.

La réalisation industrielle d'un comparateur électronique basé sur ce principe pouvait présenter un certain nombre d'inconvénients.

En particulier, la lecture du déplacement du palpeur est mesurée par le déséquilibre du pont : ce n'est donc plus, à proprement parler, une méthode de zéro puisque ce déséquilibre est dépendant de bien des facteurs extérieurs (température ambiante, humidité, ionisation de l'air, tension du générateur, gain de l'amplificateur).

Il est possible de perfectionner le système. A titre d'exemple nous décrivons rapidement le dispositif connu sous le nom de « Stop-Cote » (E.A.M., Brevets Buisson) (1) qui élimine complètement les inconvénients signalés (fig. 4).

Il s'agit d'un dispositif autocalibreur permettant, par exemple de commander automatiquement le recul de la meule d'une rectifieuse quand la cote fixée est atteinte.

La figure 5 donne le schéma de principe de cet appareil. Le palpeur entraîne une armature mobile entre deux autres, cette armature est commune à deux condensateurs montés en série dans l'une des branches du pont. Quand la capacité de l'une diminue, l'autre augmente. Le déséquilibre du pont est ainsi beaucoup plus grand que dans le cas de la figure 3, dans lequel le palpeur ne provoque la variation que d'un seul condensateur du pont. La seconde branche comporte deux condensateurs égaux. Le pont est alimenté en courant à haute fréquence (450 kilohertz).

Un compensateur monté en parallèle avec les condensateurs solidaires du palpeur permet d'équilibrer le pont pour une cote donnée.

Le courant de sortie de l'amplificateur maintient au collage un relais dont l'ouverture arrête la machine. Lorsqu'au cours de l'usinage la cote voulue est atteinte, l'équilibre du pont est réalisé et le relais stoppe la machine. On voit que le dispositif travaille bien selon une méthode de zéro.

La sensibilité de l'appareil est considérable (amplification de 10.000) et à peu près constante pour toute la course de l'appareil. Elle atteint facilement le dixième de micron. Il faut noter que le dispositif « Stop-Cote » permet une très haute sensibilité (jusqu'à 1/50^e de micron).

Un autre type de comparateur utilisant le même système de palpeur est le comparateur électronique type « minijauge ».

Ce sont des équipements très simples, très mobiles et de faible encombrement offrant une grande facilité d'emploi (fig. 6). Leur sensibilité est réglable dans le rapport de 1 à 5 avec un maximum

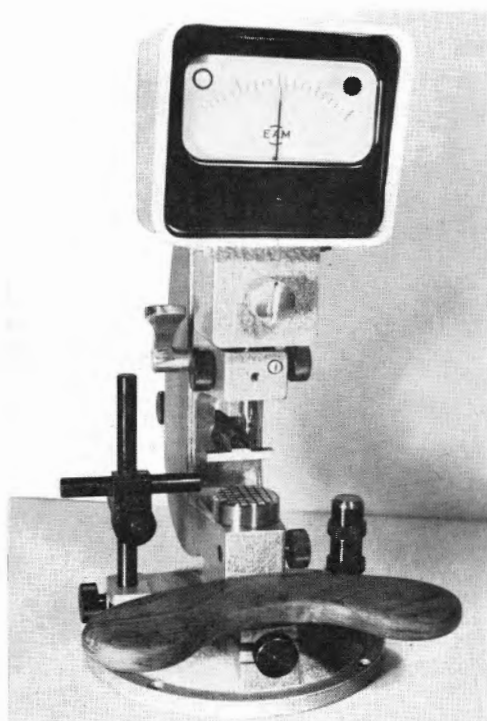


Fig. 6. Comparateur E.A.M.

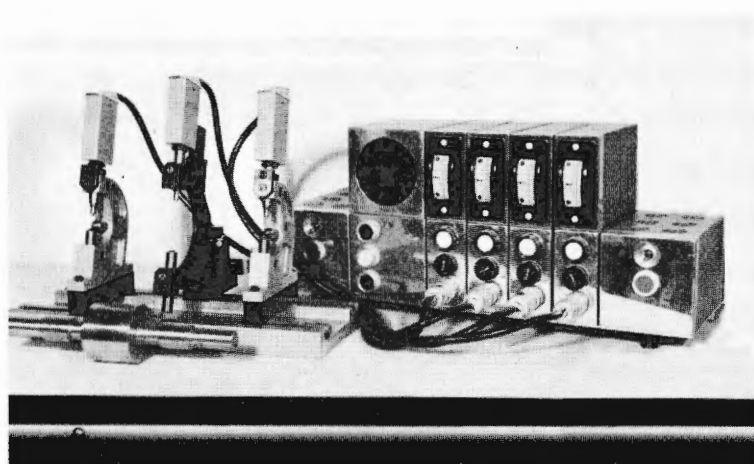


Fig. 7. Comparsateurs multidimensionnels Multicotes.

de $0,5 \mu$ par division. Il est intéressant de constater que la simplification de ces derniers par un meilleur emploi des tubes électroniques leur permet de concurrencer le prix des équipements pneumatiques.

Un équipement comprenant plusieurs comparateurs constitue un ensemble dit « multicotes » permettant une connaissance rapide des résultats du contrôle. Des signaux totalisateurs indiquent la catégorie de la pièce « excès de matière », « bon », « manque de matière ». Ils peuvent être utilisés pour des commandes automatiques ou bien la lecture de chaque dimension peut être faite avec précision sur les galvanomètres verticaux. Les amplificateurs élémentaires sont conçus pour être assemblés côte à côte (fig. 7).

2) UTILISATION D'UN CIRCUIT RÉSONNANT

La M.N.O.P. (11) a réalisé un micromètre (fig. 8) basé sur le dérèglement d'un circuit oscillant provoqué par la variation de la capacité d'un condensateur dont l'armature est solidaire d'un palpeur (fig. 9).

La résonance du circuit est constatée par l'appareil de mesure branché en parallèle sur le condensateur.

On conçoit que la fréquence d'oscillation du circuit est fonction de l'épaisseur de la pièce placée sous le palpeur.

Pour augmenter la sensibilité du système on adjoint au premier circuit un deuxième comportant le détecteur et l'appareil de mesure (fig. 10). Ce montage permet d'amplifier par effet de résonance l'action due à la variation de capacité du condensateur de mesure.

L'amplification du système peut atteindre 200.000, mais pour des mesures d'atelier une telle amplification est inutile. Une capacité variable au gré de l'opérateur, introduite dans le circuit de mesure, permet de faire varier l'amplification dans de larges mesures. L'action de cette capacité est de permettre de travailler avec un écartement plus grand des plateaux du condensateur de mesure, d'où réduction de la sensibilité (fig. 11).

La précision d'une mesure pratique est de l'ordre du dixième de micron.

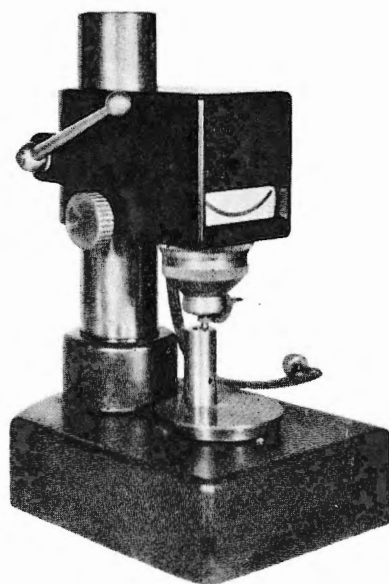


Fig. 8. Ultra-micromètre M.N.O.P.

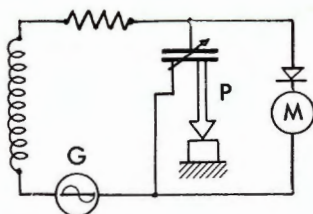


Fig. 9. **P** Palpeur capacitif.
G Générateur de courant HF.
M Appareil de mesure.

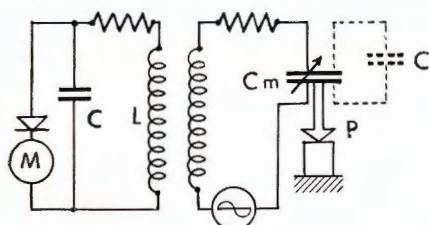


Fig. 10. **Cm** Condensateur de mesure entraîné par le palpeur P.
L, C Self et capacité constituant le circuit accordé couplé.
M Appareil de mesure.
Cs Condensateur d'appoint permettant de faire varier la sensibilité.

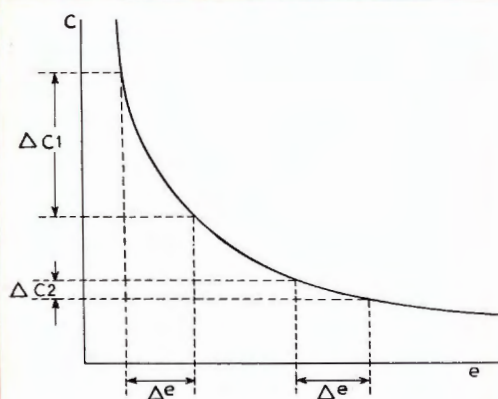


Fig. 11. Influence de l'écartement des plateaux sur la sensibilité. Des écarts égaux Δe dans la position des plateaux entraînent des variations de capacité ΔC_1 et ΔC_2 très différentes.

Le comparateur Manubel, construit par Manurhin (III), s'inspire du même principe général, mais les mouvements du palpeur capacitif produisent par déphasage une variation de la fréquence d'un oscillateur (fig. 12). La tension fournie par l'oscillateur est appliquée à deux circuits accordés formant discriminateur (fig. 13); un milli-ampèremètre différentiel alimenté par le discriminateur donne une déviation proportionnelle au déplacement du palpeur.

Le comparateur Manubel permet d'effectuer des mesures avec une précision de $1/10^6$ de micron.

Le comparateur Manubel permet, indépendamment des contrôles d'étalons industriels, de réaliser facilement le contrôle statistique d'une production de série, d'opérer un tri des pièces en fonction de leurs dimensions. Des dispositifs spéciaux permettent également d'adapter directement la tête de mesure sur une machine-outil pour provoquer automatiquement l'arrêt de la machine quand la cote est atteinte.

On voit que les comparateurs électroniques présentent un intérêt considérable pour les contrôles de précision; mais ce type d'appareil n'a pas modifié la technique d'utilisation du comparateur mécanique: la mesure d'une pièce se fait toujours en partant de la cote d'un étalon (cales Johanson par exemple) et en retranchant ou en ajoutant la différence lue sur une échelle.



Fig. 12. Comparateur Manubel, construit par la Manurhin, utilisé pour le contrôle de l'alésage d'un roulement.

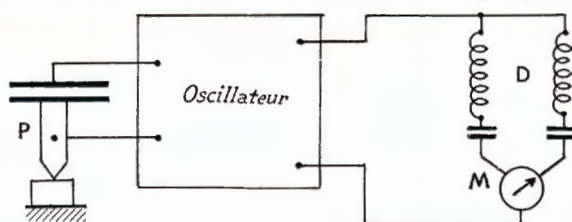


Fig. 13. **P** Palpeur capacitif.
D Discriminateur.
M Appareil de mesure.

MESURE D'ÉPAISSEUR PAR ULTRASONS

Deux méthodes peuvent être employées, soit la mise en résonance locale de la pièce soit la mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores (méthode de l'écho). Ces deux procédés offrent l'avantage de s'appliquer aussi bien à la matière première qu'aux pièces usinées dont une face seulement est accessible. De plus ils conviennent aussi bien aux matières métalliques qu'aux corps comme le caoutchouc, les isolants, les minéraux.



A) Mesure par mise en résonance locale de l'épaisseur de la pièce.

Des ondes ultrasonores de fréquence élevée et modulées en fréquence sont émises dans la pièce à contrôler par un transducteur appliqué sur la surface du corps. Les ondes sont réfléchies sur la face interne de la pièce, ce qui donne lieu à la formation d'ondes stationnaires. Chaque fois que la fréquence des oscillations est égale à une fréquence de résonance de la pièce (fondamentale ou harmonique) celle-ci entre à son tour en vibration et absorbe de l'énergie. Il en résulte une brusque variation de tension aux bornes de l'oscillateur. Cette variation après amplification et passage dans un « discriminateur de pointes » est appliquée aux plaques verticales d'un cathoscope dont le balayage horizontal est synchronisé par la modulation de fréquence et est proportionnel à celle-ci.

Lorsque le transducteur est appliqué sur une pièce on voit donc apparaître sur le cathoscope un ou plusieurs traits verticaux, dont la position définit avec précision la fréquence de résonance de la pièce, et par suite son épaisseur si l'on connaît la vitesse du son dans le matériau étudié, ou si l'on a étalonné l'appareil à l'aide d'une cale d'épaisseur.

Cette méthode de mesure a l'avantage d'être simple et facile à interpréter. Elle permet la mesure d'épaisseur comprise entre 1 et 120 mm dans les matériaux métalliques.

B) Mesure de l'épaisseur par la mesure du temps de parcours de l'onde ultrasonore.

Cette méthode consiste à émettre à l'aide d'un transducteur, plusieurs centaines de fois par seconde, un train très court d'oscillations ultrasonores. Le spot de l'oscillographe relié au générateur décrit à vitesse constante et réglable un trait lumineux. La face interne jouant le rôle de miroir plan, le faisceau ultrasonore est entièrement réfléchi et revient au transducteur fonctionnant alors comme récepteur. Connaissant la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le matériau étudié et le temps de parcours, on a l'épaisseur.

Ces procédés utilisant les ultrasons dans la métrologie sont appelés à avoir encore de grands développements.



MESURE DE L'ÉPAISSEUR D'UNE MATIÈRE ISOLANTE

Lorsque l'accès aux deux faces du matériau est possible, la mesure de l'épaisseur se fait aisément avec un procédé mécanique. Mais la mesure de l'épaisseur d'un matériau isolant dont une seule face est accessible nécessite de faire appel à un autre procédé basé sur la variation de capacité d'un condensateur en fonction de l'épaisseur de l'isolant ou diélectrique. La capacité est formée de deux armatures planes, disposées sur un même plan, que l'on vient appliquer sur la matière isolante à mesurer. Lorsque le diélectrique est l'air, la capacité a une valeur connue; cette valeur varie

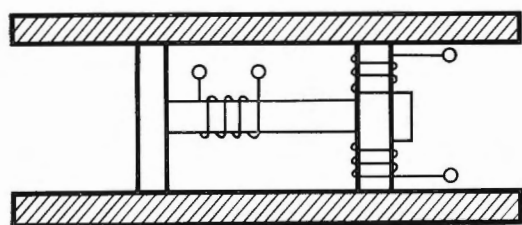
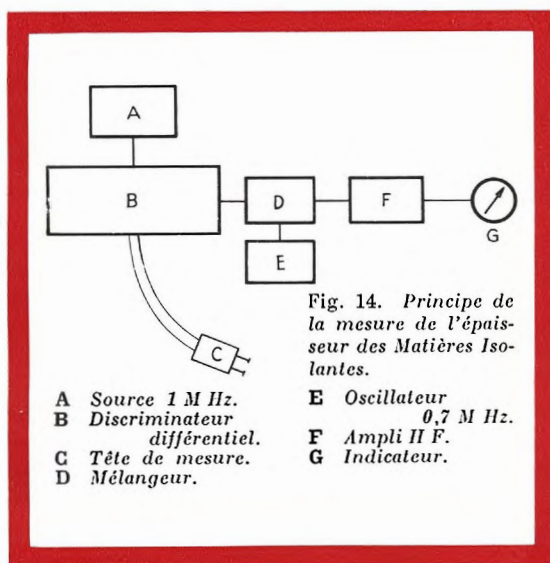


Fig. 15. Noyau en forme d'H.

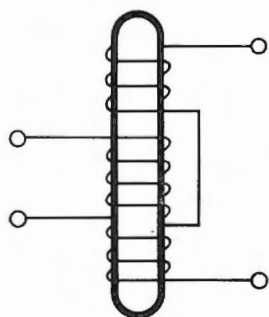


Fig. 16. Noyau pour la mesure des épaisseurs des tubes.

lorsque les armatures sont appliquées sur le matériau : variation qui est fonction de l'épaisseur de l'isolant compte tenu de sa constante diélectrique.

La figure n° 14 montre le schéma de principe de l'appareil de mesure. La tête de mesure comporte un condensateur relié à un circuit discriminatoire différentiel dont le point zéro est réglable. Une tension de fréquence 1 MHz, fournie par un oscillateur à quartz est appliquée au condensateur.

La tension HF à la sortie de ce discriminateur étant une fonction simple de la capacité, il faut opérer à niveau faible, ce qui nécessite une amplification très élevée que l'on obtient plus aisément en réalisant un changeur de fréquence suivi d'un amplificateur travaillant sur une fréquence plus basse. A la sortie de l'amplificateur un indicateur étalonné donne pour un isolant connu l'épaisseur par une lecture directe. La précision obtenue par ce procédé est de l'ordre de 5 %.

MESURE DE L'ÉPAISSEUR D'UN MATÉRIAU FERROMAGNÉTIQUE

Cette méthode est basée sur la variation du couplage magnétique existant entre deux bobinages (primaire et secondaire) lorsque leur noyau est en contact avec le matériau étudié. La variation de tension qui en résulte au secondaire est envoyée à un voltmètre qui peut être étalonné directement en épaisseur. Le système le plus précis est un noyau en H venant s'appuyer sur deux surfaces ferromagnétiques, l'une étant la pièce à mesure et l'autre une pièce étalon. Dans ce cas, le primaire est bobiné sur la branche centrale et le secondaire sur chaque branche terminale (fig. 15).

Il existe d'autres modèles et en particulier un modèle réservé pour la mesure de l'épaisseur des tubes. Ce dernier, très simple, comprend un primaire et un secondaire bobiné sur un noyau unique de dimension définie pour entrer dans un tube de diamètre donné (fig. 16). En déplaçant ce noyau à l'intérieur du tube, il est possible de faire la mesure de l'épaisseur tout le long du tube. En faisant tourner le capteur, on décèle les défauts d'excentricité qui se traduisent par une variation périodique de l'épaisseur lue sur l'indicateur.

Ces procédés permettent des mesures d'épaisseur de l'ordre de 5 millimètres à 10 % près.

De la même manière il est possible de mesurer l'épaisseur de revêtements non magnétiques (peintures, vernis, etc.) recouvrant un matériau magnétique. Le bobinage primaire est placé sur la branche centrale d'un noyau en forme d'E et les deux demi-bobinages secondaires sur les deux autres branches. La tension recueillie est inversement proportionnelle à la couche de peinture et l'appareil de sortie peut être gradué directement en épaisseur pour un matériau donné.

MESURE DE L'ÉPAISSEUR D'UNE BANDE DE MÉTAL NON FERROMAGNÉTIQUE

On sait que lorsqu'un métal non ferromagnétique se trouve dans un champ magnétique alternatif il y a absorption d'énergie électromagnétique par ce métal, du fait de la création de courants induits ou courants de Foucault. Si donc on fait passer une bande de métal entre deux bobines à noyau de fer, l'une étant excitée par une tension à 6.000 hertz et l'autre réceptrice, le courant induit dans cette dernière diminue en fonction de l'épaisseur du métal.

Le signal reçu par la bobine réceptrice est ensuite amplifié, redressé et appliqué à un voltmètre. Il suffit donc d'étalonner le voltmètre avec des cales d'épaisseur connue pour obtenir, par lecture directe, l'épaisseur de la bande de métal.

MACHINES A CLASSER

La rapidité de réponse associée à l'énergie disponible à la sortie permet de réaliser des machines à classer les pièces de série, en fonction des cotes obtenues.

Les machines à classer ou à contrôler effectuent automatiquement la distribution en catégories de pièces précises fabriquées en séries, telles que billes, galets, aiguilles, bagues, pastilles de germanium, etc. Elles sont conçues, soit pour le contrôle de plusieurs dimensions avec répartition en « rebut », « bon », « retouchable », soit pour le classement sur une dimension en plus de 3 catégories, par exemple 13, dont deux « hors cote ». Ces machines sont munies d'alimentations automatiques et mesurent les pièces une à une, à une cadence variant de 1800 à 6000 à l'heure. La distribution dans les casiers correspondant à la catégorie des dimensions se fait par l'intermédiaire de mémoires mécaniques actionnées pendant le temps de mesure. La précision est en général de l'ordre du micron, mais des classements par catégories inférieures au micron ($0,25 \mu$) ont déjà été obtenus sur des machines spécialement étudiées. La figure 17 représente une machine à classer les amorces de cartouche après mesure du diamètre extérieur et de l'épaisseur de la charge du détonnant.

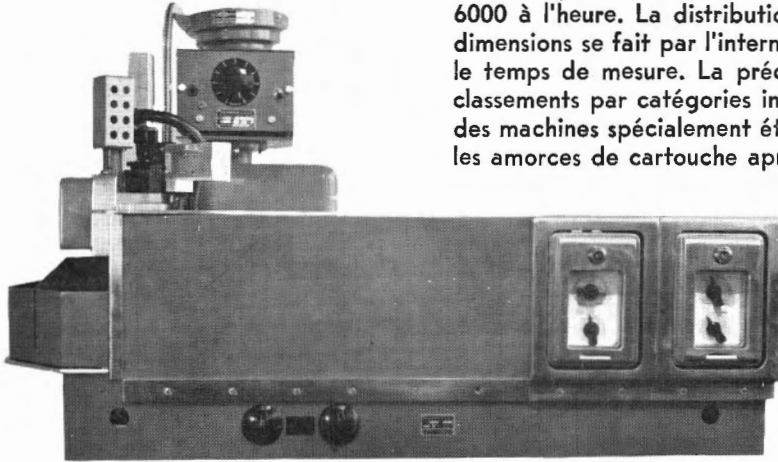


Fig. 17. Machine à classer les amorces de cartouche.

La fidélité des équipements électroniques permet même leur utilisation pour le tracé automatique des courbes de Gauss correspondant à la dispersion des cotes mesurées. Il est ainsi possible de définir de façon statistique l'erreur de forme, donc la qualité des pièces usinées. Le « centrage » d'une fabrication au milieu des tolérances peut ainsi être assuré d'une manière permanente.

MACHINE A MESURE INTERFÉRENTIELLE A LECTURE DIRECTE

Les méthodes interférentielles sont celles qui apportent à la mesure des longueurs le maximum de précision.

On sait que le principe de ces méthodes repose sur le fait qu'une lumière monochromatique traversant un système interférentiel donne lieu à l'apparition de franges alternativement sombres et brillantes.

Le nombre de franges dépend de l'épaisseur de la lame d'air interposée dans le système interférentiel, et augmente d'une unité chaque fois que l'épaisseur de la lame d'air augmente de $\frac{\lambda}{2}$, λ étant la longueur d'onde de la lumière utilisée.

On conçoit que l'on puisse mesurer une longueur en liant l'épaisseur de la lame d'air du système interférentiel à la longueur inconnue, et en comptant le nombre de franges que fait apparaître la modification d'épaisseur de la lame d'air.

Les mesures interférentielles sont extrêmement délicates par suite des faibles longueurs d'onde des radiations lumineuses et de la grandeur du nombre de franges correspondant à une épaisseur de quelques centimètres. Le calcul du nombre de ces franges, long et fastidieux, risque d'être entaché d'erreurs graves qui retireraient toute précision à la méthode.

Heureusement l'électronique permet de réaliser des machines à mesurer interférentielles d'un fonctionnement à peu près automatique qui, s'il n'utilise pas toute la précision des méthodes interférentielles, permet de lire directement le résultat de la mesure en chiffres apparents sur un compteur; l'appareil peut donc être employé par un personnel non spécialisé.

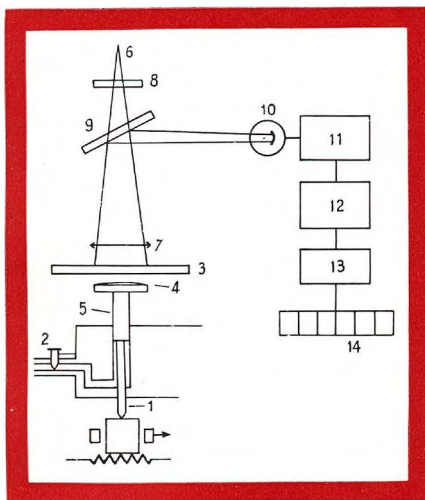


Fig. 18.

(*) Communication de M. Yves Grimod, Chef de Laboratoire à la « Précision Mécanique » (IV) à la Première Journée d'Etudes sur les interférences.

Le principe utilisé est le suivant (*) : un système interférentiel provoque, en se déplaçant, un défilement rapide de franges qui sont détectées par une cellule photoélectrique et enregistrées par un compteur totalisateur.

Le palpeur 1 (fig. 18) repose sur la pièce à mesurer, par exemple une cale à étalonner. Lorsque l'on retire la cale, le palpeur tombe sous l'influence de son poids, mais sa chute est ralentie par un frein à huile, réglable par le pointeau 2, et sa vitesse est de l'ordre de 1 mm/s.

Le système interférentiel est constitué par la lame de verre 3, munie d'un diaphragme et associée au miroir convexe 4 à très faible courbure. Le miroir est supporté par le piston 5 solidaire du palpeur 1.

Une source lumineuse 6 placée au foyer de la lentille 7 éclaire le système interférentiel, tandis que le filtre 8 assure le monochromatisme du faisceau lumineux.

Le miroir 4, sous la lame plane 3, donne des anneaux de Newton. Lorsque ce miroir s'éloigne de la lame 3, la plage du diaphragme présente des scintillations lumineuses qu'une glace semi-argentée 9 projette sur la cellule photoélectrique 10. Les impulsions issues de la cellule attaquent un amplificateur 11 de tension continue (en effet, au début du mouvement du palpeur la fréquence des impulsions est très faible, tandis que pendant la descente du piston 5 la fréquence est de l'ordre de 5 000 Hz).

Après écrêtement, dérivation et détection 12, les impulsions pourraient être comptées à l'aide d'un compteur décimal, mais il est possible de multiplier par voie électronique, en 13, le nombre d'impulsions par la demi-longueur d'onde de la radiation employée. Finalement le compteur 14 à six chiffres inscrit directement la cote en millimètres avec quatre décimales exactes.

La machine à mesurer interférentielle possède une capacité de 100 mm; elle permet d'apprécier le dixième de micron.

MÉTHODES DE MESURES SANS CONTACT

Les produits obtenus « en continu » par des opérations d'étirage, de tréfilage, de laminage se prêtent mal à l'utilisation du comparateur. Il serait en effet nécessaire d'arrêter la translation du produit pour effectuer la mesure, ce qui est absolument impossible dans certains cas (par exemple l'étirage ou le laminage à chaud). De plus, les mesures d'épaisseur de précision sur des pièces portées à haute température sont pratiquement impossibles, par suite de la dilatation du palpeur et de la butée du comparateur.

Les mesures d'épaisseurs sans contact présentent donc un intérêt certain. Nous allons décrire rapidement deux des procédés susceptibles d'être utilisés.

1) PROCÉDÉ PHOTOÉLECTRIQUE

Ce procédé permet de contrôler le diamètre extérieur de fils, tubes ou barres métalliques, ou de toutes autres matières opaques aux rayons lumineux. Le diamètre du produit sera comparé à celui de modèles calibrés maxi et mini.

Le produit défile devant une fenêtre rectangulaire, tandis que les deux calibres maxi et mini sont placés en permanence devant deux autres fenêtres. Une source lumineuse éclaire les trois fenêtres successivement grâce à un disque obturateur portant des ouvertures convenables. Une cellule photoélectrique, placée derrière l'écran comportant les fenêtres, reçoit la lumière passant à travers celles-ci (fig. 19).

Après amplification les tensions issues de la cellule sont appliquées aux plaques de déviation verticale d'un oscillographe cathodique, tandis qu'une tension de balayage est appliquée aux plaques de déviation horizontale, en synchronisme avec les premières et avec le mouvement du disque.

Trois traits horizontaux apparaissent sur l'écran de l'oscillographe. Une modification du diamètre de l'objet modifie la position de la trace de contrôle par rapport aux traces maxi et mini. La sensibilité du système ne dépend pas des dimensions de l'objet à contrôler, la déviation obtenue par un écart de dimension donné étant le même dans tous les cas. La précision obtenue est de $\pm 0,0025$ mm.

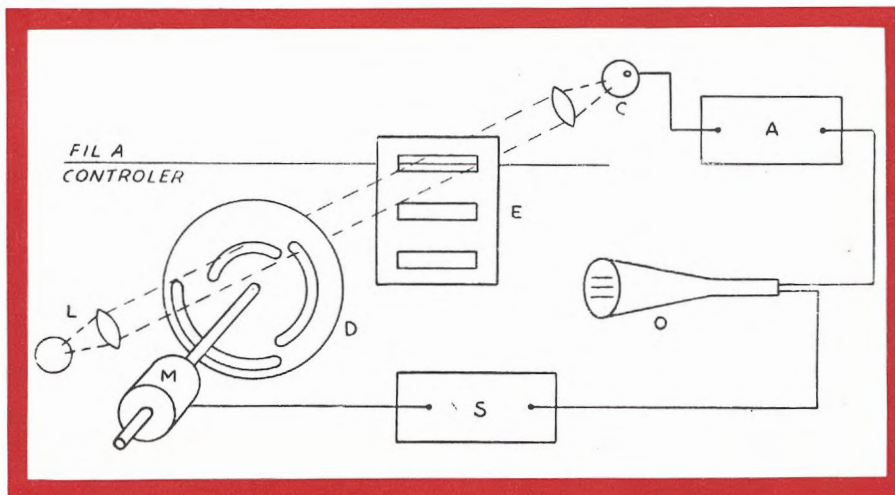


Fig. 19. L Lampe éclairant les ouvertures de l'écran E, à travers le disque obturateur D.
D Disque obturateur.
M Moteur d'entraînement du disque obturateur.
C Cellule photoélectrique.
A Amplificateur du courant photoélectrique fournissant la tension appliquée aux plaques verticales de l'oscillographe.
O Oscillographe.
S Synchroniseur et amplificateur alimentant les plaques horizontales de l'oscillographe.

2) PROCÉDÉ PAR MESURE D'UN RAYONNEMENT

A - Mesures par traversée directe de la matière.

Certains rayonnements (rayons α , β , γ et X) traversent les corps opaques, mais sont en partie absorbés par ceux-ci, la diminution de rayonnement étant proportionnelle au poids par unité de surface du matériau traversé. Il y a là un moyen particulièrement pratique pour mesurer le poids par unité de surface d'une matière donnée et cela sans contact entre la matière et l'équipement de mesure. Pour une matière donnée, de densité constante, on mesurera ainsi l'épaisseur du produit. Cette mesure est instantanée et indépendante de la vitesse de défilement du produit (fig. 20).

Les différents rayonnements α , β , γ et X ne sont pas employés indifféremment. Il faut tenir compte des propriétés de chacun d'eux.

Les particules α perdant rapidement leur énergie par interaction avec les électrons du matériau qu'elles traversent sont dites peu pénétrantes. Leur parcours maximum est de moins de 10 cm dans l'air et dans un matériau léger comme l'aluminium seulement de 0,06 mm. Pour cette raison les émetteurs de particules α ne sont pratiquement pas utilisés pour les mesures d'épaisseur.

Les rayons β présentent une certaine analogie avec les rayons α mais sont une centaine de fois plus pénétrants. Leur absorption par un matériau suit une loi exponentielle fonction du nombre d'électrons par unité de masse. Le poids maximum du matériau à traverser ne doit pas dépasser 500 ou 600 mg/cm²; ceci correspond à une épaisseur d'aluminium de 2 mm (fig. 21) ou d'acier de 0,8 mm.

L'utilisation d'un corps radioactif comme source de rayonnement β est particulièrement pratique. Ce procédé est applicable dans les industries de laminage de métaux en feuilles minces (acier pour lames de rasoir, fer blanc, papier pour condensateurs), les papeteries, les plastiques, l'industrie textile, celle des isolants.

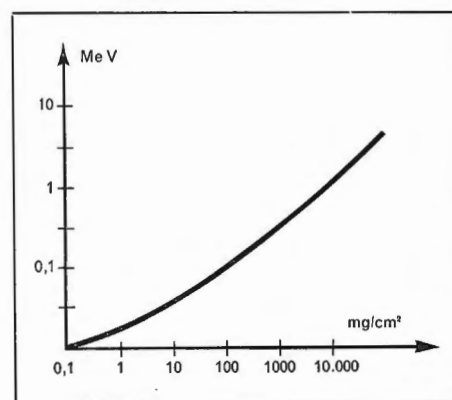
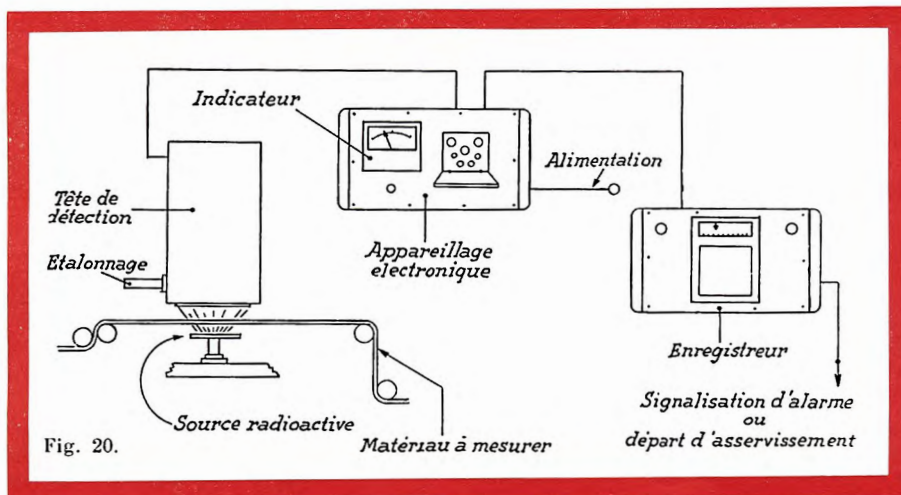
La « Précision Scientifique et Industrielle » (V) a réalisé un calibre (fig. 22) utilisant le rayonnement β qui permet de mesurer des poids au mètre carré de matériaux s'échelonnant entre 2 g et 7 kg (feuilles d'aluminium de quelques microns d'épaisseur, feuillets d'acier jusqu'à 0,8 mm, cuivre jusqu'à 0,66 mm, plastique jusqu'à 1 cm).

La précision des mesures est de l'ordre de 0,5 g/m² pour les produits légers et de 0,3 % pour les produits lourds.

Un autre appareil de fabrication Sirelec I.D.L. (VI) permet d'obtenir avec divers isotopes radioactifs les performances indiquées au tableau ci-contre.

De tels équipements peuvent également actionner directement le système de réglage de la machine pour maintenir constante l'épaisseur du produit.

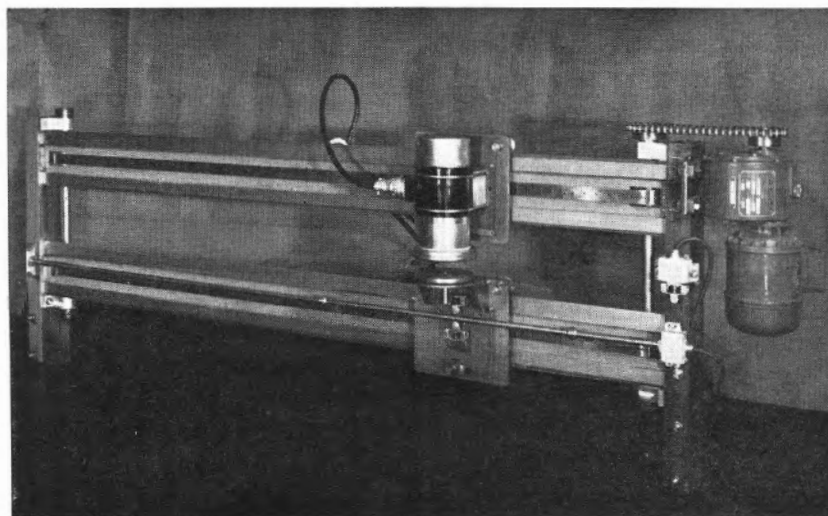
Pour des matériaux plus épais et plus denses il faut utiliser des radiations électromagnétiques telles que les rayons γ ou les rayons X qui sont très pénétrants, mais ils nécessitent un grand nombre de précautions dans la réalisation des dispositifs de mesure d'épaisseur et dans leur emploi, à cause du danger qu'ils présentent. De ce point de vue, les rayons X ont l'avantage d'avoir une énergie proportionnelle à la tension utilisée et de ne plus rayonner lorsque l'appareil est mis hors tension.



Par contre les rayons γ possédant une énergie convenant aux mesures sont émis par une source de faible dimension (thallium 170) sans autre appareillage et par suite sont d'un emploi plus facile et d'un prix de revient moins élevé. Cependant il faut aussi prendre en considération le fait que l'émetteur de rayons γ a une vie limitée.

A titre indicatif, nous décrivons ci-dessous la réalisation d'un dispositif de mesure continue de l'épaisseur de feuillard d'acier dans une aciérie.

Le feuillard quitte la cage de finition avec des températures plus ou moins élevées et à la vitesse de 600 m par minute. Un faisceau de rayons X traverse le feuillard de bas en haut immédiatement après sa sortie de la cage finisseuse; son intensité, après la traversée du feuillard, est mesurée à l'aide d'un écran fluorescent associé à une cellule photoélectrique. Le détecteur de rayonnement compare l'intensité du faisceau sortant avec celle du faisceau de référence, actionne un appa-



ISOTOPE UTILISE	Thallium 204	Strontium 90	Ruthenium 106
Durée de vie utile : années	5	3	1,5
Limite supérieure du poids du produit en mg/cm²	120	700	1200
Limite supér. de l'épaisseur du produit en cm :			
Papier (densité 0,8) ..	0,15	1,35	1,50
Matière plastique (densité 1,1)	0,11	0,56	0,89
Aluminium (densité 2,7) ..	0,045	0,23	0,41
Acier (densité 7,8) ..	0,015	0,063	0,125
Cuivre (densité 8,9) ..	0,013	0,061	0,122

reil de mesure dont l'aiguille indique directement l'épaisseur cherchée. Il est ainsi possible de mesurer des épaisseurs de feuillards chauds avec une précision de 2 %. Au besoin, on peut agir directement sur le réglage des cylindres du laminage pour maintenir constante l'épaisseur du feuillard.

Il existe également des équipements utilisant des sources de rayons γ pour la mesure de l'épaisseur des aciers compris entre 1,25 et 7,5 mm sur les trains de laminage à chaud. Certaines sources ayant la propriété d'émettre un spectre continu de rayons β et γ permettent alors de mesurer des épaisseurs de 25 μ à 7,5 mm, le détecteur étant formé d'un compteur à scintillations comprenant un cristal d'iodure de sodium et un photomultiplicateur. L'indicateur traduit les variations

de l'épaisseur nominale de la bande durant une période. Avec ce procédé l'erreur statistique est inférieure à $\pm 0,4 \%$ pour une épaisseur de 2,5 mm et à $\pm 0,3 \%$ pour une épaisseur de 4,5 mm.

B - Mesures d'épaisseur par rétrodiffusion.

Lorsqu'une seule face d'une paroi est accessible, on utilise la rétrodiffusion du rayonnement (back scattering). On peut ainsi, avec une source de rayons γ (cobalt 60) et un détecteur comprenant un compteur à scintillations équipé d'un écran à cristal d'iodure de sodium activé au thallium, mesurer des épaisseurs de tôles et de tubes d'acier jusqu'à 22 mm. Dans ce cas la source et le détecteur sont placés du même côté de la paroi, et le détecteur reçoit le rayonnement direct ainsi que le rayonnement rétrodiffusé par la pièce. On sélectionne les deux rayonnements en profitant du fait que les rayons rétrodiffusés ont moins d'énergie que les rayons directs. Pour cela le compteur à scintillations est suivi d'un trieur à simple canal agissant comme détecteur d'énergie. Cette méthode a l'avantage de ne nécessiter aucune protection entre la source et le détecteur, aussi la tête de mesure peut être petite et légère; de plus, elle permet de réaliser des mesures localisées par suite de la proximité de la source et de la pièce. Ce procédé est très intéressant pour la mesure des variations d'épaisseur des canalisations ou des tôles de navire.

On peut par ce même procédé mesurer l'épaisseur d'un revêtement sur un matériau de base. Dans ce cas le détecteur (chambre d'ionisation) est placé face de la source de radiations β dont elle est protégée par un écran. Les radiations sont en partie diffusées par la surface, en partie absorbées par le revêtement. Le reste traverse le revêtement et est réfléchi par le métal. Ce rayonnement réfléchi est encore en partie absorbé par le revêtement et la quantité reçue par le détecteur est proportionnelle au poids superficiel du revêtement (fig. 23).

Un autre procédé pour mesurer l'épaisseur des revêtements consiste à incorporer à ces derniers une charge radioactive. Cette méthode est employée pour le contrôle de l'épaisseur des émaux de céramique, d'un fil de rayonne, et des applications de peinture. Il est naturellement indispensable d'utiliser des isotopes radioactifs d'une durée de vie suffisamment courte pour que les utilisateurs des produits ne courent aucun risque.

Les divers exemples cités montrent l'apport considérable de l'électronique à la métrologie dans le domaine des mesures d'épaisseur. Grâce à l'électronique les mesures sont plus précises, plus rapides; certaines jusqu'ici impossibles (mesures sans contact) peuvent maintenant entrer dans la pratique courante.

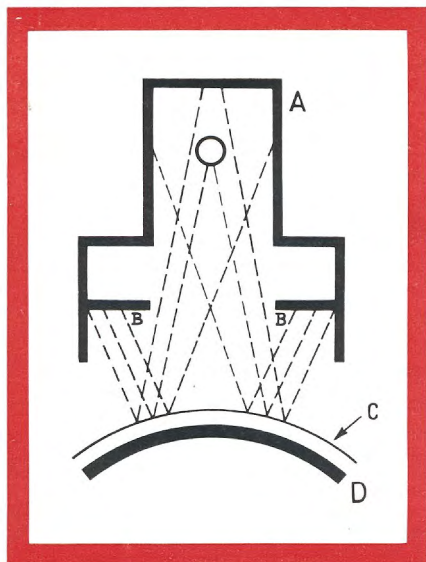


Fig. 23. Dispositif pour la mesure d'un revêtement par rétrodiffusion du rayonnement.

- A Chambre d'ionisation. B Source radioactive. C Revêtement. D Matériau de base.



LISTE DES CONSTRUCTEURS CITÉS DANS LE PRÉSENT BULLETIN

- I. E.A.M. Electronique Appliquée à la Mécanique
179, avenue Marguerite-Renaudin, Clamart (Seine).
- II. M.N.O.P. Mécanique Navale et Outillage de Précision
71 bis, quai d'Asnières, Asnières (Seine).
- III. MANURHIN Manufacture de Machines du Haut-Rhin
Mulhouse-Bourtzwiller (Haut-Rhin).
- IV. LA PRECISION MECANIQUE
11, rue Vergniaud, Paris (13^e).
- V. LA PRECISION SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIELLE
48, rue de Londres, Paris (8^e).
- VI. SIRELEC
21, rue Kléber, Issy-les-Moulineaux (Seine).

LAMPE MAZDA

COMPAGNIE DES LAMPES
SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 13 680 000 N.F.
DÉPARTEMENT TUBES ÉLECTRONIQUES
29, RUE DE LISBONNE - PARIS (VIII^e)

Tél. : LAB. 72-60 à 68 • Adr. Tél. MAZDALAMP-PARIS • R.C. Seine 54 B 5088