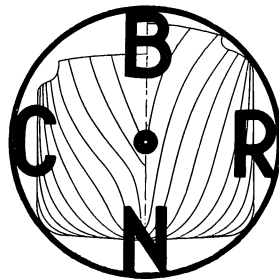


F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège

**APPAREILS MÉCANIQUES
DE
MESURE DE DÉFORMATIONS**



— 1949 —

Le Centre belge de Recherches navales (A.S.B.L.)
17, rue des Drapiers, Bruxelles

Conférence donnée à la tribune du Centre belge de Recherches navales, le 2 décembre 1949, dans le cadre des travaux de la Section I : « Structure de la coque du navire en vue de l'application de la soudure », travaux subsidiés par l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (I.R.S.I.A.).

Publication Ceberena SI/1

Prix : 50 Fr.

Appareils mécaniques de mesure de déformations

PAR

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège

Il y a longtemps que l'on effectue des mesures de déformations au moyen d'appareils mécaniques. D'abord dans les cabinets de physique du 18^e siècle (Réaumur, van Musschenbroek), puis dans les laboratoires et même sur les ouvrages d'art au 19^e siècle (Rabut, Mesnager, etc.). Mais ces mesures ne sont devenues fréquentes, notamment sur des constructions complexes (ouvrages d'art, véhicules, avions, navires, etc.), qu'à partir de l'époque où l'on a disposé d'appareils commodes et relativement peu coûteux, c'est-à-dire depuis environ un quart de siècle.

Le principe d'un instrument dû à OKHUIZEN a été perfectionné, rendu précis et pratique dans le *tensomètre de Huggenberger*. Il a fait l'objet d'une étude très complète de la part des professeurs L. BAES et L. VANDEPERRE. (« Contribution à l'étude de la déformation en un point d'un milieu matériel — Formules et procédés graphiques » — suivi de « L'extensomètre Huggenberger, description et emploi ».)

On trouvera dans ce mémoire, paru dans le fascicule de décembre 1929 du Bulletin de la Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industriels, tous les renseignements désirables sur le principe et les conditions d'emploi de l'appareil. Il a subi depuis des perfectionnements appréciables, qui n'en modifient pas le principe.

Ces tensomètres mesurent sur des bases de 20 mm, qui peuvent être ramenées à 10 mm par retournement du couteau fixe ou allongées à 100 et 200 mm par l'emploi de rallonges. Le déplacement relatif des couteaux est amplifié mécaniquement par double levier à couteaux; l'amplification est de l'ordre de 1000 à 1200. L'appareil porte une échelle d'environ 50 mm, graduée en mm (fig. 1). Une division correspond environ à 1μ de variation de longueur de la base de mesure, c'est-à-dire à une déformation spécifique de $1 : 20.000$ si la base est de 20 mm. Si l'on opère sur de l'acier, en tension uniaxe, la base étant dirigée suivant la direction de la tension, une division correspond à environ 1 kg/mm^2 de tension. Chaque appareil est taré; la sensibilité exacte résulte du coefficient de tarage.

L'appareil a l'avantage d'être léger et maniable. La fixation est délicate, aussi faut-il des opérateurs entraînés. Il y a des pièces de fixation standard, mais un laboratoire actif est conduit à confectionner des pièces de fixation ad-hoc de toutes formes pour divers cas d'utilisation.

Le tensomètre Huggenberger donne des résultats dignes de confiance lorsqu'il est possible d'effectuer des mesures plusieurs fois répétées et concordantes, donc surtout pour les mesures de déformations parfaitement élastiques sous l'effet de mises en charge renouvelables. Les premières mesures sont très fréquemment aberrantes, en raison du glissement ou du jeu des couteaux.



Fig. 1. — Tensomètre Huggenberger

On ne peut se servir de ces instruments pour des mesures uniques, quelle que soit leur durée. Ils ne conviennent pas notamment pour mesurer des déformations consécutives à un assemblage, par exemple par soudure. En outre, ils sont très sensibles aux ébranlements dynamiques et vibratoires (chocs, vibrations intenses), même au vent et aux intempéries, qui agissent sur les aiguilles très légères.

L'usage de cet instrument convient surtout au laboratoire, beaucoup moins à l'extérieur. Je m'en suis servi dès 1931 et dans la suite, au laboratoire comme en campagne. Les difficultés et les limitations de ce dernier emploi ont été parmi les raisons qui ont incité M. le Dr. R. DANTINNE, chef de travaux, à concevoir des appareils plus rustiques d'usage plus certain.

Entretemps, nous avons eu recours à un instrument d'un type très différent, que je crois pouvoir assimiler aux appareils mécaniques, puisqu'il est basé sur le principe des vibrations des cordes sonores. C'est l'extensomètre acoustique dont l'invention est attribuée aux ingénieurs français LEGRAIN et SABOURET. Monsieur A. COYNE a développé ce principe dans ses instruments, dont le point de départ est une note à la séance du 15 février 1932 de l'Académie des Sciences de Paris.

Je me suis servi dès 1931 d'un appareil de ce genre, appelé *télé-extensomètre acoustique du Dr Schaefer*, produit par la Société MAIHAK à Hambourg. Une communication sur cet appareil et son utilisation a été faite en collaboration par M. R. Dantinne et par moi à la séance du 11 mai 1932 de l'Association Belge pour l'Étude, l'Essai et l'Emploi des Matériaux (cfr Procès-verbal de cette séance).

Je renvoie à cette publication très développée en ce qui concerne le détail. Le fil type D 6 a été le plus couramment employé sur le chantier (fig. 2). Sa base de mesure est de 150 mm. Les deux extrémités du fil sont rendues solidaires de la pièce à essayer. Les déformations de cette pièce sont génératrices de variations de longueur du fil, qui font varier sa tension initiale, donc la hauteur du son produit par le fil qui vibre. Un petit électro-aimant placé vis-à-vis du milieu du fil reçoit une impulsion brève de courant et fait vibrer le fil de

mesure. L'électro-aimant fait ensuite office de microphone magnétique influencé par les vibrations du fil, agissant comme une armature oscillante. La vibration du fil est ainsi transmise à un téléphone ou à un haut-parleur, éventuellement à un oscillographe, par le moyen d'un amplificateur à lampes. La mesure se fait par une méthode de zéro. On compare à la fréquence du fil de mesure celle d'un fil de comparaison étalonné et l'on égale les fréquences par la méthode des battements, qui est très sensible, acoustiquement aussi bien qu'optiquement. On détermine ainsi la fréquence du fil de mesure

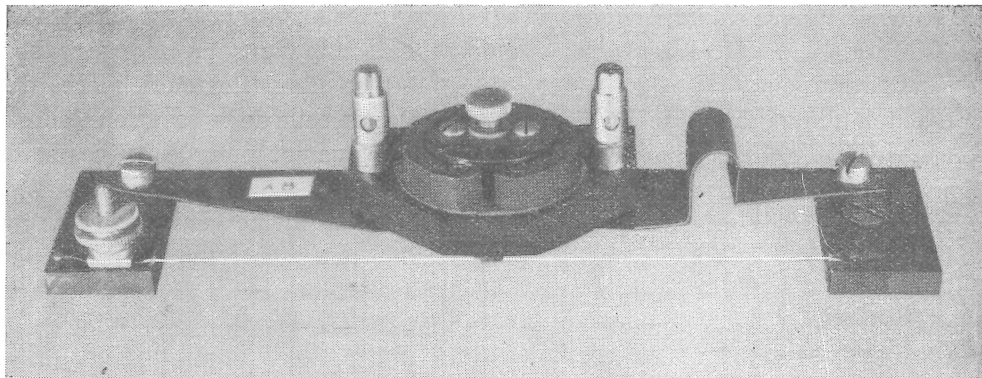


Fig. 2. — Extensomètre acoustique à corde vibrante Maihak

par celle du fil de comparaison amené à la résonance. Pratiquement, la déformation est proportionnelle à la variation de longueur du fil de comparaison. Le coefficient de proportionnalité est déterminé pour chaque fil par tarage et la variation de longueur du fil de comparaison est représentée par la variation de lecture d'un limbe gradué fixé sur la boîte-support du fil de comparaison. La sensibilité est grande. Une division du limbe de l'appareil dont je dispose correspond à environ $5,7 \cdot 10^{-6}$ de déformation spécifique. La précision pour des déformations assez grandes (de l'ordre de quelques dix-millièmes) est supérieure à 1 %. Le poste de mesure à fil de comparaison permet de contrôler successivement et à distance une douzaine de fils de mesure ou plus (fig. 3).

Cet appareil peut donner des résultats très satisfaisants au laboratoire et en campagne, pour des mesures de courte durée. Il est très sensible aux chocs et aux vibrations violentes. Il ne convient

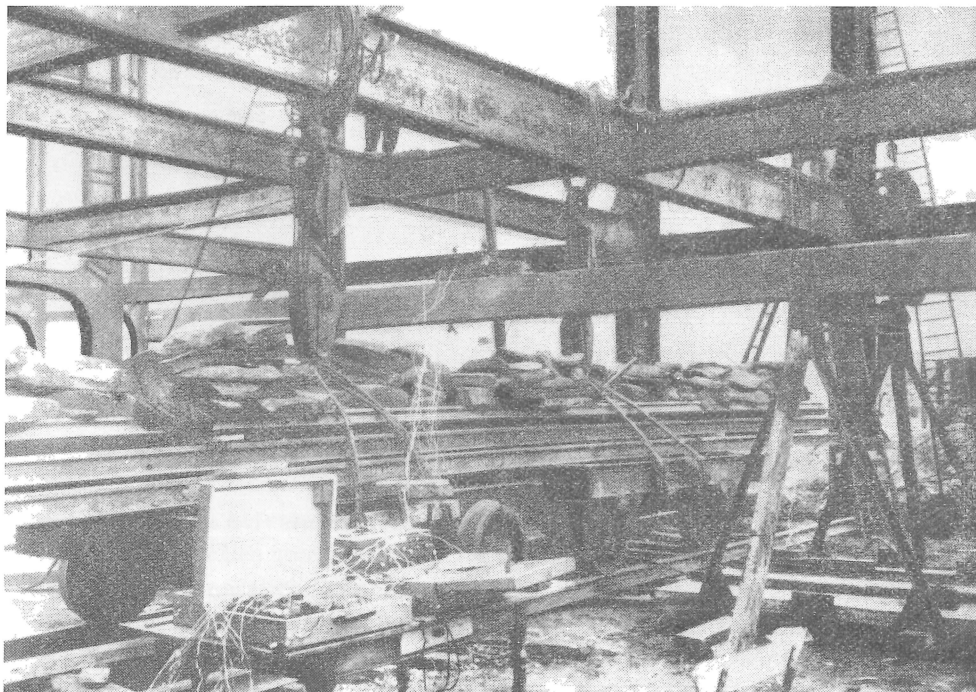


Fig. 3. — Photo d'un montage Maihak (Charpente de l'Institut de Chimie-Métallurgie)

pas pour les lectures de longue durée; le zéro varie (lecture initiale), en raison probablement de fluages dans l'appareil, le fil étant soumis à des tensions élevées, correspondant aux fréquences sonores. Le fil étant quelque peu distant de la surface de la pièce (6 à 7 mm), en cas de flexion de pièces de faible hauteur (tôles par exemple), la variation de longueur du fil diffère de celle de la base de mesure sur la pièce. Une correction est possible, mais l'appareil convient principalement pour les pièces soumises à une déformation longitudinale uniforme.

Les appareils précités, comme la plupart des appareils du même genre, exigent un tarage. Le dispositif de tarage doit être exact et sensible, plus sensible que l'instrument à tarer. Une méthode assez fréquente de tarage consiste à fixer les appareils à tarer sur une barre droite d'un métal bien stabilisé, à la soumettre à une tension connue dans une machine de traction précise et de contrôler les déformations par une méthode absolue et de grande sensibilité, par exemple l'élasticimètre à miroirs de Martens. Cependant la méthode est indirecte et la précision du tarage est aléatoire.

Il existe des appareils à étalonner, généralement optiques. Je dispose d'un *comparateur interférentiel*, utilisant le coin optique de PEROT et FABRY, construit par les Ateliers YVON et JOBIN de Paris, suivant les indications et les dessins établis en collaboration par M. le Dr R. Dantinne et moi-même (fig. 4). Un déplacement de $1/10^e$ de mm mesuré au moyen d'un vernier correspond à une variation de longueur de la base de mesure de l'appareil à tarer de 65.10^{-6} mm. Par exemple, une division d'un tensomètre Huggenberger correspond à près de 16 divisions du comparateur. Comme le déplacement possible est de 70 mm, une échelle de tensomètre peut être tarée très aisément, division par division. (cfr. R. DANTINNE — Comparateur interférentiel pour tarage des extensomètres — Congrès national des Sciences, Bruxelles 1935.)

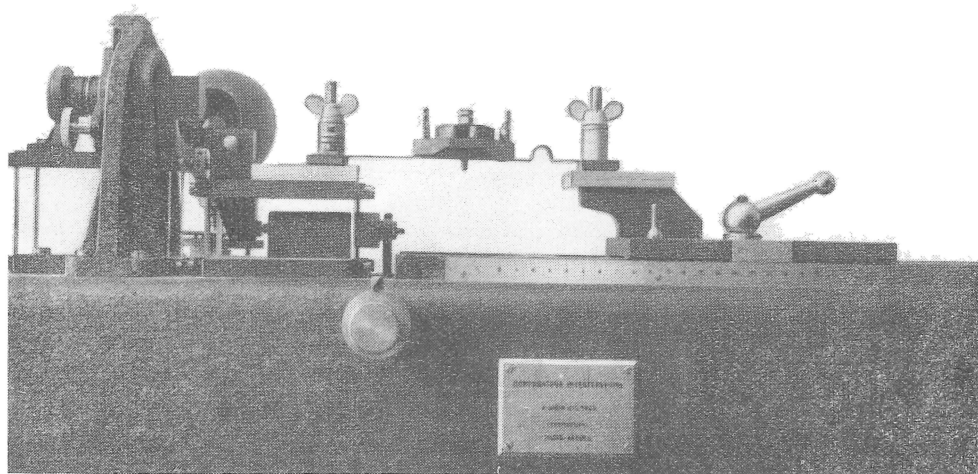


Fig. 4. — Comparateur interférentiel Yvon et Jobin

Le tarage est essentiel pour l'emploi assuré de ces instruments. Un nouveau tarage est fait périodiquement ou avant chaque opération importante.

En dépit de toutes les précautions prises, les mesures de déformation en campagne sont difficiles, souvent décevantes. Les actions atmosphériques causent des perturbations (insolation, variations de température, vent, pluie, poussières, etc.). Même dans les meilleures conditions, des mesures un peu développées demandent une organisation et une coordination parfaites. Naturellement, si les mesures sont effectuées sur une construction mécanique ou en cours d'exécution, elles peuvent être ren-

dues illusoire en raison des chocs et des vibrations. Enfin, la durée et la répétition des mesures, en cas de réversibilité absolue, peuvent être d'une grande importance, ainsi qu'il est indiqué plus haut.

Il faut tenir compte de tous ces facteurs afin d'effectuer les mesures dans les conditions qui assurent leur efficacité, à défaut de quoi elles sont aberrantes et sans signification, même susceptibles éventuellement d'induire en erreur. J'ai trouvé souvent dans la littérature technique des relations de mesures qui dénotaient l'inexpérience ou l'ignorance de leurs auteurs; il s'agissait souvent de déformations de soudure. Bien entendu, s'il s'agit de déterminer un état plan de déformation à la surface d'une pièce, faut-il encore opérer assez de mesures en chaque point, selon les principes de la théorie des petites déformations. Ceci est commun à tous les types d'instruments. Sauf sur une arête, une mesure unique de déformation est sans signification et pas susceptible d'être transformée en tension. Des incorrections se trouvent aussi assez souvent à ce sujet dans les publications, notamment à propos de soudure.

Il en résulte que les mesures de déformations et de tensions sont, en fin de compte, l'affaire de personnes ou de services assez entraînés, expérimentés et compétents, c'est-à-dire de spécialistes.

Il ne faut d'ailleurs pas attendre trop des mesures de déformations; on ne mesure jamais que des déformations moyennes sur la longueur d'une base plus ou moins courte, mais qui théoriquement devrait tendre vers zéro. On parvient à mesurer sur des bases de l'ordre de 2 à 1 mm (appareil Solex, extensomètre Johansson), mais ces appareils sont particulièrement fragiles ou délicats ou d'emploi compliqué et coûteux; ils ne conviennent pas normalement pour l'emploi en campagne, sauf en cas de conditions exceptionnellement avantageuses.

Quand on veut déterminer un état de tension plan, par exemple en un point de la surface d'une pièce, on considérera trois ou quatre bases différentes dont le point occupe le milieu commun. On mesure les *déformations moyennes* suivant ces bases et on les traite selon la théorie des déformations *en un point*. Il y a donc une erreur systématique, qui est faible si la variation des déformations dans l'étendue de la base est modérée. Mais, au voisinage d'une soudure par exemple, cette variation peut être rapide. Dans certains cas, on opère trois mesures selon trois côtés d'un triangle équilatéral dont le point de mesure est le centre et on opère sur les déformations moyennes mesurées suivant ces côtés, *dont aucun ne passe par le point*, pour en déduire la déformation au point considéré.

On voit donc que les méthodes usuelles ne sont que des *méthodes approximatives*. La mesure des déformations par la diffraction des rayons X réduit certes la base de mesure au minimum, mais on sait que la sensibilité et la précision finales de cette méthode ne sont pas garanties.

Aussi semble-t-il qu'en fin de compte et pratiquement, il faille adopter un compromis entre tous ces éléments complexes, ne pas exagérer une sensibilité et une précision illusoire et rechercher une commodité suffisante qui paraît la meilleure garantie de l'efficacité. Ce sont ces principes, tirés de l'expérience, qui ont inspiré mon collaborateur le plus ancien, M. le Dr. R. DANTINNE, dans la conception de quelques appareils, utilisés avec succès pour de très nombreuses mesures et qui ont encore été utilisés avec le plus de satisfaction lors des mesures effectuées à la demande de la Section I du Centre Belge de Recherches Navales aux Chantiers d'Hoboken de la S. A. John Cockerill. Pour leur description détaillée, je me réfère à la note de M. R. DANTINNE, parue dans le tome II, 1947 du Bulletin du C. E. R. E. S. (Extensomètres, fleximètres et clinomètres réalisés au Laboratoire).

L'extensomètre G. C. se compose de trois barres rigides en acier étiré dont deux ont leurs extrémités fixées sur la pièce. Elles sont disposées dans le prolongement l'une de l'autre et liées chacune à la troisième, qui leur est parallèle, par deux lames flexibles parallèles. Par le jeu des deux parallélogrammes articulés ainsi constitués, les deux premières barres subissent nécessairement un mouvement relatif de pure translation suivant leur alignement, égal à la variation de longueur de la base de mesure (fig. 5). L'amplitude de ce mouvement peut être mesurée par un des appareils du type précédent mais le plus commode est un comparateur à cadran au $1/100^e$ ou, selon l'occurrence, au $1/1000^e$ de mm.

La longueur de la base de mesure est normalement de 250 mm. Elle peut être réduite à 125 ou 100 mm ou portée éventuellement à 500 mm. La fixation de l'instrument à la pièce se fait par des pointes coniques et un dispositif de serrage adéquat : étriers, boulons ou vis. M. DANTINNE a notamment imaginé une fixation souple et élastique qui ne demande que le forage d'un trou peu profond ne perforant pas la pièce.

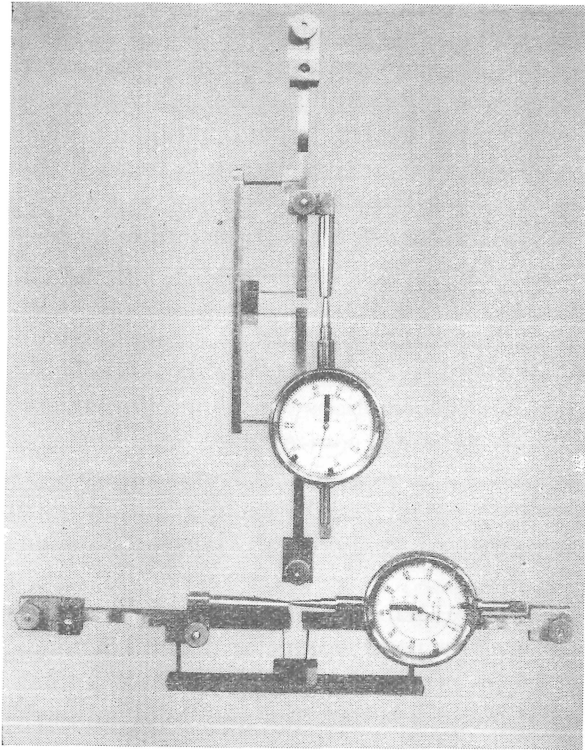


Fig. 5. — Extensomètre G. C.

Ces appareils sont très robustes et aussi sensibles que les précédents (le micromètre au $1/1000^{\text{e}}$ de mm mesure une division du cadran pour 1μ de déplacement, comme le tensomètre de Huggenberger). Mais la base de mesure étant assez grande, une telle sensibilité n'est généralement pas nécessaire et le comparateur au $1/100^{\text{e}}$ de mm suffit. L'appareil est fidèle et la durée de la mesure est indifférente. Il est peu sensible aux intempéries et facile à protéger. Il n'admet naturellement pas les chocs brutaux. De ce fait, il ne convient pas avec assurance pour des mesures effectuées, comme à Hoboken, sur un navire en construction, où les actions dynamiques sont incessantes.

Pour des mesures de durée quelconque et répétées à des intervalles quelconques, entièrement à l'abri des effets dynamiques, c'est-à-dire pratiquement effectuées dans les meilleures conditions en campagne et sur les chantiers, il faut recou-

rir aux déformètres amovibles. Le prototype est le *déformètre de WHITTEMORE*, fabriqué en Europe par M. A. HUGGENBERGER. Il se compose de deux barres en acier, dont les extrémités recourbées sont munies de deux pointes coniques et dont la distance constitue la base de mesure (par exemple un pied anglais). Dans leur majeure partie, ces barres sont droites et parallèles. Elles sont réunies par deux lames élastiques parallèles, de telle sorte que le parallélogramme articulé ainsi constitué assure un déplacement relatif parallèle des deux barres, égal à la variation de distance des pointes. Celles-ci sont sur une droite équidistante et parallèle aux deux barres (fig. 6).



Fig. 6. — Schéma du déformètre Huggenberger

Un comparateur à cadran, (par exemple au $1/10000^{\text{e}}$ de pouce) est fixé à l'une des barres; sa touche est en contact avec une butée de l'autre barre. Ainsi on lit sur le cadran du micromètre la variation des distances des deux pointeaux.

Pour mesurer, on repère une base sur la surface de la pièce. Un gabarit en acier porte deux pointeaux distants d'une longueur égale à la base de mesure de l'instrument. Il permet de faire deux empreintes de repère à la surface de la pièce, par de légers coups de marteau sur le gabarit. Ensuite on fore suivant ces repères deux trous coniques, au moyen d'une mèche spéciale, trous dont la conicité est identique à celle du déformètre. Les pointes du déformètre sont engagées dans ces trous pour les

mesures. Les effets des variations de température sont éliminés en rapportant avant chaque mesure la longueur de la base du déformètre à un étalon d'invar.

L'appareil a un inconvénient majeur, la difficulté d'engager les pointeaux coniques toujours d'une manière identique dans les trous coniques. Un cône n'est superposable à un cône que dans une position. Il n'est pas rare, lorsqu'il s'agit de mesurer près d'un joint soudé, que les trous coniques aient subi de légères rotations. Dès lors, les pointeaux ne s'adaptent plus parfaitement et il en résulte des erreurs de mesure qui peuvent être relativement importantes. D'ailleurs, lorsque les pointeaux sont engagés dans les trous, si l'on incline l'appareil vers la droite ou vers la gauche de son axe, on peut provoquer des variations de lectures de plusieurs divisions.

On remarquera que le mouvement relatif des deux barres n'est pas seulement parallèle à l'axe, mais aussi transversal. De ce fait, la touche du comparateur frotte sur la butée, ce qui n'est pas désirable.

Monsieur DANTINNE a supprimé ces inconvénients, le principal en substituant aux pointeaux coniques des billes sphériques de 2 mm de diamètre, serties aux extrémités de la base de mesure de l'instrument. Les repères coniques sont remplacés par des empreintes sphériques de même diamètre. Quels que soient les déplacements, la bille sphérique est toujours superposable à l'empreinte (fig. 7, c). Ce système donne toute satisfaction.

Pour éviter le déplacement relatif transversal, les barres mobiles du déformètre sont dans le prolongement l'une de l'autre (fig. 7, a) ou l'une d'elle est dédoublée de part et d'autre de l'autre (fig. 7, b).

Vers la fin de la dernière guerre, un appareil du dernier type a été réalisé au Laboratoire. Destiné à des mesures en laboratoire, sur des pièces horizontales, il a été exécuté en acier étiré, avec un encombrement et un poids assez considérables, favorables à la stabilité. L'appareil est équipé d'un comparateur au $1/1000^e$ de mm et la base de mesure est ajustable à 12, 20, 40, 80 et 100 mm. Une règle de comparaison, en acier ordinaire (l'invar n'était pas accessible à l'époque de l'exécution) permet l'élimination des effets de température dans des limites étroites.

Cet appareil a donné d'excellents résultats en laboratoire (fig. 8). Il a été employé à Hoboken, pour les essais de la Section I du Centre Belge de Recherches Navales. Bien qu'il n'ait pas été réalisé pour de telles mesures, c'est l'appareil qui a convenu le mieux au programme. Il est très satisfaisant pour les mesures horizontales vers le dessous, moins précis pour les mesures verticales et peu adéquat pour les mesures au plafond. Son encombrement le rend aussi impropre aux mesures dans les angles. Il serait possible, actuellement, de réaliser le même appareil avec un moindre encombrement, un moindre poids (duralumin) et avec un micromètre au $1/1000^e$ de millimètre de plus petit format. La base de mesure pourrait probablement être réduite à 10 mm.

Avant la confection d'un appareil de ce type, un autre déformètre à billes de 20 mm de base de mesure, au $1/1000^e$ de mm, mais équipé d'un micromètre au $1/100^e$ de mm, avait été confectionné

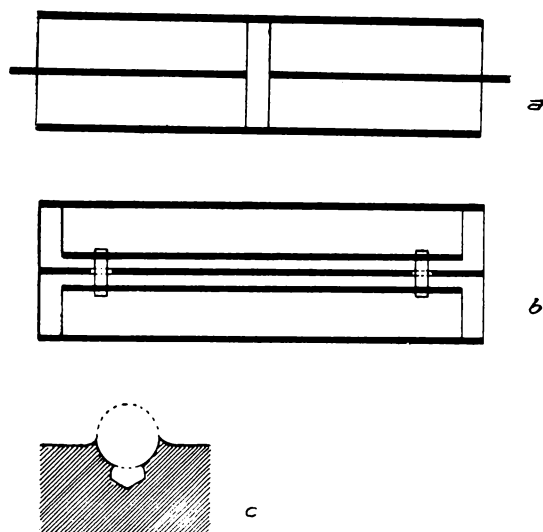


Fig. 7. — Schéma du déformètre G. C.

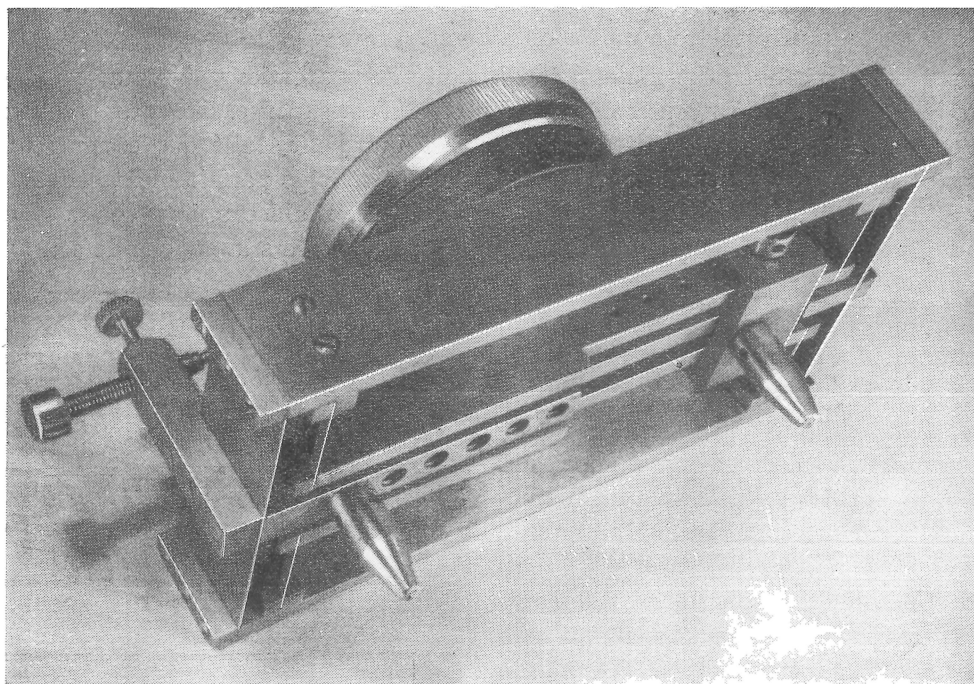


Fig. 8. — Déformètre G. C. à billes, bases de mesure multiples.

au laboratoire pendant la guerre (fig. 9). Il ne permet les mesures qu'en station horizontale supérieure, la gravité intervenant dans la mesure. Cet appareil n'a été employé qu'au laboratoire. Il a été décrit dans mon ouvrage intitulé « Recherches, études et considérations sur les constructions soudées ». Il est surpassé par l'appareil plus récent.

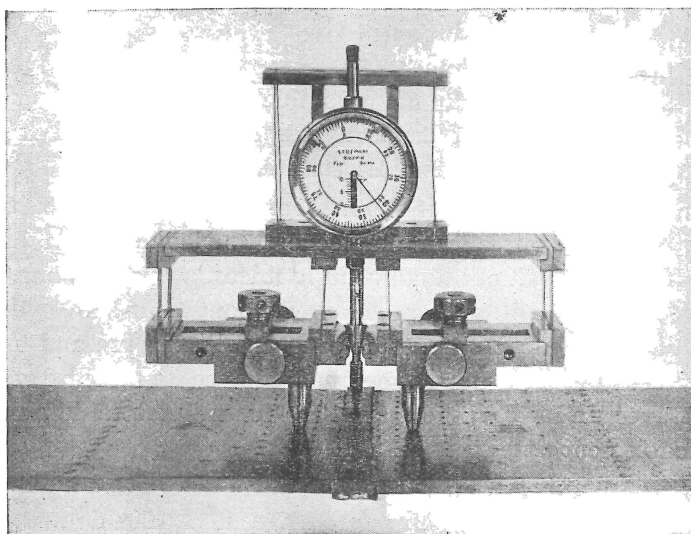


Fig. 9. — Déformètre G. C. à plongeur

Après la dernière guerre, l'extensomètre ohmique nous est venu des Etats-Unis comme une révélation, d'ailleurs étayée par une intense propagande. Nous en avons naturellement utilisés, au laboratoire et aussi au chantier, notamment à Hoboken. Il n'entre pas dans mon sujet de vous parler de ces extensomètres; mon Collègue M. SOËTE exposera sans doute ce qu'il faut penser des résultats qu'ils ont donnés dans les conditions qui prévalent sur un chantier naval. Personnellement, je suis convaincu que dans tous les cas où leur emploi est possible, les appareils mécaniques de mesure de déformations sont susceptibles de donner des résultats pratiques satisfaisants et contrôlables, en raison de la simplicité de leur principe et de leur manipulation.
