

CONCOURS INTERNATIONAL ARCOS 1950

Organisé par LA SOUDURE ELECTRIQUE AUTOGENE, S.A. - Procédé ARCOS, Bruxelles,
à l'occasion du XXX^e Anniversaire de sa fondation.

MÉTHODE DE MESURES DES DÉFORMATIONS ÉLASTIQUES ET PLASTIQUES ET DES TENSIONS DE SOUDURE

N.d.l.R. — Nous avons publié sous ce titre, dans le numéro 121 de la revue Arcos, un mémoire de M. Rudolf Gunnert, Ingénieur Chef du Laboratoire de Soudure auprès de la Svenska Aktiebolaget Gasaccumulator à Stockholm-Lidingö, Professeur à l'École Technique Supérieure Chalmers à Gothembourg, mémoire auquel il a été décerné une mention hors concours.

M. F. Campus, Recteur de l'Université de Liège, nous a fait part de certaines observations à propos de la communication de M. Gunnert.

Par souci d'objectivité et principalement dans le but d'approfondir la question importante des déformations, nous publions ci-dessous les remarques de M. F. Campus.

Méthodes de Mesures des Déformations Élastiques et Plastiques et des Tensions de Soudure des Aciers

Communication de F. CAMPUS, Recteur de l'Université de Liège.

DANS le N^o 121 de la Revue Arcos d'avril 1951, une communication de M. R. Gunnert portant le même titre a fait état d'une méthode de mesure de tensions résiduelles à laquelle il attribue mon nom. J'ai adressé à ce sujet une correspondance à M. R. Gunnert, en date du 26 mai 1950, dont il ne semble pas avoir tenu compte. Je juge utile, pour cette raison, de faire suivre sa communication de la présente. Elle ne vise à aucune revendication de priorité, puisqu'au contraire elle établit l'inopportunité d'attacher des noms de personnes à des méthodes que je pro-

pose de qualifier par leur nature. Mais elle a pour but principal d'approfondir la discussion des méthodes d'essai et de leurs cas d'application. Pour ne pas remplir un trop grand nombre de pages de cette revue, je me réfère aux publications suivantes dans lesquelles j'ai traité du sujet:

1^o *Recherches, Etudes et Considérations sur les Constructions soudées*; Ed. « Sciences et Lettres », Liège 1946.

2^o *Questions fondamentales en Matière de Constructions soudées*; « Bulletin CERES », Tome II, 1947, Liège.

3° *Appareils mécaniques de Mesures de Déformations*; Publication « Ce-BeReNa » S I/I du Centre Belge de Recherches Navales, Bruxelles 1949.

Ces publications seront désignées dans la suite par

Recherches, Questions, Appareils.

Pour des mesures très nombreuses de déformations et de tensions résiduelles dans des plaques soudées à mon laboratoire, divers instruments ont été employés successivement à partir de 1937: pied à coulisse de précision, microscope mesureur Zeiss, déformètre à cône plongeur au $1/1000^{\circ}$ de mm opérant sur une base de mesure de 20 mm (*Recherches*, pp. 11-13). A partir du dernier instrument a été conçu un déformètre à lecture directe au $1/1000^{\circ}$ de mm, à base de mesure ajustable de 12, 20, 40, 80 et 100 mm (fig. 1) (*Appareils*, pp. 9-10). Il permet de mesurer dans toutes les positions. Dans cet appareil, comme dans le précédent, dont il procède, un progrès important sur les appareils commerciaux similaires a été réalisé dès 1942, le remplacement des pointes coniques de mesure par des billes calibrées. L'expérience montre que les pointes coniques donnent lieu à une certaine imprécision de mesure, même lorsqu'il n'y a pas eu de déviation angulaire des trous de repère coniques. Or, dans les plaques soudées, au voisinage des soudures, il se produit des déviations angulaires. De ce fait, les pointes coniques de l'appareil de mesure ne peuvent plus s'adapter aux trous coniques de repère. D'ailleurs, le forage des repères coniques est très délicat.

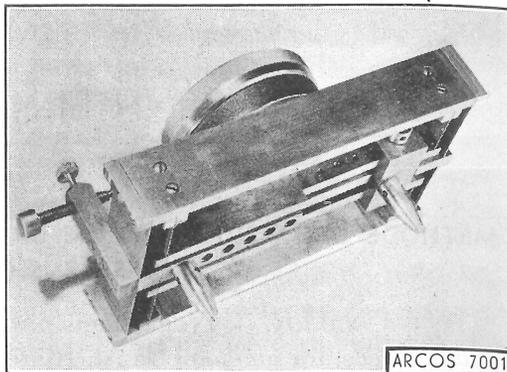


Fig. 1. — Déformètre à lecture directe au $1/1000^{\circ}$ de mm, à base de mesure ajustable de 12, 20, 40, 80 et 100 mm, et permettant de mesurer dans toutes les positions.

Les pointes coniques ont été dès 1942 remplacées dans les appareils réalisés dans mes laboratoires par des billes calibrées serties (*Recherches*, p. 13). Les repères sont réalisés en forant un petit trou cylindrique peu profond et d'un diamètre inférieur à celui de la bille. Une bille calibrée de même diamètre est alors pressée dans le trou et produit une empreinte hémisphérique à laquelle la bille de l'appareil de mesure est toujours superposable, même en cas de déviation angulaire. Les résultats ont été excellents. Les repères sont plus faciles à exécuter et plus exacts; les lectures sont facilitées et plus précises. Jusqu'à présent, les billes utilisées ont 2 mm de diamètre. Un appareil selon le même principe va être construit en métaux légers, avec une base de mesure descendant jusqu'à 10 mm au moins et utilisant éventuellement des billes de 1 mm. L'appareil est très robuste et facile à manipuler, sa précision est satisfaisante autant que sa sensibilité, qui a

l'avantage de n'être pas supérieure à la précision.

Il n'est pas possible de rendre compte ici des mesures de retrait et de déformations effectuées en nombre considérable au laboratoire et aussi sur des ouvrages (*Recherches*, pp. 7-10, *Questions*, pp. 189-222). Je me limiterai à envisager les méthodes de mesure des tensions résiduelles.

Au laboratoire, pour examiner l'état de tension des plaques d'essais, j'ai employé la méthode consistant à découper les plaques en fragments. Des carrés de 25 mm de côté ont été tracés sur les plaques, on a marqué des rosaces de 4 bases de mesure de 20 mm, inclinées à 45° l'une sur l'autre (donc 8 repères). On a effectué les mesures initiales, puis on a découpé les fragments carrés et ensuite on a effectué les lectures finales. On admet que les tensions sont annulées par le découpage. On détermine ainsi les tensions principales sur les deux faces, en direction et grandeur. Remarquons que ces opérations sont assez fastidieuses et qu'il y a intérêt à les faciliter par des abaques faciles à établir.

C'est à cette méthode que M. R. Gunnert attache mon nom. Je préfère qu'on la nomme *méthode de découpage*. Je ne crois pas être le premier à l'avoir employée. M. le Prof. Ros notamment en a fait, je crois, état avant moi. Cette méthode a donné au laboratoire des résultats satisfaisants. M. Gunnert lui reproche l'emploi d'un appareil insuffisamment précis et les dimensions trop grandes des fragments. C'est une question d'appréciation et je

ne partage pas celle de M. Gunnert. La précision de l'extensomètre utilisé est très suffisante. Les dimensions adoptées pour les bases de mesure (20 mm) ont déterminé celles des fragments (25 mm). Les mesures étaient opérées d'une manière systématique suivant des réseaux quadrillés de repères, correspondant aux bases de 20 mm.

Eu égard aux dimensions assez grandes des éprouvettes, ces bases étaient appropriées et conduisaient déjà à un travail de mesures véritablement fastidieux et qui fatiguait assez rapidement les opérateurs. C'est pourquoi il a été nécessaire de confectionner un appareil réellement très simple, très robuste, pratiquement indéglable et qui a cependant la même précision et la même sensibilité qu'un instrument apprécié, tel que l'extensomètre de Huggenberger. L'appareil et la méthode conviennent très bien, à mon avis, pour des essais systématiques de routine effectués en assez grand nombre. Dans ce cas, c'est très simple et suffisamment précis; ces conditions sont essentielles pour la valeur de mesures faites par des opérateurs professionnels.

S'il s'agit de faire des mesures isolées en petit nombre, on peut se proposer de rechercher une plus grande précision. C'est la raison pour laquelle un instrument plus perfectionné est projeté au laboratoire, mais en cherchant, dans toute la mesure du possible à conserver la grande facilité d'emploi et la robustesse. Ceci afin de ne pas rendre la précision illusoire par la délicatesse de l'instrument. Cependant, on peut se demander si, en tout état de cause, une

aussi grande précision a une réelle signification dans la mesure des tensions résiduelles, qui sont toutes des cas d'espèce, et si même elle n'est pas illusoire dans le principe. On se base en effet sur les lois de la répartition des tensions *autour d'un point* pour opérer sur des tensions moyennes mesurées sur une base de longueur finie. Il y a là une discordance systématique que les différences possibles de longueur des bases, lorsqu'on atteint l'ordre de ± 10 mm, ne semblent pas devoir influencer beaucoup.

La *méthode de découpage* est entièrement destructive. Elle est praticable au laboratoire, mais pas à l'extérieur, sur un ouvrage réel. Le problème s'est posé en Belgique de tenter des mesures de tensions réelles sur des ouvrages existants, dès 1938, pour un de mes collaborateurs scientifiques, M. H. Louis. A sa suggestion, une transformation a été apportée à l'appareil Schmuckler du laboratoire, servant aux fraisages de contrôle des soudures. Une foreuse creuse spéciale a été adaptée à l'arbre flexible, permettant d'extraire des ouvrages des pastilles cylindriques de 27 mm de diamètre, jusqu'à une épaisseur de 30 mm. Les mesures sont opérées sur les deux faces de ces pastilles comme dans la *méthode de découpage*, sur des bases de 20 mm, à l'origine avec un microscope mesureur, actuellement avec l'appareil du type de la figure. Cet appareil a l'avantage de pouvoir opérer dans toutes les directions, selon la position de l'élément de la construction. La base de mesure de 12 mm permettrait d'ailleurs d'opérer sur des

pastilles de plus petit diamètre, par exemple de 18 mm, mais une foreuse de 18 mm n'a pas encore été utilisée.

C'est la *méthode de trépanation*, supérieure à celle attribuée par M. R. Gunnert à Meriam-Garmo-Jonassen pour le moyen de trépanation, dont le principe est identique à celui de M. Gunnert. Cette méthode a été employée pour quelques applications isolées sur des ouvrages, avec des résultats satisfaisants. Mais la trépanation est cependant apparue comme assez compliquée lorsqu'elle est opérée sur un ouvrage réel. Finalement, cette méthode semi-destructive est plus commode au laboratoire qu'à l'extérieur, mais au laboratoire elle n'offre vraiment pas d'avantages de principe sur celle de découpage s'il s'agit d'une recherche systématique. Elle est éventuellement surtout appropriée pour des mesures isolées, par exemple sans dégagement total de la pastille, comme l'indique M. R. Gunnert. Dans ce cas, une très grande précision n'est pas toujours exigée.

Ces essais et l'expérience acquise de ce fait m'on ramené pour l'extérieur au principe de l'appareil de Mathar. Cet appareil avait été soumis avant 1938 dans mes laboratoires à un essai de contrôle et de tarage, qui a établi son imperfection (*Recherches*, p. 71, *Questions*, p. 224). Tout tarage a été reconnu impossible. L'appareil a deux défauts majeurs, l'un de réalisation, c'est que l'extensomètre est affecté par les vibrations du forage; l'autre de principe, c'est la mesure par un seul extensomètre dans une seule direction. Ces imperfections n'affectent cependant pas

le principe de la modification du champ élastique par le forage d'un trou, qui permet théoriquement la mesure du champ initial.

Cette méthode a paru plus commode pour les mesures sur des ouvrages réels, car le forage du trou peut se faire par une foreuse portative ordinaire sans réelles difficultés.

Cette *méthode de forage* (*Recherches*, pp. 103-109, *Questions*, p. 226) a été utilisée d'abord, pendant la guerre, en forant un trou de 10 mm de diamètre, enjambé par 4 bases de mesure diamétrales de 20 mm, dont les milieux coïncident avec le centre du trou. Cette disposition des bases de mesure à cheval sur le trou est favorable pour augmenter la sensibilité de la méthode, qui est inférieure à celle des deux précédentes. Le déformètre de la figure donne une précision suffisante dans ces conditions.

Après la guerre, M. Soete a eu recours au même principe, en utilisant les strain-gages ohmiques récemment introduits en Europe et qui pallient la sensibilité réduite du principe de la méthode par la plus grande sensibilité des extensomètres à résistance électrique. Mais comme il faut six extensomètres par forage (3 sur les deux faces), c'est assez coûteux. L'appareil mécanique, travaillant à cheval sur le trou, permet 8 mesures par point, c'est-à-dire deux mesures de contrôle, sans grande dépense.

Actuellement, avec le déformètre de la figure, on opère sur des bases de 12 mm enjambant un trou de 6 mm.

Cette méthode a été utilisée avec succès au cours de l'hiver 1949-1950 pour effectuer un très grand nombre de mesures sur deux grands navires soudés (un pétrolier et un cargo) aux chantiers de la S.A. John Cockerill à Hoboken (Belgique). La principale difficulté résultait du très mauvais temps (pluie, neige et gel), de l'activité trépidante du chantier, de la difficulté d'accès des fonds des coques, des positions incommodes et de la longue durée des essais, notamment du grand intervalle des mesures.

Les résultats ont été nettement supérieurs par la méthode indiquée à ceux de la méthode qui utilisait des strain-gages, dont le fonctionnement a été le plus souvent empêché ou rendu précaire par les conditions décrites.

La *méthode de forage*, telle qu'elle est définie ci-dessus, a donc des avantages d'efficacité et de commodité dans les cas difficiles mais intéressants de mesures sur des ouvrages réels. Sa précision est variable, en principe assez modérée. Théoriquement, si les tensions à mesurer sont élevées, le forage du trou produit des déformations permanentes qui doivent affecter la mesure. Je ne pense pas que ce soit très important, néanmoins les fortes tensions paraissent ainsi affectées d'une erreur systématique, tandis que pour les petites, l'erreur accidentelle doit être grande. La méthode décèle plutôt un ordre de grandeur.

Bien entendu, si les déformations subies par l'ouvrage sont inférieures à la limite élastique, les mesures avant et après l'opération de soudage, sans dé-

coupage ni trépanation ni forage, permettent de déterminer les tensions directement à partir des déformations.

En conclusion, la *méthode de forage* paraît surtout appropriée sur les ouvrages réels, avec des moyens de mesure mécaniques robustes, indéréglables, commodes et aussi précis et sensibles que le permettent ces nécessités. La précision est modérée.

La *méthode de découpage* et la *méthode de trépanation* sont en somme identiques quant au principe; l'emploi de l'une ou de l'autre paraît un cas d'espèce. Dans ces cas aussi, la recherche de la grande précision paraît devoir

être limitée par la commodité et la sécurité, comme aussi par l'imperfection théorique des méthodes. On peut cependant se proposer de pousser la précision et la sensibilité aussi loin que possible. Cela est toujours intéressant en soi, du point de vue métrologique, même si c'est douteux pour certaines applications. C'est ce qui m'incite à la réalisation d'un appareil du type de la figure mais plus léger, plus réduit, avec une plus petite base de mesure minimum et un appareil de mesure plus sensible que le micromètre à cadran au millième de millimètre, qui peut être un microcator ou tout dispositif aux mêmes fins.
