IV 895

MESURES DES TENSIONS MATERIELLES

par F. CAMPUS
Professeur à l'Université de Liége

S'il est vrai qu'il n'y a de science que du mesurable, on peut dire que les possibilités et les connaissances scientifiques relatives à la distribution des tensions dans les solides contraints ont progressé considérablement au cours des trois dernières décades, grâce aux perfectionnements apportés à la mesure des tensions par la création et l'emploi d'instruments qui ont élargi considérablement la possibilité de mesures précises et délicates dans de nombreux cas intéressants pour la science, la technique et la pratique. La notion de tension est certes établie scientifiquement depuis plus longtemps (Réaumur, Musschenbroek 1729) et a servi de base à la théorie scientifique de l'élasticité déjà ancienne et fondée sur des mesures, mais relatives à des expériences simples relevant du cabinet de physique (18e et 19e siècle)

Sur cette base élémentaire, la théorie mathématique de l'élasticité et la résistance des matériaux, qui en est une forme simplifiée, ont pu édifier le calcul des tensions dans un grand nombre de cas biem définis et plus ou moins simples ou complexes. Des mesures de vérification peuvent être effectuées dans de nombreux cas et il existe des appareils et des méthodes classiques de msure des coëfficients caractéristiques de l'élasticité (module de Young, coefficient de Poisson) permettant une très grande précision. Le caractère scientifique de ces théories est ainsi parfaitement établi. Mais il s'agit là de mesures élémentaires ou fondamentales de laboratoire. La théorie mathématique de la plasticité, dont le développement est plus récent, fonde également ses hypothèses sur des mesures d'un autre ordre et possède aussi

---

Minute non revue d'une conférence faite à la section "Méthodes et Appareils de mesure" du Cercle d'Etudes "Mécanique" de l'A.I.Lg. le 6 juillet 1943.

un caractère scientifique certain, mais les possibilités de mesure sont plus limitées et les résultats ont souvent de ce fait un caractère plus hypothétique et moins assuré.

Le progrès industriel de la construction sous toutes ses formes techniques, surtout si on le considère sous l'angle de la solution du dilemme de concilier la recherche de l'économie, notamment dans l'économie de matière, avec la garantie de la sécurité, a posé des problèmes nombreux dont la compréhension générale est certes fondée entièrement sur les théories prérappelées, mais dans des cas dont la complexcité est telle que ces théories ne peuvent pas donner une solution satisfaisante ou donnant une assurance suffisante, en raison de la hardiesse avec laquelle les constructeurs veulent serrer les conditions du problème, pour des raisons de concurrence ou même pour des raisons de pure nécessité sine qua non, par exemple, en aviation, en construction navale, etc.. Ce sont ces problèmes qui ont suscité la recherche, la création, le développement et l'emploi des appareils de mesures de tensions au cours des trois dernières décades. Ces instruments ont, dans une large mesure, répondu aux besoins dont ils sont nés et ont apporté des contributions importantes aux études, recherches, réalisations, perfectionnements et performances de la construction contemporaine, dans une mesure dont nous ne pouvons peutêtre pas nous rendre pleinement compte actuellement, mais telle que leur emploi me parait devoir devenir de plus en plus indispensable et être appelé à se développer encore considérablement. Il reste d'ailleurs des progrès considérables à réaliser, surtout dans le domaine des tensions dynamiques, pour la mesure desquelles il n'existe pas encore d'instruments vraiment satisfaisants et commodes, alors qu'ils existent pour les tensions statiques.

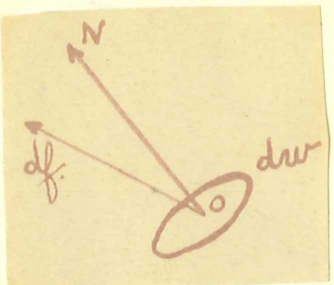
Les champs d'application des mesures de tensions à la construction sont les suivants:

A) Une construction unique (pont, navire) a été édifiée d'après un projet élaboré suivant les méthodes adéquates. La mesure des tensions sur l'ouvrage réalisé, dans des conditions de sollicitation bien définies et connues, permet la vérification des calculs et de la pertinence des bases des méthodes de calcul. Elle contrôle donc le bien-fondé des méthodes ou suscite leur correction ou leur perfectionnement. Ceci est surtout utile pour les constructions de type original ou les méthodes nouvelles de calcul. Le cas échéant, les tensions mesurées étant faibles, la mesure autorise des allègements pour les ouvrages ultérieurs similaires par modification des coéfficients spécifiques. Si, au contraire, elles sont élevées, la mesure justifie et précise les renforcements nécessaires à l'ouvrage et la modification subséquente des coéfficients de sécurité pour les projets ultérieurs. Résultats donc très importants, mais de portée cependant limitée.

B) Pour une construction en série, on mesure de même les tensions en service sur un prototype de grandeur réelle. D'après ces mesures, on corrige, perfectionne et met au point le projet. La construction est faite en série d'après ce projet perfectionné. La mesure des tensions est ainsi le terme suprême de l'étude et de l'élaboration du projet. La portée de ces résultats est beaucoup plus grande. C'est en somme la méthode logique de l'épreuve, mais scientifique, chiffrée et accélérée, en outre organisée et autant que possible dépourvue de risques dangereux.

C) Pour les deux types de constructions, uniques ou en série, des mesures sont faites comme dans B, mais sur un modèle à échelle réduite (en vertu des lois de similitude) ou sur des éléments essentiels (en vraie grandeur ou à échelle réduite), ceci en vue de réduire les frais à la mesure supportable (notamment pour une construction unique, mais même dans le cas B). Les mesures font alors partie intégrante de l'élaboration du projet à un stade assez précoce. Dans la mesure où les lois de similitude sont applicables et appliquées avec discernement, les avantages sur la méthode A sont considérables, mais ne dispensent pas nécessairement de A, surtout pour des ouvrages originaux. Pour les constructions en série, les mesures sur protoype selon B auront lieu en tous cas, mais seront plus assurées et accélérées grâce aux mesures préalables selon C. Naturellement, dans le cas C, les connaissances requises sont élevées, en raison de la question délicate du report des essais sur modèles.

Je ne reprendrai pas la démonstration classique de l'existence d'efforts et de tensions au sein des solides contraints par des forces quelconques, soient extérieures, y compris les forces de liaison -qui ont les caractères des forces extérieures, mais sont liées à certaines conditions et déterminées en vertu de ces conditions- soient massiques (gravité, champ électrique ou magnétique), soient dynamiques (force d'inertie, qui, conformément au principe de d'Alembert, ont les mêmes effets que des forces extérieures ou massiques) soient intrinsèques (ou internes ou initiales), résultant de déformations hétérogènes ou contrariées provenant d'actions physiques ou physico-chimiques (dilatations thermiques, retraits, etc.). Mais, pour bien fixer les idées, je préciserai, comme point de départ, la définition des tensions.

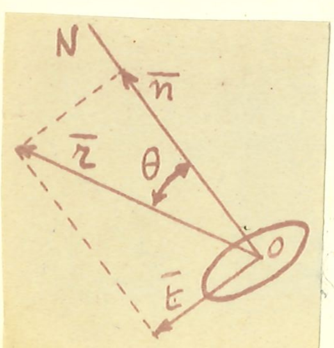


Considérons en un point O d'un corps solide contraint une facette plane élémentaire dw dont O est le centre et dont ON est la normale. Cette facette est ainsi entièrement définie dans un système quelconque de référence. L'effort interne appliqué à cette facette, en raison des contraintes diverses agissant sur le corps et déterminé en vertu des conditions d'équilibre est df. C'est un vecteur défini par un point d'application O, sa direction, son sens et sa grandeur définie dans un certain système d'unités. On appelle tension le vecteur

$$\bar{r} = \lim \frac{df}{dw}$$

défini comme df. Dimensions $FL^{-2} = ML^{-1} T^{-2}$

Le vecteur tension est inséparable de la facette correspondante (ou de sa normale ON), ils sont dits conjugerés. Ils sont inséparables tous deux du point d'application O. En général, $\bar{r}$ n'est pas confondu



avec la normale ON, mais fait avec celle-ci un angle de glissement θ. La projection de $\bar{r}$ sur ON est la composante normale (ou tension normale) $\bar{n}$. La projection normale de r sur la facette est la composante tangentielle (ou tension tangentielle) $\bar{t}$. Si θ = o, la tension est purement normale, elle est purement tangentielle si $\theta = \frac{\pi}{2}$. Suivant leur sens, les tensions normales sont des tractions ou des compressions

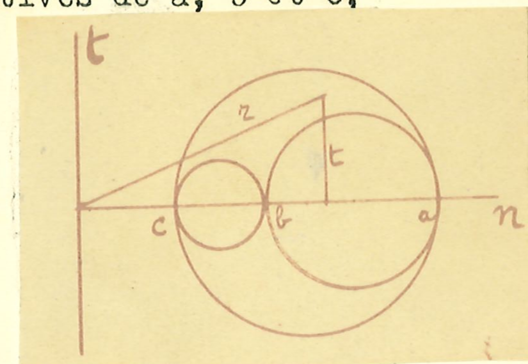
Il n'y a pas de sens caractéristique pour les $\bar{t}$.

Ellipsoïde de Lamé. Rappel de la propriété. Cas général de l'ellipsoïde à trois axes inégaux (contrainte triple au point O). Tensions principales purement normales.

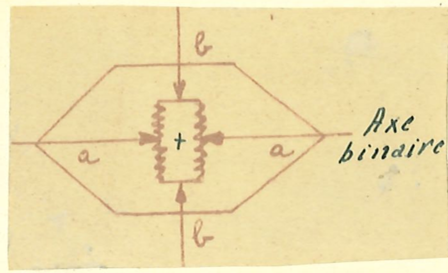
Ellipsoïde des tensions $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$

Quadrique directrice des tensions $\frac{x^2}{a} + \frac{y^2}{b} + \frac{z^2}{c} = 1$

Son genre dépend des signes et grandeurs relatives de a, b et c, tensions principales.



Représentation par les cercles de Mohr
Orientation des facettes -pas insister, les cas de mesures à trois dimensions n'existant pas-. Ces propriétés et relations sont toujours vraies, quel que soit le régime de déformation.
Cercle de Weyrauch à 3 dimensions (pour mémoire).
Les mesures directes de tensions ne sont généralement pas praticables, sauf pour les corps transparents isotropes possédant la propriété de biréfringence accidentelle, qui permettent l'application de la photo-élasticimétrie. Je ne développerai pas ce point, qui a fait l'objet d'un exposé du camarade Pirard. Les mesures ressortent généralement de la catégorie C (modèles) et sont pratiquement relatives à des problèmes plans. On ne s'en sert généralement pas pour mesurer des tensions dans des ouvrages réels, mais bien pour constater qualitativement l'existence ou l'absence de tensions dans certains objets en verre (polariscope). Cependant, M.Mabboux a imaginé l'application de la photoélasticité à un certain contrôle des tensions dans les ouvrages en béton. (Applications de la photo-élasticimétrie à l'étude des ouvrages en béton par Georges Mabboux, Comptes-rendus des séances de l'Académie des Sciences 30 mai 1932) Lire extraits commencement et fin. L'application est curieuse et intéressante, mais de portée limitée (béton). L'auteur ne semble d'ailleurs pas en avoir une opinion exagérée et l'on n'a guère entendu parler des applications de la méthode. L'on a tenté de recourir, pour la mesure des tensions, à de nombreux phénomènes assez complexes de la physique. Ces tentatives, théoriquement intéressantes, se sont rarement avérées commodes et pratiques. Il en est notamment ainsi de la piézo-électricité du quartz, résultant de l'anisotropie cristalline, que l'on a envisagé d'appliquer à la mesure directe des tensions dans l'intérieur des



corps solides, notamment en France.

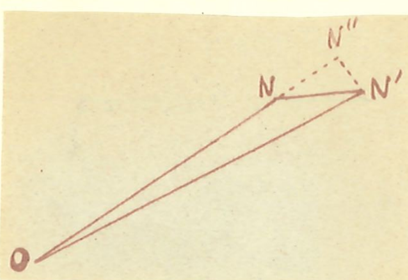
Piézo-électricité. Propriété des cristaux hémièdres, tels le quartz.

Pressions sur deux faces perpendiculaires à un axe binaire ou sur deux facettes parallèles à un axe binaire et à l'axe optique (ternaire) font apparaître charges sur les deux faces perpendiculaires à l'axe binaire (égales et opposées).

Je ne connais pas de publications à ce sujet, mais il résulte d'entretiens avec Mr Prot (des services techniques de l'Aéronautique) et avec Mr Coyne (Chef du service technique des grands barrages) que la méthode n'a pas donné de résultats.

Il faut donc recourir aux <u>mesures indirectes</u>. Les effets en relation avec les tensions et que l'on mesure sont les <u>déformations</u>. Il en résulte une limitation que nous détaillerons et qui provient de ce que la relation entre les tensions et les déformations n'est simple et connue que dans les limites de l'élasticité.

Un corps est déformé lorsque des points qu'on peut y localiser subissent des déplacements inégaux, suivant les directions qui les joignent deux à deux. Les déformations résultent donc de déplacements relatifs et la notion de <u>déformation en un point</u> n'a pas un sens aussi direct que celle de <u>tension en un point</u>. Rappel succinct des éléments de la géométrie des petites déformations.



Considérons un segment dirigé ON avant déformation. Après déformation il est devenu ON'. Projetons ON' en ON" sur ON. On appelle <u>dilatation unitaire en O suivant ON</u>.

$\varepsilon = \lim \frac{NN''}{ON}$. Ceci peut être un allongement ou un raccourcissement.

<u>Glissement unitaire en O suivant la même direction</u>

$\gamma = \lim \frac{N'N''}{ON}$. Il n'y a pas de sens caractéristique pour les glissements.

(moitié du glissement suivant la définition ordinaire = variation angulaire de deux segments orthogonaux. Ces variations sont égales pour chaque segment à la moitié; nous ne considérons qu'un segment).

La déformation unitaire résultante (vectorielle) en O suivant ON est $\delta = \lim \frac{NN'}{ON}$

sa grandeur est $\delta = \sqrt{\varepsilon^2 + \gamma^2}$

Moyennant ces définitions ou conventions, on peut considérer les <u>déformations unitaires en un point</u> suivant toutes les directions ON ou, ce qui revient au même, correspondant à des facettes planes élémentaires dw de centre O et perpendiculaires à ON. Ces éléments peuvent être les mêmes que nous avons considérés pour la définition des tensions au point O.

Cela étant, dans un corps déformé d'une manière continue sans rupture, les déformations au point O suivant toutes les directions obéissent aux mêmes lois que les tensions.

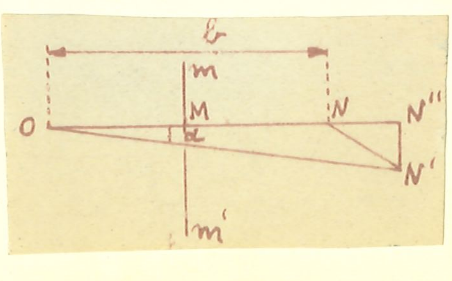
Ellipsoïde des déformations
Quadrique directrice des déformations
Cercles (de Mohr) des déformations.

(Ceci établit la notion des facettes conjuguées des déformations ou encore de la normale ON conjuguée à la déformation, qui est un vecteur non dirigé suivant ON) Dilatations principales purement normales, facettes ou directions éventuelles de pur glissement.

Ces définitions et relations sont vraies indépendamment de toutes relations entre les tensions ou déformations (élasticité ou plasticité) Les déformations sont mesurables. Pour pouvoir en déduire les tensions il faut connaître les relations qui existent entre elles.

<u>MESURES DES DEFORMATIONS</u> - On ne mesure pratiquement que des dilatations (normales positives ou négatives). Les mesures de glissements par des appareils spéciaux, d'usage limité, ne sont pas usuelles. On préfère déduire les glissements des mesures de dilatations suivant plusieurs directions.

Considérons un segment dirigé <u>ON</u> avant déformation. C'est la base <u>b</u> de mesure. Elle doit être théoriquement infinitésimale, pratiquement aussi petite que possible. Après déformation, N vient en N'. L'instrument, dont deux points sont restés communs avec O et N pendant le phénomène, mesure $\frac{ON' - ON}{ON}$



soit $\frac{\frac{ON'' - ON}{\cos \alpha}}{ON}$

Or, les déformations sont très petites et négligeables vos-à-vis de

ON, on peut donc écrire

$$\frac{ON' - ON}{ON} = \frac{ON + NN'' - ON}{ON} = \frac{NN''}{ON} = \mathcal{E}$$

L'erreur est insignifiante et inférieure à toute erreur systématique ou accidentelle de mesure.
Seulement, cet $\mathcal{E}$ n'est pas la dilatation unitaire au point O suivant O.N, mais la dilatation moyenne suivant ON. On la rapporte donc généralement au point M, milieu de ON, ou à la facette élémentaire plane mm' perpendiculaire à ON, dont le centre est M.

Opération des mesures de déformation.

La mesure peut se faire dans l'intérieur d'un corps solide si on peut y introduire l'instrument dans des conditions permettant d'opérer la mesure. Il faut alors recourir à l'électricité comme agent. L'instrument comporte le "témoin" (ou émetteur) noyé dans le corps et le "récepteur" qui permet de recueillir, mesurer ou enregistrer les indications du témoin. On a pu ainsi disposer dans des ouvrages en béton des témoins sonores (Coyne) ou des "télémètres" à résistance de charbon (Mac Collum). Ces mesures ne peuvent être faites que dans des massifs assez volumineux. Les bases de mesure sont grandes ($\geq$ 20 cm) encore que relativement petites par rapport aux dimensions de l'ouvrage. Mais la principale réserve à exprimer est que généralement la mesure de déformation ne se fait en un point que suivant une direction, ce qui ne permet pas d'en déduire la valeur de la tension. En effet, pour pouvoir déduire les tensions des déformations dans le cas de sollicitation à 3 axes inégaux, il faut, dans le cas de l'élasticité, connaître les trois dilatations principales, dont les axes coïncident avec les tensions principales. Si les directions principales sont connues à priori (ce qui est toujours plus ou moins hypothétique ou incertain) il faut trois mesures de dilatations principales. Sinon, il en faut six suivant 2 trièdres trirectangles et la détermination des dilatations principales est très laborieuse.

La relation entre les tensions et les dilatations est :

$$n_1 = \frac{E}{1+\mu}\left[\mathcal{E}_1 + \frac{\mu(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3)}{1 - 2\mu}\right]$$

$$n_2 = \frac{E}{1 +}\left[\mathcal{E}_2 + \frac{\mu(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3)}{1 - 2\mu}\right]$$

$$n_3 = \frac{E}{1 + \mu}\left[\mathcal{E}_3 + \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\right]$$

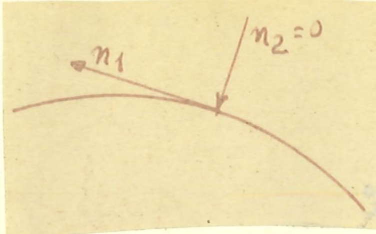
Pour trois tensions normales formant un trièdre trirectangle

On connait alors toute la répartition des tensions au point considéré. Je dois insister sur le point que les mesures faites dans l'intérieur des massifs de béton ne donnent donc qu'une dilatation, dont on ne peut même approximativement déduire une tension, d'autant plus que le béton n'est pas un matériau proprement élastique. Il faut ajouter que, le plus souvent, les mesures portant sur de longues périodes cumuleront les effets, parfois opposés, de diverses influences: mise en charge, variations de température internes et externes, retrait, etc. Il n'y a donc, en réalité, rien de précis ni de vraiment scientifique à conclure de ces mesures, parce que l'on ne sait pas exactement ce que l'on mesure. L'échec ne tient pas tant à l'imperfection des appareils qu'à la difficulté du problème et il importe de bien noter que les conditions principales énoncées pour les mesures de tensions à l'intérieur des corps, comme en tous cas de contraintes à trois dimensions, sont absolues.

Le plus souvent, les mesures se font à la surface des corps, seule accessible. Comme l'a fait remarquer le professeur Vreedenburgh, de l'Ecole de Bandoeng, ce sont généralement les tensions à la surface ou sur les tranches qui sont les plus élevées, tout au moins dans les problèmes statiques. La théorie de l'élasticité et la photo-élasticimétrie sont d'accord sur ce point. S'il s'agit donc du problème technique ou industriel de la sécurité, les mesures de tensions en surface sont suffisantes. Si l'on veut étudier le problème scientifique ou théorique de la répartition interne des tensions, on est loin de compte.

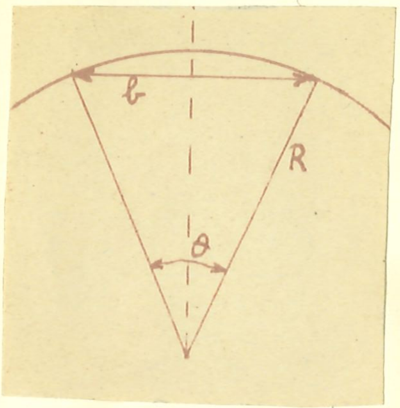
Pratiquement, on est ramené à deux cas de mesures.

I) Mesures sur les tranches de modèles ou éléments plans minces, dont toute la sollicitation agit dans le plan axial du disque. Il n'y a donc aucune action quelconque perpendiculaire au plan du disque ni agissant dans les faces terminales du disque et, celui-ci étant très mince, on admet que toutes les tensions sont des vecteurs parallèles au plan du disque et qu'elles ont la même valeur dans toute l'épaisseur du disque. Ceci donne lieu à quelques réserves au point de vue de la théorie mathématique rigoureux de l'élasticité, mais n'a généralement pas d'importance pratique, pourvu que les conditions de sollicitation soient vraiment planes. On mesure en somme les tensions moyennes (suivant l'épaisseur) sur les tranches du disque. Cette tension est principale et la seule non nulle, donc $n_2 = n_3 = o$ et $n_1 = E\varepsilon_1$.



La dilatation ε_1 étant mesurée ainsi qu'il a été dit, n_1 s'en déduit facilement et exactement, indépendamment du coefficient de Poisson, difficile à mesurer, par la seule connaissance de E généralement bien connu et facile à mesurer.

La fixation des appareils sur les tranches est généralement aisée.



Si la tranche présente une certaine courbure, de rayon R, et que la base de mesure est b, on mesure suivant la corde et non suivant l'arc. on mesure donc

$$\frac{2R\sin\frac{(\theta + d\theta)}{2} - 2R\sin\frac{\theta}{2}}{2R\sin\frac{\theta}{2}} = \frac{d\sin\frac{\theta}{2}}{\sin\frac{\theta}{2}} = \frac{d\theta}{2\,tg\frac{\theta}{2}}$$

au lieu de $\frac{d\theta}{\theta}$. Il faut donc multiplier le ε mesuré par

$$\frac{tg\frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} = \frac{b}{2\sqrt{R^2-\frac{b^2}{4}}\ \mathrm{arc\ tg}\ \frac{\frac{b}{2}}{\sqrt{R^2-\frac{b^2}{4}}}}$$

Ce facteur peut devenir important lorsque b tend vers 2 R et est par contre négligeable lorsque R est grand par rapport à b.

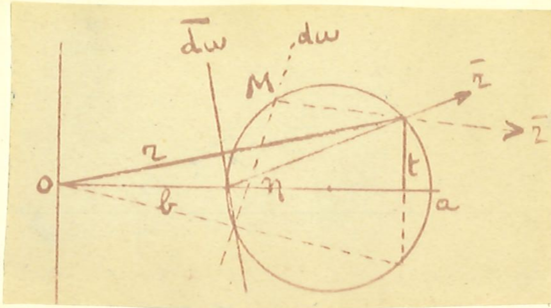
II) <u>Mesure à la surface d'un corps contraint</u>

La tension normale à la surface est l'une des tensions principales et est nulle. Les deux autres sont dans le plan de la surface. Donc $n_3 = o$.

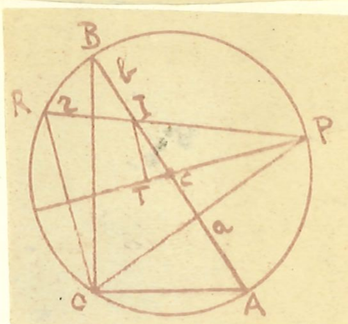
On a alors $n_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2)$

$$n_2 = \frac{E}{1-\ {}^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1)$$

Si l'on connait, a priori, les deux directions principales, au moyen de <u>deux mesures</u> on mesure directement ε_1 et ε_2. On en déduit n_1 et n_2. L'ellipsoïde de Lamé devient une ellipse, la quadrique directrice de tension devient une cônique. Les cercles de Mohr se réduisent à 1 pour toutes les tensions sur les facettes perpendiculaires au plan de la surface.

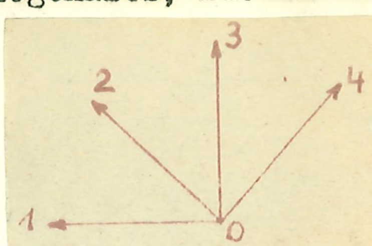


On peut aussi employer le cercle de Weyrauch



On effectuera une ou deux mesures de contrôle supplémentaires.

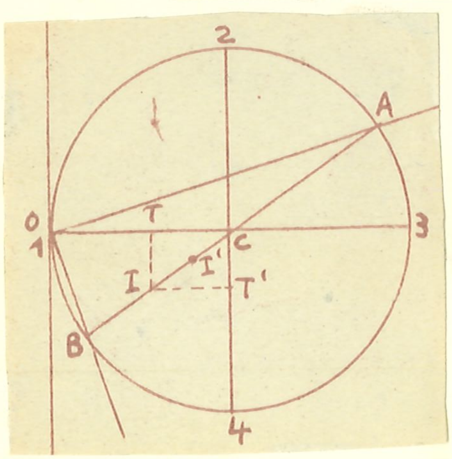
Si on ne connait pas a priori les directions principales, il faut procéder à 3 mesures; pratiquement on en effectue 4 par raison de contrôle. On effectue ces mesures suivant deux groupes de directions orthogonales, inclinées de 45° les unes par rapport aux autres



Comme vérification, on doit trouver

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_4$$

(compte tenu des signes)



$1T = \varepsilon_1 \quad T3 = \varepsilon_3 \quad 2T' = \varepsilon_2 \quad T'4 = \varepsilon_4$

(tous positifs)

$AI = \varepsilon_a \qquad IB = \varepsilon_b$

Portons de I vers C $II' = \dfrac{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)\mu}{1 + \mu}$

$$= \frac{(IA - IB)\mu}{1 - \mu}$$

On a I' tel que $I'A = a \quad I'B = b$

avec la relation $\text{ech}\,\sigma = \dfrac{1 - \mu}{E}\,\text{ech}\,\varepsilon$

Dès lors toutes les tensions normales et tangentielles sont connues dans le plan de la surface, en grandeur et direction

$$\text{éch}\,\sigma = \frac{\text{représ}\,\sigma}{\sigma} \qquad \text{éch}\,\varepsilon = \frac{\text{repré}\,\varepsilon}{\varepsilon} = b\ \text{éch}\,\Delta b$$

$$\text{donc}\quad \text{éch}\,\sigma = \frac{(1-\mu)}{E}b\ \ \text{éch}\,\Delta b$$

$$\text{éch}\,\Delta b = \frac{\text{repr}\,\Delta b}{\Delta b}$$

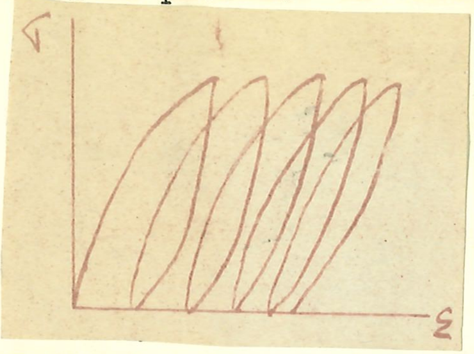
Le problème est entièrement résolu. En cas de courbure, il faut opérer la même correction que précédemment, R étant le rayon de courbure dans le plan normal de la base de mesure.

La fixation des appareils sur la surface peut être malaisée. Il faut éviter autant que possible de devoir percer ou entamer la surface. Cependant la fixation doit être bien stable et effective, c'est à dire assurer que l'instrument reste en contact pendant la déformation avec deux points individuels toujours les mêmes, constituant les extrémités de la base de mesure, sans glissement relatif, qui fausserait tout. Il faut s'en assurer et il n'y a qu'un moyen, <u>la répétition des mesures</u>. La première doit être présumée incorrecte en tous cas. On ne peut s'estimer satisfait en général qu'après trois lectures concordantes successives. Un bon opérateur entraîné les obtient généralement par les 2e, 3e et 4e mises en charge(évent[t] 1e,2e et 3e). Sauf <u>précautions spéciales et toujours précaires</u>, aucune valeur sérieuse ne peut être accordée aux mesures de déformations <u>uniques</u>, réalisées parfois pour des observations de longue durée, et cela pour la raison de principe exposée ci-dessus, à laquelle s'ajoutent toutes les causes perturbatrices de longue durée (variations thermiques, éventuellement chocs perturbateurs, etc.). On mesure on ne sait quoi. J'insiste là dessus parce que la critique des mesures est souvent insuffisante, encore davantage celle des principes des mesures. J'ai été témoin de discussions et de déclarations importantes d'autorités universitaires et de commissions considérables basées sur des mesures faites en méconnaissance complète de ces principes et dénuées en fait de toute valeur. Ceci doit être dit, non seulement pour l'éducation de ceux qui font des mesures, mais davantage encore pour ceux qui sont susceptibles d'en faire exécuter et de les interpréter ensuite.

Les tensions mesurées correspondent à la différence entre les états final et initial de l'expérience, déterminées par l'application à l'ouvrage d'états de charge ou de déformations bien définis, bien connus et rigoureusement les mêmes pour chaque répétition. On ne mesure donc pas les tensions totales qui peuvent comporter en outre celles provenant de surcharges permanentes, de tensions de pose, d'effets thermiques, etc..

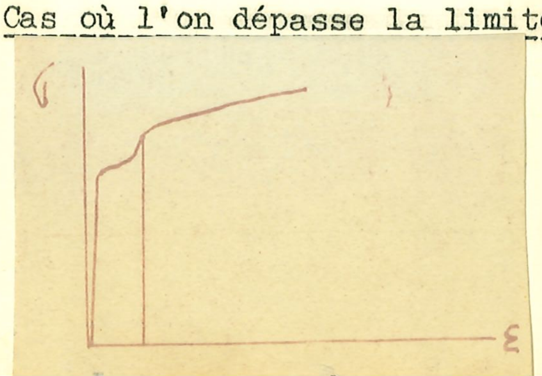
Cas des corps n'obéissant pas à la loi de Hooke.

En principe, il n'y a pas de moyen indirect de mesure des tensions. Par approximation, on peut faire des mesures de déformation sur tranche (ou cas assimilables) à condition de déterminer par expérience directe et séparée contemporaine et dans des conditions identiques (autant que possible) et valables, la loi reliant les déformations aux tensions. Voici comment nous opérons pour les bétons. Connaissant approximativement les données de variation des tensions pendant l'essai, on soumet, le jour de l'essai, à la compression, un prisme de béton, par exemple de 20 x 20 x 120 cm et on y mesure, sur 4 faces, les raccourcissements proportionnels pour des tensions connues de compression. On décrit plusieurs cycles correspondant au domaine présumé. On obtient des courbes ayant les allures ci-contre



Les déformations se mesurent au moyen des mêmes appareils que sur l'élément de construction. Ensuite, on soumet cet élément, par exemple, une poutre en béton armé, au nombre voulu de cycles de charges et on interprête les résultats par la formule $n = E\varepsilon$ en utilisant la valeur moyenne de E déduite des courbes pour le cycle approprié, Après quelques cycles, il y a une tendance à la stabilisation.
On opère de même pour les pierres, mais les mesures ne doivent pas nécessairement être contemporaines, l'effet de l'âge n'existant pas comme pour les bétons. On voit que la méthode est assez laborieuse, pour un résultat approximatif, mais cependant utilisable et intéressant.

Cas où l'on dépasse la limite élastique (Acier)



Si l'on dépasse la limite élastique de l'acier, pour une certaine tension σ_s, on sait que l'acier écroui est élastique pour toutes les sollicitations consécutives inférieures à σ_s.

Les formules et les méthodes précédemment indiquées pour les corps élastiques sont donc valables pour toutes les mesures succédant à celle au cours de laquelle la limite élastique a été dépassée et pour autant que la sollicitation ne soit pas augmentée. Si l'on mesure dès la première fois des tensions dépassant la limite élastique, sans déformation permanente (c'est à dire sans différence systématique avec les mesures ultérieures), c'est que le métal a déjà été écroui avant les mesures. Dans une expérience, la limité élastique peut éventuellement être dépassée en raison de sollicitations autres que celle correspondant à l'essai, qui sont permanentes et qui s'y superposent. Il faut y prendre garde.

Principe des appareils

Il s'agit donc de mesurer les variations de longueur très courtes (de l'ordre de 10^{-3}mm ou 1μ) d'une base aussi courte que possible. Il faut donc procéder par amplification ou avoir recours recours à des agents physiques sensibles aux petites variations de longueur. Envisageons d'abord ces derniers principes, parce qu'ils sont les plus particuliers et les plus curieux, mais à mon avis d'un usage incommode, sauf cas particulier adéquat.

1) Variation de résistance électrique. Une pile de rondelles de charbon de cornue, corps peu conducteur, est serrée entre 2 électrodes solidaires des pointes limitant la base de mesure. Les deux pointes limitant la base sont fixes.

Les petites variations de longueur de cette barre modifiant de façon sensible la résistance de la pile. Celle-ci se mesure par une méthode électrique sensible, par exemple, par un pont de Wheatstone. L'appareil est préalablement taré par mesure directe. Il est assez robuste, mais la base est assez longue (plusieurs cm). C'est le principe du télémètre de Mac Collum (susceptible d'être disposé à demeure dans les ouvrages en béton) et de Bernhard (Deutsche Reichsbahn 1928 - Base 200 mm, derniers modèles base variable de 20 à 50 mm) Appareils employés pour les tensions statiques et dynamiques.

On a construit en Allemagne un appareil pour déformations dynamiques relativement grandes comportant un conducteur divisé par un contact glissant dont la position varie d'après les variations de longueur de la base. Les deux parties du conducteur forment deux côtés d'un pont de Wheatstone; leur variation peut donc être mesurée électriquement (appareils de la Deutsche Reichasbahn et d'Askania) Mesurent des déplacements supérieurs à 0,1 mm sur des bases assez longues. 1 pointe fixe et 1 palpeur coulissant.

2°) Variations de capacité ou de self. Les deux pointes formant les extrémités de la base sont solidaires des armatures d'un petit condensateur ou d'une self dont les capacités ou coefficients de self varient avec la longueur de la base. On mesure ces variations par une méthode électrique sensible. Les appareils sont préalablement tarés par mesure directe. Ces instruments peuvent avoir des bases plus petites, mais sont assez délicats, sujets à déréglage et d'emploi compliqué. On a construit des appareils à induction à base variable de 0,5 à 2 mm (Lehr, une pointe fixe, une mobile, de 0,5 à 5 mm. Darmstadt 2 pointes fixes) et des appareils à capacité de 1 mm de base (2 pointes fixes, Deutsche Versuchsanstalt der Luftfahrt) Appareils statiques et dynamiques.

3°) Appareils sonores. Une corde métallique sonore est tendue suivant la longueur de la base et subit toutes les variations de celle-ci. La hauteur du son de ce fil varie donc d'après les dilatations qui font varier la tension du fil. Le fil est mis en vibration par une impulsion électro-magnétique et le son émis est transmis par un téléphone. Il est comparé à celui d'un fil étalon connu par la méthode des battements. Chaque fil est taré par mesure directe. L'appareil est robuste, sensible et précis. Mr Dantinne et moi avons publié anciennement une étude sur l'appareil Schäfer-Ma hiak. Le même fil étalon permet d'opérer en succession immédiate sur un grand nombre de fils de mesure. Monsieur Dantinne fera mardi prochain un exposé plus détaillé de cet appareil, avec démonstration et adaptation à l'oscil-lographe Base 20 ou 10 cm.

Mr Coyne a inventé un appareil analogue dont les "témoins sonores" étanches peuvent être disposés à demeure à l'intérieur de massifs en béton (longueur de mesure ± 80 cm).

Dans ces appareils, les deux extrémités de la base sont fixes. Ils sont destinés aux mesures statiques.

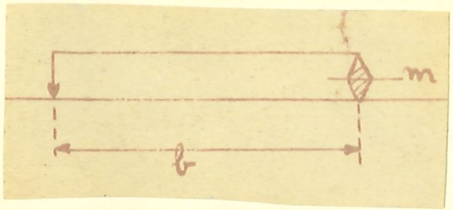
4°) Appareils à cellule photo-électrique. Les plus récents . La variation de longueur de la base est répercutée, avec amplification mécanique, sur une mince fente, dont l'ouverture varie en conséquence.

Une petite lampe électrique envoie un flux de lumière, variable d'après l'ouverture de la fente, sur une cellule photo-électrique dont le courant amplifié est mesuré. L'appareil doit être taré directement. La base peut être très petite. (2 mm dans l'appareil de Lehr construit par Askania . Une pointe est fixe, l'autre mobile). L'appareil sert à la mesure de tensions statiques.
Les appareils utilisant l'électricité comme agent ont l'avantage de permettre de faire les lectures d'un poste central fixe, quelque peu éloigné des points de mesure et unique pour plusieurs points. Ils conviennent aux mesures statiques et dynamiques. Dans ce cas, on peut opérer l'enregistrement oscillographique avec photographie. Les mesures électriques sont, on le sait, commodes et précises, moyennant un soin convenable et éclairé, bien entendu. Mais les appareils eux-mêmes sont souvent délicats, sauf les appareils sonores. très robustes. On a, en général, peu appris des performances de ces appareils et, en général, ils ne sont pas très répandus. Au point de vue dynamique, ils peuvent avoir l'avantage d'une faible inertie et d'une fréquence propre élevée. Je ne citerai que pour mémoire les méthodes de mesure des tensions par la diffraction des rayons X, basées sur les modifications de la microstructure des corps par l'effet des déformations résultant des tensions. Ces méthodes opèrent sur les bases de l'ordre de grandeur atomique, leur technique est très particulière et loin d'être mise au point; elle est provisoirement réservée aux recherches d'ordre scientifique.

5°) <u>Appareil Solex à micromètre pneumatique</u>.

La Société française des carburateurs Solex a construit des mesureurs de tension à petite base dont les variations agissent sur un micromètre pneumatique Solex. (Type Service technique des constructions navales, base 2 mm, amplification 200.000 Type B, base variable de 4 à 30 mm, amplification 5 à 40.000).
On mesure les variations de pression d'air comprimé d'un gicleur ultra-sensible (principe employé avec un succès pratique pour la vérification micrométrique de pièces usinées, de calibres, pour vérifier les états de surface, au μ près, etc..). Appareil statique d'usage assez spécial et très coûteux (Génie Civil 1er janvier 1943).

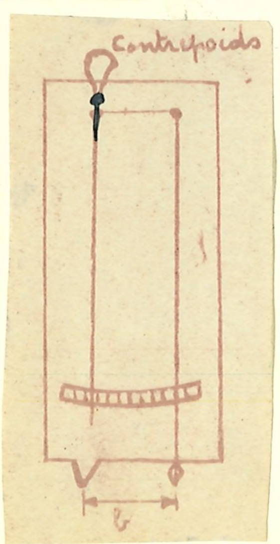
6°) <u>Amplification optique</u>. Une pointe de la base est fixe et agit avec une légère amplification sur un petit miroir solidaire de la 2e pointe articulée. Toute variation de longueur fait varier l'orientation du miroir et déplace donc un spot lumineux sur une échelle. Pour les



mesures de tensions dynamiques, il peut y avoir enregistrement photographique. L'amplification peut être grande, la base de mesure va d'une fraction de mm à 200 mm. Il y a plusieurs types d'apperils. Au point de vue dynamique, ils peuvent avoir une faible inertie (amplification optique) et une fréquence propre élevée. En général, on tare directement l'instrument; il est cependant susceptible d'être absolu. On peut rattacher à l'amplification optique les appareils à rayure. Une pointe est fixe, l'autre mobile solidaire d'un éclat de diamant qui raye une plaque métallique polie ou un film qui se déplace devant le diamant.On enregistre ainsi en <u>vraie grandeur</u> les variations de longueur de la base de mesure pendant un essai dynamique. L'amplification est réalisée par l'examen de l'enregistrement au microscope à un grossissement connu. Il ne faut pas de tarage en principe. On peut faire une microphotographie avec échelle micrométrique.(divers types, appareils de la Cambridge Scratch-extensometer Lee -de Forest, etc..).

7°) <u>Amplification mécanique</u> par leviers.

Principe: une pointe fixe, une pointe mobile articulée permettant l'amplification par double levier. Amplification pratique 1000 à 1200 fois.



<u>Prototype</u> Appareil Mesnager b = 50 mm, pas d'axe ni de couteaux, articulations à lames. Amplification 2000.

Okhuizen, vers 1914. Amplification 1100, base 20 mm. Réalisation Stoppani. Incommode, peu sensible, peu précis.

<u>Appareils Huggenberger</u>.- Divers types plus ou moins perfectionnés. Base normale 20 mm. Amplification 1000 à 1200. Allonges à 100 mm (voire 200 mm). Appareils à base de 20 et 10 mm. et à base variable réglable de 20 à quelques millimètres. Appareils finalement très légers, commodes, sensibles, précis. Fixation facile, d'usage universel. Aiguille à

tranche mince, équilibrée se déplaçant devant un miroir, pour éviter erreur de parallaxe. Echelle en mm, chaque division 0,8 à 1 μ . Usage statique. Très commode, mais très sensible au choc et aux perturbations atmosphériques. Donc précautions à prendre. Il faut de toutes manières opérateurs très expérimentés et consciencieux connaissant à fond le maniement des appareils. Ils ne doivent pas être appuyés trop fortement (erreur des débutants). Les appareils doivent être tarés fréquemment, notamment lorsque les couteaux en acier dur ont été retaillés sur la pierre à rasoir. Il y a des appareils dynamiques à amplification mécanique et enregistreurs à tambour. Forte inertie, faible fréquence propre, appareils ne convenant que dans des limites étroites de fréquence.

Démonstrations Huggenberger. Soient N le nombre de divisions lues (en mm), b la base en mm, A l'amplification:

$$\varepsilon = \frac{N}{Ab} \qquad \text{Si } A = \sim 1050 \qquad b = 20 \qquad \varepsilon = \sim \frac{N}{21000}$$

$$n = E\varepsilon \ (\text{en kg/mm}^2) \qquad n = \sim \frac{21000\ N}{21000} = \sim N \text{ kg/mm}^2.$$

Donc, on possède pour la mesure des tensions un grand nombre d'appareils, dont certains, surtout pour les mesures statiques, ont fait leurs preuves, à conditions de les employer en connaissance de cause qu'ils soient bien tarés et qu'on observe les principes des mesures. Pour les mesures de tensions dynamiques, les résultats sont moins satisfaisants pratiquement. Peut-être n'y a t-il pas un appareil pratique universel, les conditions sont très diverses. En tous cas, le tarage est essentiel.

Mr Dantinne vous exposera mardi prochain les données d'un appareil statique de tarage très précis, le détail avec expérience des appareils Schäfer-Mahiak à cordes sonores et vous parlera enfin d'un type d'appareil amovible appelé déformètre, permettant au moyen d'un seul instrument d'effectuer des mesures en autant de points que l'on veut, à n'importe quelle époque et dont le Laboratoire du Génie Civil de l'Université de Liégé construit un modèle original, dû à Monsieur Dantinne, déjà assez répandu en Belgique et qui donne toute satisfaction.

⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕