

# Rapprt général

Autor(en): **Stüssi, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht**

Band (Jahr): **6 (1960)**

PDF erstellt am: **14.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-6940>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

structures, if the structural material does not obey Hooke's law. An analytical expression is proposed for the stress-strain diagram.

A. HILLERBORG distinguishes, in regard to the plastic theory for reinforced concrete slabs, between the flow line theory and the equilibrium theory and indicates that the equilibrium theory exhibits greater safety. He also comments on the restrictive conditions which the Swedish building regulations impose on the application of such calculations in accordance with the plastic theory.

L. A. SCIPIO has investigated the behaviour of thin shells of revolution of viscoelastic materials under constant normal pressure. If certain assumptions are made, the same stresses follow as those resulting from the elastic theory, while the deformations differ by a time-dependent creep factor.

## Rapport général

La première séance de travail est consacrée à des questions fondamentales, concernant aussi bien la construction métallique que celle en béton, des questions donc qui sont déterminantes pour le dimensionnement des ouvrages en acier et en alliages légers comme de ceux en béton armé et en béton précontraint. Selon les décisions prises à Istanbul par le Comité Permanent le 2 septembre 1958, la discussion aura pour sujet les propriétés des matériaux qui conditionnent le dimensionnement, c'est-à-dire principalement leur résistance et leurs caractéristiques de déformation, ainsi que le développement des méthodes de calcul. La Publication Préliminaire contient 16 contributions au Thème I; leur examen montre qu'il n'est pas aisé de séparer clairement les Thèmes Ia et Ib, car il existe souvent des corrélations étroites entre les propriétés des matériaux et le dimensionnement. Pour certaines contributions, la répartition adoptée a donc été une affaire d'opinion; nous avons tenté d'obtenir un classement qui conduise à une disposition favorisant une discussion féconde à la séance même.

### Thème Ia: Propriétés des matériaux

A une exception près, les mémoires de la Publication Préliminaire relatifs à ce thème traitent le comportement des matériaux soumis à des efforts appliqués un grand nombre de fois ou pendant une longue durée; ils font donc ressortir la tendance moderne de fonder le dimensionnement des ouvrages, non seulement sur les résultats d'essais à court terme en laboratoire, mais aussi sur le comportement réel des matériaux soumis à des efforts variables,

au cours d'un service prolongé. Il s'agit là de phénomènes de longue durée, dont la compréhension requiert une loi correspondante. Les problèmes posés sont en particulier les suivants :

Fatigue due à des efforts appliqués un grand nombre de fois.

Résistance aux efforts prolongés.

Variation des contraintes en fonction du temps, sous déformation constante (relaxation).

Fluage sous effort permanent.

Retrait du béton

ou combinaison de ces effets isolés.

C'est à une *théorie généralisée de l'endurance* qu'il appartient de saisir tous ces problèmes partiels et de décrire avec précision le comportement du matériau à l'aide de caractéristiques aussi peu nombreuses que possible. Cette théorie doit pouvoir s'appuyer sur une loi d'une validité très générale, satisfaisant aux conditions suivantes :

La loi doit reproduire avec exactitude le comportement du matériau, à l'aide de caractéristiques aussi peu nombreuses que possible ; il faut donc qu'elle corresponde, par son caractère même, à l'allure fondamentale du comportement du matériau. En particulier, la variation de la grandeur des sollicitations et des déformations à représenter devra être continue et aussi « naturelle » que possible, de la valeur initiale à la limite asymptotique. D'autre part, il est souhaitable d'obtenir une expression d'une structure suffisamment simple, qui permette d'interpréter aisément les résultats expérimentaux.

En principe, on peut concevoir diverses formes d'expression de cette loi. Pour m'être occupé de façon approfondie des phénomènes de longue durée, je suis cependant persuadé que la loi que j'ai proposée<sup>1)</sup> il y a quelque temps pour la compréhension de la courbe dite de Wöhler, relative à la fatigue due à des efforts alternés, peut être considérée comme loi générale des phénomènes de longue durée. L'allure d'une courbe de Wöhler quelconque  $\sigma_w$  est donnée à la figure 1\*), à gauche en fonction du nombre de cycles  $n$ , à droite en abscisses logarithmiques  $i = \log n$  ; pour décrire cette courbe, nous posons :

$$\sigma = \frac{\sigma_0 + f \sigma_a}{1 + f} \quad (1)$$

où  $\sigma_0$  désigne la valeur initiale,  $\sigma_a$  la limite asymptotique et  $f$  la « fonction de fatigue » à déterminer. L'interprétation de tous les résultats expérimentaux dont je dispose montre de façon claire et convaincante que l'expression

1) F. STÜSSI: Die Theorie der Dauerfestigkeit und die Versuche von August Wöhler. Mitteilungen der T.K.V.S.B., Nr. 13, Zürich 1955.

\*) Voir les figures dans le texte allemand.

$$\lambda = \log f = \log \frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma - \sigma_a}$$

varie linéairement avec les abscisses  $i$ ; on a donc

$$\lambda = p i + \lambda_0 \quad (2)$$

or 
$$f = f_0 n^p = a^\lambda. \quad (2a)$$

L'équation (1) peut donc aussi s'écrire

$$\sigma = \frac{\sigma_0 + a^\lambda \sigma_a}{1 + a^\lambda} = \frac{a^{-\lambda} \sigma_0 + \sigma_a}{1 + a^{-\lambda}}. \quad (1a)$$

La courbe  $\sigma - i$  est symétrique par rapport au point d'inflexion  $W$  correspondant à  $\lambda = 0$ ,  $\sigma = (\sigma_0 + \sigma_a)/2$ .

Pour caractériser complètement la résistance à la fatigue d'un matériau à température constante, il faut connaître, en plus de la résistance aux efforts alternés  $\sigma_w$ , les demi-amplitudes  $\Delta\sigma$  pour une contrainte moyenne déterminée  $\sigma_m$ ; ces valeurs sont définies par les relations

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}.$$

A partir des valeurs couplées  $\Delta\sigma$ ,  $\sigma_m$ , on peut retrouver<sup>2)</sup> la résistance aux efforts alternés  $\sigma_w$ , correspondant au même nombre de cycles  $n$ , à l'aide de «l'invariant de fluage»  $\kappa^2$

$$\kappa^2 = \frac{\sigma_{0Z}(\sigma_{0Z} - \sigma_m)(\sigma_w - \Delta\sigma) - \sigma_m \sigma_w \Delta\sigma}{\sigma_m - \sigma_w + \Delta\sigma}; \quad (3)$$

$\kappa^2$  ne dépend donc pas du nombre de cycles ni du choix de l'abscisse d'origine  $\sigma_m$ ; à une température donnée, il s'agit d'une constante du matériau. Pour l'acier de construction ordinaire,  $\kappa^2$  est nul à la température ambiante; pour les alliages d'aluminium examinés jusqu'à ce jour, par contre, on a  $\kappa^2 > 0$ , ce qui signifie que la résistance à la traction  $\sigma_Z$ ,

$$\sigma_Z = \sigma_m \quad \text{pour} \quad \Delta\sigma = 0$$

dépend du nombre de cycles ou plutôt de la durée de la mise en charge. Avec les abréviations

$$c_1 = \frac{\sigma_{0Z} \sigma_w + \kappa^2}{\sigma_{0Z}^2 + \kappa^2}, \quad c_2 = \frac{\sigma_{0Z} - \sigma_w}{\sigma_{0Z}^2 + \kappa^2}$$

on peut tirer de l'équation (3) la relation suivante

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_w - c_1 \sigma_m}{1 - c_2 \sigma_m}. \quad (4)$$

<sup>2)</sup> F. STÜSSI: Theory and Test Results on the Fatigue of Metals. Journal of the Structural Division, Proceedings ASCE, Oct. 1959. (Joint ASCE-IABSE Meeting, New York, oct. 1958.)



On remarquera que les valeurs  $\Delta\sigma$ , pour une contrainte moyenne  $\sigma_m$  constante, obéissent également à la loi des phénomènes de longue durée donnée par les équations (1) et (2), avec la même valeur de  $p$  que pour la résistance aux efforts alternés, est que la fonction de fatigue  $f_m$  s'exprime par la formule

$$f_m = f_w \left( 1 - \frac{\sigma_0 Z - \sigma_{aw}}{\sigma_0^2 Z + \kappa^2} \sigma_m \right) = f_w (1 - c_{2a} \sigma_m).$$

Ces traits principaux d'une théorie sur l'endurance de l'éprouvette lisse sont comparés, à la figure 2, aux valeurs des résistances à la fatigue des alliages 14 S-T, 17 S-T et 24 S-T, données dans le «Alcoa Structural Handbook», 1945. Nous parlerons plus tard des influences particulières telles que les effets d'entaille, les déformations à froid, etc.

On a indiqué ailleurs la bonne concordance de la loi donnée par les équations (1) et (2) avec la résistance des aciers soumis à des efforts prolongés, à haute température<sup>3)</sup>, et avec la relaxation des fils d'acier<sup>4)</sup>; pour l'étude de ces phénomènes, le temps  $t$  remplace le nombre de cycles  $n$  et l'on a  $i = \log t$ . Nous reviendrons plus loin à la comparaison avec des essais de fluage.

\* \* \*

Il ne saurait être question ici de commenter et d'analyser en détail les contributions à la Publication Préliminaire. Nous nous contenterons de signaler quelques questions particulières, qu'il serait spécialement désirable de discuter lors de la première séance de travail.

M. A. M. FREUDENTHAL a effectué des essais de fatigue sur un acier à haute résistance SAE 4340, avec des sollicitations d'amplitude variable. Il en déduit qu'une limite de fatigue  $\sigma_{aw}$  certaine n'existe que pour les essais à amplitude constante; tel n'est pas le cas si les contraintes sont variables (spectre de contraintes). Les trois séries d'essais, exécutées selon un programme clair et d'une conception logique, ont porté sur des éprouvettes sollicitées en flexion rotative (rotating beam); en supprimant un palier de pulsations correspondant à des contraintes inférieures à l'endurance (estimée), on a pu multiplier par trois à cinq le nombre de cycles relatif aux contraintes élevées.

Ce résultat est important et il pose des questions de principe quant à la conception du problème de l'endurance avec limite inférieure asymptotique; avant d'être accepté généralement, il doit être soigneusement contrôlé. En premier lieu, il faut se demander si, dans les essais décrits, certaines particularités ou influences complémentaires ne sont pas la cause de ce résultat inattendu, qui perdrait par là son droit à une validité générale.

<sup>3)</sup> W. STAUFFER und A. KELLER: Anwendung der Dauerfestigkeitstheorie von F. Stüssi auf die Ergebnisse von Zeitstandversuchen. Archiv Eisenhüttenwesen 1958, Heft 7.

<sup>4)</sup> F. STÜSSI: Zur Relaxation von Stahldrähten, Mémoires AIPC, Vol. 19, Zurich 1959.

Pour des sollicitations élevées, une telle perturbation peut résulter des déformations à froid, dont l'influence se manifeste par une augmentation de la résistance à la fatigue sous un nombre réduit de cycles<sup>2)</sup> (jusqu'à 100 000 cycles et au delà). Comme, dans les essais de M. FREUDENTHAL, la contrainte du palier le plus élevé du spectre atteignait environ 85% de la résistance à la rupture statique, une influence des déformations à froid est possible pour les essais comprenant un nombre d'alternances peu élevé.

Ces réflexions m'ont amené à entreprendre quelques essais parallèles sur des éprouvettes forées, en «alliage Z» (un alliage expérimental de composition Al-Zn) de la Société Anonyme pour l'Industrie de l'Aluminium (collaborateur E. Peter). On a prévu quatre paliers de contraintes, le palier inférieur correspondant pratiquement à la limite de fatigue calculée  $\sigma_{aw} = 0,55 \text{ t/cm}^2$  et le palier supérieur à la résistance à 100 000 cycles au moins. La figure 3 représente les essais de base à contrainte constante  $\sigma_w$ , exécutés sur un pulsateur à haute fréquence Amsler, et le diagramme de la résistance aux efforts alternés  $\sigma_w$  qu'on en a déduit. Dans le tableau\*) donné ci-dessous, les résultats des trois programmes d'essais sont consignés, avec le minimum, le maximum et la moyenne des jeux de quatre éprouvettes. Le résultat des essais de M. FREUDENTHAL n'est donc pas confirmé.

Dans la colonne de droite, figure le nombre d'alternances calculé d'après le théorème de MILTON A. MINER<sup>5)</sup>

$$\sum \frac{\Delta n_i}{n_i} = 1,$$

$\Delta n_i$  désigne le nombre de cycles du programme d'essais pour le palier de contraintes  $\sigma_i$ , tandis que  $n_i$  indique le nombre de cycles qui conduirait à la rupture pour des contraintes limites constantes  $\sigma_i$ . Si l'on tient compte de la dispersion inévitable, la concordance entre les résultats des essais et ceux du calcul est pleinement satisfaisante.

On peut penser que la discussion lors du Congrès favorisera l'éclaircissement de cette question, dont l'importance est fondamentale.

Le mémoire de M. G. REHM est une étude expérimentale sur le comportement à la fatigue des aciers d'armatures. Pour rapprocher autant que possible les conditions des essais des conditions effectives, les fers ont été enrobés dans de courtes poutres en béton. A  $2 \cdot 10^6$  pulsations, la différence pour les résistances limites sous charges répétées entre les barres libres, droites ou enrobées est plus grande que l'on ne pouvait s'y attendre; la diminution de résistance des fers crénelés par rapport aux fers ronds, par contre, est conforme aux prévisions. On ne peut cependant guère accepter la proposition de caractériser l'endurance d'un matériau par l'amplitude  $\Delta\sigma$ ; cette amplitude décroît, en

\*) Voir texte allemand.

<sup>5)</sup> MILTON A. MINER: Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, Sept. 1945.

effet, lorsque la contrainte moyenne  $\sigma_m$  augmente. Le comportement du matériau est par contre déterminé par sa résistance  $\sigma_w$  aux efforts alternés.

M. D. D. VASARHELYI démontre, à l'aide d'essais sur éprouvettes entaillées, que, à basse température  $-50^\circ\text{F}$  ( $-46^\circ\text{C}$ ), non seulement la limite élastique et la résistance à la rupture, mais également la résistance à la fatigue (au moins pour les entailles à grand rayon) de l'acier ordinaire ASTM A-7 est sensiblement plus élevée qu'à la température ambiante de  $70^\circ\text{F}$  ( $21^\circ\text{C}$ ). Il serait souhaitable de poursuivre systématiquement ces essais.

M. T. C. HANSEN a étudié l'influence de l'humidité ambiante sur le fluage et le retrait du béton. En ce qui concerne le fluage, il a observé les flèches de poutres expérimentales soumises à un moment de flexion constant.

Les diagrammes, tirés de la figure 2 de son mémoire, des flèches de fluage  $\eta$ , pour une humidité ambiante de 50%, 60% ou 70% et une contrainte sur l'arête atteignant  $32\text{ kg/cm}^2$ , ont été comparés avec la loi pour les phénomènes de longue durée de l'équation (1); cette confrontation est visible à la figure 4. Il paraissait indiqué de comparer également ces courbes de fluage avec la loi de fluage donnée par M. F. DISCHINGER<sup>6)</sup>

$$\eta = \eta_a (1 - e^{-ct});$$

les constantes  $\eta_a$  et  $c$  ont été déterminées à partir des valeurs de fluage à 10 et 100 jours, pour les humidités ambiantes de 50% et 70%. Les diagrammes calculés de cette façon sont comparés à la figure 5 avec ceux de la figure 4. Il apparaît nettement qu'une loi de fluage de la forme  $1 - e^{-\varphi}$  ne correspond pas au caractère du phénomène de fluage. Cela est important, car la détermination du coefficient de fluage final, par extrapolation des valeurs expérimentales, n'est ainsi plus réalisable avec exactitude, parce qu'elle dépend fortement des valeurs expérimentales choisies pour le calcul des constantes.

Il est assurément possible de généraliser la loi de fluage de DISCHINGER sous la forme

$$\eta = \sum \eta_{ia} (1 - e^{-c_i t})$$

ce qui est en principe la formule de fluage proposée par MM. A. M. FREUDENTHAL et F. ROLL<sup>7)</sup>. On réussit ainsi à mieux adapter, dans le domaine étudié, la courbe de fluage aux valeurs expérimentales; il reste cependant à examiner si ce procédé permet d'obtenir une extrapolation suffisamment précise à la valeur limite  $\eta_a$ .

M. ST. SORETZ décrit l'influence des conditions de prise sur les déformations différées du béton soumis à des charges prolongées. Il examine également l'influence, sur ces déformations, de l'adhérence entre les armatures et le béton.

<sup>6)</sup> F. DISCHINGER: *Massivbau. Taschenbuch für Bauingenieure*, herausgegeben von F. Schleicher, 2e édition 1955, p. 766, vol. I.

<sup>7)</sup> A. M. FREUDENTHAL and F. ROLL: *Creep and Creep Recovery of Concrete under High Compressive Stress. Journal of the American Concrete Institute*, Juin 1958.

Le mémoire de MM. J. TAUB et A. M. NEVILLE, relatif à la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton soumises à des charges statiques, montre que le mode d'application des efforts (directement ou par des entretoises) n'exerce que peu d'influence.

### **Thème 1 b: Développement des méthodes de calcul**

En choisissant ce thème, on pensait à un prolongement de la discussion relative aux questions que notre regretté Secrétaire général, M. le Prof. Pierre Lardy, avait largement exposées dans son rapport général au Thème II du Congrès de Cambridge-Londres. Ce rapport général reste encore parfaitement valable à l'heure actuelle; aujourd'hui comme alors, le développement des méthodes de calcul, analytiques et numériques, comme des essais sur modèle réduit, a toujours pour but de déterminer le jeu des forces dans nos ouvrages avec une rigueur et une exactitude suffisante. Bien qu'aucune contribution ne se rapporte à ces questions fondamentales (du moins pas dans le sens du rapport général précité de M. le Prof. Pierre Lardy), une discussion, au Congrès même, sur les lignes principales du développement des méthodes de calcul paraît très désirable.

A la lumière des réflexions précédentes, les mémoires de la «Publication Préliminaire» illustrent certains points relatifs au Thème posé en traitant plutôt des questions de détail que des rapports de principe.

Le mémoire de MM. R. F. LEGGET et W. R. SCHRIEVER démontre de façon instructive l'importance d'une estimation exacte des charges sollicitant un ouvrage. Il serait d'intérêt général d'étendre à d'autres pays l'étude portant sur les différences régionales des surcharges dues à la neige à considérer au Canada. Un constructeur pleinement conscient de ses responsabilités quant aux vies humaines et aux valeurs matérielles ne peut guère supporter l'idée qu'il existe toujours une probabilité de ruine de nos ouvrages, si faible soit-elle. Mis à part les cas de force majeure, un accident est toujours dû à une insuffisance humaine, c'est-à-dire à l'ignorance ou à des erreurs commises. Les courbes données des fréquences de charge et de résistance se recourent dans la zone de l'insuffisance humaine (figure 6), qui doit être évitée par les soins apportés à l'étude et à l'exécution.

M. I. I. CASEÏ expose dans son rapport les recherches théoriques et expérimentales qui ont été entreprises en URSS sur des ponts de chemin de fer, pour étudier les actions dynamiques des charges mobiles; il montre que ces actions ne dépendent pas seulement du type de l'ouvrage, mais également du matériel roulant et de la superstructure. Ces résultats sont une contribution intéressante aux échanges internationaux de résultats d'expériences.

MM. CH. MASSONNET et P. MOENAERT ont dépouillé quelques 1500 résultats d'essais à la rupture sur des poutres en béton armé, en les comparant aux

moments de rupture calculés pour diverses formes du diagramme des compressions du béton. Lorsque la répartition admise est conforme à la réalité, on obtient en moyenne une bonne concordance entre les essais et le calcul.

M. W. WIERZBICKI applique sa méthode semi-probabiliste au calcul d'un pont métallique de chemin de fer. Il énumère les divers «coefficients d'incertitude». Le but de l'étude est de tenter d'obtenir une meilleure économie, tout en gardant une sécurité suffisante (par exemple par rapport à la limite élastique).

Le mémoire de M. G. HERRMANN montre l'application des méthodes énergétiques aux effets thermiques; il répond par là aux besoins provoqués par le développement récent de la technique dans le domaine de la construction des réacteurs.

M. B. GILG esquisse le développement des méthodes de calcul des barrages-voûtes; il rappelle que la complication des formes à considérer ne permet pas d'obtenir une solution analytique rigoureuse.

MM. L. G. BOOTH et P. B. MORICE montrent, après rappel des bases mathématiques, comment on peut déterminer les contraintes et les déformations d'un voile cylindrique à l'aide d'une calculatrice électronique (Ferranti-Pegasus). Cet instrument de calcul puissant va certainement prendre toujours plus d'importance dans le domaine des ponts et charpentes.

MM. A. YLINEN et A. ESKOLA exposent l'application des déplacements virtuels et du principe de l'énergie complémentaire minima au calcul des treillis hyperstatiques, dont le matériau n'obéit pas à la loi de Hooke. Pour le diagramme allongement-tension, les auteurs proposent une expression analytique.

M. A. HILLERBORG présente le calcul plastique des dalles en béton armé; il distingue deux théories principales, celle des lignes de rupture et celle de l'équilibre, qui offre l'avantage d'une plus grande sécurité. Il expose les conditions restrictives que contiennent les règlements suédois en ce qui concerne l'utilisation des calculs plastiques.

M. L. A. SCIPIO étudie le comportement de voiles minces de révolution, en matériau visco-élastique, soumis à une pression normale uniformément répartie. Dans certaines conditions, les sollicitations sont identiques à celles données par la théorie de l'élasticité, tandis que les déformations sont affectées d'un coefficient de fluage, dépendant du temps.