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

**Band:** 6 (1960)

**Artikel:** Rapport général

**Autor:** Stüssi, F.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-7015

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 16.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Rapport général

## Thème Ia: Les propriétés des matériaux

Lorsque la discussion, à un congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes, a pour sujet les propriétés mécaniques déterminantes des matériaux, il paraît utile de fixer d'abord notre point de vue et, par là, le but de la discussion. Qu'il me soit permis de citer à ce propos les constatations émises par M. le prof. WEIBULL[1]), Stockholm, qui peuvent, à nous aussi, servir de directive:

"There are two quite different lines of attacking fatigue problems: the phenomenological and the metallographical. The first one is the line of the designer, who wants to know what happens; the second one, that of the metallographer, who wants to know why it happens. As a link between the two, you will find the third man, the tester of materials.

All these categories have different opinions as to the way of designing the experiments and of conducting the testing. The metallographer, for instance, may think — I have met this statement quite recently — that the basic physical facts of fatigue should be clarified before the organization of any large scale testing. The designer, on the other hand, wants urgently many more facts about fundamental questions than are available today, and it is definitely impossible for him to wait for the many years that it will certainly take to obtain well-founded theories which will be of any use to him. There is no need, I think, to point out that both of the ways have to be trod and that progress in one field may have quite important influences on the proceedings in the other."

Telles sont les réflexions de M. WEIBULL, dont je ne voudrais pas manquer de relever ici les grands mérites en ce qui concerne l'examen statistique et l'interprétation des essais de fatigue.

Notre point de vue est ainsi clairement fixé; nous devons connaître le comportement des matériaux parce qu'il conditionne le dimensionnement des ouvrages et nous sommes forcés d'acquérir ces bases en recourant à un procédé phénoménologique tant que les causes physiques profondes des phénomènes essentiels nous sont cachées. Bien entendu, la coopération du physicien et du spécialiste en essais des matériaux sera toujours bienvenue, nous tenons à le relever ici.

Pour illustrer ces réflexions, considérons la relation qui lie la résistance aux efforts alternés $\sigma_W$ d'un métal au nombre de cycles $n$ qui produit la rupture

---

[1]) W. WEIBULL: The Statistical Aspect of Fatigue Failures and its Consequences. Fatigue and fracture of metals, edited by W. M. Murray, Mass. Inst. Techn., 1952.

de l'éprouvette ou de la pièce. Cette courbe dite de Wöhler, décrivant la résistance aux efforts alternés, peut en principe s'exprimer de différentes façons, comme je l'ai déjà relevé dans la «Publication Préliminaire». J'ai proposé une relation de la forme

$$\sigma_W = \frac{\sigma_{0Z} + f_W \sigma_{aW}}{1 + f_W}. \tag{1}$$

La résistance cherchée y apparaît comme la moyenne pondérée de deux valeurs limites: la résistance à la rupture statique $\sigma_{0Z}$ et la limite asymptotique de fatigue $\sigma_{aW}$. Le «poids» est donné par la fonction d'endurance $f_W(n)$

$$f_W = \frac{\sigma_{0Z} - \sigma_W}{\sigma_W - \sigma_{aW}}, \tag{1a}$$

dont le logarithme varie linéairement avec la valeur $i = \log n$; on a donc

$$\lambda = \log f_W = \log \frac{\sigma_{0Z} - \sigma_W}{\sigma_W - \sigma_{aW}} = p\,i + \lambda_0$$

et

$$f_W = a^\lambda = f_{0W}\, n^p. \tag{1b}$$

Se fondant sur une proposition de M. Epremian et utilisant la courbe des erreurs de Gauss, M. Weibull[1]) a présenté une autre expression que l'on peut écrire sous la forme

$$\sigma_W = \sigma_{aW} + (\sigma_{0Z} - \sigma_{aW})\, e^{-m_0 i^r}; \tag{2}$$

par un double logarithme, on obtient la relation linéaire:

$$\log\log \frac{\sigma_{0Z} - \sigma_{aW}}{\sigma_W - \sigma_{aW}} = r \log i + \mu_0.$$

Comparons les deux expressions en considérant, par exemple, les résultats d'une série d'essais effectués sur des éprouvettes forées (∅ du trou 4 mm, largeur totale 30 mm), en acier 44 de la Société de Roll (fig. 1) *). Comme cela ressort de la fig. 2 *), les deux expressions concordent bien dans le domaine étudié, de $n = 30 \cdot 10^3$ à plus de $n = 10 \cdot 10^6$; la dispersion inévitable, spécialement élevée pour les faibles efforts, ne permet pas de décider laquelle des deux expressions reproduit mieux l'allure de la courbe de Wöhler. Si je donne la préférence à l'expression (1), c'est parce qu'elle s'applique correctement à d'autres phénomènes de longue durée et qu'elle est plus simple dans sa forme et son application que l'expression (2).

Ce n'est pas seulement en effectuant et en exploitant de nouvelles séries comprenant de nombreux essais, ce sera aussi probablement grâce à «l'essai à deux degrés», interprété dans le sens de la sommation des dommages partiels, que l'on pourra décider quelle est la véritable loi de fatigue. On sait que le théorème de Palmgren-Miner n'est pas valable pour l'essai à deux degrés; cet

*) Voir les figures dans le texte allemand.

essai comporte, dans un premier palier de charge $\sigma_1$ (rupture à $n_1$ alternances), $\Delta n_1$ alternances suivies, au second palier $\sigma_2$ ($n_2$), de $\Delta n_2$ alternances jusqu'à la rupture. Lorsque les sollicitations sont de même nature aux deux degrés (par exemple des sollicitations alternées ou une contrainte moyenne $\sigma_m$ constante), on obtient, en posant

$$\xi_1 = \frac{\Delta n_1}{n_1}, \qquad \xi_2 = \frac{\Delta n_2}{n_2},$$

pour $\sigma_1 < \sigma_2, \quad n_1 > n_2 : \xi_1 + \xi_2 > 1$

et pour $\sigma_1 > \sigma_2, \quad n_1 < n_2 : \xi_1 + \xi_2 < 1,$

alors que le théorème de Palmgren-Miner indique que $\xi_1 + \xi_2 = 1$. La courbe d'endommagement $S - \xi$ ne saurait donc être une droite [2]).

Nous pouvons nous représenter l'allure de cette courbe à l'aide des réflexions suivantes: supposons que la détérioration $e$ du matériau augmente proportionnellement au nombre d'alternances [3]),

$$e = \alpha \xi .$$

Comme elle touche un barreau de plus en plus endommagé, dont nous admettons que la capacité de résistance $w$ diminue linéairement,

$$w = 1 - \beta \xi ,$$

l'endommagement relatif s'écrira

$$S = \frac{e}{w} = \frac{\alpha \xi}{1 - \beta \xi}. \tag{3}$$

La rupture se produit pour $\xi = 1$ et l'on a

$$S = 1 = \frac{\alpha}{1 - \beta}$$

et par conséquence $\alpha + \beta = 1 .$

Divisons le numérateur et le dénominateur de l'équation (3) par $\alpha$ et posons

$$a = \frac{1}{\alpha}; \qquad b = \frac{\beta}{\alpha},$$

nous pouvons alors écrire $S = \dfrac{\xi}{a - b \xi}$

ou, puisque $a = 1 + b$, $$S = \frac{\xi}{1 + b(1 - \xi)}. \tag{3a}$$

---

[2]) N. M. Newmark: A Review of Cumulative Damage in Fatigue. Fatigue and fracture of metals, edited by W. M. Murray, Mass. Inst. Techn., 1952.

[3]) Cette hypothèse paraît justifiée puisque, sous contrainte constante, les fissures se propagent proportionnellement au nombre d'alternances; voir W. Weibull: Size effects on fatigue crack initiation and propagation in Aluminium sheet specimens subjected to stresses of nearly constant amplitude. F.F.A., Flygtekniska Försöksanstalten, Meddelande 86, Stockholm 1960.

A vrai dire, l'essai à deux degrés ne nous permet pas de déterminer directement la fonction d'endommagement $b$; nous ne pouvons obtenir que des courbes d'endommagement relatives, par rapport à une courbe admise arbitrairement pour le premier palier de charge $\sigma_1$. Cependant, les résultats de quelques premiers essais de sollicitations alternées concordent bien avec les valeurs calculées si l'on prend comme fonction d'endommagement $b$ la fonction de fatigue $f_W$ exprimée par l'équation (1a), soit

$$b = f_W = \frac{\sigma_{0Z} - \sigma_W}{\sigma_W - \sigma_{aW}} \tag{4}$$

ou

$$S_W = \frac{\xi}{1 + f_W(1-\xi)}. \tag{4a}$$

Appliquons, dans un essai à deux degrés, le palier de charge $\sigma_1$ comportant $\Delta n_1 = \xi_1 n_1$ alternances suivies du palier $\sigma_2$; on disposera, à ce dernier palier, des $\Delta n_2 = \xi_2 n_2$ alternances correspondant au domaine d'endommagement s'étendant de $S = S_1$ à $S = 1$ et il vient

$$\xi_2 = \frac{1-\xi_1}{1+\varphi\,\xi_1}, \tag{5}$$

avec (fig. 3) *)

$$\varphi = \frac{f_2 - f_1}{1 + f_1}. \tag{5a}$$

A la fig. 4 *), les résultats de deux séries d'essais sont comparés avec ces valeurs calculées; dans les expériences de M. WILKINS[4]) on a $\sigma_1 < \sigma_2$, $f_1 > f_2$, $\xi_1 + \xi_2 > 1$ tandis que dans nos essais, effectués sur des éprouvettes forées en acier de Roll, on a le cas inverse, soit $\xi_1 + \xi_2 < 1$. Remarquons expressément que la relation $b = f_W$ (équation 4) n'est valable que pour des sollicitations alternées ($\sigma_{max} = -\sigma_{min}$, $\sigma_m = 0$); pour d'autres genres de sollicitations, avec $\sigma_m \neq 0$, la corrélation entre $b$ et $f_W$ devra être déterminée par des essais analogues.

Les essais sur éprouvettes doivent nous révéler les relations fondamentales qui régissent le comportement des matériaux soumis à des efforts de longue durée. Il serait souhaitable que ces recherches de laboratoire soient complétées par des essais à grande échelle sur des éléments de construction ou des ouvrages complets; on peut ainsi contrôler l'application, au dimensionnement des ouvrages, des résultats obtenus en laboratoire et en garantir l'exactitude. C'est là que réside l'importance de la communication de M. le prof. MICHALOS et de ses collaborateurs.

M. FREUDENTHAL complète sa contribution parue dans la «Publication Préliminaire» et répond aux réflexions émises dans mon rapport général; on constatera que les deux points de vue ne se sont pas encore rapprochés. Le

*) Voir les figures dans le texte allemand.

[4]) E. W. C. WILKINS: Cumulative damage in fatigue. Colloquium on fatigue, Stockholm 1955, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956.

problème soulevé par M. FREUDENTHAL est fondamental et il reste très actuel; je suis persuadé qu'il se trouvera, pour l'ingénieur civil également, une solution satisfaisante, même si cela demande une recherche expérimentale de longue haleine.

Lorsque l'on entreprend des essais, la difficulté réside dans la dispersion inévitable. Seules des séries comportant de nombreux essais permettent d'obtenir des moyennes bien assurées et de connaître la grandeur des écarts probables; cela exige souvent plus de temps que l'on n'en dispose dans le cas particulier. Il est donc utile que la statistique mathématique nous montre comment exploiter valablement des séries de petite taille. La communication de M. DAVIN présente quelques aspects fondamentaux de ce problème.

### Thème Ib: Développement des méthodes de calcul

Pour établir des méthodes de calcul numériques, destinées à permettre le dimensionnement des ouvrages, on peut en principe procéder de deux manières, illustrées toutes deux par des contributions à la discussion.

En premier lieu on peut transformer — à l'aide de relations permettant d'intégrer numériquement (calcul d'une aire à l'aide de la règle de Simpson, équation du polygone funiculaire, introduction de développements en série) ou de différentier — des équations différentielles en des systèmes d'équations écrites en un nombre fini de points du domaine d'intégration. C'est un procédé par intégration successive (calcul d'une aire à l'aide de la règle de Simpson) qu'utilise M. GILG ; il part de la dérivée de l'ordre le plus élevé intervenant dans l'équation différentielle pour évaluer les dérivées d'ordre inférieur. Notons cependant que les équations pourront être peu maniables lorsque l'on a un grand nombre d'intervalles.

C'est un développement en série qu'utilisent MM. NASH et HO pour établir un système d'équations; ils étudient une plaque circulaire encastrée, sur fondation élastique.

L'efficacité des procédés numériques de cette sorte s'évaluera d'après le critère suivant: obtenir la meilleure précision possible avec le moins d'équations possible.

Une seconde manière de procéder consiste à introduire, lors de l'étude d'un ouvrage, un «système de remplacement» facile à examiner. C'est ainsi que, en statique élémentaire, le calcul graphique d'une poutre simple repose sur l'analogie du moment fléchissant de la poutre avec la figure d'équilibre d'un fil chargé; MOHR a étendu cette analogie en l'appliquant à l'étude de la ligne élastique. Dans sa communication (à paraître dans les «Mémoires»), M. ASPLUND expose une autre analogie, celle existant entre le calcul des voiles minces et celui des treillis spatiaux.

M. KOLOUŠEK, dont on connaît les études sur les vibrations, examine les

vibrations des ouvrages continus, formés d'éléments successifs ou identiques. Il utilise à cet effet un autre procédé d'investigation numérique, celui des approximations successives.

L'application des calculatrices électroniques à l'étude des ouvrages du génie civil, application illustrée par l'exposé de M. MEHMEL et celui de M. MASSONNET et de ses collaborateurs, ne fait qu'accroître l'importance des méthodes de calcul efficaces et précises; une exigence supplémentaire doit être satisfaite: il faut que la programmation soit aisée.

Dans certains cas, les essais sur modèle peuvent remplacer ou compléter le calcul; la contribution de M. BERIO montre une application de ce procédé, surtout indiqué pour des structures compliquées, rebelles à un calcul à la fois simple et suffisamment précis.

M. OLSZAK et M. DRUCKER (pour ce dernier, voir le volume 21 des «Mémoires») envisagent dans leurs contributions des états limites. Ces méthodes d'investigation, si séduisantes soient-elles du point de vue théorique, ne sont pas encore admises sans autre comme base du dimensionnement des ouvrages.

M. WIERZBICKI ainsi que MM. MASSONNET et MOENAERT complètent leurs contributions parues dans la «Publication Préliminaire».

## Conclusions

1. Les contributions à la première séance de travail du congrès font clairement ressortir la tendance, déjà fort répandue actuellement et qui ne fait que s'étendre, de fonder le dimensionnement des ouvrages, non seulement sur les résultats d'essais de courte durée 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 et tout d'abord des problèmes de la fatigue, de la résistance aux efforts prolongés, de la relaxation ainsi que du retrait et du fluage.

Dans l'état actuel de nos connaissances, il n'est pas encore possible de résoudre définitivement ces problèmes en s'appuyant sur une interprétation physique de ces phénomènes. Pour l'instant, l'ingénieur civil doit donc recourir à un procédé phénoménologique, tout en souhaitant que se poursuive la coopération du physicien et du spécialiste en essais des matériaux.

Lors du congrès, la discussion a toutefois indiqué en principe la marche à suivre ainsi que la disposition générale et l'interprétation des essais à effectuer dans l'avenir; ces recherches sont nécessaires, elles permettront de contrôler les lois existantes, de les corriger en cas de besoin et de les développer.

2. L'évolution des méthodes de calcul sera principalement caractérisée par le développement des procédés numériques; le dimensionnement des ouvrages est en effet un problème de caractère essentiellement numérique. Les conditions d'équilibre et de déformation, qui régissent le jeu des forces dans les ouvrages

et conduisent souvent à des équations différentielles, peuvent s'exprimer à l'aide de systèmes d'équations simples, solubles numériquement. Une méthode d'investigation est appropriée lorsqu'elle permet de résoudre le problème posé à peu de frais mais de façon sûre, c'est-à-dire avec une précision suffisante. Une solution analytique rigoureuse n'est applicable que si les hypothèses de base sont réellement satisfaites. Avec l'introduction des calculatrices électroniques, il est d'autant plus nécessaire de posséder des méthodes numériques efficaces.

L'introduction d'un système de remplacement, plus aisé à examiner, peut également faciliter le calcul d'un ouvrage. Enfin, dans certains cas particuliers, l'essai sur modèle peut remplacer ou compléter l'étude proprement dite.

3. L'ingénieur chargé de réaliser une construction n'oubliera jamais que les ouvrages exécutés actuellement devront normalement durer plusieurs générations et qu'ils seront donc soumis, au cours d'un service prolongé, à des conditions variables. Nous remplirons toujours plus pleinement notre tâche d'ingénieur et de constructeur en tenant toujours mieux compte, lors de la conception et de l'étude des ouvrages, de ces conditions de service réelles, touchant aussi bien les charges statiques et dynamiques, les effets spatiaux et le jeu des forces dans l'espace que le comportement des matériaux dans le temps.