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

**Band:** 1 (1932)

**Artikel:** Influence des propriétés physiques des matériaux sur la statique du béton armé: rapport d'introduction

**Autor:** Campus, Fernand

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-626

**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**

# VI

**Sixième Séance de travail.**

*Sechste Arbeitssitzung.*

**Sixth Working Meeting.**

## INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MATÉRIAUX SUR LA STATIQUE DU BÉTON ARMÉ

## *AUSBAU DER STATIK DES EISENBETONS MIT RÜCKSICHT AUF DIE BAUSTOFFEIGENSCHAFTEN*

## DEVELOPMENT OF THE STATICS OF REINFORCED CONCRETE, WITH REGARD TO THE PROPERTIES OF THE MATERIAL USED

### VI 1.

### INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MATÉRIAUX SUR LA STATIQUE DU BÉTON ARMÉ. RAPPORT D'INTRODUCTION.

### *AUSBAU DER STATIK DES EISENBETONS MIT RÜCKSICHT AUF DIE BAUSTOFFEIGENSCHAFTEN. EINLEITENDES REFERAT*

### DEVELOPMENT OF THE STATICS OF REINFORCED CONCRETE, WITH REGARD TO THE PROPERTIES OF THE MATERIAL USED. INTRODUCTORY REPORT

**Fernand CAMPUS,**
Professeur à l'Université de Liége.

Voir aussi « Publication Préliminaire », p. 547. — *Siehe auch « Vorbericht », S. 547.*
See also " Preliminary Publication ", p. 547.

Je crois pouvoir constater l'accord général entre mon rapport d'introduction et celui du Dr Faber (Elasticity, plasticity and shrinkage), notamment en ce qui concerne la proportionnalité des déformations plastiques aux forces, hypothèse favorable pour les méthodes de calcul.

Le rapport d'introduction est compatible aussi, d'une manière générale, avec tous les autres rapports concernant les questions du béton armé ou connexes présentés au Congrès, et avec les contributions apportées à ces questions au cours des discussions précédentes. Je crois utile cependant de reprendre encore le point fondamental du but de la statique. La résistance du béton armé est une propriété physique réelle ; elle est définie par des expériences et se détermine à certains indices ; rupture, déformation, etc... Elle est une fonc-

tion complexe des propriétés physiques élémentaires des matériaux constituants.

La statique ou le calcul constituent des conjectures, tendant à prévoir la résistance d'une construction en béton armé.

On peut exiger de la statique qu'elle soit exacte. On peut se représenter qu'une telle statique puisse exister et on conçoit qu'elle ne pourrait être que le fruit d'une analyse pénétrante et d'un emploi étrangement certain du calcul des probabilités. Une telle statique serait l'apanage exclusif de quelques rares savants. On lui préférera vraisemblablement toujours une statique « efficace » ; je ne veux pas utiliser le qualificatif « commode » que Poincaré applique à la géométrie euclidienne. L'efficacité résultera d'un compromis entre l'exactitude inaccessible et la commodité strictement suffisante. La notion est donc imprécise et donnera lieu toujours à un conflit moral entre ceux qu'inquiètent des aspirations intellectuelles et ceux que les nécessités ou l'expérience contraignent à plus de réalisme. Un rapport d'introduction ne me paraît pas destiné à résoudre ce conflit. Son but est plutôt de poser le problème. Le travail en perspective est assez vaste pour que chacun y trouve de l'intérêt, mais il importe à mon sens, pour être pratique, de l'entreprendre avec une claire notion de l'exact, du possible et de l'efficace.

Une contradiction importante résulte du fait que l'on prend en considération la résistance à l'extension du béton pour le calcul des déformations et des inconnues hyperstatiques, tandis que l'on néglige le béton tendu pour le calcul des fatigues et des dimensions. Ni l'une ni l'autre de ces hypothèses ne sont d'ailleurs exclusives ; le calcul permet de tenir compte indifféremment de l'une ou de l'autre dans tout problème concret.

Il y a beaucoup d'apparences que ce soit le second concept qui s'écarte le plus des circonstances réelles des ouvrages. Cependant aucune tendance de réforme ne se dessine. J'ai personnellement consacré quelques efforts au calcul des tensions d'extension du béton il y a quelques années (Annales des Travaux publics de Belgique, 1924), pour aboutir à une constatation plutôt négative, comme mes prédécesseurs dans cette voie. Il est certain néanmoins que la question des bases du calcul du béton armé n'est pas close ; elle inquiète un spécialiste qui n'est pas un néophyte, le Dr von Emperger, et son article récent a déclanché dans la revue « Beton und Eisen » une véritable enquête, d'où la question apparaît comme n'étant pas résolue.

En France, elle inquiète aussi M. F. Dumas, ingénieur des Ponts et Chaussées, dont j'ai déjà cité, dans mon rapport, deux études récentes et qui, par un important travail publié après la remise de ce rapport, revient aux expériences fondamentales de la flexion du béton armé. Ce mémoire, intitulé « Le béton armé et ses hypothèses », a paru dans les fascicules V et VI de 1931 des Annales des Ponts et Chaussées.

Je me suis mis en relation avec M. F. Dumas, qui a bien voulu répondre à mon appel à la discussion. C'est donc après entente préalable avec lui sur l'opportunité du débat et après communication des arguments, que j'exposerai sommairement comment je crois qu'il faut interpréter les idées de M. Dumas. M. Dumas n'attaque guère le calcul organique usuel, encore qu'il en constate certaines anomalies. C'est à l'hypothèse de l'élasticité appliquée

aux déformations qu'il réserve principalement ses critiques ; il les pousse aux conséquences extrêmes puisqu'il conclut textuellement :

*a*) « La loi de Hooke n'est pas applicable aux ouvrages en béton armé.

*b*) On ne peut calculer les pièces en béton armé par la méthode habituelle des lignes d'influence.

*c*) Les théorèmes de Maxwell et de Castigliano ne peuvent s'appliquer au calcul des pièces en béton armé, ainsi que toute la théorie basée sur les travaux virtuels. »

Les deux dernières conclusions sont exactement l'inverse de ce que j'ai écrit dans mon rapport. Il m'a semblé qu'une contradiction aussi complète devait faire l'objet d'un éclaircissement.

M. Dumas fonde ses conclusions sur un ensemble d'expériences effectuées, jusqu'à rupture par flexion simple, sur des poutres prismatiques en béton armé, à section rectangulaire. Traçant les diagrammes de variation des flèches en fonction des charges, il obtient des courbes comprises entre les deux droites limites correspondant aux valeurs calculées compte tenu ou non du béton tendu. Il en conclut qu'il n'y a pas de proportionnalité des déformations aux charges et il vérifie, par un exemple, qu'il n'y a pas de réciprocité (th. de Maxwell). Me plaçant à un point de vue absolu, j'accepte ces conclusions, mais j'objecte aussitôt qu'elles sont trop sommaires et que dans le domaine de variation des charges envisagé par M. Dumas, qui va de zéro à la charge de rupture, l'analyse des régions est insuffisante. Il semble même que M. Dumas s'attache davantage à l'étude des effets des charges élevées, où les écarts considérables justifient nettement ses conclusions, par exemple en ce qui concerne la réciprocité.

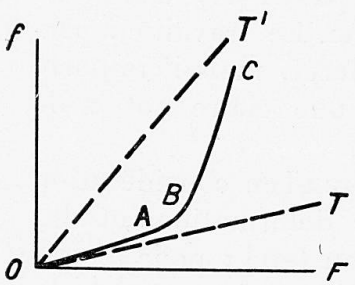

Fig. 1.

Les conclusions de mon rapport sont, au point de vue de la statique efficace, compatibles avec les observations expérimentales de M. Dumas.

En effet, à plusieurs reprises, il note que les diagrammes de variation des flèches en fonction des charges ont l'allure du croquis ci-contre. Ils comportent :

1) une partie quasi-droite OA, voisine de la droite théorique OT correspondant au calcul lorsqu'on suppose le béton tendu résistant.

2) une courbe de transition AB.

3) une partie terminale quasi droite BC se terminant, sous la charge de rupture, au voisinage de la droite théorique OT′ des flèches calculées en supposant le béton tendu intégralement fissuré. Je ferai observer que l'allure de ce diagramme concorde avec toutes les expériences connues, avec tous les diagrammes analogues présentés dans la séance précédente et avec ceux que divers orateurs vont montrer dans la présente séance.

Les conclusions de mon rapport ne se réfèrent qu'à la zone OA, tout le texte l'implique. Je ne me suis pas placé au point de vue de la résistance des matériaux, mais bien de la statique, du calcul qui envisage le domaine des charges pratiques de sécurité. J'ai d'ailleurs à diverses reprises exprimé la restriction que les déformations devaient rester assez petites, ce qui implique une limita-

tion aussi étroite des forces, tant permanentes qu'instantanées. La quasi droite initiale OA définit ce que l'on pourrait appeler la région des faibles écarts de proportionnalité. La limite A serait la charge-limite des faibles écarts de proportionnalité; on peut la définir conventionnellement si elle ne s'indique pas naturellement.

M. Dumas constate dans son mémoire que la limite A concorde avec les taux de travail pratiques tels qu'ils sont définis par la circulaire ministérielle française de 1906 (0,28 de la résistance sur cubes à 90 jours).

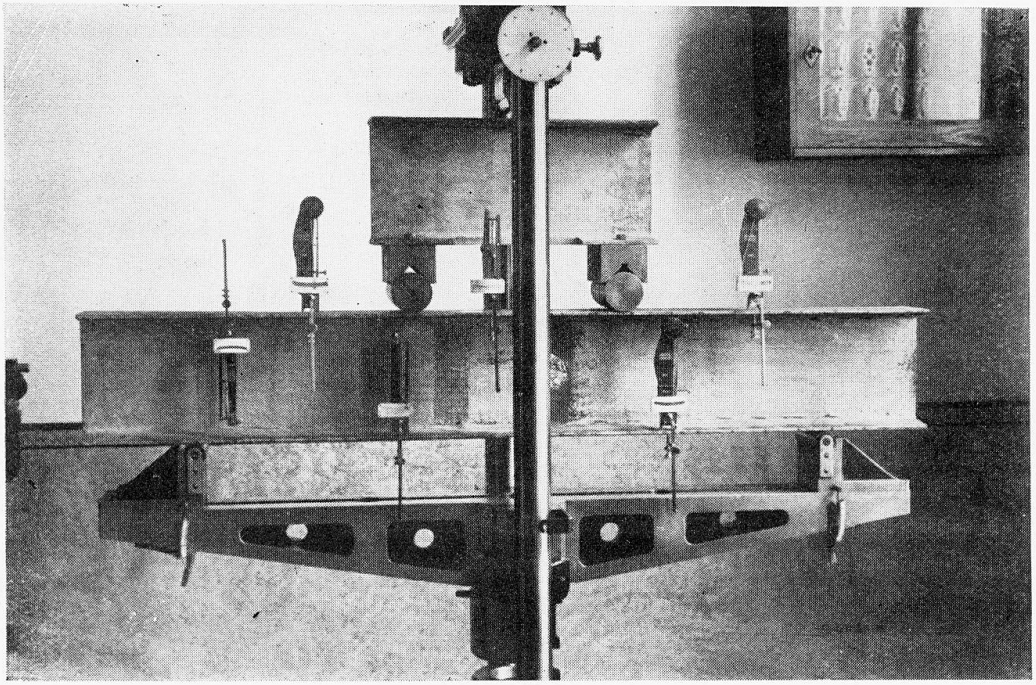

Fig. 2.

Il résulte de cet examen que si les conclusions de M. Dumas sont valables pour un problème passant du domaine OA au domaine BC, et même, malgré la loi quasi linéaire, dans le domaine BC, je considère que ses propres expériences justifient mes conclusions dans le domaine OA. Je puis donc maintenir mes conclusions en les précisant de la sorte et sous le bénéfice des réserves de mon rapport concernant les déformations lentes produites par les charges permanentes et les effets de charges répétées. Toutes les expériences concordent pour montrer que ces effets tendent à produire, dans les limites de charges et de déformations suffisamment modérées, un état élastique final bien défini.

Au point de vue expérimental, je crois devoir attirer l'attention sur l'influence locale des charges concentrées. A titre de démonstration, j'indique les résultats de l'auscultation directe, au moyen d'extensomètres Huggenberger, d'une poutrelle I en acier fléchie sous l'effet d'une ou de deux charges concentrées. Il se présente des écarts par rapport à la loi de Hooke dans presque toute l'étendue de la pièce et la fibre neutre est déplacée vers le haut, comme dans les expériences de M. Dumas (fig. 2, 3, 4). Personne cependant n'en

conclura à la non-validité de la loi de Hooke, des lignes d'influences, des théorèmes de Castigliano, de Maxwell et des travaux virtuels pour les constructions en acier. Ces effets locaux n'apparaissent clairement que par les mesures tensométriques. Les flèches de flexion intègrent les effets de toutes

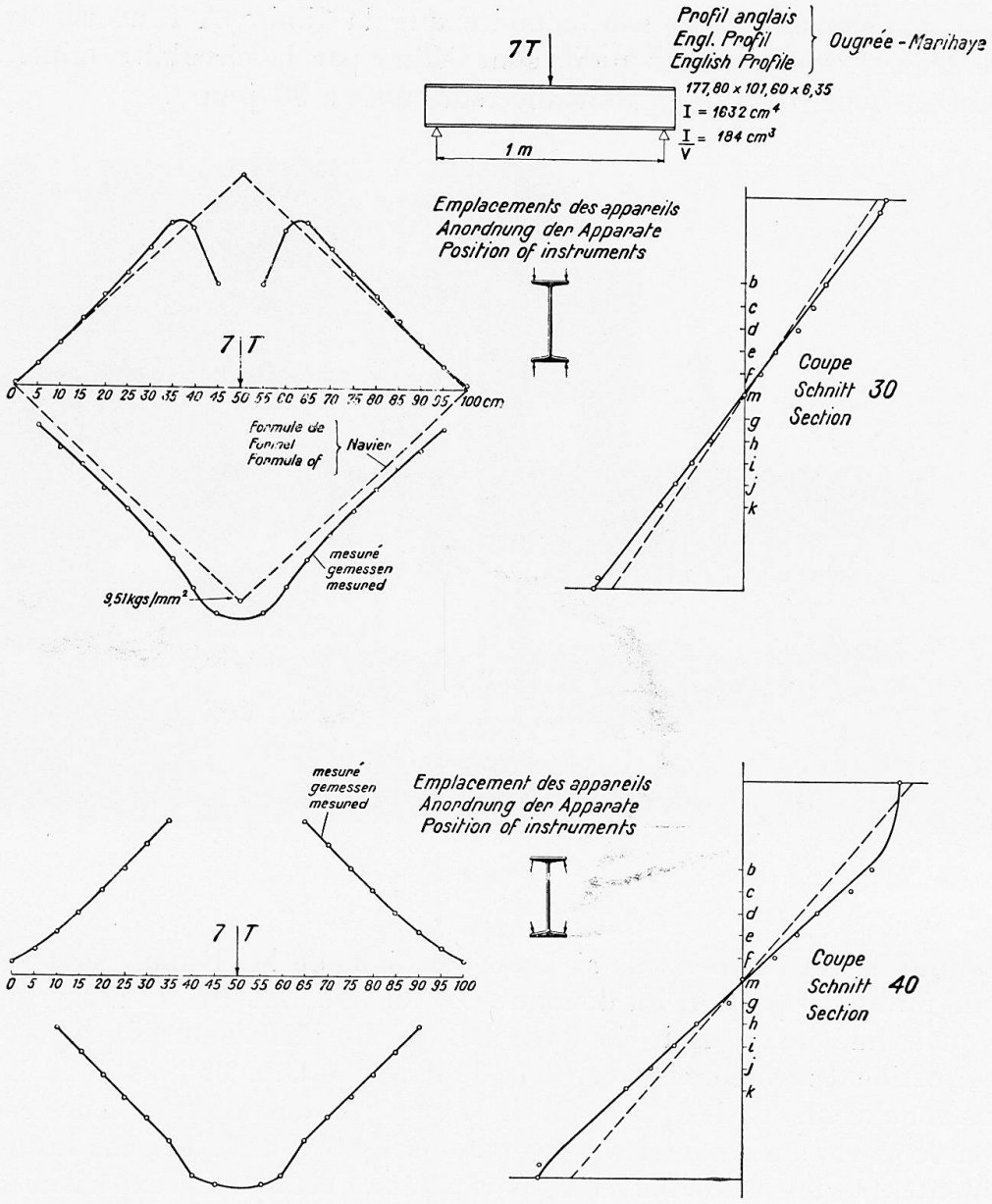


Fig. 3.

les tensions élémentaires dans la pièce et donnent des résultats moyens moins affectés par les effets locaux. Pour des constructions complexes et des cas de charges concentrées, il est donc avantageux d'apprécier le fonctionnement élastique par les flèches.

Bref, je ne pense pas qu'il y ait incompatibilité irréductible entre mon rapport et l'étude de M. Dumas, qui constitue une analyse très critique du fonctionnement du béton armé. M. Dumas annonce une suite à ses travaux. Si les

efforts de M. Dumas, autant que ceux de M. Emperger, pouvaient résoudre le paradoxe ou plutôt la dualité que je caractérisais en commençant et établir l'unité de principe, ils rendraient à la théorie du béton armé et vraisemblablement aussi aux praticiens un service considérable.

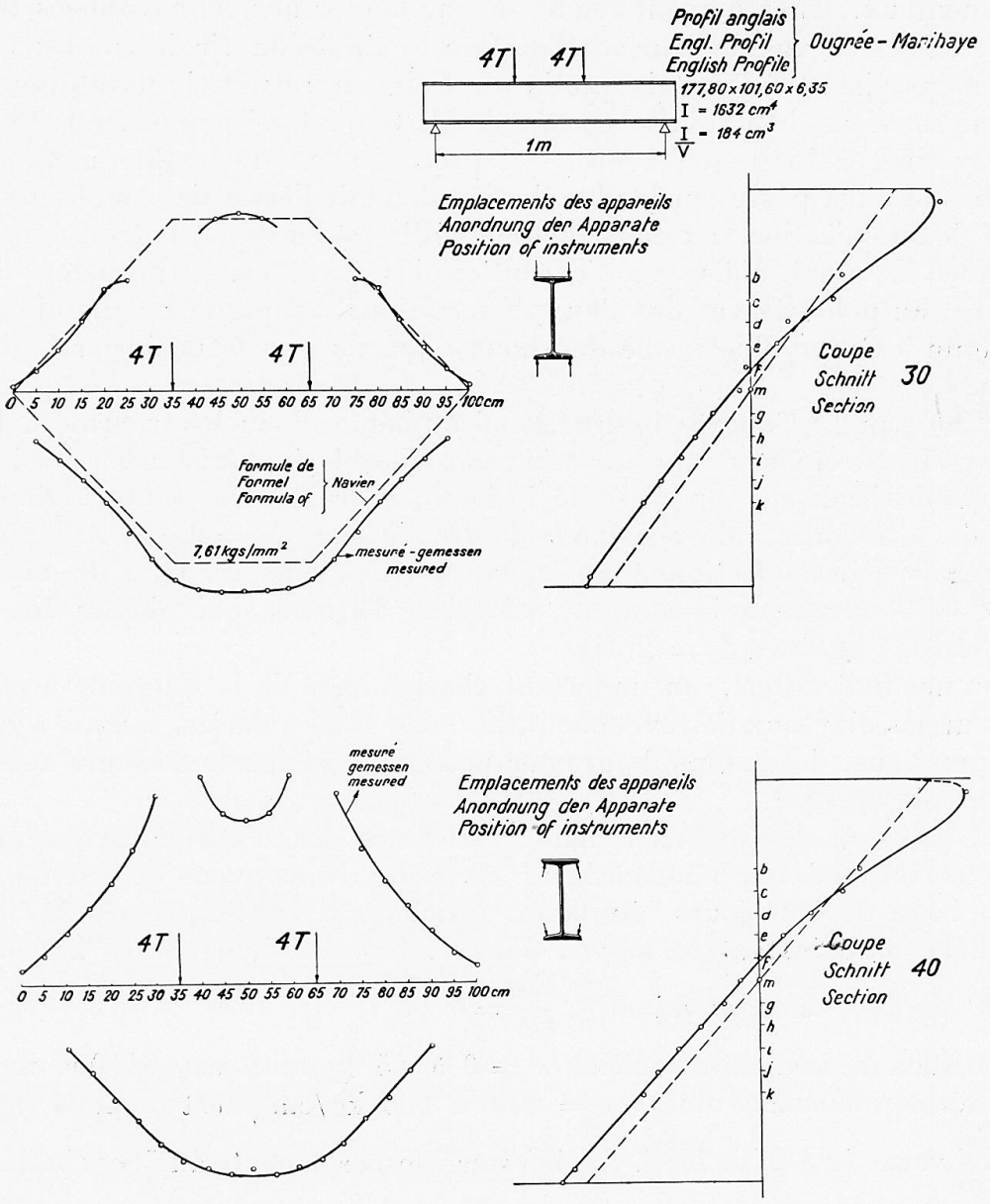


Fig. 4.

Quels que soient les progrès possibles de la statique, la question de l'influence des propriétés physiques des matériaux constituants du béton armé n'en restera pas moins essentielle. La nécessité s'avérera d'une connaissance toujours plus approfondie de ces propriétés physiques et des coefficients expérimentaux qui les caractérisent. Il faut donc établir un programme de recherches et entreprendre sa réalisation. Les expériences seront de deux ordres. Celles exécutées sur des ouvrages d'art, des édifices réalisés, intéressent directement

l'Association Internationale des Ponts et Charpentes. Mais il est évident que ces expériences relèveront aussi du domaine de l'essai des matériaux, elles figurent d'ailleurs à l'ordre du jour des travaux de l'Association Internationale pour l'Essai des Matériaux.

Le but de ces recherches ne peut être limité à la collection de coefficients expérimentaux. Elles doivent tendre à augmenter nos connaissances intimes des matériaux en vue de leur amélioration et de découvrir les moyens d'agir sur certains phénomènes, tels que la plasticité, le retrait, la fissuration, etc..

Je me souviens de certains exposés de M. Caquot à Vienne (en 1928) et de M. Freyssinet à Liége (en 1930), qui préconisaient déjà cette méthode. La question est ainsi posée sur le plan de l'étude et de l'essai des matériaux, mais en vue de l'application aux constructions. Elle est en rapport étroit non seulement avec le calcul, mais avec l'exécution des ouvrages. Le problème constitue donc, au point de vue des deux Associations, ce que la langue allemande appelle un « Grenzgebiet », ce que nous exprimons en français par un terrain d'entente.

En 1930, au 1er Congrès international du béton et du béton armé à Liége, M. Freyssinet a envisagé une élévation considérable des résistances des bétons. Au cours de la discussion, j'ai cité le béton extrait d'une route cylindrée et qui avait, à 56 jours, une résistance de 820 kg/cm² ($\Delta = 2{,}57$). A l'intention du Congrès, j'ai confectionné un nouveau cube dans la dalle de béton de $0{,}40 \times 0{,}40$ extraite de la route et, à l'âge de 18 mois, j'ai obtenu une résistance de 1031 kg/cm² ($\Delta = 2{,}51$).

Selon nos indications, un important charbonnage de la Campine a pu réaliser pour ses claveaux de revêtement de puits et de galeries, soumis à de très fortes pressions, des bétons de gravier possédant à l'âge de 28 jours une résistance de 630 kg/cm².

Cette question des bétons à haute résistance est d'un très grand intérêt, car elle correspond aux bétons à haute élasticité. Nous avons déterminé l'élasticité à l'âge de 730 jours du béton résistant à 1031 kg/cm². Le coefficient d'élasticité instantané moyen dans l'intervalle de 0 à 200 kg/cm² est 574000 kg/cm², correspondant à $\frac{Ea}{Eb} = 3{,}68$

Le coefficient instantané initial ($\sigma = 0$ à 25 kg/cm²) est 641000 kg/cm², le coefficient instantané final ($\sigma = 175$ à 200 kg/cm²) est 542000 kg/cm². Donc $\frac{Ea}{Eb}$ varie de 3,27 à 3,87. La déformation permanente au 5e cycle de mise en charge et de décharge est $2 \times 10^{-6}$. Il y a certaines inspirations à trouver dans ces exemples de bétons de haute qualité. Leurs déformations plastiques sont certainement moindres, ce qui est partiellement un avantage et partiellement un inconvénient. Des déformations plastiques excessives, comme on en constate assez fréquemment dans des constructions récentes, de même que les manifestations nombreuses et récentes de corrosion du béton, ne sont-elles pas un indice de qualité moindre du béton due à une mise en charge hâtive et aussi à une importance trop grande accordée à la « travaillabilité » (« workability »), conduisant à un excès de fin, à un excès d'eau et à un médiocre tassement. Une part de vérité peut se trouver dans ces questions, ce qui fait

que, quels que soient les progrès de la statique, des matériaux et de leur connaissance, la qualité et le soin de mise en œuvre resteront toujours des facteurs dominants de la valeur des ouvrages en béton armé.

Depuis la remise de mon rapport d'introduction au Secrétariat général du Congrès, outre le mémoire de M. Dumas et les articles parus dans Beton und Eisen à propos des suggestions de M. von Emperger, d'autres travaux ont été publiés, parmi lesquels je crois utile de citer un rapport important de M. Ch. S. Whitney, intitulé « Plain and Reinforced Concrete Arches » paru dans le Journal of the American Concrete Institute, March 1932 (Il contient une abondante bibliographie).

Enfin, M. Caminade a consigné des remarques intéressantes pour le problème traité dans la séance de ce jour sous le titre « Le règlement de la Chambre syndicale française sur les constructions en béton armé et les prescriptions officielles étrangères ». (Le Génie Civil, 1932).

## VI 2

## ÉLASTICITÉ, PLASTICITÉ ET RETRAIT
## *ELASTIZITÄT, PLASTIZITÄT UND SCHWINDEN*
## ELASTICITY, PLASTICITY AND SHRINKAGE

**Oscar FABER,**
D. Sc., Consulting Engineer, London.

Voir « Publication Préliminaire », p. 565. — *Siehe « Vorbericht »*, S. 565.
See " Preliminary Publication ", p. 565.

**Participants à la discussion des questions $VI_1$ et $VI_2$**
***Diskussionsteilnehmer an den Fragen $VI_1$ und $VI_2$***
**Participants in the discussion of questions $VI_1$ and $VI_2$ :**

Dr. Ing. E. PROBST,
Professor an der Technischen Hochschule, Karlsruhe i. B.

Die Bedeutung der plastischen Formänderungen für die Spannungsverteilung in Eisenbetonquerschnitten wird z. Zt. in der Fachwelt lebhaft besprochen. Es ist nicht zu erwarten, dass man zu einer Klärung des Problems auf anderen als experimentellen Wegen gelangen wird. Wesentlich sind hierbei Feinmessungen der Formänderungen bezw. der Rissweiten an Beton- und Eisenbetonträgern bis möglichst nahe an die Bruchgrenze unter Dauerbelastungen, häufig wiederholten Lastwechseln und unbelastet.

Es scheint mir zweckmässig von den einfachsten Fällen auszugehen, wie sie bei einem axial beanspruchten Betonprisma vorliegen. Dabei ist zu beachten, dass Beton ein Material ist, das sich nach Beendigung des Abbinde-