

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 99 (1973)  
**Heft:** 26

**Artikel:** Structures optimales en béton  
**Autor:** Huber, Josef  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-71714>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.11.2024

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

# Structures optimales en béton

par JOSEF HUBER, ingénieur

## 1. Généralités

Un ingénieur travaillant à un projet de construction s'efforce toujours de trouver la solution la plus économique. D'année en année, cela s'avère plus difficile. Les raisons n'en sont que trop connues : accroissement du volume des constructions, manque de temps et de personnel. Le dimensionnement d'un pont, de locaux industriels ou d'un immeuble-tour se limite trop souvent à l'étude de quelques variantes. De plus, l'évolution rapide des prix unitaires des bétons, coffrages, aciers, etc., empêche l'ingénieur d'estimer le coût de l'ouvrage. Par conséquent, le choix du projet dépend de l'expérience de l'ingénieur et de son appréciation plutôt que d'un calcul systématique.

Ces dernières années on a développé une méthode permettant de projeter rapidement des ouvrages en béton au meilleur prix. Comme le montre la pratique, elle permet dans tous les cas de réaliser des économies.

## 2. Développement du procédé d'optimisation

Parmi toutes les solutions statiques possibles pour le dimensionnement d'une construction, une seule est la plus économique. Une dalle de pont, par exemple, peut être calculée et exécutée avec 40, 60 ou 80 cm d'épaisseur. En choisissant pour critères le prix du m<sup>3</sup> de béton et de la tonne d'acier, on peut calculer l'épaisseur de la dalle pour laquelle le coût du pont sera le plus faible.

Il était donc intéressant de développer une méthode de calcul, qui, outre les paramètres statiques, tiendrait compte des prix unitaires, et en considérant quelques données adéquates, livrerait rapidement la solution optimale. Son utilisation devait en être simple, afin que l'ingénieur ou le calculateur puissent l'appliquer facilement.

La première étape de ce développement, consacrée à l'optimisation des dalles de béton, a été mise au point en 1966. La deuxième étape, traitant l'optimisation d'un élément de béton, était au point en 1970. Il ne nous est pas possible dans ce cadre d'entrer dans le détail de calculs très approfondis; on se bornera à évoquer quelques problèmes pratiques tirés de l'expérience. Dans ce qui suit, on trouvera une brève description de la solution.

La fonction cherchée, devant représenter le coût total de la construction, est définie par :

$$K = f(x_i, p, \sigma, k_j)$$

où  $x_i$  = les dimensions optimales de la section de l'élément, par exemple  $x_1$  la hauteur de la poutre,  $x_2$  le rapport de l'épaisseur de l'âme à la largeur de la poutre,  $x_3$  la portée, etc. ;

$p$  = les charges extérieures agissant sur la construction ;

$\sigma$  = les contraintes admissibles ou limites des matériaux utilisés ;

$k_j$  = les paramètres exprimant les prix, respectivement les coûts unitaires ; ce sont, par exemple, le coût d'un m<sup>3</sup> de béton mis en place, d'un m<sup>2</sup> de coffrage, d'une tonne d'acier posée. Il s'agit donc uniquement de frais variables.

Le minimum de la fonction est cherché par la différentiation partielle de  $K$  par rapport aux différentes variables.

$$\frac{\partial K}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial K}{\partial x_2} = 0; \quad \dots \quad \frac{\partial K}{\partial x_i} = 0.$$

Nous obtenons ainsi un système d'équations non linéaires dont la solution fournit les dimensions recherchées.

Il reste à vérifier que les conditions secondaires sont remplies, la plupart étant de nature constructive ou technologique : les contraintes admissibles des matériaux ne doivent pas être dépassées, la sécurité à la rupture doit être suffisante, il doit y avoir une armature minimale déterminée, les dimensions doivent être positives, etc. Ces exigences peuvent parfois être mises en équations, mais le plus souvent doivent être exprimées sous forme d'inéquations, livrant un grand nombre de solutions, dont l'optimale ne

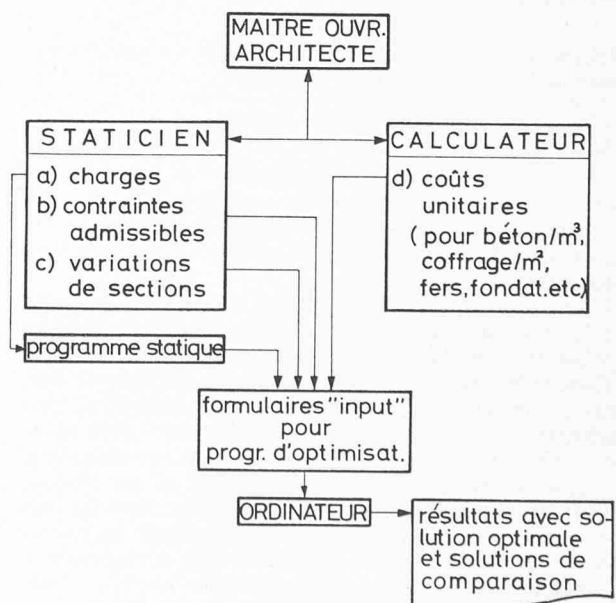


Fig. 1. — Déroulement de l'optimisation.



PROCÉDE D'OPTIMISATION-HUBER POUR STRUCTURES ECONOMIQ. EN BETON ARME  
 A. RECHERCHE SOLUTION OPTIMALE (H, FE, COUTS) POUR CHAQUE VARIANTE DONNÉE  
 (ET SÉL. COMPARAT. P. LES PARAMÈTRES-COUTS CROISSANTS ET DÉCROISSANTS)  
 B. SÉLECTION DE LA VARIANTE OPTIMALE (AINSI QUE TABLEAU DES VARIANTES)  
 A.

1. POUTRE A T, DIM. CON. BS 400 L=16  
 DONNÉES POUR VARIANTE 1  
 WMA=200 SIG=1600 A=0.06 BS=143.0 B1=130. SK=0. LC=80.0  
 MP=144.0 S=0.50 D=0.25 FU=0.0 B=3.00 N=0.0 E=152.0  
 HMIN KOS H FE KOS H FE KOS H FE KOS  
 57 530.8 113 50 421 84 66 438 155 38 438 215 29 494  
 SOL. COMPARAT. IV. BS/E 2\*BS/E BS/E/2 BS/E/4  
 SOLUT. OPTIMALE HAUT. H=113 ARMATURE FE=49.8 COUTS=420.9

2. POUTRE A T BH 300 L=16  
 DONNÉES POUR VARIANTE 2  
 WMA=167 SIG=1200 A=0.06 BS=136.5 B1=117. SK=0. LC=80.0  
 MP=144.0 S=0.50 D=0.15 FU=0.0 B=3.00 N=0.0 E=152.0  
 HMIN KOS H FE KOS H FE KOS H FE KOS  
 71 460.0 117 65 406 88 86 423 160 49 424 221 38 478  
 SOL. COMPARAT. IV. BS/E 2\*BS/E BS/E/2 BS/E/4  
 SOLUT. OPTIMALE HAUT. H=117 ARMATURE FE=64.8 COUTS=406.3

3. DALLE A CAISSON, AC.3 BS 400 L=16  
 DONNÉES POUR VARIANTE 3  
 WMA=200 SIG=1600 A=0.03 BS=221.0 B1=130. SK=0. LC=80.0  
 MP=144.0 S=0.50 D=0.15 FU=0.22 B=3.00 N=0.0 E=152.0  
 HMIN KOS H FE KOS H FE KOS H FE KOS  
 54 558.2 90 59 487 67 79 508 123 44 508 170 34 575  
 SOL. COMPARAT. IV. BS/E 2\*BS/E BS/E/2 BS/E/4  
 SOLUT. OPTIMALE HAUT. H=90 ARMATURE FE=58.9 COUTS=487.2

4. DALLE, DIMENS. RUPTURE BH 300 L=16  
 DONNÉES POUR VARIANTE 4  
 WMA=220 SIG=1200 A=0.03 BS=429.0 B1=117. SK=0. LC=80.0  
 MP=144.0 S=3.00 D=0.0 FU=0.0 B=117. N=0.0 E=113.7  
 HMIN KOS H FE KOS H FE KOS H FE KOS  
 71 708.8 71 151 709 71 151 709 90 130 734 121 112 820  
 SOL. COMPARAT. IV. BS/E 2\*BS/E BS/E/2 BS/E/4  
 SOLUT. OPTIMALE HAUT. H=71 ARMATURE FE=151.0 COUTS=708.8

B. TABLEAU DES VAR.

VAR 1	COUTS= 420.9	1. POUTRE A T, DIM. CON.	BS 400 L=16
VAR 2	COUTS= 406.3	2. POUTRE A T	BH 300 L=16
VAR 3	COUTS= 487.2	3. DALLE A CAISSON, AC.3	BS 400 L=16
VAR 4	COUTS= 708.8	4. DALLE, DIMENS. RUPTURE	BH 300 L=16

CONSTRUCTION OPTIMALE = VARIANTE 2 COUTS MINIM. DE STRUCT.= 406.3  
 FR/ML

Fig. 3. — Journal de l'ordinateur pour structures en béton armé.

Ces données sont reportées sur les formulaires pour l'ordinateur OPT 12 (fig. 2) et OPT 11. Pour cet exemple, on ne considèrera que six des vingt variantes proposées; les résultats en sont par conséquent moins complets.

Résultats :

L'ordinateur arrive en quelques minutes à la solution optimale, aussi bien pour le béton armé (fig. 3) que pour le béton précontraint (fig. 4).

En plus de la solution optimale, l'ordinateur donne des solutions voisines, parmi lesquelles on peut choisir, si l'optimale ne convient pas pour des raisons constructives par exemple.

La variante n° 2 est la moins chère des constructions en béton armé. Le prix de revient du pont s'élève à fr. 406,30 par mètre courant.

Si l'on avait choisi arbitrairement une hauteur de poutre de 71 cm, le pont aurait coûté 460 fr. par mètre, donc 13 % de plus.

Comme le montre la figure 4, le projet le plus économique pour le tablier du pont est de toute évidence une poutre en T précontrainte en béton BH 300, la hauteur étant de 110 cm et la précontrainte de 309 tonnes. On voit que la contrainte admissible n'est pas entièrement utilisée : SS = 118,5 kg/cm<sup>2</sup>. Le prix de fr. 377,30 par mètre

PROCÉDE D'OPTIMISATION-HUBER POUR STRUCTURES ECONOM. EN BETON PRECONTR.

A. RECHERCHE SOLUTION OPTIMALE (H, A, V, TENS, COUTS) POUR CHAQUE VARIANTE DONNÉE  
 (ET QUELQUES SOLUTIONS COMPARAT. PROCÈS DE LA SOLUTION OPTIMALE)  
 B. SÉLECTION DE LA VARIANTE OPTIMALE (AINSI QUE TABLEAU DES VARIANTES)  
 A.

1. POUTRE A T, A PRECONTRAINTE TOTAL BH 300  
 DONNÉES POUR VARIANTE 1  
 SB=1200.0 SS=1500.0 SZ=200.0 S0=0.0 BS=136.5 B1=117.0 SK=0.0  
 E=0.498 LC=80.0 B=3.000 S=0.500 D=0.250 FU=0.0 N=0.0  
 MP=144.0 A=0.13 J=0.900 MZ=0.  
 SOLUTIONS 1-12 COMPRENENT SOLUT. COMPARATIVES, SI COUTS  
 SOLUTIONS 1+4 POUR PARAMÈTRES-COUTS CROISSANTS 2\*BS/E  
 SOLUTIONS 1+4 POUR PAR. DÉCROISSANTS = BS/E/2 ET BS/E/4

NO	COUTS	H	A	V	SB	SS	SZ	S0	Q1	Q2	Q3
1	377.3	110	13	309	1500	1500	200	0	0.304	0.689	0.027
2	677.5	97.8	2.19	74.1	0	0	0	0	0.379	0.709	0.028
3	377.3	1.100	0.13	309.3	374	1185	-79	-0	0.355	0.705	0.028
4	54.9	0.13	743.1	1200	4418	-658	-0	0.546	0.689	0.029	
5	381.1	0.978	0.13	350.5	445	1500	-122	-0	0.379	0.709	0.028
6	884	0.13	413.7	558	2008	-200	-0	0.412	0.710	0.028	
7	352	0.13	1766.0	358	668	-200	-0	0.756	0.614	0.041	
8	522.4	1.664	0.13	446.1	40	1500	-200	877	0.292	0.682	0.027
9	1.664	0.13	446.1	40	1500	-200	877	0.208	0.595	0.021	
10	631.6	0.580	0.13	448.0	1061	2235	-90	-0	0.488	0.703	0.028
11	0.450	0.13	495.2	2817	1500	216	-3824	0.629	0.664	0.032	
12	1.020	0.05	246.7	2817	1500	216	-3824	0.371	0.708	0.028	
1	392.2	1.490	0.13	232.2	246	651	-19	-0	0.416	0.710	0.028
4	2.600	0.13	84.7	3383	1500	362	-4265	0.246	0.646	0.025	
1	6830	0.13	350.2	2404	1500	132	-3388	0.196	0.670	0.027	
4	443.4	2.060	0.13	178.9	163	349	5	-0	0.267	0.666	0.026
→ SOLUT. OPTIMALE HAUT. H=110 A=13 V=309 SB*NO=44 COUTS=377.3											

2. DALLE A PRECONTRAINTE TOTAL BH 300  
 DONNÉES POUR VARIANTE 2  
 SB=1200.0 SS=1500.0 SZ=200.0 S0=0.0 BS=429.0 B1=117.0 SK=0.0  
 E=0.455 LC=80.0 B=3.000 S=3.000 D=0.0 FU=0.0 N=0.0  
 MP=144.0 A=0.05 J=0.900 MZ=0.

SOLUTIONS 1-12 COMPRENENT SOLUT. COMPARATIVES, SI COUTS  
 SOLUTIONS 1+4 POUR PARAMÈTRES-COUTS CROISSANTS 2\*BS/E  
 SOLUTIONS 1+4 POUR PAR. DÉCROISSANTS = BS/E/2 ET BS/E/4

NO	COUTS	H	A	V	SB	SS	SZ	S0	Q1	Q2	Q3
1	631.6	0.800	-0.32	396.0	2138	1500	87	-3059	1.000	0.500	0.083
2	0.480	-0.32	396.0	2138	1500	87	-3059	1.000	0.500	0.083	
3	0.480	-0.32	396.0	2138	1500	87	-3059	1.000	0.500	0.083	
4	631.6	0.800	0.05	441.2	967	1043	31	-0	1.000	0.500	0.083
5	636.7	0.510	0.05	918.4	1200	1334	-1	-0	1.000	0.500	0.083
6	0.480	0.05	960.0	1333	1500	-19	-0	1.000	0.500	0.083	
7	1.546	0.05	0.7	1333	1500	-19	-0	1.000	0.500	0.083	
8	1.546	0.05	0.7	1333	1500	-19	-0	1.000	0.500	0.083	
9	753.3	0.614	0.05	1076.9	663	1500	-200	507	1.000	0.500	0.083
10	0.614	0.05	1076.9	663	1500	-200	507	1.000	0.500	0.083	
11	0.442	0.05	1161.7	1404	2148	-200	349	1.000	0.500	0.083	
12	0.199	0.05	843.9	9002	1500	1642	-8175	1.000	0.500	0.083	
1	520	-0.01	782.5	9002	1500	1642	-8175	1.000	0.500	0.083	
4	0.430	0.05	1044.5	1619	1855	-55	-0	1.000	0.500	0.083	
1	1.460	0.05	26.3	11438	1500	2162	-8142	1.000	0.500	0.083	
4	657.3	0.790	0.05	699.9	591	580	76	-0	1.000	0.500	0.083
1	3.520	0.05	764.8	7528	1500	1334	-4977	1.000	0.500	0.083	
4	740.3	1.090	0.05	599.4	367	318	89	-0	1.000	0.500	0.083
→ SOLUT. OPTIMALE HAUT. H=58 A=5 V=841 SB*NO=104 COUTS=631.6											

B. TABLEAU DES VAR.

VAR 1	COUTS= 377.3	1. POUTRE A T, A PRECONTRAINTE TOTAL	BH 300
VAR 2	COUTS= 631.6	2. DALLE A PRECONTRAINTE TOTAL	BH 300

CONSTRUCTION OPTIMALE = VARIANTE 1 COUTS MINIM. DE STRUCT.= 377.3  
 FR/ML

Fig. 4. — Journal de l'ordinateur pour structures en béton précontraint.

courant est le plus bas de toutes les variantes considérées.

On voit que la solution la plus économique est conditionnée aussi bien par les coûts unitaires que par les paramètres statiques. L'étude de ce système simple par les méthodes conventionnelles nécessiterait plusieurs jours de calculs et d'évaluation, alors que le traitement par ordinateur dure quelques minutes seulement. Faute d'ordinateur, on peut rechercher l'optimisation à l'aide de tables volumineuses.

A titre d'exemple, le coût global de cette étude d'optimisation se monte à 700 fr.

5. Expériences pratiques actuelles

Au cours des deux dernières années, environ 70 études d'optimisation ont été entreprises à l'aide de la méthode exposée. Elles traitaient de ponts, de bâtiments industriels et d'immeubles-tours en Suisse, en Allemagne, en Autriche et en Yougoslavie.

La figure 5 présente quelques exemples d'optimisations.

Pour 20 études, les avant-projets ont été présentés avec le calcul des coûts, de façon à pouvoir chiffrer l'économie offerte par la solution optimale.

On voit qu'il est avantageux de consulter tous les intéressés dès l'avant-projet : maître d'œuvre, architecte, sta-

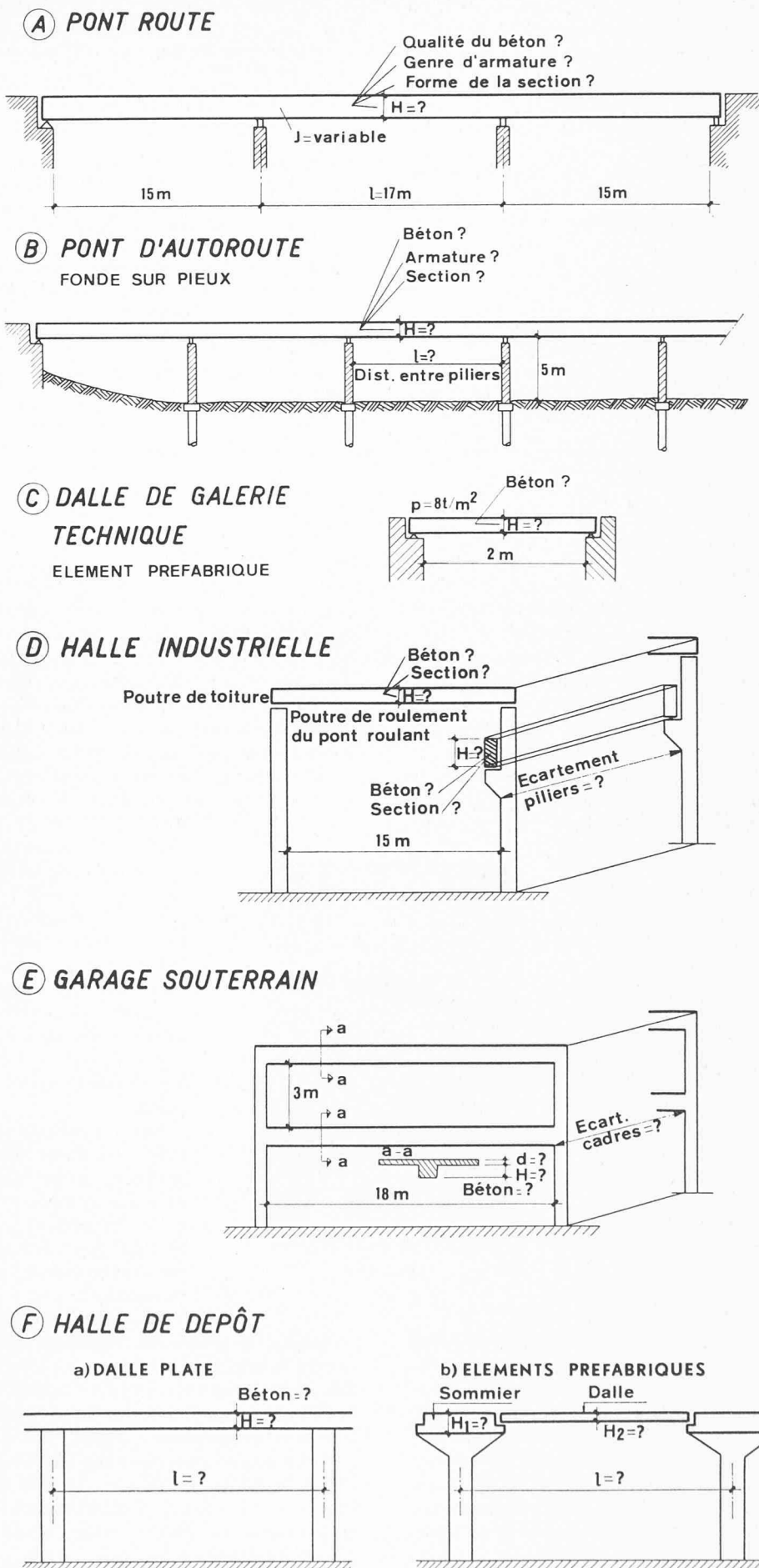


Fig. 5. — Exemples d'emplois dans la pratique.

ticien, calculateur. L'ingénieur responsable du projet doit néanmoins concevoir les idées maîtresses de la structure. L'ordinateur est pour lui un moyen puissant. Il permet de calculer très rapidement toutes les variantes selon des paramètres statiques et économiques et d'arriver à une construction optimale.

Cette méthode d'optimisation est à la disposition des ingénieurs; ceux qui s'intéresseraient à son application peuvent s'adresser directement à l'auteur.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. ANDERHEGGEN: *Optimale Bemessung von Stabtragwerken*. Diss. ETH, Juris Druck Zürich, 1966.
- [2] S. GAJNULLINA: *Die Anwendung der Variationsmethoden zur Berechnung von Systemen geringsten Gewichtes*. Trudyakazanskogo aviacionnogo in-ta, UdSSR vypusk 91, 1966.

- [3] J. HUBER: *Die praktische Anwendung der konstruktiven Optimierung im Bauwesen*. Oe. Institut für Bauforschung, Jahresbericht 1968.
- [4] J. HUBER: *Elektronische Rechenanlagen im Bauwesen (Plattenoptimierung)*. Oe. Ingenieur-Zeitschrift, Heft 3, 1964.
- [5] G. ROZVANY und M. COHN: *Lower bound optimal design of concrete structures*. Proc. ASCE 96, Nr. 6, 1970.
- [6] M. RUSSOW und G. QUASCHNING: *Operations Research und seine Anwendungsmöglichkeiten in der Bauindustrie*. IFA Baupraxis, Heft 7, 1968.
- [7] J. HUBER: *Wirtschaftlichere Betontragwerke durch Optimierung*. Schweizerische Bauzeitung, Heft 40, 1972.

Adresse de l'auteur:

D<sup>r</sup> Josef Huber, ingénieur diplômé  
Losinger S.A.  
Könizstrasse 74, 3001 Berne.

## Nécrologie

### François Panchaud (1906-1973)

Le professeur François Panchaud, titulaire de la *chaire de béton armé et de béton précontraint* de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne et chef de son Département de génie civil, est décédé au soir du 27 septembre 1973, après quelques mois de maladie. Le monde de la science et de la technique, l'Ecole polytechnique en particulier, ont perdu en lui l'une de leurs plus brillantes personnalités.

D'origine vaudoise, né en 1906 à Lausanne où il a passé toute sa jeunesse et fait ses études, M. Panchaud a obtenu en 1928 le diplôme d'ingénieur civil avec le Prix Grenier et le Prix de l'Association des anciens élèves décerné à l'étudiant ayant manifesté le plus de qualités dans les épreuves pratiques finales. Pendant les vacances universitaires, il avait fait des stages, notamment au Bureau des ponts de la Direction générale des Chemins de fer fédéraux. Au sortir de l'Ecole d'ingénieurs, il entre au bureau d'ingénieur-conseil du professeur A. Stucky et collabore au calcul et à l'établissement d'un grand nombre d'ouvrages de génie civil. Dès 1940, il entreprend certains travaux sous sa seule responsabilité; il restera néanmoins, jusqu'à sa mort, attaché à ce bureau en qualité de conseiller.

Peu après la fin de ses études, en 1929, M. Panchaud avait été chargé temporairement d'une partie du cours de résistance des matériaux et de statique graphique à l'Ecole d'ingénieurs, en remplacement du professeur Paschoud. Il revient à l'enseignement en 1940, chargé du cours d'éléments de béton armé aux étudiants ingénieurs, puis comme professeur à l'Ecole d'architecture, dès sa création en 1942. En 1949, il succède à son ancien maître, le professeur Paris, à la chaire de béton armé de l'Ecole polytechnique. Sous son impulsion, le *Laboratoire de statique des constructions* se développe. On le consulte pour des projets de toute nature que le calcul ne saisit que d'une manière encore imparfaite: dalles et ponts biais ou courbes, structures compliquées, coupoles, barrages. Chaque fois que les

circonstances s'y prêtent, le professeur Panchaud complète l'étude des modèles réduits par l'auscultation des ouvrages finis, pour confronter les résultats obtenus en réalité avec ceux trouvés en laboratoire. Son enseignement est à la hauteur de ses connaissances et de ses qualités pratiques, intéressant et empreint d'un enthousiasme communicatif. Il est nommé professeur ordinaire en 1953.

M. Panchaud s'est intéressé particulièrement au béton armé et à son emploi dans les constructions les plus diverses. Excellent mathématicien, il s'efforce de mettre en équations tous les problèmes qui paraissent justiciables du calcul et recherche dans le détail les causes des discordances qui se manifestent parfois entre les résultats de l'analyse et ceux de l'essai sur modèle ou sur ouvrage réel. Ses connaissances théoriques et son expérience pratique, alliées à son sens observateur et à son esprit critique, lui permettent de développer constamment la discipline qu'il exerce.

Dès l'apparition du béton précontraint, M. Panchaud en étudie les propriétés au moyen d'essais et il met sur pied une méthode de calcul rationnelle qui va rapidement porter ses fruits. On lui doit, dans ce domaine, des réalisations intéressantes, parmi les premières en Suisse.

Pour perfectionner ses moyens de recherche, le professeur Panchaud estime nécessaire de vérifier la résistance des structures à l'échelle de la réalité. Dès que la possibilité lui en est offerte, il crée, au sein de l'EPFL, le *Centre d'étude du béton armé et précontraint* et le dote d'un équipement d'essai relativement puissant.

A part son enseignement aux futurs ingénieurs, M. Panchaud, à plusieurs reprises, collabore aux *cours de recyclage* organisés par la Section vaudoise de la SIA pour ses membres. De plus, sa vaste culture scientifique et sa grande expérience d'ingénieur et de professeur le font choisir par ses collègues de l'EPFL pour mettre sur pied dès 1970 les *cours de 3<sup>e</sup> cycle* du Département de génie



FRANÇOIS PANCHAUD  
1906-1973