

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin technique de la Suisse romande
<b>Band:</b>	85 (1959)
<b>Heft:</b>	15
<b>Artikel:</b>	Les essais sur modèles réduits: dans l'étude des ouvrages d'art et des ossatures du bâtiment
<b>Autor:</b>	Soutter, P.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-64126">https://doi.org/10.5169/seals-64126</a>

#### **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:** 26.01.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraisant tous les 15 jours

## ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes  
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)  
de la Section genevoise de la S.I.A.  
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique  
de l'Université de Lausanne)  
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole  
polytechnique fédérale de Zurich)

## COMITÉ DE PATRONAGE

Président: J. Calame, ing. à Genève  
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne  
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève  
Membres:  
Fribourg: H. Gicot, ing. ; M. Waeber, arch.  
Genève: G. Bovet, ing. ; Cl. Groscurtin, arch. ; E. Martin, arch.  
Neuchâtel: J. Béguin, arch. ; R. Guye, ing.  
Valais: G. de Kalbermatten, ing. ; D. Burgener, arch.  
Vaud: A. Chevalley, ing. ; A. Gardel, ing.  
M. Renaud, ing. ; Ch. Thévenaz, arch.

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »  
Président: A. Stucky, ing.  
Membres: M. Bridel ; R. Neeser, ing. ; P. Waltenspühl, arch.  
Adresse: Ch. de Roseneck 6, Lausanne

## RÉDACTION

D. Bonnard, ing.  
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »  
Tirés à part, renseignements  
Adresse: Case Chauderon 475, Lausanne

## ABONNEMENTS

1 an . . . . .	Suisse Fr. 26.—	Etranger. . . Fr. 30.—
Sociétaires . . . . .	» 22.—	» . . . 27.—
Prix du numéro . . . . .	» 1.60	
Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,		
N° II 57 75, Lausanne.		
Adresser toutes communications concernant abonnement, changements d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29 Lausanne		

## ANNONCES

Tarif des annonces:  

1/1 page. . . . .	Fr. 275.—
1/2 » . . . . .	» 140.—
1/4 » . . . . .	» 70.—
1/8 » . . . . .	» 35.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.  
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



Les essais sur modèles réduits dans l'étude des ouvrages d'art et des ossatures du bâtiment, par P. Soutter, ingénieur, à Zurich.  
Actualité industrielle (5).

Divers. — Bibliographie. — Les Congrès.

Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Informations diverses.

## LES ESSAIS SUR MODÈLES RÉDUITS

### DANS L'ÉTUDE DES OUVRAGES D'ART ET DES OSSATURES DU BÂTIMENT

par P. SOUTTER, ingénieur, à Zurich<sup>1</sup>

Les essais sur modèles réduits ont pris ces dernières années une importance de plus en plus grande dans l'étude des ouvrages d'art et d'ossatures du bâtiment. Je traiterai ce sujet du point de vue *du bureau d'étude*, en me limitant, cela va sans dire, à l'essentiel et ne parlerai pas des essais sur modèles utilisés dans d'autres buts, par exemple pour l'étude des barrages, étant donné qu'ils posent des problèmes particuliers qui sortent du cadre de cet exposé.

L'étude théorique analytique d'un ouvrage peut se heurter à certains obstacles, lorsque l'ouvrage échappe aux contingences posées par les hypothèses du calcul statique. Dans ces cas, les essais sur modèle réduit peuvent donner toutes les indications nécessaires sur

le comportement effectif de l'ouvrage réel. La tendance moderne de l'ingénieur est d'étudier sa construction sans se demander s'il pourra calculer l'ouvrage avec les méthodes classiques de calcul. Les temps sont révolus où l'ingénieur concevait son ouvrage de manière à pouvoir le calculer sans trop de difficultés, disposait par exemple des articulations non seulement inutiles mais contraires à l'économie de la construction, à seule fin de ramener le nombre des inconnues à un chiffre compatible avec les possibilités du calcul statique et avec les honoraires qu'il recevait pour son travail. L'ingénieur moderne construit monolithique et dans l'espace. Il doit pouvoir échapper de plus en plus à l'étreinte des méthodes traditionnelles et trouver des possibilités nouvelles d'investigations. Parmi les méthodes nouvelles, l'étude d'ouvrages sur modèle réduit offre des possibilités en partie encore inexplorées qui méritent un examen des plus attentifs de la part des ingénieurs. On peut sérier les diverses faces du problème de la façon suivante :

<sup>1</sup> Conférence présentée aux journées d'études sur les problèmes actuels du béton précontraint, organisées à Neuchâtel, les 23, 24 et 25 avril 1959, par la S.I.A. (Société suisse des ingénieurs et des architectes) et son Groupe professionnel des ingénieurs des ponts et charpentes GPPC), en commun avec l'A.S.E.M. (Association suisse pour l'essai des matériaux) et la V.S.S. (Union suisse des professionnels de la route).

- But des essais sur modèles.
- Bases théoriques des essais sur modèles.
- Construction du modèle et matériau utilisé.
- Méthodes de mesure et instruments utilisés.
- Interprétation des mesures et contrôle des résultats.
- Réalisation de la précontrainte sur le modèle.
- Application sur quelques exemples (fig. 1-7).

#### But des essais sur modèle réduit

Ces essais permettent soit

- 1<sup>o</sup> le contrôle de l'étude analytique théorique ;
- 2<sup>o</sup> de remplacer l'étude théorique possible mais trop longue et fastidieuse ;
- 3<sup>o</sup> de remplacer l'étude théorique impossible ou exigeant des simplifications telles qu'elles rendent la précision du calcul illusoire ;
- 4<sup>o</sup> d'établir les bases d'un calcul analytique approché.

En principe, l'étude sur modèle doit toujours être accompagnée d'une étude parallèle théorique, c'est-à-dire d'un calcul analytique même fortement simplifié mais qui donnera des renseignements utiles pour le dimensionnement de l'ouvrage et du modèle et permettra un contrôle de l'essai sur modèle. C'est grâce aux recouplements possibles entre l'étude sur modèle et le calcul analytique que l'on assurera d'une part la sécurité des mesures et d'autre part le progrès du calcul. *En particulier, les essais sur modèle réduit peuvent donner un essor considérable à l'application de la précontrainte à des structures compliquées dont les calculs sont incertains et où la précontrainte peut provoquer des efforts inattendus difficiles ou impossibles à déterminer exactement avec les méthodes classiques de calcul analytique.* L'essai sur modèle permet en effet de déterminer exactement les efforts de la précontrainte dans les ouvrages les plus compliqués.

Quels sont les domaines d'application des essais sur modèles ?

- a) Tout d'abord l'étude du comportement élastique d'un ouvrage sous charges statiques (loi de Hooke).
- b) Puis l'étude du comportement plastique jusqu'à la rupture sous charges statiques.
- c) Enfin l'étude de l'ouvrage sous charges dynamiques.

Il faut remarquer que ces trois genres d'études ne peuvent généralement pas se faire sur le même modèle et avec les mêmes instruments.

Nous nous limiterons aujourd'hui à l'étude du comportement élastique, qui est encore pour le moment la base principale du dimensionnement de l'ouvrage précontraint, ce qui ne veut pas dire que les autres domaines soient moins importants.

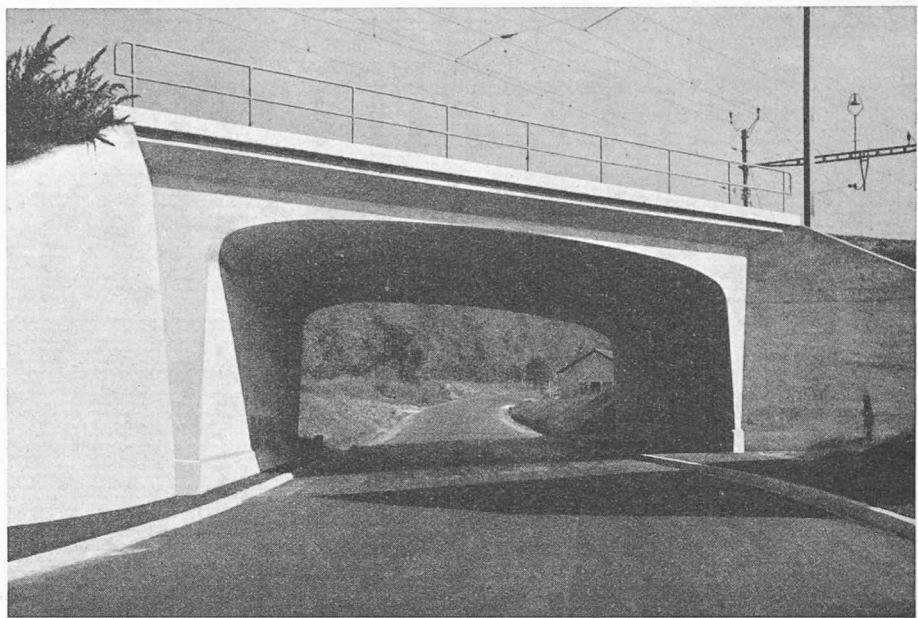


Fig. 1 a. — Passage supérieur C.F.F. biais à Koblenz.

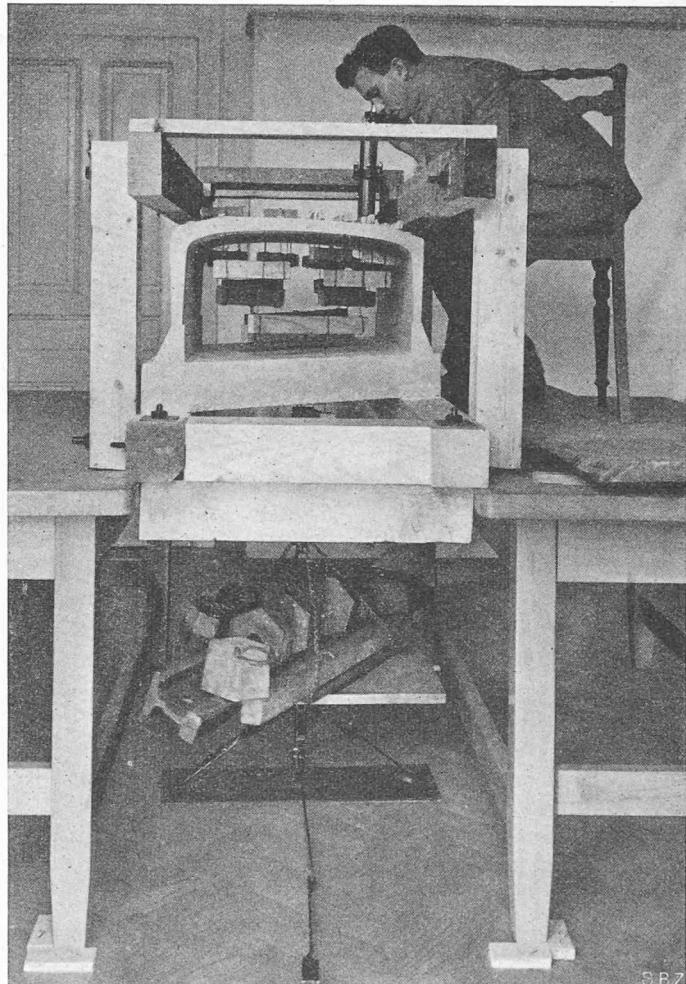


Fig. 1 b. — Modèle en plâtre, mesures optiques des rotations avec miroirs.

**Quelles sont maintenant les bases théoriques des essais sur modèles ?**

Elles sont établies sur la similitude mécanique. Si l'on se limite au comportement élastique, que le matériau de l'ouvrage est homogène (toutes les parties de même nature) et isotrope (présentant les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions), le module d'élasticité n'intervient pas dans le rapport des efforts modèle/ouvrage mais seulement le *coefficient de Poisson*, dans une mesure plus ou moins forte. La loi de similitude mécanique entre deux corps n'est en effet valable de façon absolue que si les deux corps ont le même coefficient de Poisson.

Les matériaux courants utilisés pour les modèles — plexiglas et anticorodal — ont un  $\nu = \frac{1}{m} = 0,3$ .

Les normes S.I.A. donnent pour le béton  $\nu = \frac{1}{m} = \frac{1}{6} = \sim 0,16$ . De récents essais de mesure du coefficient de contraction transversale pour le béton, effectuées par Simmons en Angleterre et par Lücking et Bührer en Allemagne, ont donné des  $\nu$  variant entre 0,25 et 0,30. Il sera donc nécessaire de tirer au clair cette question.

*Le coefficient de Poisson* a une très petite influence sur la valeur des moments max. longitudinaux, c'est-à-dire dans la direction de la portée, et peut en général être négligé pour la détermination de ces moments. Il en va autrement pour les moments transversaux perpendiculaires à la portée qui sont fortement influencés

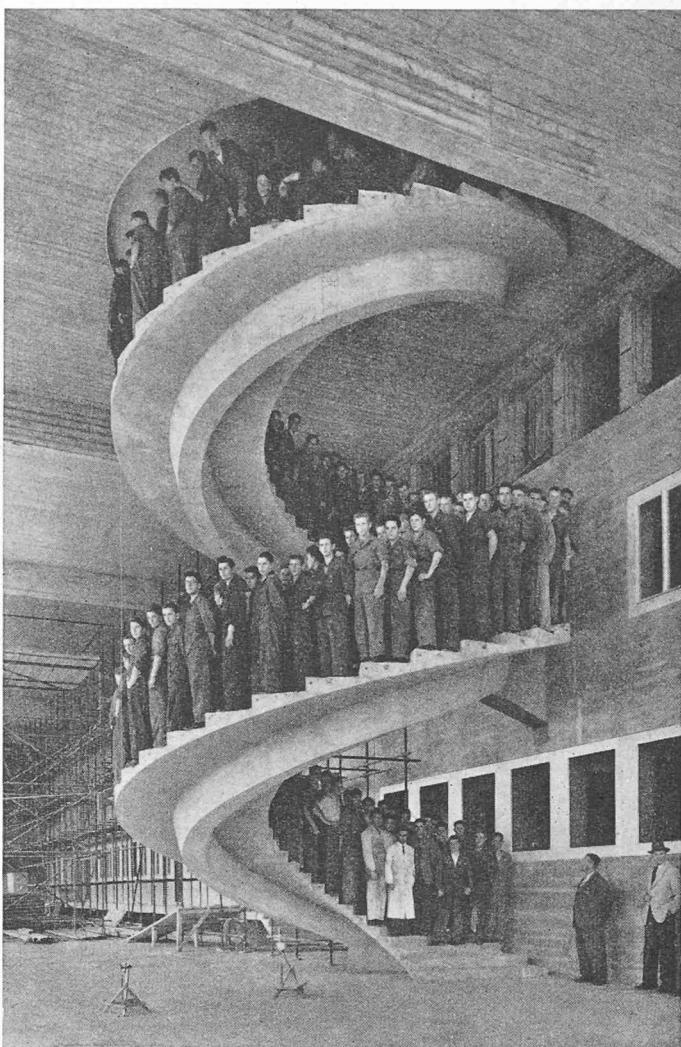


Fig. 2 a. — Escalier en spirale (B.B.C., Baden).

par  $\nu$ . Il sera donc bon de calculer ces moments pour deux valeurs limites possibles du coefficient de Poisson, tant que toute la clarté nécessaire n'aura pas été faite sur les valeurs effectives de ce coefficient dans le modèle et le prototype. Il peut même arriver qu'un moment transversal change de signe pour deux valeurs possibles de  $\nu$ .

*Le matériau du modèle* peut donc être différent de celui de l'ouvrage réel, à condition qu'il soit homogène et isotrope. Il suffit de mesurer les contraintes sur le modèle, les contraintes réelles de l'ouvrage s'en déduisent des rapports des dimensions géométriques et des rapports des charges. Le modèle se comporte en quelque sorte comme une machine à calcul qui donne directement, en appliquant certains coefficients et avec une exactitude suffisante les efforts et déformations des points intéressants de la structure de l'ouvrage.

En règle générale, on peut utiliser des échelles différentes pour les longueurs et pour les épaisseurs (afin de diminuer l'épaisseur de certains éléments et d'augmenter les flexions à mesurer sous les charges) ; il suffit de respecter les rapports de flexibilité des différents éléments. Mais de toute façon, il est préférable de conserver la même échelle pour les longueurs et pour les épaisseurs, ce qui est possible par exemple avec les matières plastiques dont le  $E$  est suffisamment bas et

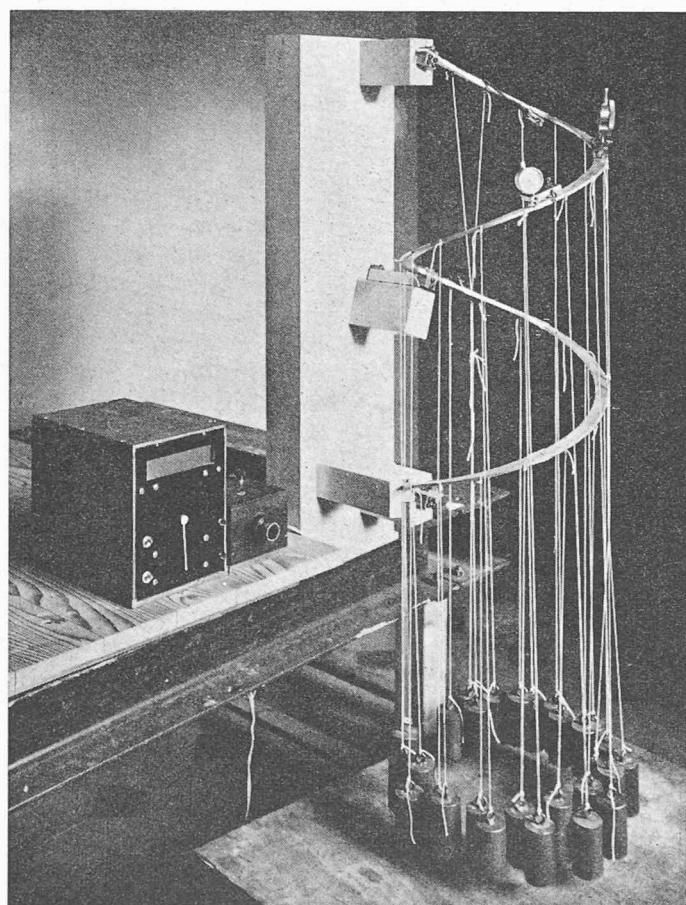
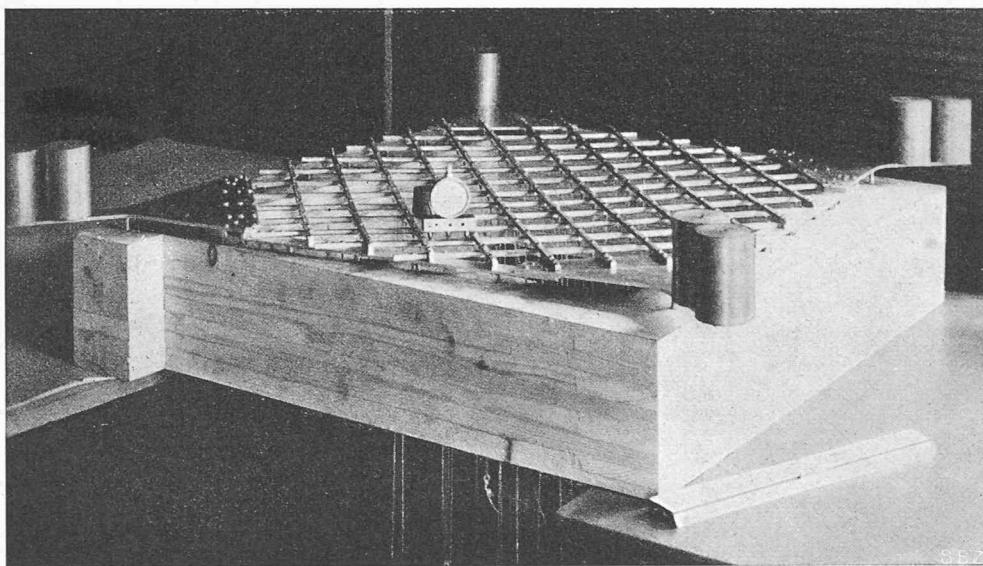


Fig. 2 b. — Modèle réduit. Barre de 5 × 20 mm en anticorodal.

Fig. 3 a.  
Plancher à nervures  
en diagonale  
de 23 × 23 m de portée.



Fig. 3 b.  
Modèle réduit à  
l'échelle 1 : 40.  
Réseau de barres en  
métal léger de 5 × 5 cm.



permet des déformations facilement mesurables. En particulier, il faudra faire en sorte que les déformations d'une plaque ne dépassent pas une certaine valeur en rapport avec son épaisseur. Si les déformations sont trop grandes, il peut se produire un effet de membrane qui s'ajoute à l'effet de flexion et qui fausse les résultats des mesures. Dès ce moment, la déformation n'est plus proportionnelle à la charge. Des essais ont montré que des déformations du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la plaque ne provoquent pas encore un effet de membrane sensible. On peut établir la règle que les déformations doivent rester inférieures à l'épaisseur de la plaque. Cette condition est importante quand on utilise des appareils de mesure de courbure mécaniques, pour lesquels on a tendance à augmenter les déformations afin de faciliter la lecture des mesures.

#### Exécution du modèle ; choix de l'échelle, du matériau et des instruments

On établira tout d'abord un avant-projet de l'ouvrage, dimensionné sur la base de quelques calculs approchés de l'ouvrage, en utilisant les données de l'expérience et éventuellement d'ouvrages semblables exécutés. A ce premier stade, un modèle très simple en carton ou bristol peut donner d'utiles renseignements (sur le flambage, par exemple) et confirmer les calculs provisoires.

Cette première étude est importante et fait grandement appel à l'intuition de l'ingénieur, qui doit « sentir » les dimensions à donner à son ouvrage. Il est important que cette estimation soit aussi exacte que possible, car c'est sur cette base que sera dimensionné le modèle, dont les différents éléments doivent correspondre le mieux possible à ceux de l'ouvrage réel.

Le choix du matériau, celui de l'échelle du modèle et des instruments de mesure doivent avoir lieu en même temps car ils s'influencent réciproquement.

Le matériau doit donc être homogène et isotrope. Il ne doit pas être influencé de manière appréciable par un changement de température et par l'humidité ou par le vieillissement, ce qui risquerait de fausser les mesures *pendant leur exécution*.

Le matériau doit être facile à travailler (moulage ou

collage), car il doit permettre d'obtenir des dimensions précises. On peut éliminer le *fluge* en mesurant toujours après le même temps de chargement.

L'échelle du modèle sera choisie de façon à obtenir des déformations mesurables avec une précision suffisante par les instruments à disposition. D'autre part, ces déformations doivent être facilement créées par un système de charge simple.

Les instruments doivent permettre des mesures très petites et précises avec le minimum d'encombrement, ce qui permet d'utiliser des modèles de dimensions réduites.

Parmi les matériaux utilisables, on peut citer :

#### 1. MATIÈRES PIERREUSES

*Plâtre*

$$E = 50\,000 \text{ à } 60\,000 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\nu = \frac{1}{m} = 0,15.$$

Résistance à la rupture/traction = 20 kg/cm<sup>2</sup>.  
Allongement admissible 0,25 %.

Avantages : homogène, isotrope. Se moule facilement. Inconvénients : faibles allongements admissibles, d'où mesures très sensibles. Possibilité de fissuration sans que l'on s'en aperçoive tout de suite, d'où fausses mesures du fait de changement dans le comportement interne du modèle.

*Béton de pierre ponce*

$$E = 65\,000 \text{ kg/m}^2.$$

*Mortier de ciment / Ciment armé*

$$E \text{ dépend du dosage} = 200\,000 \div 600\,000 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\nu = \frac{1}{m} = 0,16 \div 0,3.$$

Ces matériaux ont à peu près les mêmes avantages et inconvénients que le plâtre. Le *E* varie avec le temps et sa courbe des variations doit être connue pour l'interprétation des résultats des mesures.

#### 2. MATIÈRES PLASTIQUES

*Celluloïd*

$$E = 20\,000 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\nu = 0,42.$$

Allongement admissible 5 %.

Avantages : facile à travailler.

Inconvénients : influence importante de la température et du vieillissement.

Fluge considérable.

*Araldit*

Produit Ciba. Il s'agit d'une résine que l'on mélange à un durcisseur. On peut y ajouter un produit de remplissage (sable, sciure, etc.). Suivant le dosage, on obtient une gamme variée de caractéristiques élastiques et plastiques.

$$\nu \cong 0,3$$

Avantages : permet le moulage et le choix de *E* entre des limites assez éloignées.

Inconvénients : *retrait et fort fluge*.

Difficulté d'obtenir des dimensions très précises *par moulage*. Nécessité d'un *rabolage*. *E* sensible à la température.

*Trovidur*

Matière plastique homogène. Produit de la Dynamit Aktiengesellschaft.

$$E = 30\,000 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\nu \cong 0,3.$$

Résistance à la traction : 550 kg/cm<sup>2</sup>.

Résistance à la flexion : 1100 kg/cm<sup>2</sup>.

Résistance à la compression : 800 kg/cm<sup>2</sup>.

Ce matériau se laisse facilement scier, trouer, coller et souder.

Les avantages et inconvénients sont les mêmes que pour l'Araldit.

*Plexiglas*

$$E = 30\,000 \text{ à } 40\,000 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\nu = \frac{1}{m} = 0,3.$$

Avantages : se travaille très facilement, se colle, s'assemble, etc.

Inconvénients : influence de la température, mais relativement légère, fluge. Les meilleurs résultats sont obtenus en hiver dans un local régulièrement chauffé. En été, on dépend trop de la température extérieure variable. Ces remarques étant du reste valables pour toutes les matières plastiques.

#### 3. MÉTAUX LÉGERS

Le plus utilisé est l'*anticorodal*.

$$E = 700\,000 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\nu = \frac{1}{m} = 0,3.$$

Avantages : parfaitement élastique.

Inconvénients : grand *E* et petites déformations. Exige des modèles de grandes dimensions, ou l'adoption d'échelles différentes pour les épaisseurs et pour les longueurs. Se travaille moins facilement.

#### Quelques mots sur les méthodes de mesures et les instruments

On peut classer les méthodes de mesures suivant la qualité des instruments.

1. Mesures mécaniques.
2. Mesures électriques.
3. Mesures optiques.

On peut aussi les classer suivant le genre de mesures effectuées.

1. Mesures de contrainte
2. Mesures de courbure.
3. Mesures de déformation.
4. Mesures de torsion.

A ce propos, rappelons les *vernis craquelants*, qui permettent de déterminer les lignes isostatiques sur les faces du modèle. Les extensomètres peuvent alors être placés directement dans les directions principales.

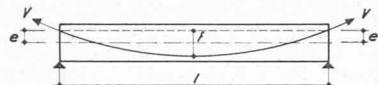
Nous examinerons rapidement avant tout les *mesures électriques et mécaniques de contraintes et de moments*, parce qu'elles sont les plus usuelles dans la pratique.

On détermine une *contrainte* en mesurant sur le modèle une déformation spécifique, allongement ou rétrécissement. La méthode la plus précise est donnée par des *jauges électriques* ; elle est basée sur le principe de la variation de la résistance électrique d'un fil métallique subissant une déformation spécifique. On mesure les variations de résistance proportionnelles aux contraintes au moyen d'un pont de Wheatstone. Il s'agit en principe de filaments de très faible diamètre fixés sur un support de papier fin poreux de composition spéciale. La jauge collée sur le modèle suit fidèlement les déformations de la surface aussi bien en traction qu'en compression.

A ce propos, remarquons que la combinaison de trois jauge placées à 90° et 45° permet de déterminer les directions des *contraintes principales dans une plaque*.

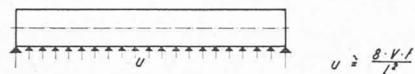
On peut aussi utiliser un *extensomètre électrique* par induction pour une base de 50 mm pour de *grands modèles*.

*Les mesures de courbure*, c'est-à-dire des *moments* consistent à mesurer la *flèche* au milieu d'une longueur de base entre deux points fixes. La précision de la mesure dépend de cette longueur de base qui doit être adaptée aux dimensions du modèle. L'appareil lui-même (sphéromètre) est très simple et consiste en deux points fixés à une plaque rigide supportant un *comparateur*. La précision dépend aussi du comparateur. Le *comparateur mécanique* peut donner le 1/1000 de mm.



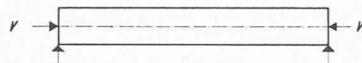
Grâce au principe de superposition on peut remplacer l'influence du câble parabolique par:

### 1) Charge répartie

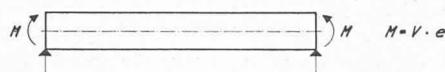


$$u = \frac{8V}{l^2}$$

### 2) Force de compression centrée $V_h$



### 3) Moment de bord



$$M = V_e e$$

Fig. 4. — Analyse des forces exercées par les câbles de précontrainte.

On peut utiliser un *comparateur électrique* basé sur le principe de l'induction permettant de mesurer le  $1/20000$  de mm.

On peut monter sur le même support deux comparateurs donnant les courbures au même point dans deux directions orthogonales, ce qui simplifie les mesures.

Enfin, différents contrôles sont possibles comme pour les mesures de contraintes par jauge électrique.

Nous ne nous étendrons pas sur les différentes méthodes de *mesures optiques* par photoélasticité (Favre), ainsi que par mesures directes ou indirectes de rotations de miroirs fixés sur le modèle (Koblenz), ou de convergence de rayons en mesurant les dioptries, enfin d'autres méthodes spéciales comme celle consistant à figer des contraintes par gel d'un modèle transparent à trois dimensions. On obtient les contraintes en mesurant la différence entre la tranche gelée et la tranche dégelée. Il s'agit là de méthodes intéressantes pour des recherches théoriques, mais dont l'emploi souvent long et fastidieux est moins rationnel dans la pratique, aussi bien au point de vue des installations nécessaires qu'en ce qui concerne la précision des mesures.

A côté des contraintes et des moments, il est aussi possible de mesurer mécaniquement ou électriquement directement l'*angle de torsion* entre deux sections voisines. On peut utiliser soit un comparateur fixé sur un support avec quatre points fixes, soit deux jauge électriques placées à  $90^\circ$  de façon à obtenir les deux contraintes principales dues à la torsion (escalier BBC).

D'autre part, on a le choix d'une manière générale pour tout essai sur modèle soit de procéder par *mesures directes* soit d'établir des *lignes d'influences* par exemple pour les moments en chaque point particulier, comme l'ont fait Homberg et Marx pour établir leur dernier ouvrage *Schiefe Stäbe und Platten*.

## Interprétation des mesures et contrôle des résultats ?

Les mesures sur modèles nous donnent donc par l'intermédiaire du rapport de similitude les moments et efforts normaux réels dans l'ouvrage. Mais il faut savoir en quels points critiques ces mesures doivent être faites. Le premier travail consiste à déterminer sur le modèle les trajectoires des moments principaux et les points les plus sollicités. Il faut procéder à une auscultation systématique du modèle, où l'intuition devra compléter la connaissance.

Il peut être nécessaire de connaître la valeur des *efforts tranchants*. Pour une poutre, on peut coller des jauge obliques sur les faces de la poutre. Dans les dalles, on peut dessiner la courbe des moments et en mesurer les tangentes. Pour les réactions d'appuis, on peut soit déterminer les efforts tranchants au moyen des courbes de moment, ce qui est peu précis, soit les mesurer directement. Pour ce faire, il convient de mesurer par des jauge les contraintes dans des appuis isolés, par exemple sous forme de bâche, dont la section est connue, ce qui donne les réactions exercées par ces appuis.

Une des difficultés essentielles réside dans l'exécution sur le modèle *d'appuis* correspondant à ceux de l'ouvrage. Il faudra donc évaluer l'influence des conditions éventuellement différentes de frottement ou d'encastrement des appuis dans le modèle et dans l'ouvrage.

Une cause importante d'erreur peut être provoquée par le manque de rigidité du *support du modèle*, ce qui peut provoquer des déformations parasites dans le modèle.

Pour éviter les *erreurs de lecture*, il est essentiel de répéter trois fois chaque mesure avec chargement et déchargement du modèle.

Il est important tout au long des mesures exécutées sur le modèle d'effectuer des *contrôles simples* permettant de s'assurer de l'exactitude des mesures. Par exemple pour des plaques minces, on vérifiera, lors de la mesure de courbure, si la somme des courbures dans deux directions orthogonales est bien une constante. On vérifiera que la somme des efforts intérieurs dans une section quelconque est égale à la somme des forces extérieures agissant dans la direction donnée. Ce contrôle est très simple pour les piliers ou pour les appuis du modèle, où l'on doit retrouver la totalité des charges agissant sur le modèle. De même, par exemple pour une dalle biaise appuyée sur deux côtés et chargée uniformément, la somme des moments au milieu dans une section parallèle aux appuis est égale à  $\frac{pl^2}{8}$ .

La somme des efforts tranchants calculés d'après les courbes des moments mesurés doit être sur les appuis égale à la somme des réactions mesurées. La somme des moments mesurés au voisinage d'un nœud de barres doit être nulle.

Bref, il faut qu'en tout point l'équilibre statique soit réalisé. On peut utiliser en fait les mêmes contrôles que pour les calculs statiques, ce qui permet à tout moment de s'assurer de l'exactitude des opérations de mesure.

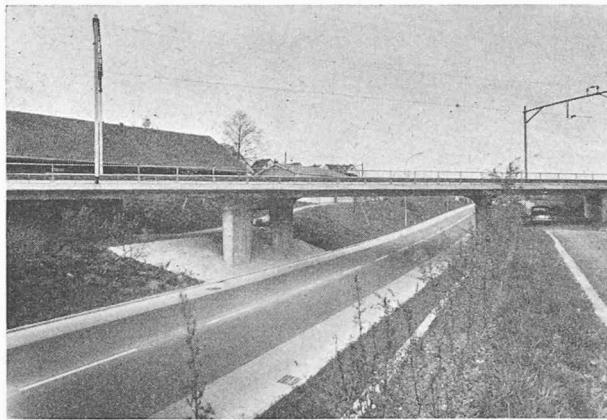


Fig. 5 a. — Pont C.F.F. biais précontraint à Wallisellen.

#### Comment réaliser la précontrainte sur les modèles ?

Les modèles en ciment de grandes dimensions peuvent être précontraints par des fils isolés tendus par des vérins. Il faut une main-d'œuvre très spécialisée, car du fait de la réduction des épaisseurs, une erreur de pose a une très grande influence. Il s'agit d'un procédé trop compliqué pour un bureau d'études exigeant d'autre part des modèles trop grands.

La méthode la plus simple, qui peut s'appliquer à n'importe quel modèle, consiste à remplacer les câbles par les forces qu'ils exercent sur l'ouvrage. Les mesures sur modèle et l'application de ces forces sont conduites de la même manière que pour les autres cas de charges (poids propre, surcharge, par exemple).

Prenons les forces exercées sur l'ouvrage par les câbles de précontrainte. Il s'agit d'étudier soigneusement pour chaque cas quelles sont ces forces et quels sont leurs effets. Il faut distinguer :

1. Les forces dues à la courbure du câble ou au changement de direction du câble (poussée au vide du câble).
2. Les forces axiales de compression dues aux réactions des plaques d'ancrage.
3. Les moments de bords dus à l'excéntricité des ancrages.
4. Les forces verticales sur appuis dues à l'inclinaison des câbles au droit des appuis.

Les forces extérieures ainsi décomposées sont faciles à réaliser sur un modèle. On peut utiliser en général les mêmes procédés de chargement que pour les autres forces extérieures. (Poids suspendus au modèle, quand il s'agit des forces dues à la courbure du câble.)

Pour la compression axiale (que l'on peut remplacer par une traction axiale), le montage est un peu plus compliqué. On peut éventuellement tourner le modèle de  $90^\circ$  pour le charger verticalement. Ou bien, par un jeu de poulie, on transforme une force verticale en une force horizontale. On peut également utiliser des pesons à ressort (jaugés) que l'on tend pour exercer une force de compression. Il faut faire attention, pour

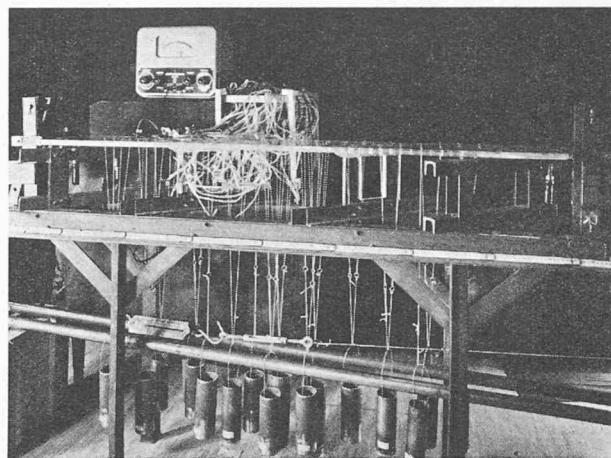


Fig. 5 b. — Modèle en plexiglas à l'échelle 1 : 40.

Charges verticales et peson à ressort pour la mesure des efforts horizontaux.

les modèles dont le matériel flue, que la force de compression entre en jeu instantanément et non pas progressivement, ce qui compliquerait l'élimination de l'effet du fluage, afin d'éviter le fluage. Les moments extérieurs de bord sont facilement réalisés au moyen de consoles que l'on charge d'une manière adéquate.

L'effet de la compression axiale peut éventuellement être évalué par le calcul pour les dalles simples ou continues sur appuis simples. Pour les systèmes dans l'espace (cadre, etc.), il est important de mesurer l'effet de la compression axiale des divers éléments. Ces mesures peuvent ensuite servir à l'étude de l'influence d'une différence uniforme de température, puisque la compression axiale provoque, comme un abaissement de température, un raccourcissement.

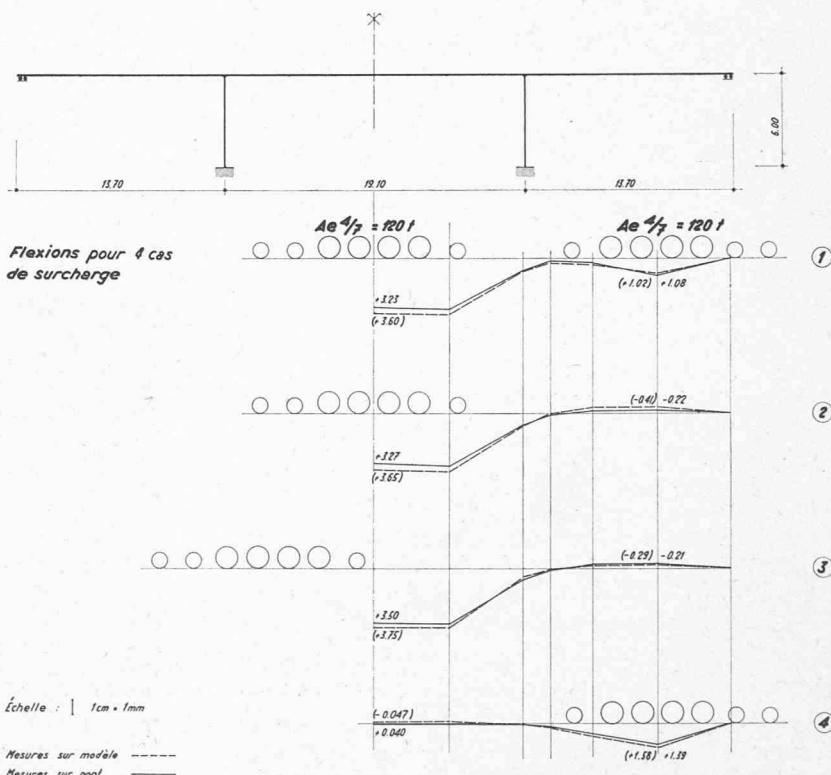


Fig. 5 c. — Passage supérieur à deux voies des C.F.F. à Wallisellen. Flexions pour la surcharge sur modèle et ouvrage réel.



Fig. 6. — Voile mince plissé précontraint de 36 m de portée (Siemens-Zurich).

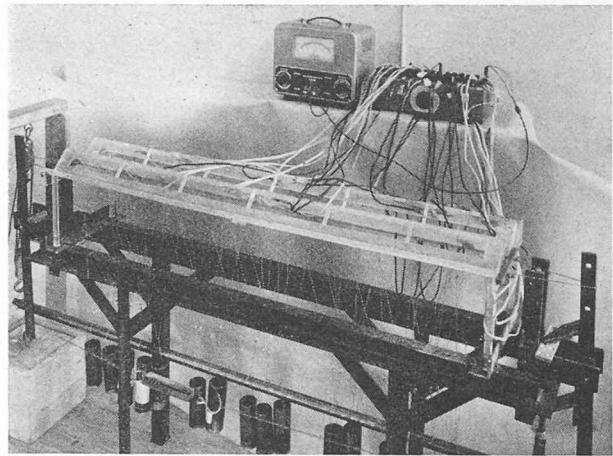


Fig. 6 a. — Modèle en plexiglas à l'échelle 1 : 25.

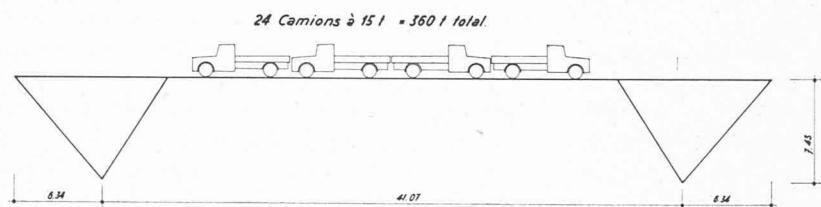


Fig. 7 b. — Pont sur la Sihl à Zurich (Brunau).

Flexions pour la surcharge dans la travée moyenne sur modèle et ouvrage réel.

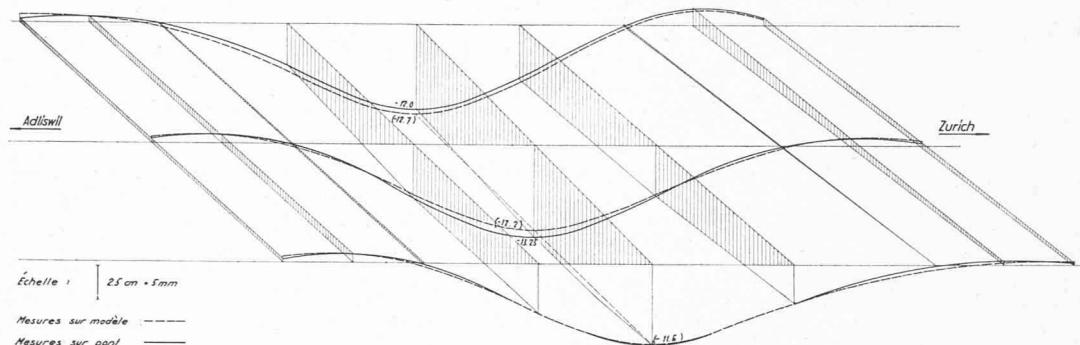


Fig. 7. — Pont biais précontraint avec appuis triangulés sur la Sihl à Zurich (Brunau).



Fig. 7 a. — Modèle en plexiglas à l'échelle 1 : 50.

## Conclusions

Les essais sur modèle exigent une connaissance approfondie aussi bien des lois de la statique que des matériaux utilisés pour le modèle et pour l'ouvrage réel. L'exécution des mesures et leur interprétation demandent de leurs auteurs une précision d'horloger alliée à une grande intuition statique. Les frais du modèle, mais surtout l'exécution et la répétition nécessaire des nombreuses mesures, leur contrôle, leur mise en valeur, sont la cause du coût relativement élevé d'un essai sur modèle sérieux. Il n'est naturellement pas possible d'évaluer ces frais en fonction du coût de la construction et ils s'ajouteront, d'une manière générale, aux honoraires d'ingénieurs calculés suivant les normes S.I.A.

Da Rocha, qui possède à Lisbonne un laboratoire très actif, a communiqué au dernier congrès de Venise qu'un essai sur modèle coûtait de 3000 à 10 000 dollars, suivant son importance. Un essai sur modèle effectué dans l'esprit de ce que je viens d'exposer devrait

coûter de 5000 à 20 000 fr. Ceci à titre de simple indication d'un ordre de grandeur. Ces frais seront toujours modestes vis-à-vis des avantages techniques et économiques qui en résulteront pour la construction.

Les essais sur modèles donnent à l'ingénieur le moyen de dimensionner de la manière la plus rationnelle les constructions les plus compliquées et offrent des possibilités d'auscultation de la construction encore insuffisamment explorées, par exemple pour les effets dynamiques. Ils entreront en ligne de compte et seront souvent indispensables toutes les fois que les méthodes de calculs statiques ne permettront pas de saisir avec une exactitude suffisante le comportement de l'ouvrage réel. Toutefois l'essai sur modèle sera toujours accompagné d'un calcul statique plus ou moins poussé, les deux systèmes d'investigation se complétant et se vérifiant mutuellement.

Il est certain que l'essai sur modèle deviendra *l'instrument de travail indispensable* de tout ingénieur désireux de construire sous le signe de l'audace et de la vérité.

## ACTUALITÉ INDUSTRIELLE (5)

### Un nouveau générateur thermique

#### Généralités

Les Ateliers des Charmilles, Usine de Châtelaine, viennent de terminer la mise au point d'un nouveau générateur thermique, capable de produire de l'eau chaude, de la vapeur ou de l'air chaud, à partir d'une idée originale de M. André Hool, ingénieur, et de travaux effectués en commun avec M. Samuel Rieben, ingénieur.

Ce nouvel appareil, baptisé « Générateur thermique CC », est basé sur le principe de la combustion pulsatoire, qui offre de nombreux avantages lorsqu'il s'agit de réaliser une installation simple, peu encombrante, bon marché à l'achat et à l'entretien, légère, maniable et d'un fonctionnement souple.

La combustion pulsatoire assure une transmission de chaleur intense, qui peut atteindre et même dépasser la valeur de 70 000 kcal/m<sup>2</sup> h, grâce à l'absence pratique de couche-limite, à la très grande vitesse des gaz chauds (déplacement à la vitesse du son, soit, pour une température moyenne de 1500° K, une vitesse de 775 m/s) et à une pression relativement élevée.

Etant donné le très grand flux de chaleur, il est possible de prévoir des surfaces d'échange très faibles, d'où *légèreté et faible encombrement*. D'autre part, la combustion pulsatoire s'entretient d'elle-même, par autoréglage, ce qui permet la suppression du ventilateur et de toute pièce mobile, d'où *simplicité et facilité d'entretien*.

La combustion pulsatoire s'accompagne toutefois d'un phénomène quelque peu restrictif, à savoir la production d'ondes acoustiques assez intenses. Suivant le genre d'utilisation du générateur, il est cependant possible d'atténuer considérablement le bruit, mais au détriment de la légèreté et de la simplicité de l'installation.

#### Dimensions et performances<sup>1</sup>

Les constructeurs ont présenté deux prototypes éprouvés (les modèles CC 451 et CC 452), d'une puissance thermique effective (puissance mesurée dans l'eau ou la vapeur) de 20 000 à 35 000 kcal/h, selon les besoins.

<sup>1</sup> Les poids, dimensions et contenances indiqués se rapportent strictement aux deux prototypes fabriqués. Les modèles de série pourraient naturellement présenter des valeurs différentes.

L'installation comprend *une chaudière* (en un seul élément : modèle CC 451, ou en deux éléments de même longueur : modèle CC 452) et *un agrégat de démarrage*.

	Chaudière CC 451	Chaudière CC 452	Agrégat de démarrage
Longueur (m)	2,0	2,0	0,53
Diamètre hors-tout (m)	0,19	0,1	0,21
Contenance (litres)	48,5	45,7	10,0 (carburant)
Poids à sec (kg)	13,8	16,5	15,3

Comme carburant, on utilise de la simple benzine.

L'agrégat de démarrage est pourvu d'une bouteille d'air comprimé de 2 litres, assurant plus de 100 démarriages. Le circuit électrique est alimenté par six piles de poche de 1,5 volt chacune, garantissant plus de 2000 démarriages.

Le prix de vente de l'installation complète (chaudière et agrégat de démarrage) est inférieur à 1500 fr.

Contrairement à ce qu'on observe pour les autres installations thermiques, le rendement global du générateur thermique CC augmente à charge partielle, et peut atteindre 40 % environ, valeur représentant un prix de revient du kWh équivalent transmis à l'eau inférieur à 10 centimes.

En fonctionnement, le générateur thermique CC peut travailler *par accumulation* ou *en service continu*. De plus, le modèle CC 452, qui comporte deux éléments montés bout à bout, peut fonctionner *en série* (mêmes performances que le CC 451, en une seule pièce) ou *en parallèle*, ce qui permet alors de délivrer deux débits d'eau simultanés à des températures différentes, ou de produire en même temps de l'eau chaude et de l'air chaud, ou encore de l'eau chaude et de la vapeur.

Le graphique de la figure 3 traduit les performances du générateur thermique CC 452, en charge partielle. On constate ainsi, par exemple, qu'il est possible de débiter 780 lt/h d'eau portée à 40° C (alimentation simultanée de deux postes de douche à plus de 6 lt/min par poste, ou de six lave-mains à un peu plus de 2 lt/min par lave-mains) ou 250 lt/h