

Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen

Band: 36 (1976)

Artikel: Etude et essais sur modèle d'un caisson de réacteur en béton précontraint, à cavités multiples : essais sur modèle d'un caisson en béton précontraint à cavités multiples

Autor: Favre, R. / Koprna, M. / Jaccoud, J.-P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-920>

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: 28.01.2026

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

PARTIE III

Essai sur modèle d'un caisson en béton précontraint à cavités multiples

R. FAVRE, professeur, M. KOPRNA, adj. scient., J.-P. JACCOUD, ingénieur

Centre d'étude du béton armé et précontraint de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.

1. Introduction

Le but du présent article est de présenter l'essai sur modèle d'un caisson de centrale nucléaire en béton précontraint à cavités multiples, essai qui fut réalisé au Centre d'étude du béton armé et précontraint (CEBAP) de l'EPF-Lausanne. Le mandat confié au CEBAP comprenait la construction du modèle de caisson à l'échelle 1/20 (fig. 1) et la réalisation de différents programmes de mesures sous charge de pression intérieure uniforme dans toutes les cavités en vue de:

- a) déterminer la pression et les mécanismes de rupture, afin de pouvoir en déduire la sécurité globale;
- b) déterminer la limite du comportement élastique du modèle;
- c) observer le comportement du modèle sous la pression de service, sans toutefois tenir compte des effets thermiques ou des effets de fluage et retrait du béton.

Le délai total, y compris la planification de l'essai, la construction du modèle, les tests et mesures ainsi que la livraison du rapport final, n'a pas dépassé une année.

2. Construction du modèle

Le modèle fut réalisé en microbéton dont le diamètre des agrégats ne dépassait pas 6 mm; il consistait en un bloc cylindrique massif de 2,40 m de diamètre et de 1,95 m de hauteur (fig. 1). Pour un volume brut d'environ 8,8 m³, le modèle comprenait 40 évidements d'un volume total égal à 1,4 m³ et répartis comme suit:

- a) 28 cavités principales (fig. 2 et 3), simulant les cavités du réacteur (au centre), des turbines (horizontales sous le réacteur) et des refroidisseurs, récupérateurs, etc. (verticales autour du réacteur);
- b) 12 cavités plus petites, simulant certaines galeries de liaison entre les cavités principales; elles n'ont été totalement représentées que dans un tiers du modèle, appelé «zone de faiblesse».

Le modèle est précontraint tridimensionnellement au moyen d'un triple système de câbles verticaux, annulaires et radiaux, ces derniers au niveau des turbines uniquement (fig. 2 et 3). Les câbles, au nombre de 254, sont des monotorons non injectés. À l'extrémité libre des cavités, les poussées dues à la pression intérieure sont transmises aux câbles par l'intermédiaire de bouchons métalliques.

Vu ses dimensions et son poids importants (environ 20 tonnes), le modèle fut construit et bétonné en place dans la halle d'essais du CEBAP (fig. 1). La multiplicité des tâches à réaliser dans un délai relativement court nécessita la mise en œuvre de moyens considérables. Outre la participation du personnel du CEBAP, on doit mentionner l'aide de nombreux instituts ou laboratoires de l'EPF-Lausanne ainsi que la participation de l'industrie suisse, notamment en ce qui concerne la réalisation des cavités en tôle d'acier inox, de la précontrainte et des bouchons.

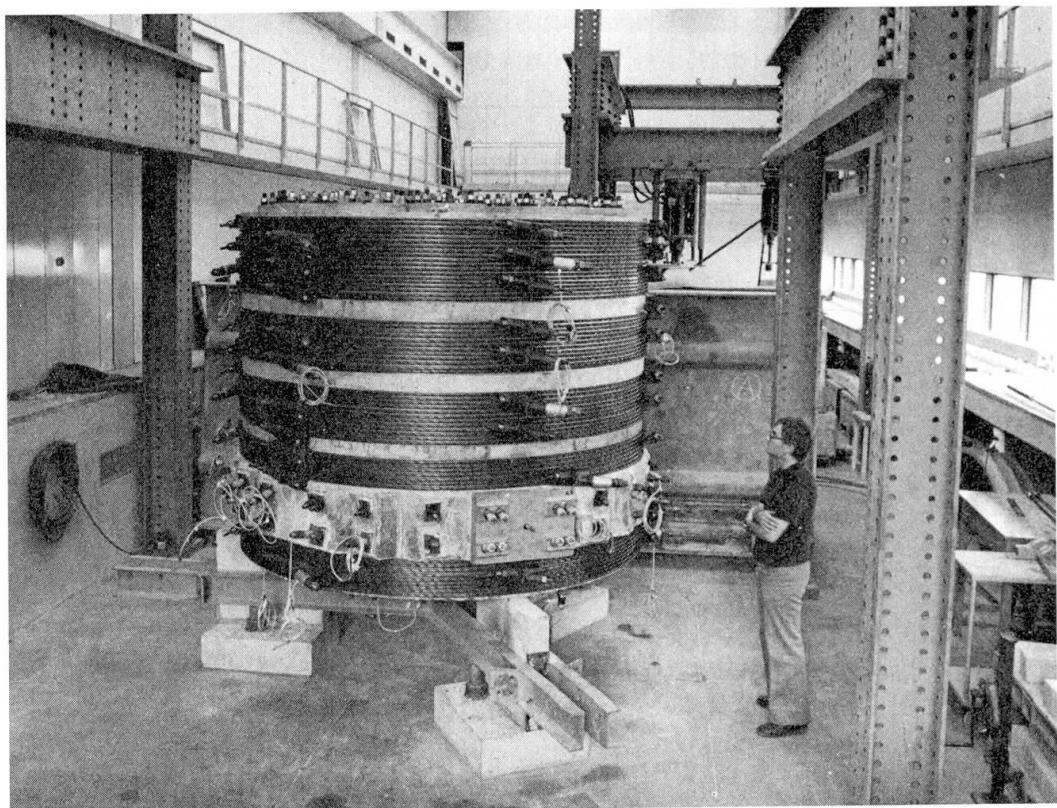


Fig. 1. Vue du modèle dans la halle du CEBAP.

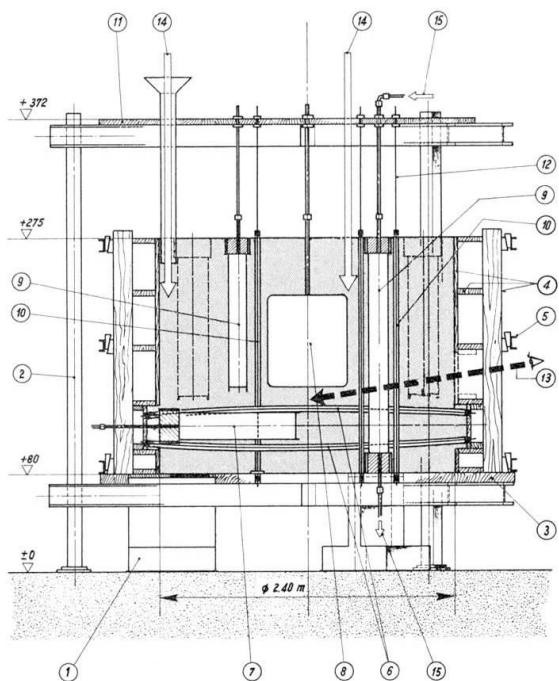


Fig. 2. Coupe schématique du modèle lors de sa construction.

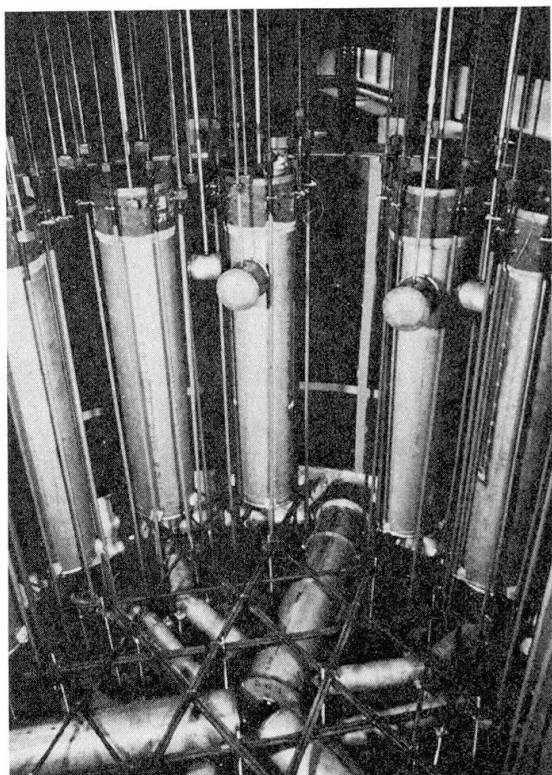


Fig. 3. Vue de l'intérieur du modèle lors de la pose des cavités et câbles de précontrainte.

Les cavités et les câbles de précontrainte radiaux et verticaux furent mis en place dans un coffrage en bois supporté par un étayage métallique (fig. 2 et 3). Pour leur positionnement et afin d'assurer leur stabilité vis-à-vis des pressions du béton frais au moment du bétonnage, les cavités et câbles verticaux furent fixés et mis légèrement sous tension entre le fond du coffrage et une plate-forme supérieure (fig. 2).

Le bétonnage du modèle s'effectua en une seule étape d'un jour; environ 8 m³ de microbéton furent mis en œuvre par le haut du modèle au moyen de goulottes (fig. 2).

La mise en place des câbles de précontrainte annulaire et la mise en tension de tous les câbles s'effectua par étapes, environ un mois après le bétonnage.

3. Caractéristiques des matériaux

3.1. Le microbéton

La composition et les caractéristiques du microbéton furent définies lors d'essais préliminaires effectués par les soins du Laboratoire d'essais des matériaux pierreux (LMP) de l'EPF-Lausanne. Cette composition fut la suivante:

435 kg/m³ de ciment CPA HTS Lafarge;

222 kg/m³ d'eau;

1693 kg/m³ d'agrégats roulés répartis en 3 classes (0/1, 1/3 et 3/6 mm).

Lors des essais proprement dits, soit environ cinq mois après le bétonnage, les valeurs moyennes mesurées sur éprouvettes prismatiques 12 × 12 × 36 cm étaient les suivantes:

résistance à la compression sur cube:

$$\beta_w = 653 \text{ kg/cm}^2$$

résistance à la traction par flexion:

$$\beta_{bz} = 109 \text{ kg/cm}^2$$

module d'élasticité instantané:

$$E_{bo} = 380000 \text{ kg/cm}^2$$

retrait spécifique:

$$\varepsilon_s = -470 \cdot 10^{-6}$$

effet de la précontrainte verticale ($\sigma_b = -49 \text{ kg/cm}^2$)

$$\varepsilon_{t1} = -109 \cdot 10^{-6}$$

raccourcissement élastique:

$$\varepsilon_k = -160 \cdot 10^{-6}$$

raccourcissement dû au fluege:

3.2. La peau d'étanchéité

La peau d'étanchéité des 40 évidements (fig. 2 et 3) fut réalisée en tôle d'acier inox X5CrNi18 9 d'épaisseur 4 mm pour la cavité centrale et 2 mm pour toutes les autres cavités. Les propriétés mécaniques mesurées de cette tôle étaient les suivantes:

limite apparente d'élasticité:

$$\sigma_{02} \cong 28 \text{ kg/mm}^2$$

contrainte de rupture:

$$\beta_z = 67 \div 70 \text{ kg/mm}^2$$

allongement de rupture:

$$\lambda_5 = 55 \div 60\%$$

module d'élasticité:

$$E \cong 16000 \text{ kg/mm}^2$$

Les rôles que devait assumer cette peau d'étanchéité étaient multiples:

- a) elle servait de coffrage des évidements, au moment du bétonnage;
- b) elle devait assurer une parfaite étanchéité des cavités à l'eau, ceci afin de permettre leur mise en pression jusqu'à la pression maximale de rupture du caisson; elle devait notamment être apte à continuer d'assumer son rôle en cas de fissurations et déformations importantes du caisson.

Les essais ont montré que la peau d'étanchéité a parfaitement rempli son rôle jusqu'à la rupture du modèle.

3.3 Les câbles de précontrainte

Le modèle fut précontraint au moyen d'un triple système de câbles (fig. 1) dont les caractéristiques sont les suivantes:

- 159 torons VSL 0.5" (section du câble: 93 mm^2) pour la précontrainte verticale.
- 59 torons VSL 0.6" Dyform (section 163 mm^2) pour la précontrainte annulaire.
- 36 torons VSL 0.5" Supa (section 99 mm^2) pour la précontrainte radiale.

Les têtes d'ancre avec douille sertie sur le toron furent construites spécialement pour cet essai. Des essais préliminaires effectués à l'Institut des métaux et des machines (IMM) de l'EPF-Lausanne démontrent le comportement satisfaisant de ces ancrages; ces essais ont d'autre part mis en évidence le glissement du fil central dans les ancrages de ce type dès que les contraintes atteignent $0.7 \beta_z$.

Pour diverses raisons techniques, la précontrainte annulaire du modèle fut réalisée au moyen de câbles indépendants, contrairement au caisson réel où elle sera vraisemblablement réalisée au moyen de fils continus. Ce choix n'était cependant pas sans inconvénient, notamment en ce qui concerne les pertes par frottement. Grâce à de nombreux essais préliminaires, on put déterminer très exactement ces pertes et, d'autre part, les diminuer et les égaliser de manière optimale par des dispositions techniques et constructives appropriées. Les câbles annulaires, graissés avec du Spec. Moly. Grease, furent placés sur une tôle d'acier d'épaisseur 1 mm; ils furent mis en tension en tirant simultanément leurs 2 extrémités. On détermina ainsi un coefficient de frottement μ égal à 0.09. La précision atteinte dans les forces de précontrainte ne fut nulle part inférieure à $\pm 2,5\%$.

La mise en précontrainte du modèle s'effectua en deux étapes et débuta un mois après le bétonnage; chaque câble fut mis en tension en une seule étape à une valeur moyenne correspondant à $0.67 \beta_z$.

4. Dispositifs d'essais

Les essais de charge du modèle eurent lieu dans la halle d'essai climatisée du CEBAP. La variation de la température étant négligeable on a pu utiliser un cadre de référence (pour fixation des capteurs de déplacement) indépendant, fixé directement sur la dalle d'essai (fig. 4); ceci facilita énormément le dépouillement des résultats de mesure.

Les mesures enregistrées furent effectuées au moyen de différentes sortes de capteurs électriques, répartis sur le modèle en 168 points et groupés essentiellement dans la «zone de faiblesse».

On été employés :

- des jauge de déformation (déformation relative > 20%) collées d'une part sur la peau d'étanchéité, d'autre part sur la surface du béton. Quelques difficultés, posées surtout par la protection des jauge intérieures et leurs câblages (danger d'une amorce de fissuration) et par la pression intérieure anormalement élevée, furent surmontées d'une manière satisfaisante grâce à de nombreux essais préliminaires;
- des capteurs inductifs de déplacement (course de ± 5 mm à ± 50 mm) fixés sur un cadre de référence indépendant (voir fig. 4); cette solution simple s'est avérée satisfaisante;
- des capteurs de force (système à jauge de déformation — portée nominale de 20 t et 30 t) pour mesurer la variation de la précontrainte, montés sur les câbles lors de leur mise en place (voir fig. 4);
- des capteurs de pression (système à jauge — portée nominale de 200 kg/cm² et 500 kg/cm²) pour des mesures précises de la pression introduite;
- des thermorésistances, destinées à mesurer les éventuelles variations de température.

A part les capteurs susmentionnés, certaines cavités sélectionnées furent équipées de manomètres mécaniques afin de pouvoir d'une part contrôler la pression interne visuellement, d'autre part détecter, le cas échéant, la cavité dont la peau d'étanchéité aurait cédé.

A titre d'essai, un capteur de bruit (signal amplifié enregistré sur un oscilloscope à mémoire) fut utilisé dans le but d'essayer de capter le bruit dû à la fissuration (l'expérience était assez concluante).

L'acquisition des valeurs mesurées s'effectuait par l'intermédiaire d'une chaîne de mesures automatique, la sortie étant imprimée et simultanément enregistrée sur une bande perforée (fig. 6). Cette bande était ensuite traitée sur l'ordinateur à partir d'une console de télétype, ce qui a permis de livrer les résultats traités presque immédiatement.

Le système de mise en pression comprenait en principe un agrégat de pompes avec mainteneur de charge (pression maximale de 380 bars), complété par un vérin (changeur de pression et de milieu) et un réseau de distribution équipé de vannes permettant, le cas échéant, de court-circuiter les cavités ayant des pertes de pression dues à une rupture locale prématuée de la peau d'étanchéité. La mise en pression du modèle s'effectua au moyen d'une émulsion d'eau avec 2% d'huile soluble.

Lors de cycles de rupture, le comportement du modèle (surtout la fissuration) dans la zone de faiblesse fut observé à distance au moyen de 3 caméras de télévision et enregistré simultanément sur 3 magnétoscopes (fig. 6).

5. Programme d'essais

Les essais préliminaires avaient pour but de contrôler (sous une faible pression ne dépassant pas 20 kg/cm²) les parties principales du modèle, les capteurs, la chaîne de mesure et la chaîne de mise en charge.

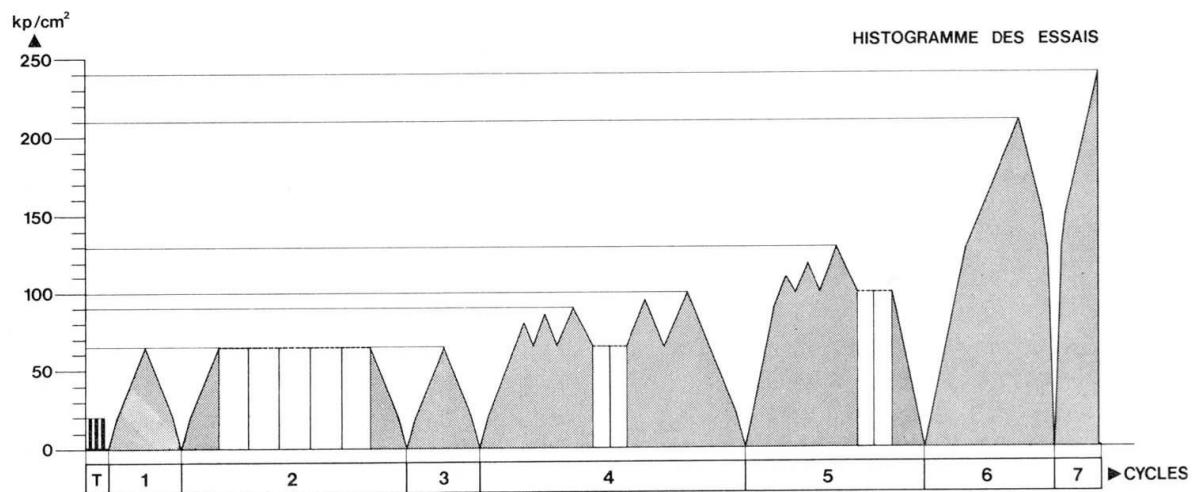


Fig. 5. Histogramme des essais.

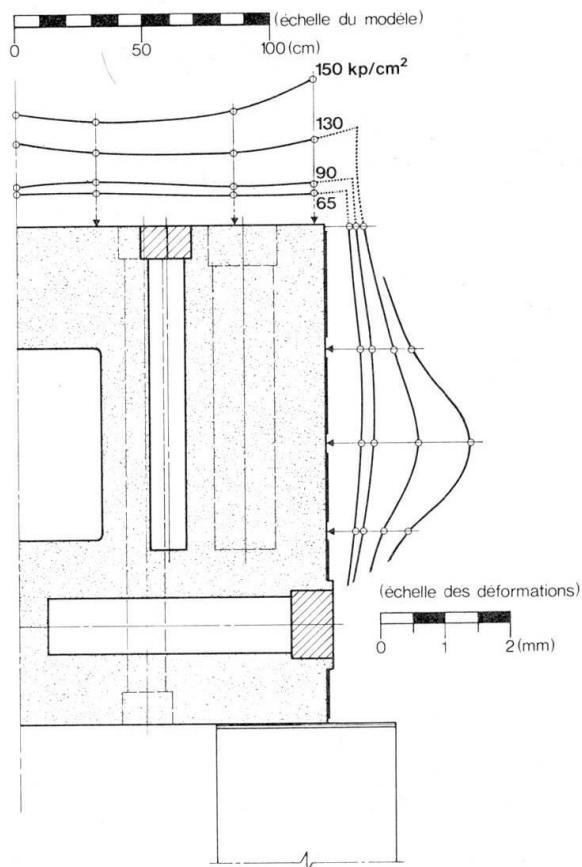


Fig. 11. Déformée du modèle.

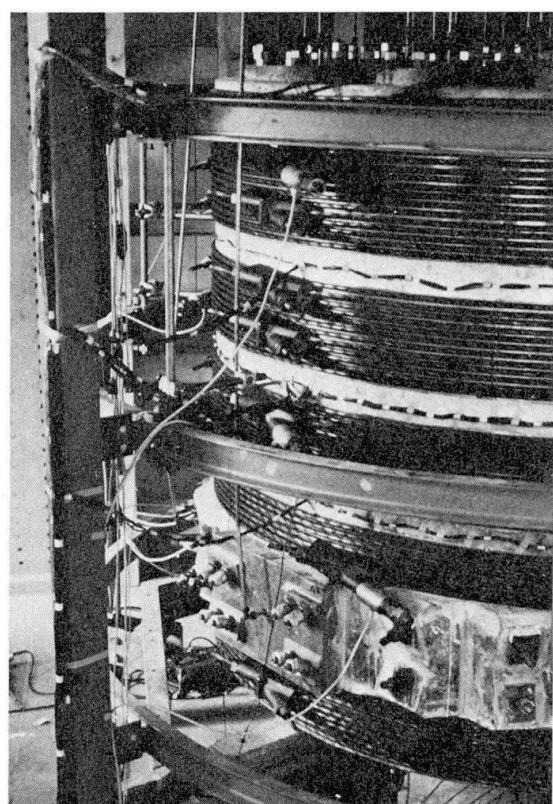


Fig. 4. Vue des dispositifs de mesure et du cadre de référence.

Les essais proprement dits comportaient 7 cycles de charge. On y distingue 3 phases essentielles (fig. 5):

- a) cycles 1, 2, 3: observation du comportement du modèle sous la pression de service;
- b) cycles 4, 5: observation du comportement du modèle dans l'état limite d'utilisation et au-delà (pour déterminer le début de la fissuration et de la plastification);
- c) cycles 6, 7: essai de rupture.



Fig. 6. Vue de l'ensemble des chaînes de sollicitation et de mesures lors des essais.

Pendant les cycles 2, 4 et 5, on a procédé aux essais de longue durée, pour examiner le comportement du modèle sous une pression constante.

Les paliers de charge étaient de 5 kg/cm^2 pendant les cycles et de 10 kg/cm^2 au début et à la fin de ceux-ci, à l'exception des cycles de rupture où l'on a choisi également des paliers de valeurs plus élevées. La durée d'un palier était de quinze minutes.

Les essais ont duré deux mois et il a été accompli au total 250 lectures sur 168 points de mesure, non comprises celles faites lors des phases de test.

6. Résultats et commentaires des essais

Lors des essais, les résultats numériques des mesures furent livrés immédiatement après chaque cycle. Ces résultats furent ensuite complétés par des représentations graphiques (fig. 7 à 10): les courbes montrent les variations de déformations spécifiques, de déplacements ou de forces dans les câbles de précontrainte

en fonction de la pression. Sur chacun de ces graphiques, la courbe en trait plein représente les valeurs mesurées en fonction des pressions atteintes pour la première fois, l'autre, en traitillé, représente le dernier cycle de charge au complet.

Les résultats ont montré que le comportement global du modèle était linéaire jusqu'à une pression intérieure de l'ordre de 120 à 130 kg/cm². Lors des essais de longue durée, aucun phénomène particulier n'a en outre été observé.

Une image de la déformation globale du modèle est donnée à la figure 11. Les mesures n'ont montré aucune déformation significative de la dalle inférieure. Les déformations maximales mesurées à la rupture furent de 12 à 19 mm à mi-hauteur de la face verticale et de 5 à 6 mm pour la dalle supérieure.

Les premières fissures détectables sont apparues sur la face latérale à mi-hauteur du modèle dès que la pression dépassa 120 kg/cm². Elles devinrent nettement visibles à partir de 150 kg/cm²; tout d'abord, la fissure horizontale à mi-hauteur puis des fissures verticales, une au droit de chaque cavité verticale périphérique (fig. 12). Sous la pression de rupture, l'ouverture maximale de la fissure horizontale à mi-hauteur était de 10 à 15 mm.

La pression maximale atteinte à la rupture fut égale à 240 kg/cm². La rupture se manifesta extérieurement par de grandes déformations et des fissures largement ouvertes, par la rupture d'un câble annulaire et par des fuites importantes dues à une rupture de la peau d'étanchéité de deux cavités verticales périphériques (rupture provoquée par la fissuration et les mouvements importants du béton; cf. fig. 14).

Des coupes du modèle (fig. 13 à 15), effectuées par sciage au fil, montrent de manière éloquente la fissuration à l'intérieur de celui-ci. Elles montrent notamment le mécanisme d'éjection qui se développa à la périphérie des faces verticales du modèle (fig. 14), la fissuration des dalles supérieure et surtout inférieure (fig. 13 et 14), quoique aucune fissure de celles-ci ne fût visible au cours des essais. On remarquera également le réseau de fissures verticales reliant les différentes cavités (fig. 15) et la manière remarquable dont travailla et se déforma la peau d'étanchéité en tôle d'acier inox.

En conclusion, il faut relever le fait que l'essai a permis de vérifier, outre la grande réserve par rapport à la ruine, un comportement relativement ductile du modèle. Bien qu'il fût dépourvu d'armatures intimement liées au béton (câbles non injectés et absence d'armature passive), la fissuration et la déformation ont évolué de manière très progressive, ce qui est de grande importance pour la qualité de service du caisson.

POINT DE MESURE N°: 104
CAPTEUR DE DÉPLACEMENT

Pression (kp/cm²)

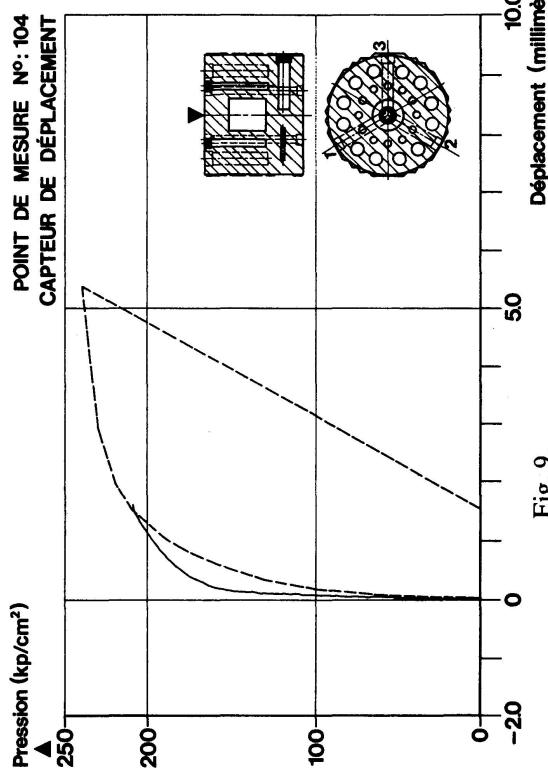


Fig. 9.

POINT DE MESURE N°: 152
CAPTEUR DE FORCE

Pression (kp/cm²)

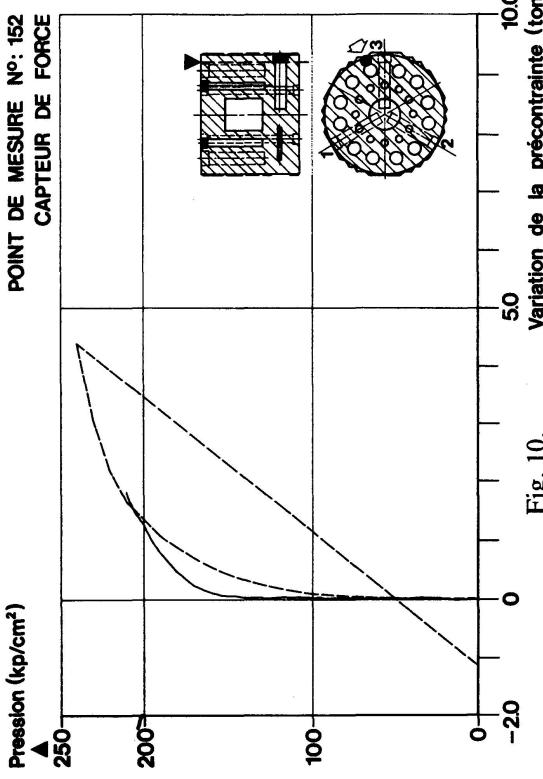


Fig. 10.

POINT DE MESURE N°: 20
JAUGE DE DÉFORMATION INTÉRIEURE

Pression (kp/cm²)

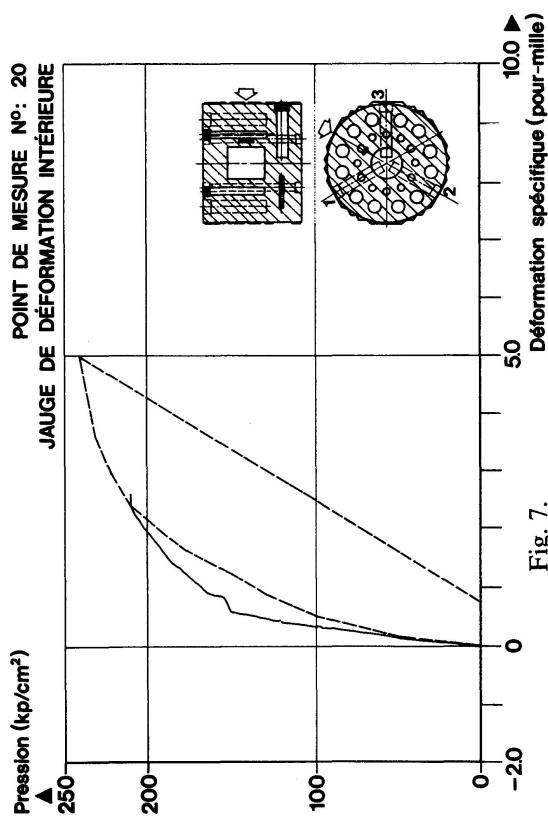


Fig. 7.

POINT DE MESURE N°: 50
JAUGE DE DÉFORMATION EXTERIEURE

Pression (kp/cm²)

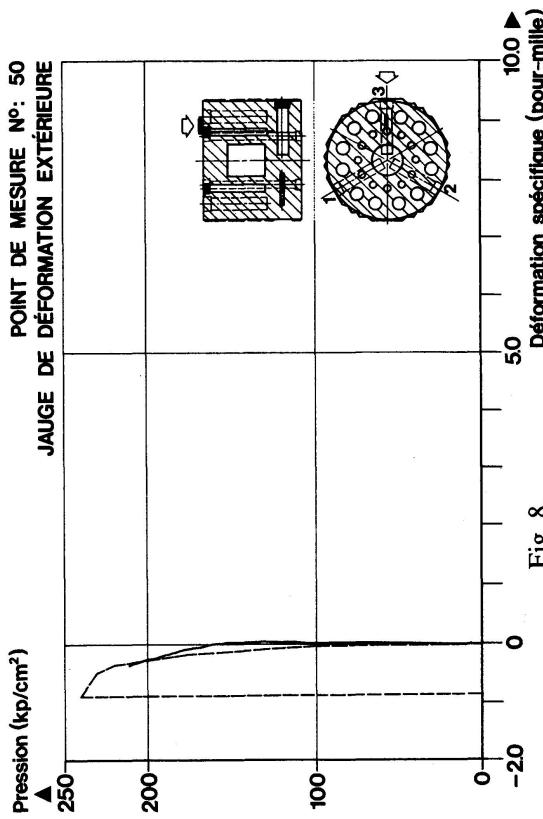


Fig. 8.

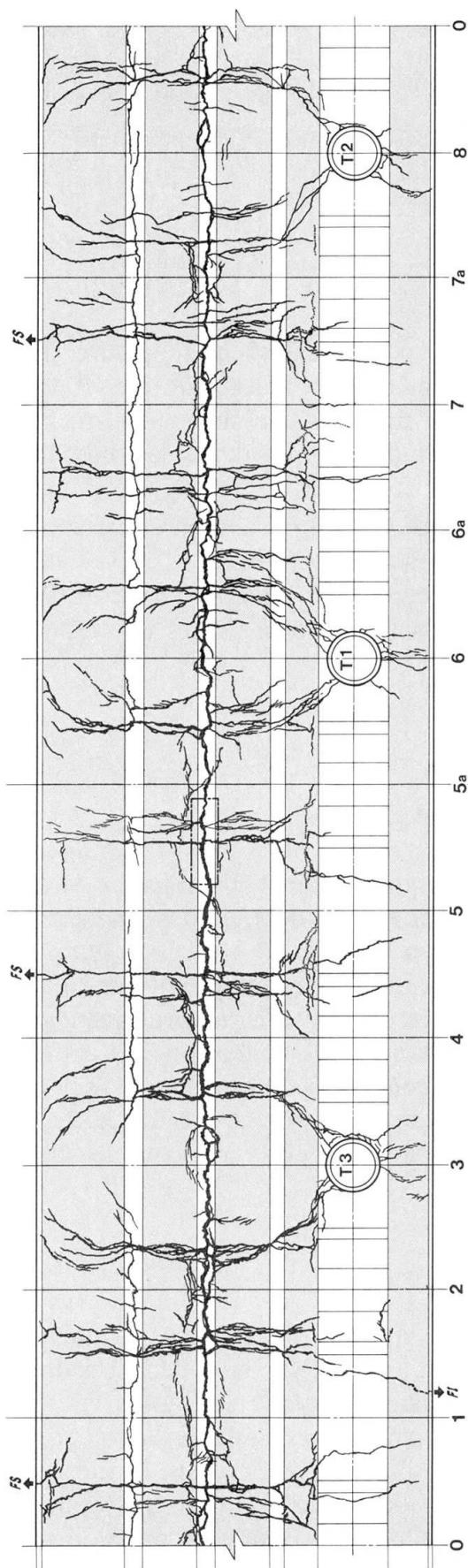


Fig. 12. Relevé des fissures sur la face verticale développée (T1, T2 et T3 sont les trois turbines).

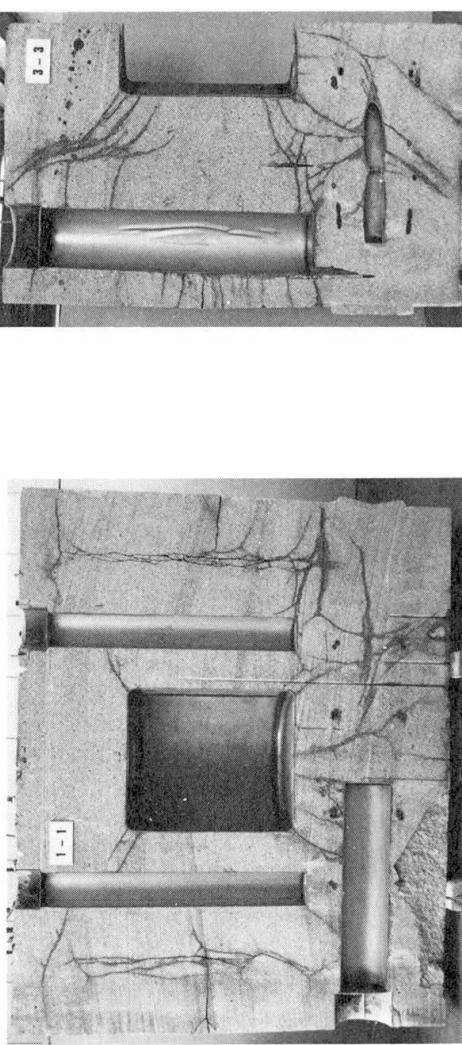


Fig. 13. Vue de la coupe verticale du modèle dans l'axe d'une turbine (T3).

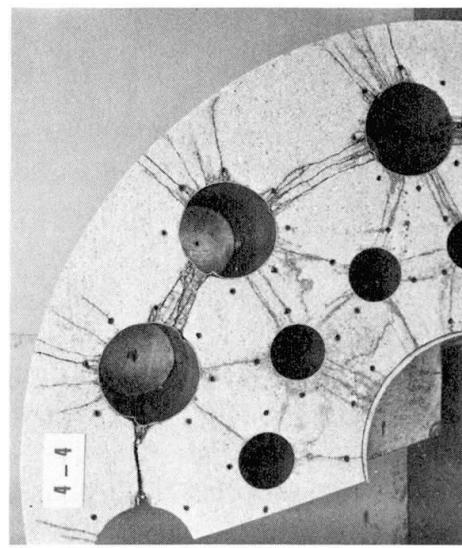


Fig. 14. Vue d'une demi-coupe verticale dans l'axe d'une cavité périphérique (V22).

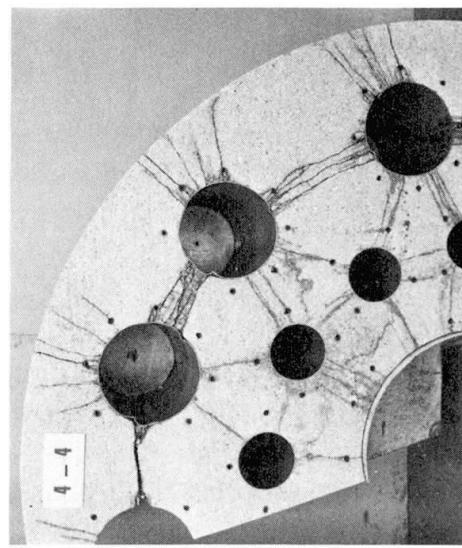


Fig. 15. Vue d'une coupe horizontale au niveau de la cavité centrale du réacteur.