

Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 19 (1974)

Artikel: Caisson Bugey I et ses maquettes: auscultation et exploitation des mesures prises pendant les essais

Autor: Lemasson, M. Jacques

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-17519>

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: 04.04.2025

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

Caisson Bugey I et ses maquettes. Auscultation et exploitation des mesures prises pendant les essais

*Bugey I pressure vessel and scale models.
Instrumentation and utilization of the measurements carried out during the testing period*

*Spannbetondruckbehälter Bugey I und die Versuchsmodelle.
Instrumentierung und Auswertung der Bemessungen während der prüfungszeit*

par M. Jacques LEMASSON - Spic-Batignolles / Citra
13, Avenue Moranc-Saulnier - Velizy (78 140) - France

I - INTRODUCTION

La présente communication est relative à l'exploitation des mesures prises pendant les essais effectués sur le caisson BUGEY I et sur ses maquettes. Avant de présenter les résultats correspondants nous rappellerons brièvement les caractéristiques et l'historique de ces ouvrages. D'autre part, nous passerons en revue les types de capteurs adoptés, leur implantation et les méthodes d'exploitation des mesures.

II - LE CAISSON EN BETON PRECONTRAIT BUGEY I ET SES DEUX MAQUETTES AU 1/5e

1 - Description du caisson

Le caisson en béton précontraint de la centrale nucléaire BUGEY I a été construit de 1967 à 1970. Le réacteur qu'il contient est du type uranium naturel-graphite-gaz, la puissance électrique est de 560 MWe (voir figure 1). Les essais précédant la mise en service ont eu lieu de juin 1971 à janvier 1972.

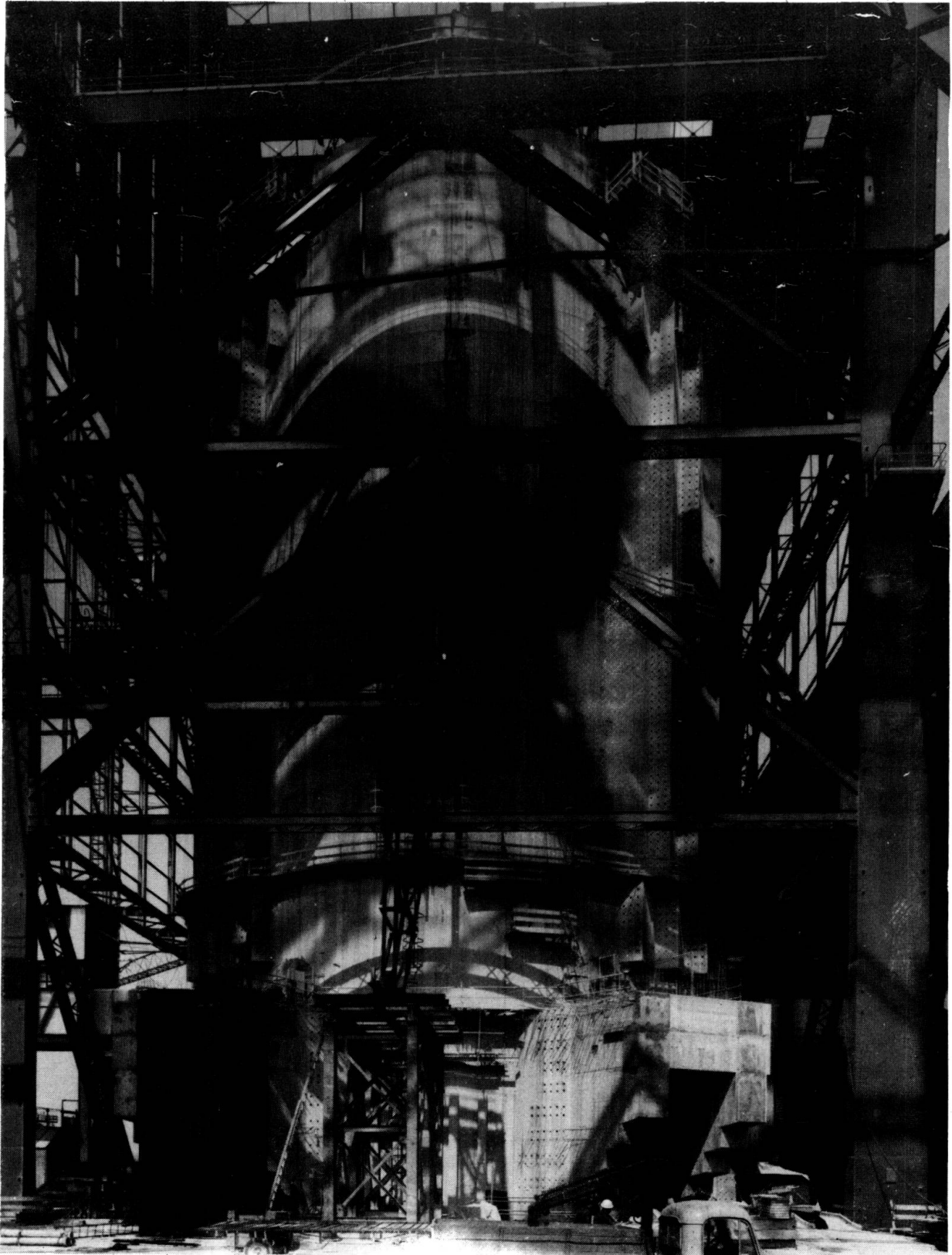


Figure 1 Caisson BUGEY 1 en construction.
Pressure vessel BUGEY 1 in construction.
Druckbehälter BUGEY 1 im Aufbau.

Cet ouvrage est remarquable par ses dimensions et par les sollicitations auxquelles il est soumis en service. Les figures 2 et 3 schématisent le coffrage et la précontrainte de l'ouvrage. Les caractéristiques principales sont :

- Diamètre intérieur	17,10 m
- Hauteur intérieure	40,125 m
- Epaisseur de la paroi cylindrique	5,50 m
- Epaisseur des dalles des fonds	7,50 m

La précontrainte est assurée par 4 200 t de câbles du type BBRB 54 Ø 7 placés sous gaines injectées. L'ouvrage est revêtu intérieurement d'une peau d'étanchéité en acier de 25 mm d'épaisseur portant un calorifuge et un circuit de refroidissement. La dalle supérieure est perforée de 942 puits formant le "bloc tubulaire supérieur" : cette disposition interdit le passage de câbles radiaux.

2 - Sollicitations

Le caisson doit pouvoir supporter, dans les conditions de service une pression interne absolue de 46 b et une différence de température entre faces interne et externe du béton de 35°C.

3 - Sécurité, contraintes admises

On ne saurait manquer de rappeler l'importance de la notion de sécurité pour de tels ouvrages. A l'époque à laquelle le caisson a été entrepris il n'existait pas de réglementation particulière pour ce type de structure, soumise à un gradient thermique important (depuis, une codification a été précisée par l'Arrêté Ministériel du 15 juin 1970). Par référence aux ouvrages dépendant du Ministère des Travaux Publics le domaine de sécurité du béton a été déduit du domaine de résistance par une réduction homothétique dans le rapport de 1 à 0,42. D'autre part, la pression entraînant la ruine de l'ouvrage devait rester supérieure à 2,5 fois la pression de service. Enfin, comme il s'agissait d'un appareil à pression, le Service des Mines a fait procéder à un essai sous 1,1 fois la pression de service (50,6 b).

4 - Calcul

Le caisson peut être assimilé à un corps de révolution. Toutefois, le rapport des épaisseurs des parois au diamètre ne permet pas de traiter la structure comme une coque mince. SFAC (aujourd'hui CREUSOT LOIRE) et CITRA (aujourd'hui SPIE-BATIGNOLLES et CITRA FRANCE) ont établi en commun un programme de calcul thermoélastique à deux dimensions qui a permis de traiter ce problème. Ce programme se réfère à la théorie de l'élasticité linéaire et utilise la méthode des éléments finis. Développé depuis -notamment pour les structures tridimensionnelles- ce programme a été le départ du système de calcul sur ordinateur baptisé "TITUS".

5 - Données numériques relatives aux matériaux

Elles ont fait l'objet d'une expérimentation étendue. Pour le béton, l'on a notamment mesuré les modules de déformation instantanés et différés à trois températures, la résistance mécanique, le retrait, la dilatation thermique. Les paramètres suivants ont par suite été introduits dans les calculs

$$E_i = 400\ 000\ \text{b}$$

$$E_{\infty} = \frac{E_i}{3} \quad \text{sous précontrainte}$$

$$E_{\infty} = \frac{E_i}{2} \quad \text{sous chargement thermique}$$

$$\sigma'_{28} = 400\ \text{b}$$

$$\sigma_{28} = 34\ \text{b}$$

$$\alpha = 8 \times 10^{-6} \quad \text{Coefficient de dilatation}$$

- CAISSON BUGEY.1
 - PRESSURE VESSEL BUGEY.1
 - DRUCKBEHÄLTER BUGEY.1

- Coupe Verticale
 - Vertical Section
 - Vertikalschnitt

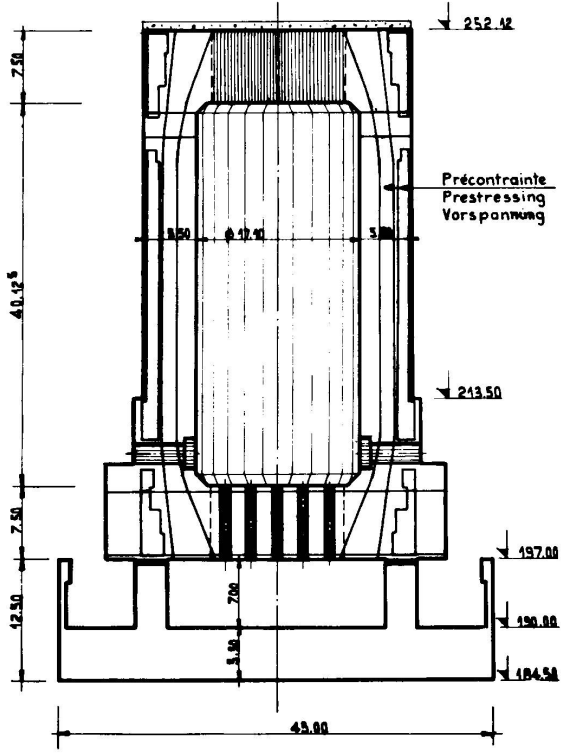


Figure 2.

Ech : 0.003

- Coupe Horizontale
 - Horizontal Section
 - Horizontalschnitt

Ech : 0.004

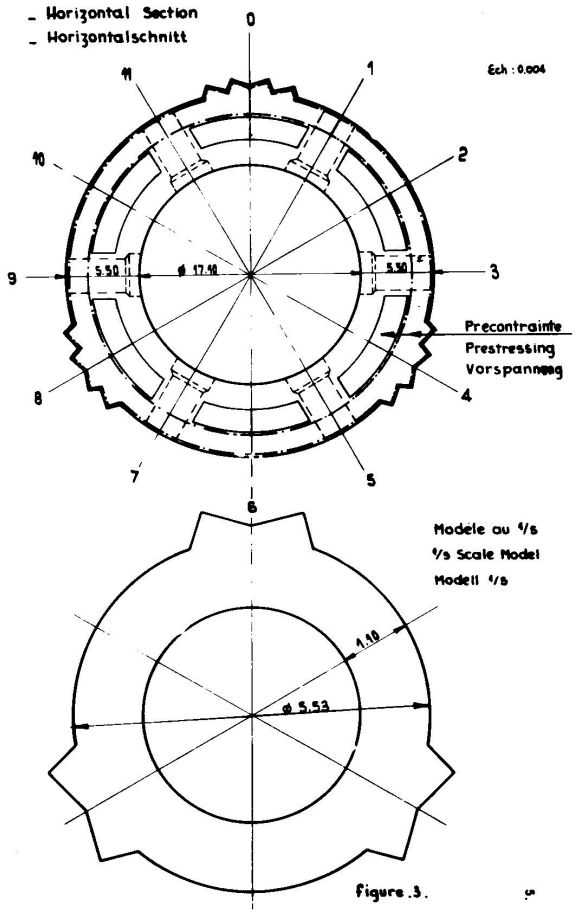


Figure 3.

5

Le coefficient de frottement des câbles de précontrainte dans leurs gaines a été mesuré sur un banc circulaire de diamètre comparable à celui du caisson. La valeur de 0,18 a été retenue.

Le "bloc tubulaire supérieur" forme un complexe béton-acier dont les propriétés ont dû être mesurées sur une maquette particulière. La mesure des déformations sous étreinte circulaire a permis l'obtention des données suivantes

$$E_i \text{ (BTS)} = 0,75 E_i \text{ (béton seul)}$$

$$E_{\infty} \text{ (BTS)} = E_{\infty} \text{ (béton seul)}$$

6 - Maquettes du caisson

Compte tenu de l'état des connaissances et de l'impossibilité de procéder à des essais de réception de l'ouvrage sous pression fortement majorée (ce qui entraînerait la fissuration), il a été décidé de construire deux maquettes complètes. L'échelle du 1/5^e a été retenue car elle permet notamment l'emploi d'un béton "réel" (0/15) dont les caractéristiques ne s'éloignent pas de celles du prototype. En outre il reste possible dans ces conditions de placer des capteurs dans le béton sans apporter de perturbations locales (à ce jour les appareils sûrs restent encombrants).

La maquette n°1, dite "froide", était destinée à des essais en pression poussés jusqu'à rupture (obtenue à 124 b).

La maquette n°2, dite "chaude" était plus particulièrement destinée à l'étude des chargements thermiques. Elle a servi à de multiples expériences jusqu'à sa rupture obtenue pour $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ et $p = 137 \text{ b}$.

Outre la vérification globale de la validité du calcul, ces maquettes ont, en parallèle avec l'expérimentation "sur éprouvette", servi à l'établissement des paramètres détaillés ci-dessus en II-5.

III - INTERET DE L'INSTRUMENTATION

Le résumé qui vient d'être fait montre tout l'intérêt qu'il y a à disposer d'informations recueillies "in situ" grâce à un dispositif d'auscultation étoffé. Deux buts principaux peuvent lui être assignés : la surveillance et l'information. Vis-à-vis de la sécurité, on peut citer le contrôle des calculs et de leurs données, le pilotage des essais de réception, la surveillance de la durabilité de l'ouvrage. Vis-à-vis de l'information on peut retenir particulièrement l'appréciation des "effets d'échelle" entre éprouvettes et structures massives, l'étude du retrait et du fluage des parois épaisses soumises à un gradient thermique, etc, ..

IV - APPAREILLAGE UTILISE

1 - Pour le caisson

1.1 - Mesures globales de position et de déformation

1.11 - 4 pendules inversés placés suivant deux diamètres.

Ces appareils mis au point par EDF (DTG) fournissent des verticales repères. Des tables de lecture sont situées à mi-hauteur du caisson et au niveau de la dalle supérieure

1.12 - 6 repères de nivellement topographique

1.13 - 3 bases de lecture de longueur au fil Invar

1.2 - Mesure des températures

706 thermocouples (dont 446 dans le béton, du type PYROTENAX T 10 C)

1.3 - Mesure des déformations locales

1.31 - 318 extensomètres à corde vibrante (témoins sonores) du type TELEMAT F2 (longueur 254 mm)

1.32 - 250 rosettes d'extensomètres à fil résistant collées sur la peau d'étanchéité métallique

1, 4 - Mesure des forces de précontrainte

20 dynamomètres montés sur 6 câbles verticaux (une extrémité) et 7 câbles horizontaux (deux extrémités), du type SERIM. Ces appareils sont placés sous les ancrages, la mesure s'effectue par l'intermédiaire d'un anneau comprimé équipé de jauges électriques. Notons que les gaines des câbles correspondants ne peuvent être injectées : elles sont balayées en permanence par un courant protecteur d'air sec.

1, 5 - Mesure de la teneur en eau du béton

15 hygromètres. Ces appareils mis au point par EDF (SERNUTH) déduisent l'humidité du béton de sa résistance électrique.

2 - Pour les maquettes

Les deux maquettes ont reçu une instrumentation similaire, adaptée à leur but respectif, notamment :

Maquette n°1 = 238 témoins sonores, 10 thermocouples

Maquette n°2 = 250 " " 133 "

Les témoins sonores étaient du type TELEMAT C 90, (longueur 120 mm)

3 - Salle de mesures

Une salle d'enregistrement automatique des lectures a été installée pour le caisson et pour les maquettes. Une lecture complète des appareils conduit au recueil de plus de 1 000 informations. Seules de telles installations permettent de "saisir" l'état de contrainte lorsque la pression varie rapidement.

V - REMARQUE SUR L'IMPLANTATION DES EXTENSOMETRES

Il faut savoir placer efficacement et ceci quel que soit l'ouvrage instrumenté un certain nombre de capteurs, limité par les possibilités budgétaires. Il faut en outre se rappeler les deux buts : surveillance et information, qui peuvent être contradictoires. Dans un ouvrage cylindrique type BUGEY 1 une solution apparue comme bonne est d'équiper largement une section méridienne, et légèrement 5 autres. Il faut éviter le "saupoudrage" qui empêche les corrections par continuité. De même, les points de mesure doivent être groupés en files d'au moins 4 ou 5, perpendiculaires aux parements du béton.

Enfin, on utilisera les symétries pour réduire le nombre de capteurs placés en chaque point de mesure. On pourra voir cette disposition sur la figure 8 . Dans tout ouvrage -surtout s'il s'agit d'un caisson nucléaire- les contraintes thermiques, particulièrement en régime transitoire, peuvent être importantes : il est toujours nécessaire de placer un thermocouple à chaque point de mesure extensométrique.

VI - PROGRAMME DE MESURES

Il est important de prévoir à l'avance un calendrier des mesures, le relevé de tous les appareils étant faits à l'occasion d'états de sollicitation caractéristiques. Il est notamment indispensable, en vue de l'exploitation des mesures de relever les "zéros" avant ou après une phase d'essai. Pour le caisson BUGEY 1, dans la période qui intéresse la présente communication, le déroulement des opérations principales a été le suivant : (voir figure 4)

Précontrainte	6 - 1969 à 4 - 1970
Essais en air sans pression	6 - 1971
Essais en CO ₂ en pression	8 - 1971 à 12 - 1971
Essai final (Service des Mines)	1 - 1972

Les lectures exploitées vont du "zéro avant précontrainte" au "zéro après essai final". Elles correspondent à un an et demi du premier âge du caisson et permettent d'observer une part significative du fluage et de la relaxation des matériaux.

VII - EXPLOITATION DES MESURES PRISES SUR LE CAISSON

1 - Thermocouples

Durant les essais la température de la cavité intérieure a fréquemment varié et les régimes thermiques dans le béton ont gardé un caractère transitoire. On peut toutefois noter que les modifications de température se propagent plus vite que ne le laissent prévoir les essais de conductivité thermique en laboratoire : on peut voir là l'influence des éléments métalliques noyés. Il a été également possible de constater que le calorifuge avait d'excellentes qualités. Pendant ce temps les canalisations extérieures chauffaient l'air du hall abritant le réacteur. En conséquence, les gradients thermiques tendaient à disparaître, voir à s'inverser par rapport aux hypothèses du calcul. Lors des essais en CO₂ en septembre 1971, tous les gradients étaient négligeables (voir figure 5).

Cette circonstance remarquable permet d'attribuer aux variations de pression seules, les variations des lectures des capteurs à cette époque. Il n'a pu en être de même lors de l'essai final (voir figure 5), mais le caisson ayant été dégonflé rapidement la température n'a pas sensiblement évolué pendant cette opération et encore une fois les capteurs n'ont enregistré que l'effet de la chute de pression.

2 - Dynamomètres

La figure 6 montre l'évolution dans le temps des forces mesurées au moyen des dynamomètres, c'est-à-dire la tension des câbles instrumentés au voisinage de leurs ancrages. Les courbes correspondent à la moyenne des observations pour les câbles verticaux et horizontaux. Lors du blocage initial la force est de 275 t, celle-ci s'abaisse début 1972 à 235 t pour les cerces et 240 t pour les câbles longitudinaux. Ces valeurs sont supérieures de 7% et de 5% respectivement à celles calculées pour les conditions de service à long terme.

- Essais en pression et température

- Pressure and temperature tests

- Druck und Temperatur prüfung

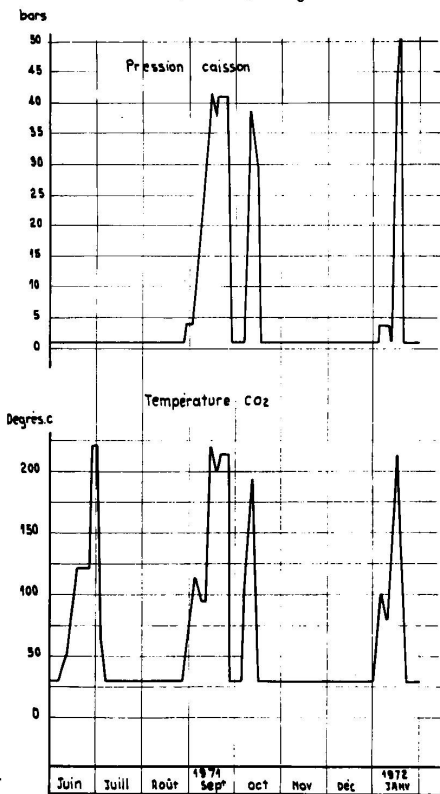
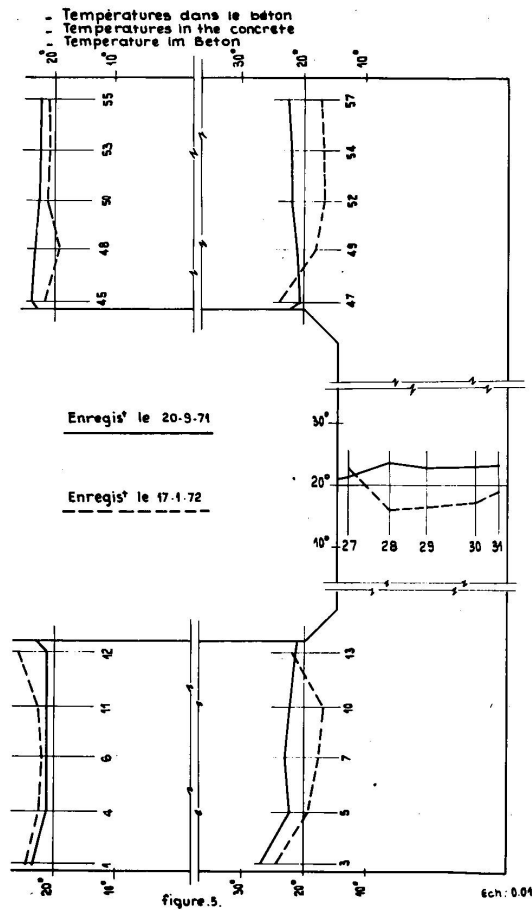


Figure.4.



Compte tenu des causes d'imprécision de la comparaison calcul-mesure, notamment en ce qui concerne l'effet de la température sur la relaxation de l'acier, on peut considérer que les hypothèses prises pour le calcul ont été convenables. Conformément aux prévisions, l'élévation de la température de l'ouvrage fait baisser la tension des dynamomètres, du fait de la différence des coefficients de dilatation entre l'acier et le béton. Les valeurs observées varient de 1 à 3 t. L'effet de la mise en pression sous 41 b entraîne d'autre part une surtension des cerces, (à mi hauteur), de 2,34 t. Enfin, comme on le verra plus loin, les dynamomètres permettent le "calage" des modules de déformation utilisés pour l'exploitation des lectures des témoins sonores.

3 - Pendules inversés

Les observations en température sans pression sont peu intéressantes (sauf pour le contrôle de la verticalité de l'ouvrage), car les déformations tant calculées que mesurées sont inférieures au millimètre. La figure 7 montre la variation d'un rayon correspondant à deux essais en pression accompagnés de variations thermiques négligeables. La linéarité et la réversibilité des déformations sont satisfaisantes. Celles-ci correspondent à un module de déformation global de l'ordre de 400 000 b.

4 - Extensomètres sur peau d'étanchéité

Les jauges étaient groupées en panneau dans la partie courante du fût -. EDF (DTG) a procédé à l'exploitation des lectures. A la fin de la mise en précontrainte du caisson les résultats étaient les suivants :

$$\sigma_C \text{ (circonférentielle) } = 16,2 \pm 0,7 \text{ hb}$$

$$\sigma_Z \text{ (longitudinale) } = 10,4 \pm 0,7 \text{ hb}$$

- DYNAMOMETRES - DYNAMOMETERS - KRAFTMESSRINGE
Sur cables de précontrainte

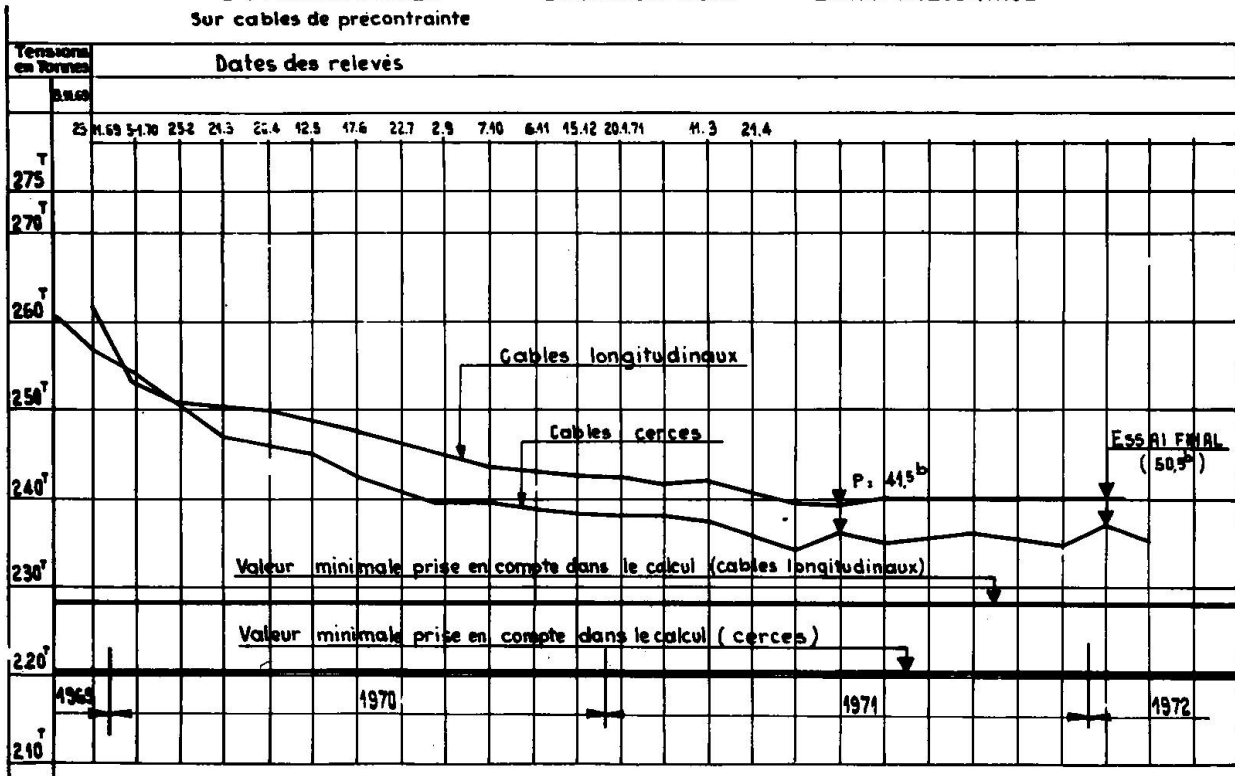


figure 6.

BUGEY-4. ESSAIS en CO_2 - PENDULES INVERSES, AXE 4-10 heures

GONFLEMENT DU GAISSON A NGF 224,50 (1/2 hauteur du fût)

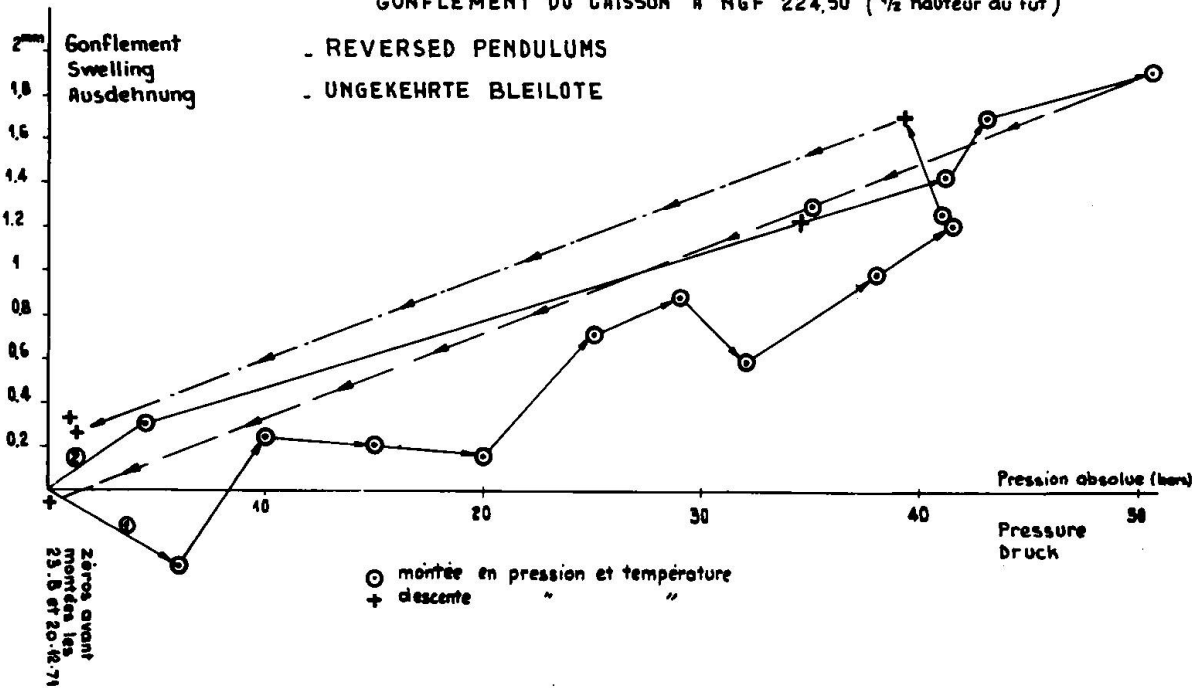


figure 7.

Les déformations enregistrées par les jauges collées sur le métal et les témoins sonores noyés dans le béton les plus proches étaient remarquablement concordantes (651×10^{-6} et 624×10^{-6} pour σ_C par exemple). Il y a une correspondance convenable entre calculs et mesure si l'on affecte au béton un module de déformation partiellement différé de 250 000 b à cette époque, cette dernière valeur étant par ailleurs en accord avec les indications des dynamomètres.

On a pu observer également une bonne correspondance entre les valeurs calculées et mesurées lors des essais, puis les jauges ont été abandonnées en raison notamment de leur dérive.

6 - Témoins sonores

La figure 8 montre l'implantation des 171 témoins sonores, groupés en 72 points de mesure, qui ont fait l'objet des lectures les plus fréquentes pendant les essais. Les informations ainsi recueillies ont été utilisées pour le pilotage des essais, c'est-à-dire la conduite avec sécurité des opérations de mise en température et pression. Il fallait donc procéder à l'exploitation immédiate des lectures.

Dans ce but, EDF (DTG) et CITRA ont établi un programme de calcul sur ordinateur, baptisé "TSONO". Celui-ci calcule les déformations et les contraintes à partir des fréquences des cordes vibrantes et de leur température. Il fait appel aux formules de l'élasticité et nécessite certaines données numériques. Les valeurs suivantes ont été fixées :

Coefficient de dilatation acier	12×10^{-6}
Coefficient de dilatation béton	8×10^{-6}
Coefficient de POISSON	0,20

Le module de déformation E doit être adapté au cas de chargement concerné. La validité de la valeur prise est vérifiée en comparant la résultante des efforts internes déduits de l'exploitation des témoins et la force extérieure appliquée (précontrainte d'après les dynamomètres, ou pression).

BUGEY.1. caisson .TEMOINS SONORES.
 Comparaison des déformations, en partie courante du fût
 entre caisson et maquettes

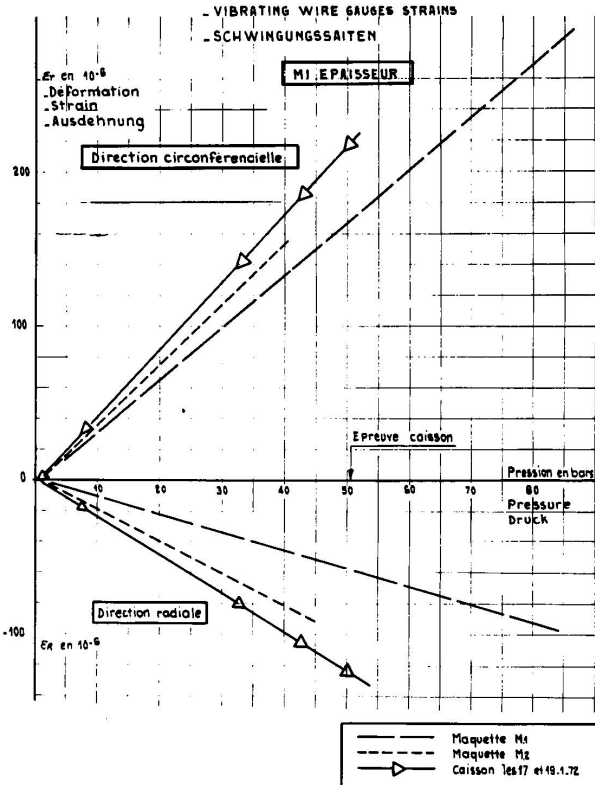
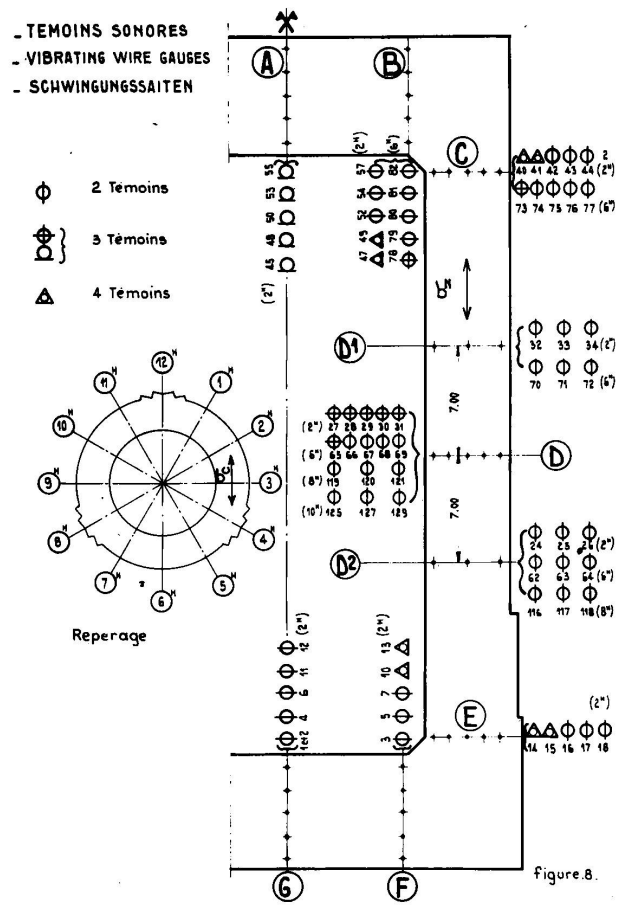


Figure. 9.



Les valeurs suivantes de E se sont montrées les plus convenables :

- Pour la pression seule	$E_C = E_Z =$	370 000 b
- Pour la précontrainte à l'époque des essais	$E_C =$	170 000 b
	$E_Z =$	140 000 b

On voit donc apparaître une certaine anisotropie. D'autre part, pour enlever plus rapidement les raidisseurs de la peau d'étanchéité, on a coulé d'abord autour de celle-ci un "corset" de 70 cm d'épaisseur intégré ultérieurement, au béton du fût cylindrique. Les témoins sonores placés dans ce corset ont enregistré au cours de la mise en précontrainte de l'ouvrage des déformations correspondant à un module inférieur au module moyen de la structure.

La figure 9 montre les déformations notées en partie courante du fût, à mi-épaisseur du béton. On peut noter la remarquable linéarité des diagrammes.

Les figures 10 et 11 montrent la comparaison calcul-mesure pour σ_C et σ_Z à mi-fût dans les cas précontrainte seule et précontrainte plus essai à 41,5 b (avec gradient thermique négligeable, comme on l'a vu en VII. 1).

VIII - EXPLOITATION DES MESURES PRISES SUR LES MAQUETTES, COMPARAISON AVEC LE CAISSON

Nous ne détaillerons pas l'exploitation des mesures prises sur les maquettes, travail similaire à celui exposé en VII. La comparaison calcul-mesure s'est montrée satisfaisante. Il est difficile de pouvoir comparer avec exactitude maquette et prototype : l'histoire des bétons et les états thermiques sont toujours différents aux époques des mesures. La figure 9 groupe des déformations correspondant au caisson et aux deux maquettes.

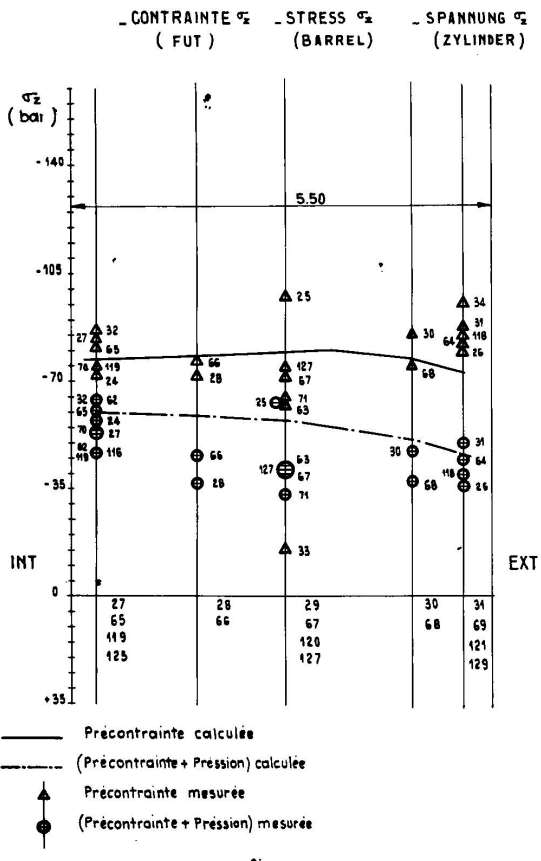


Figure.11.

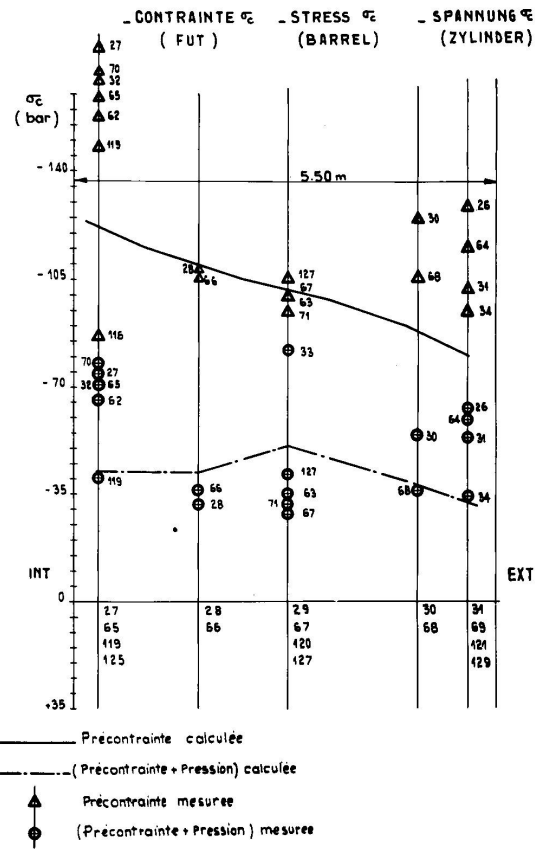


Figure.10.

RESUME

Le caisson en béton précontraint de la centrale nucléaire BUGEY 1 a été construit de 1967 à 1970. Ses caractéristiques principales sont : diamètre intérieur 17,10 m, pression interne 46 b, poids des câbles de précontrainte 4 200 t.

La dalle supérieure ne comporte aucun câblage transversal en raison de la présence d'un bloc tubulaire.

Les études ont été accompagnées d'une large expérimentation comprenant deux maquettes à l'échelle du 1/5e. En raison du caractère exceptionnel de la structure de nombreux dispositifs de mesure ont été installés : pendules inversés, thermocouples, cordes vibrantes, jauges à fil résistant, dynamomètres etc. ...

La présente contribution analyse les informations fournies par ces appareils pendant les essais du caisson, de juin 1971 à janvier 1972.

Les résultats des mesures et des calculs sont comparés, la concordance est satisfaisante.

SUMMARY

The Prestressed Concrete Pressure Vessel of BUGEY I Nuclear Power Reactor was erected between 1967 and 1970, the main features of which being :

- Internal diameter : 17.10 m
- Operating pressure : 45 bars
- 4,200 t of prestressing tendons.

The upper slab has no transverse cabling because of the shape of the standpipes unit.

The studies involved a wide range of tests, including tests performed on two 1/5 scale models. Owing to its unique features, numerous measuring devices such as "reversed pendulums", thermocouples, vibrating wires, electrical strain-gauges and dynamometers etc... were placed in the concrete structure.

This paper analyses the results obtained by means of these devices during the tests period, from June 1971 to January 1972. Concordance of the test results with calculations is satisfactory.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Spannbetondr ckbehlter des Kernkraftwerks BUGEY I ist in den Jahren 1967 bis 1970 gebaut worden. Die wichtigsten Merkmale folgen hier :

Innendurchmesser : 17,10 M

Betriebsdruck : 46 Bars

Gewicht der Spannglieder : 4200 T

Die Deckplatte enthält keine Querbewehrung infolge der Anwesenheit eines Hohlzylinderblocks.

Die Untersuchungen umfassten viele Prüfungen und die Ausprobung von zwei auf $1/5$ verkleinerten Versuchsmodellen. Der ausserordentlichen Art des Bauwerks wegen, wurden zahlreiche Pr fungsgerte eingesetzt, wie zum Beispiel : umgekehrte Bleilote, Temperaturgeber, Schwingungssaiten. Dehnungsmessstreifen, Kraftmessringe, usw.

Dieser Bericht analysiert die Ergebnisse dieser Geräte während der Prüfungszeit des Behälters, ab Juni 1971 bis Januar 1972. Der Vergleich der Ergebnisse der Bemessungen entsprach den Berechnungen zur Genüge.

Leere Seite
Blank page
Page vide