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 : projet du caisson et du modèle
Autor: Lafitte, R. / Vuilleumier, F. / Marchand, J.D.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-918

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: 11.12.2025

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

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

Studien und Modellversuche an einem mit Hohlräumen durchsetzten Reaktordruckgefäss aus vorgespanntem Beton

Studies and Tests on Model of a Prestressed Concrete Nuclear Vessel with Multiple Cavities

PARTIE I

Projet du caisson et du modèle

R. LAFITTE, sous-directeur, F. VUILLEUMIER, ingénieur principal, J.D. MARCHAND, ingénieur, chez Bonnard & Gardel, Ingénieurs-conseils S.A.

1. Introduction

Dans le cadre d'un accord germano-suisse, des études de développement d'une centrale nucléaire, équipée d'un réacteur à haute température et de turbines à hélium, ont été entreprises.

Un élément important de cette centrale est constitué par un caisson en béton précontraint qui englobe non seulement le réacteur, les échangeurs et récupérateurs de chaleur, mais encore trois turbines à gaz de 500 MW chacune. Le caisson se présente (fig. 1) sous la forme d'un cylindre de 48 mètres de diamètre et de 39 mètres de hauteur, comportant 28 cavités. Celles-ci sont remplies d'hélium atteignant dans la majeure partie des zones une pression de 65 kg/cm^2 et une température de 850° C.

Le caractère particulier de ce caisson, d'une forme encore jamais exécutée notamment si l'on considère la forte épaisseur des parois percées de nombreuses cavités, a nécessité que l'on fasse clairement la démonstration de sa faisabilité et que l'on assure à l'ouvrage une sécurité suffisante tout en obtenant une conception économique de la structure. Ainsi, sans attendre le stade du projet définitif, a-t-il été jugé nécessaire d'entreprendre des essais statiques sur modèle réduit. Il est aussi apparu important, parallèlement aux essais, de recourir à l'utilisation d'un programme de calcul puissant à l'ordinateur, permettant de simuler et par conséquent de prévoir le comportement du modèle statique dans le domaine non linéaire et jusqu'à la rupture. La comparaison des essais et du calcul valorise en outre l'outil mathématique dans son utilisation pour le projet du caisson en vraie grandeur.

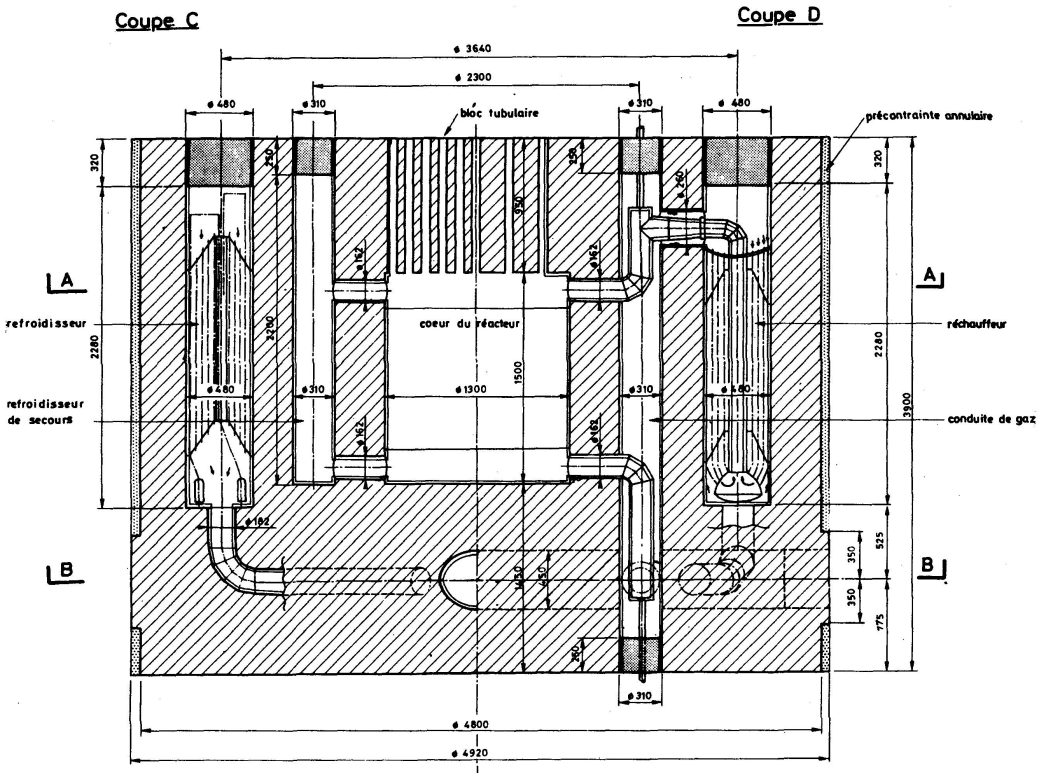

Fig. 1a.

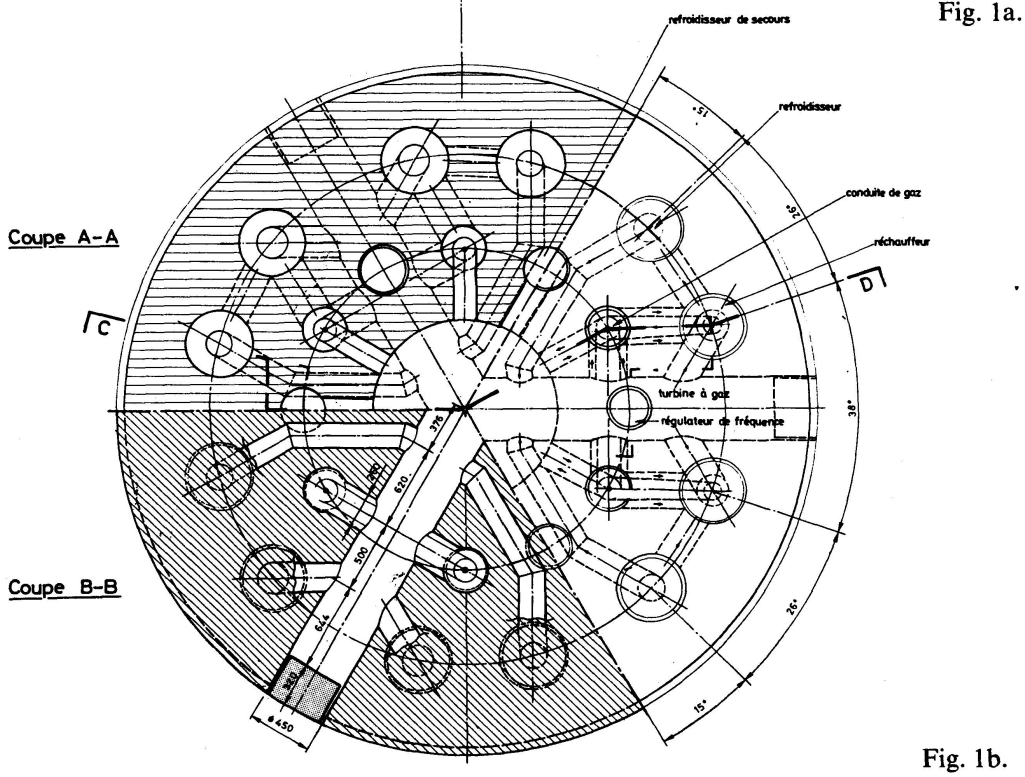

Fig. 1b.

Fig. 1. Caisson de référence.

2. Conception du caisson

2.1. Généralités

Comme dans tout caisson de réacteur, la précontrainte du béton a pour but de créer des contraintes de compression qui s'opposent aux contraintes de traction créées par la pression dans les cavités et dans une certaine mesure à celles qui résultent d'un gradient thermique dans les parois. L'étanchéité des cavités est assurée par une peau en acier ductile de 20 à 40 mm d'épaisseur ancrée dans le béton. Une isolation thermique disposée contre la peau d'étanchéité, côté intérieur des cavités, limite les pertes de chaleur et, conjointement à un système de refroidissement de la peau, maintient la température du béton et des câbles de précontrainte au-dessous d'une valeur admissible (65° C environ en fonctionnement normal). Les cavités, qui doivent être accessibles pour permettre le démontage de l'équipement, sont obturées par des bouchons: structures importantes en acier et en béton transmettant les efforts qui les sollicitent aux câbles de précontrainte. L'exposé qui suit est essentiellement consacré à la conception du béton précontraint du caisson [1].

2.2 Cas de charge

Les charges permanentes sont constituées par le poids propre du caisson et celui des équipements qu'il contient.

Différentes pressions agissent dans les cavités à l'état de service. En schématisant, on admet qu'elles sont de:

— 65 kg/cm^2 dans la cavité centrale et la première ligne de cavités périphériques;
— 46 kg/cm^2 dans les cavités des turbines;
— 25 kg/cm^2 dans la ligne extérieure des cavités périphériques.

On prévoit en outre de contrôler le comportement du caisson en le sollicitant par une pression dite de «test» uniforme fixée à 75 kg/cm^2.

Pour ce qui est des effets thermiques, dans une première phase de l'étude, seul un régime permanent est considéré. La température du béton sur les parois est maintenue à une valeur de 65° C; la face extérieure du caisson est à la température de 35° C. Etant donné la répartition des cavités, on admet qu'il règne une température uniforme de 65° C dans la masse du béton depuis la cavité centrale jusqu'à un cercle qui circonscrit les cavités périphériques. Depuis là, la température décroît linéairement pour atteindre 35° C sur la face extérieure du caisson.

Les cas de charge considérés doivent permettre de déterminer les contraintes maximales dans les différents états du caisson:

a) poids propre + précontrainte initiale (lors de la mise en tension des câbles);
b) poids propre + effet thermique + précontrainte finale (toutes pertes effectuées);

[1] Notons que l'isolation thermique, dont nous ne parlerons pas ici, constitue un élément déterminant dans le projet de l'ouvrage. Réalisée en matériaux céramiques pour des températures de 850° C et des variations de pression de 100 kg/cm^2/s, l'isolation doit donner lieu à des études de développement très importantes tendant à mettre au point une solution fiable et encore économique.

[2] Pression maximale du circuit 65 kg/cm^2 multipliée par un coefficient tenant compte des fluctuations de pression (1.05) et d'un coefficient de sécurité sur l'ouverture des soupapes (1.1).

c) poids propre + pression de test + précontrainte finale;
d) poids propre + pression de test + effet thermique + précontrainte finale.

2.3. Matériaux

Le béton prévu pour cet ouvrage a les caractéristiques suivantes:

— résistance sur cube à 28 jours $\beta w_{28} = 450$ kg/cm^2
— module d'élasticité $E_{28} = 300000$ kg/cm^2
— module d'élasticité thermique $E_{th} = 200000$ kg/cm^2
— coefficient de dilatation $d = 10^{-5}/°C$

Trois types de câbles assurent la précontrainte du caisson: annulaires réalisés par frettage du fût, traversants horizontaux dans la zone des turbines et traversants verticaux dans les parois du cylindre. Les câbles utilisés ont une tension à la rupture élevée (170 à 180,5 kg/mm^2); leur stabilisation permet de garantir des pertes par relaxation inférieures à 7,5%. Le frettage annulaire est réalisé au moyen de torons de ⅜ de pouce disposés en couches superposées dans des canaux de 48 cm de hauteur et sur une épaisseur de 25 cm de profondeur environ. Les câbles traversants horizontaux ou verticaux, d'une force unitaire de rupture de 1180 t, sont constitués de 180 fils de 7 mm de diamètre. Les câbles restent libres dans leurs gaines, celles-ci étant injectées d'une graisse anticorrosion.

Des armatures de couture sont prévues dans la masse du béton afin de répartir la fissuration pouvant résulter de concentrations de contraintes ou d'effets thermiques. Ces armatures seront notamment disposées au voisinage de la peau d'étanchéité, sous les têtes d'ancrage des câbles, dans la zone périphérique du caisson soumise à un gradient thermique important. La densité d'armature pourra atteindre dans cette zone 120 kg/m^3.

2.4. Dimensionnement

La disposition des cavités dans le caisson, qui impose notamment sa forme cylindrique, résulte de considérations concernant la conception optimale du circuit d'hélium. La distance entre les cavités est cependant définie par le projeteur du caisson. Elle doit être suffisante pour permettre la mise en place de câbles verticaux autour des bouchons, pour que ces câbles puissent traverser la zone des turbines encombrée de câbles horizontaux, et enfin pour éviter des concentrations de contraintes dans le béton entre cavités. Les formes de béton étant ainsi déterminées par des raisons constructives, il convient de définir le câblage de précontrainte qui satisfasse les critères de dimensionnement. Ceux-ci sont de deux ordres:

— les contraintes dans l'ouvrage, pour les cas de charge, doivent être inférieures aux contraintes admissibles;
— la sécurité à la rupture du caisson doit être admissible.

On notera qu'il n'existe pas de norme applicable sans autre à un tel caisson et il appartient au projeteur de l'ouvrage de poser les conditions qu'il juge admissibles. Il se basera pour cela sur une connaissance de la technique des caissons, le plus souvent moins complexes, réalisés depuis vingt ans et sur une adaptation

au cas présent des normes existantes. Référence sera notamment faite à la dernière norme américaine: ASME Boiler and pressure vessel code, section III, division 2, édition du 1er janvier 1975.

a) *Contraintes admissibles*

Dans la définition de contraintes admissibles, il convient de distinguer les effets thermiques dits secondaires (au même titre que le retrait et le fluage du béton) des sollicitations primaires telles que pression, précontrainte, poids propre. Les contraintes thermiques n'ont pas le même degré d'importance par leur caractère d'autocontraintes qui conduit à leur diminution ou même à leur disparition en cas de fissuration ou de fluage.

Le caisson considéré ayant une épaisseur de paroi considérable, on constate que les contraintes thermiques de traction qui se développent à la périphérie atteignent des valeurs très importantes, de l'ordre de 70 kg/cm^2. Une augmentation de la précontrainte dans le but de compenser ces tractions créerait des contraintes de compression inadmissibles autour de la cavité centrale. En outre, la quantité d'acier de précontrainte deviendrait largement surabondante en regard de la sécurité à la rupture de l'ouvrage. Il serait par ailleurs illusoire de vouloir diminuer ces tractions thermiques en agissant sur le gradient par une augmentation de l'épaisseur des parois [1]. Par contre, on pourrait envisager de modifier le gradient dans l'épaisseur des parois au moyen d'un système de refroidissement plus puissant ou encore en calorifugeant la face extérieure du caisson. A ce stade du projet, il a été jugé préférable de tolérer un état de précontrainte partielle sur la face extérieure du caisson, c'est-à-dire d'admettre que la zone périphérique peut se fissurer mais reste en mesure de transmettre les forces de précontrainte sur la partie comprimée du caisson. La condition posée est cependant que la peau d'étanchéité sur les parois des cavités se trouve toujours dans une zone comprimée.

La zone fissurée doit bien entendu être fortement couturée d'armature passive. Cette façon de concevoir le caisson n'empêche pas de chercher à améliorer son comportement en agissant sur le gradient thermique comme indiqué précédemment par refroidissement ou calorifugeage.

Dans ces conditions, les contraintes admissibles dans le béton, tenant compte de son comportement sous étreinte triaxiale (qui a fait l'objet de nombreuses études récentes), se déduiront des contraintes admissibles uniaxiales suivantes, déterminées à partir de la résistance sur cube à 28 jours βw_{28}.

Contraintes admissibles	primaires	primaires + secondaires
Compression moyenne	$0{,}25\ \beta w$	$0{,}3\ \beta w$
Compression d'arête ou ponctuelle	$0{,}4\ \beta w$	$0{,}5\ \beta w$
Traction moyenne	0	$0{,}7\sqrt{\beta w}$
Traction d'arête ou ponctuelle	$0{,}6\sqrt{\beta w}$	$2\ \sqrt{\beta w}$

[1] La logique voudrait au contraire que l'on diminue la rigidité des parois en diminuant leur épaisseur mais cela est impossible en raison de la présence des nombreuses cavités.

b) *Sécurité à la rupture*

Le coefficient de sécurité à la rupture est défini dans le cas présent comme le rapport entre la pression entraînant la ruine du caisson (rupture de câbles de précontrainte et perte d'étanchéité) et la pression maximale possible pendant la vie du caisson, pression supposée égale dans toutes les cavités. Il s'agit ici de la pression de test (75 kg/cm^2). Le coefficient de sécurité admis ne devrait pas être inférieur à 2,5.

Pour des caissons à parois plus minces (de l'ordre de 5 m d'épaisseur par exemple) une condition de sécurité face à une rupture fragile est définie. On admet que suite à une forte déformation des parois dans un stade ultime de ruine, la peau peut perdre son étanchéité et le gaz s'infiltrer dans les fissures pour créer un gradient de pression dans l'épaisseur des parois. On considère alors que les aciers de précontrainte doivent être en mesure de résister avec une sécurité de l'ordre de 1,5 à ce cas de charge.

Pour un caisson à parois très épaisses, un coefficient de sécurité aussi élevé ne paraît pas devoir se justifier. Il est peu probable qu'un schéma de ruine apparaisse qui conduise à une infiltration de gaz généralisée dans une section complète horizontale ou verticale du caisson. Nous admettrons donc un coefficient de sécurité de l'ordre de 1,0 pour ce schéma de rupture en prévoyant en outre la mise en place d'un système de drainage au contact des parois des cavités ou dans la masse du béton afin de couper toute sous-pression éventuelle. Le câblage de précontrainte et les aciers passifs qui en résultent ne prennent pas ainsi une importance démesurée.

c) *Calculs*

Différents calculs ont été effectués, que nous citons brièvement:

— détermination globale de la précontrainte à l'aide de schémas de ruine simplifiés;
— analyse bidimensionnelle de l'état de contrainte dans le fût du caisson;
— détermination de la précontrainte dans les dalles à partir de considérations sur les déformations relatives dalle-fût;
— contrôle de la sécurité à la rupture par l'analyse de mécanismes de ruine plus complexes;
— calcul tridimensionnel par éléments finis dans le domaine linéaire pour les différents cas de charge cités au paragraphe 2.2.

Les mécanismes de ruine les plus défavorables sont indiqués sur la fig. 2. On note les valeurs de pression de rupture et les coefficients de sécurité par rapport à la pression de test suivants:

	Pression de rupture kg/cm^2	Coefficient de sécurité
Rupture par cisaillement du fût	275 à 400	3,7 à 5,3
Rupture par cisaillement de la dalle inférieure	280 à 330	3,7 à 4,4
Rupture par cisaillement de la dalle supérieure	260 à 300	3,5 à 4
Rupture par éjection de blocs de béton de la zone périphérique	190 à 250	2,5 à 3,3

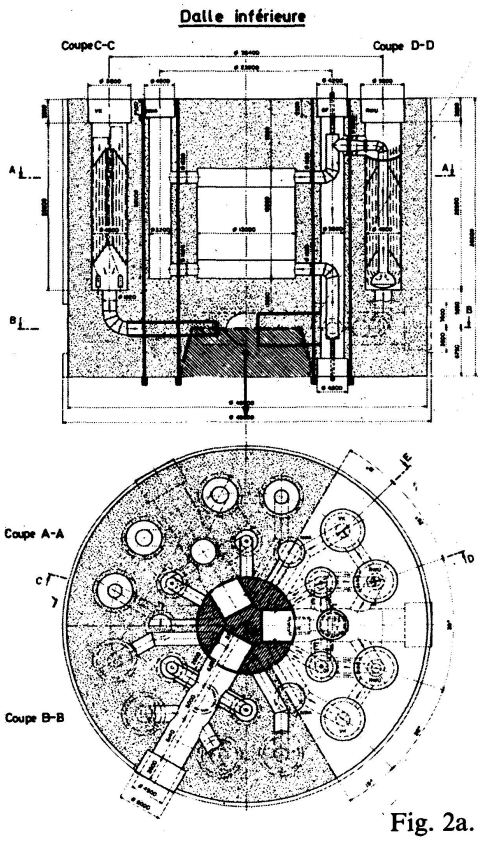

Fig. 2a.

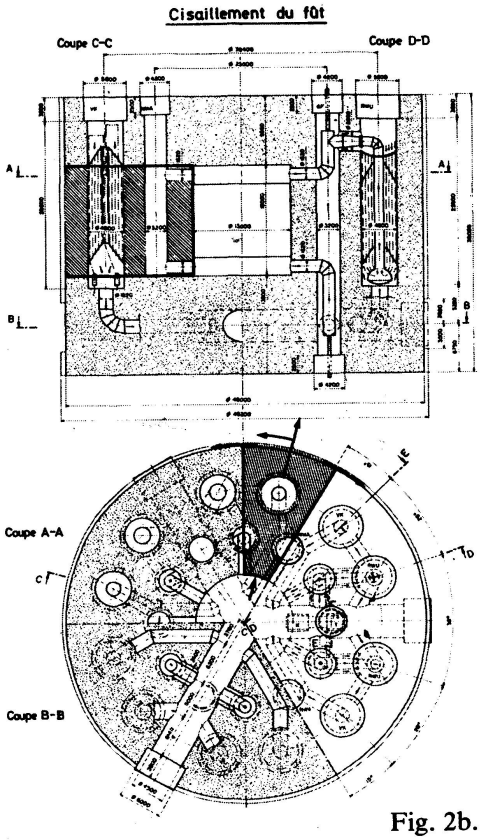

Fig. 2b.

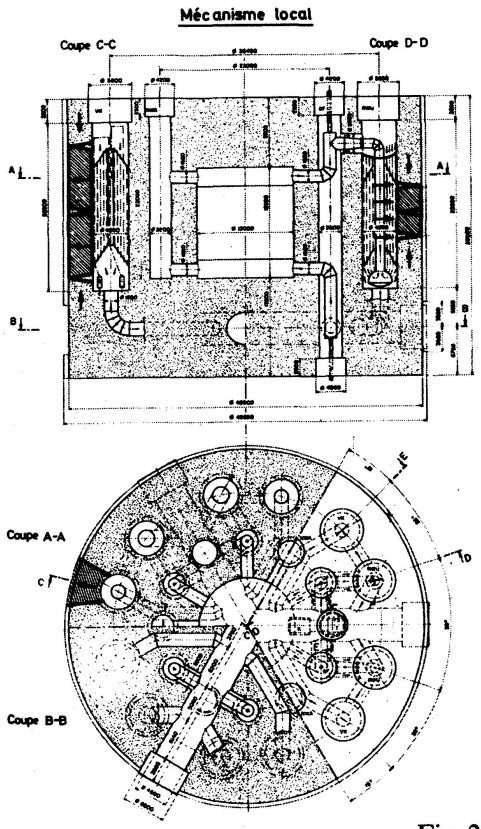

Fig. 2c.

Fig. 2. Mécanismes de ruine défavorables.

d) *Câblage de précontrainte*

La précontrainte retenue en définitive est conçue comme suit:

Précontrainte verticale

Elle est disposée de façon à garantir le maintien des bouchons avec une sécurité de 3 par rapport à la pression de test. Cela impose pour les grandes cavités périphériques 35 câbles répartis sur deux couronnes. Les bouchons des petites cavités comportent chacun 15 câbles. Les autres câbles sont disposés autour de la cavité centrale. La pression moyenne exercée par les 903 câbles de précontrainte verticale est plus forte dans la zone centrale (valeur lors de la mise en tension 80 kg/cm^2) qu'à la périphérie (42 kg/cm^2).

Précontrainte annulaire

La pression exercée par le frettage est 30% plus élevée dans les zones des dalles que dans le fût. Celle-ci crée une pression de 54 kg/cm^2.

Pression horizontale traversante

Le nombre de câbles est limité au niveau des turbines par l'encombrement dû aux cavités verticales. Les têtes d'ancrage sont concentrées autour des bouchons des turbines. Pour le passage de la zone centrale, les câbles se croisent en 12 nappes de 6 câbles.

3. Essais sur modèle

3.1. But des essais

Un programme d'essais sur modèle a été établi dans le but essentiel de déterminer *le schéma de ruine* et *le coefficient de sécurité à la rupture* du caisson. Les essais devaient aussi permettre de connaître la limite du comportement élastique du caisson. Le comportement de l'ouvrage a donc été analysé sous charges de pression intérieure croissante jusqu'à la rupture. Il a été admis, à ce stade du projet, que les effets thermiques n'avaient pas une influence importante sur la rupture.

3.2. Description du modèle

Le choix s'est porté sur un modèle en microbéton précontraint à l'échelle 1/20. Cette échelle permet de réaliser une maquette d'un coût raisonnable et qui satisfasse encore aux critères de similitude. Le choix du microbéton plutôt que la résine synthétique est dicté par le fait qu'il s'agit principalement d'un essai de rupture, ce qui nécessite d'avoir un matériau dont le comportement à la rupture est aussi proche que possible de celui du matériau réel.

a) *Formes de béton*

Le dessin du modèle est représenté sur la fig. 3. Ses dimensions sont de 1,95 m de hauteur et de 2,40 m de diamètre. La géométrie est conforme au caisson réel,

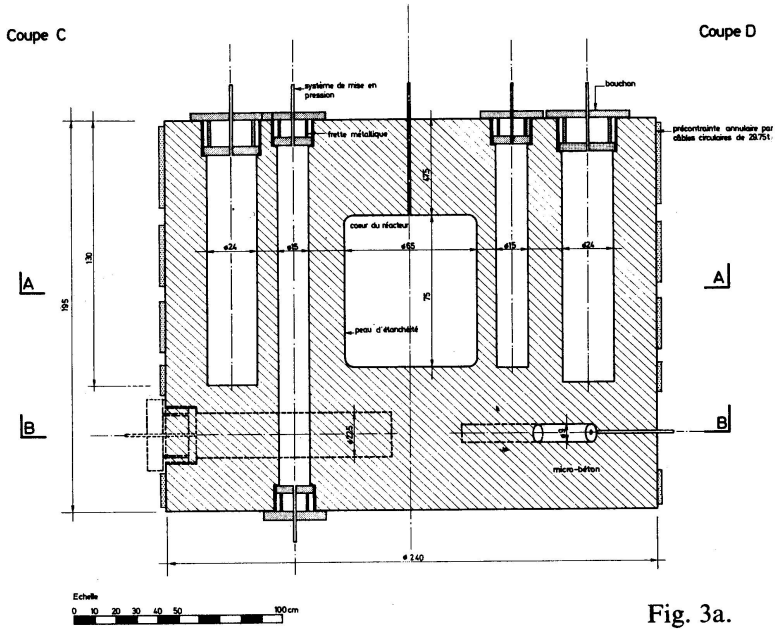

Fig. 3a.

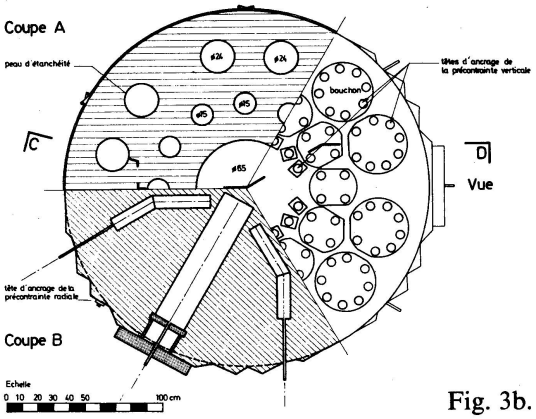

Fig. 3b.

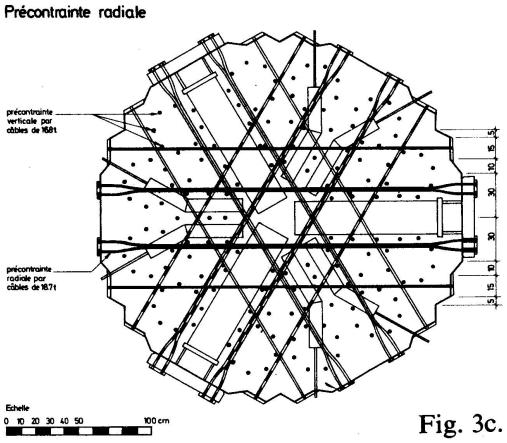

Fig. 3c.

Fig. 3. Modèle de caisson.

en ce qui concerne les cavités principales. Les cavités des turbines ne sont pas jointives afin de simplifier les soudures de la peau et ainsi de mieux garantir son étanchéité. Pour ce qui est des conduites horizontales, seules ont été simulées, dans l'ensemble du caisson, les conduites reliant les turbines aux cavités périphériques extérieures. Les autres conduites de moindre importance ont été introduites dans un secteur de 120° afin d'améliorer la similitude dans cette zone où seront concentrés des points de mesure. La dalle supérieure du modèle est réalisée en béton plein, sans la multitude de pénétrations de petit diamètre que l'on trouve dans le caisson réel pour le passage des éléments de combustible et des barres de contrôle.

b) *Précontrainte*

La précontrainte verticale est composée de 159 câbles de 16,8 t à la rupture. Sur la face supérieure, la majorité des câbles est ancrée sur les bouchons des

cavités. La précontrainte annulaire est réalisée non par enroulement, mais par 59 câbles circulaires de 29,75 t à la rupture. La précontrainte horizontale traversante est assurée par 36 câbles de 18,7 t à la rupture. Les deux tiers de ces câbles sont ancrés sur les bouchons des turbines.

c) *Bouchons*

Il a été retenu un dispositif simple offrant une grande sécurité lors des essais. Il s'agit de pièces métalliques composées de deux plaques circulaires et d'un élément de transition tubulaire. La tôle de fermeture de la peau d'étanchéité s'applique sur la plaque inférieure du bouchon qui est lui-même directement tenu par les câbles de précontrainte.

d) *Peau d'étanchéité*

La peau d'étanchéité de la cavité centrale est constituée par une tôle en acier ductile de 4 mm d'épaisseur. Les autres cavités comportent une peau en acier ductile de 2 mm et sont fermées à leurs extrémités par des plaques de 4 mm.

e) *Armatures passives*

Elles n'ont pas été simulées. Seuls des renforcements tubulaires en acier ont été disposés autour des bouchons afin d'assurer le frettage du béton sous les plaques d'ancrage des câbles de précontrainte.

3.3. Similitude

Une analyse systématique de la similitude du modèle a permis de s'assurer que sa représentativité était satisfaisante compte tenu du but fixé.

Les caractéristiques mécaniques du microbéton (dont les agrégats ne sont pas mis à l'échelle du modèle) sont très voisines de celles du béton réel. La principale différence porte sur la résistance du béton en compression et en traction (voir partie III). L'influence de l'écart de résistance à la traction sur la fissuration peut être déterminée simplement. Le microbéton est légèrement moins déformable que le béton réel.

L'écart de similitude introduit dans la dalle supérieure, réalisée sans le réseau des pénétrations de petit diamètre, conduit à augmenter sa rigidité et sa résistance de l'ordre de 10%. La disposition adoptée paraît cependant préférable à celle d'une modélisation qui serait réalisée par un nombre limité de pénétrations, créant alors un risque de fissuration prématurée de la dalle. La dalle inférieure du modèle est par contre un peu moins résistante que la dalle réelle. Si aucune pression n'agit au centre de la dalle, les trois cavités des turbines n'étant pas jointives, la surface d'application de la pression au centre de la dalle est réduite. Par contre, le poids propre n'est pas simulé et la peau d'étanchéité, dans le modèle, est plus faible que celle du caisson réel qui a été augmenté en cours d'étude. De ces deux effets, qui vont en sens contraire, le deuxième est plus important. La résistance de la dalle inférieure du modèle est donc plus faible que celle du caisson.

Pour des raisons constructives (place à disposition pour les têtes d'ancrage et pour le bétonnage), le nombre de câbles traversants est diminué d'un facteur 6, la pression moyenne exercée par la précontrainte étant par ailleurs identique à celle du caisson réel. Les pointes de contrainte exercées par les têtes d'ancrage apparaissent négligeables dans le phénomène d'ensemble du caisson massif; en outre, les câbles n'étant pas injectés au coulis de ciment, les effets d'adhérence n'entrent pas en considération. Pour ce qui est de la précontrainte, des dispositions ont été prises quant à la répartition des têtes d'ancrage et au mode de mise en tension afin que les câbles circulaires créent une répartition uniforme de la pression autour du caisson, ainsi que le ferait un enroulement.

Le système d'ancrage des bouchons est très simplifié par rapport à celui du caisson réel. Cependant, la façon dont les forces de pression sont transmises aux câbles de précontrainte est globalement représentative de la réalité.

La nécessité de garantir l'étanchéité de la peau pour des pressions pouvant atteindre 250 kg/cm^2 a imposé des épaisseurs minimales de 2 et 4 mm. L'échelle n'est donc pas respectée. La comparaison de la quantité d'acier de la peau du modèle à celle du caisson réel, auquel sont ajoutés, pour ce dernier, les aciers passifs, montre que tant que le comportement reste globalement élastique la similitude est respectée, l'amorce de la fissuration se produisant cependant plus tôt sur le modèle. Au moment de la rupture, l'effet du manque d'aciers passifs dans le modèle est assez exactement compensé par la surépaisseur de la peau.

Pour ce qui est du comportement global de l'ouvrage dans le domaine élastique, on peut dire que les dispositions constructives retenues conduisent à un modèle plus rigide que le caisson réel. Ceci est accentué par le fait que ce dernier est microfissuré par des phénomènes de retrait et thermiques. Par contre, la non-simulation des armatures passives, l'absence de pattes d'ancrage sur la peau d'étanchéité ont des effets de sens opposé. On peut en définitive estimer que l'écart de similitude sur les déformations et les contraintes dans le caisson, qui résulte de la modélisation, ne devrait pas dépasser 10% environ. Pour ce qui est de la rupture, les calculs ont montré que l'ordre d'apparition des différents mécanismes de ruine (cités au paragraphe 2.4.c, ci-dessus) était le même pour le caisson réel et le modèle, permettant de conclure que le résultat de l'essai de rupture du modèle était significatif.