Ouvrages en béton précontraint destinés à contenir ou à retenir des liquides

Autor(en): **Freyssinet, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht**

Band (Jahr): **3 (1948)**

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-4023

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

IId9

Ouvrages en béton précontraint destinés à contenir ou à retenir des liquides

Anwendungen des vorgespannten Betons bei Flüssigkeitsbehälter und Staumauern

Structures of pre-stressed concrete erected to contain or retain liquids

E. FREYSSINET
Paris

Le béton précontraint donne des parois comprimées en toutes directions, par suite nécessairememnt exemptes de fissures, étanches d'emblée si on a réalisé des bétons de bonne qualité, faciles à colmater, même dans le cas de bétons très défectueux.

Cette propriété du béton précontraint a été ou peut être utilisée principalement pour exécuter :

Des tuyaux de toute nature et pour toutes pressions;
Des réservoirs ou cuves;
Des barrages de régulation;
Des barrages de retenue;
Des revêtements de puits, tunnels;
Des revêtements de formes de radoub, de docks ou d'écluses;
Des engins flottants, caissons de toutes tailles et formes, docks flottants, pontons ou navires.

Le volume du sujet est considérable et dépasse le cadre d'une communication. Il ne sera donc traité ici que très superficiellemment.

Tuyaux

L'idée de précontraindre des tuyaux transversalement est très ancienne; elle dérive directement de l'habitude de fretter les tonneaux et les tuyaux en bois et se trouve être bien antérieure à l'énoncé général du principe de précontrainte. En effet, alors que le premier énoncé de caractère public

du principe de précontrainte, remonte à 1928, l'Autrichien von Emperger avait, dès les premières années du siècle, réalisé des tuyaux précomprimés transversalement au moyen de fils enroulés sous forte tension sur des noyaux de béton moulés d'avance.

Ce procédé oblige à dépenser dans un frein un travail mécanique supérieur au produit de la longueur initiale du fil par la tension; le travail utile n'étant que le demi-produit de l'allongement du fil par la tension; de plus, il soumet les noyaux, au cours de l'enroulement des fils, à des cisaillements temporaires importants en raison de la différence de déformation entre les parties comprimées et non comprimées des noyaux.

On a cherché à remédier à ces difficultés grâce au vieux procédé du frettage à chaud; soit sous la forme classique de frettes fermées, agrandies par chauffage avant pose; soit sous la forme plus récente de l'enroulement continu et uniforme d'un fil chauffé de manière continue et uniforme.

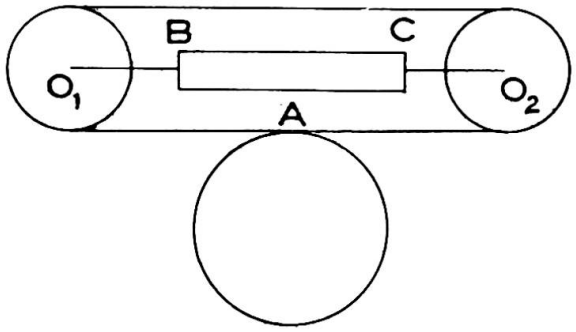


Fig. 1.

J'ai donné moi-même au problème de l'enroulement des frettes sous tension, une solution qui évite de dépenser dans un frein une quantité d'énergie supérieure à cent fois l'énergie utile. Ce moyen consiste à enrouler le fil sur le noyau, sous très faible tension; puis on attache le fil à ses deux extrémités, après formation à l'une d'elles d'une boucle dont les deux brins se croisent en A (fig. 1).

On sollicite la boucle par un vérin BC agissant sur les axes de deux poulies folles O_1, O_2, de manière à tendre le fil qui la constitue, au taux $\frac{T}{n}$, T étant la tension finale souhaitée, n un nombre quelconque. Le fil au voisinage de A est tendu, à $\frac{T}{n}$.

On fait tourner le tuyau; le point A décrit tout le fil qui est ainsi tendu à $\frac{T}{n}$, sur toute sa longueur. On fixe le fil au béton, provisoirement, en amont de la boucle; on le raccourcit pour ramener la boucle à sa longueur primitive; on fixe alors le fil à l'aval de la boucle, puis on fait tourner le tuyau en sens inverse. Après n opérations, le fil est tendu à la tension T. On peut donner à n toutes valeurs à partir de l'unité, ce qui limite à toute valeur fixée d'avance le cisaillement des noyaux.

Ce procédé a été employé en Algérie, à l'usine de l'Oued Fodda pour porter de 18 à 40 kg la pression d'épreuve de tuyaux obtenus par un procédé que je décrirai plus loin.

Quel que soit le procédé employé, les tuyaux obtenus par frettage d'un noyau préfabriqué avaient deux défauts qui ont empêché leur développement industriel.

Il faut protéger le fil enroulé par un enduit. En raison de la déformation lente des bétons du noyau précontraint celui-ci diminue de diamètre peu à peu, et tend à se séparer de l'enduit qui est comprimé selon la tangente au cercle et sollicité par une traction selon le rayon.

Il est très difficile d'empêcher ce décollement. L'ingéniosité des chercheurs s'est employée à trouver des systèmes de revêtement aussi adhérents que possible. L'expérience seule pourra dire dans quelle mesure ils ont réussi.

Mais les tuyaux formés de noyaux frettés ont un défaut plus grave encore : c'est leur aptitude à se fissurer transversalement sous les causes diverses : vidanges successives, variations de température, tassements du sol, etc.

Depuis peu, on obtient de bons tuyaux en supprimant ce défaut par l'emploi de noyaux précontraints longitudinalement, lors de leur fabrication, par mise en tension d'armatures longitudinales. D'importantes séries de tuyaux vont être exécutées en Algérie par ce procédé sous licence de mes brevets.

Pour quiconque a une fois compris le principe de précontrainte tel que je l'ai énoncé dans mes brevets et publications, cette solution est évidente. L'industrie des tuyaux frettés l'a cependant attendue pendant près d'un tiers de siècle. Rien ne démontre mieux cette vérité, qu'autant il est facile de tirer d'un principe général clairement formulé des conséquences pratiques, autant il est difficile de parcourir le chemin en sens inverse et de remonter de faits connus par tradition, même anciens, nombreux et importants, à leur principe commun.

Aucun des hommes, dont plusieurs de premier ordre et fort ingénieux, dont l'effort, pendant de nombreuses années, n'a cessé d'être centré sur l'utilisation de forces de précontrainte créées par des frettes, et sur la mise au point du très difficile problème de la mise en tension des armatures transversales des tuyaux, n'a été capable de séparer la notion abstraite de précontrainte de sa réalisation traditionnelle par frettage sous tension, et de l'étendre aux génératrices.

Et pendant trente ans, l'industrie du tuyau par noyaux frettés a végété, d'échecs en échecs, jusqu'à la révélation du principe général de précontrainte que je lui ai apportée vers 1935. Elle en a alors fait l'application aussitôt et sans difficulté.

Je ne me suis pas attaché à la réalisation de tuyaux par noyaux frettés, sinon pour renforcer de petites séries de tuyaux à pressions de service exceptionnellement élevées, parce que dès 1933, j'avais imaginé un procédé de fabrication de tuyaux doublement précontraints coulés en une seule fois. Ce procédé a reçu d'importantes applications, suspendues par la guerre, mais qui, je l'espère, vont bientôt reprendre; l'interruption a d'ailleurs été utilisée pour réaliser d'importants perfectionnements du matériel.

Le système, mis au point dans une usine d'essai à Paris, en 1934, a été utilisé d'abord en Algérie à partir de 1935, puis en Allemagne à partir de 1939. Les tuyaux sont coulés en une seule fois, en béton de très haute qualité, dont la résistance dépasse parfois 1 200 kg/cm^2. Ce coulage est fait verticalement dans un moule qui comprend, comme tout moule à tuyaux coulés, un mandrin central et une coquille extérieure. Mais ici ces moules sont construits de manière à être extensibles à volonté, tout en étant capables de résister à de très fortes pressions internes (fig. 2 et 3).

Essentiellement, le mandrin central est constitué par un noyau étanche solide et aussi léger que possible, qui, dans les usines existantes, est en acier forgé d'épaisseur à peu près moitié de celle des tuyaux à réaliser. Il est entouré d'une chemise en caoutchouc, raccordée au noyau de façon à permettre l'envoi d'eau sous pression connue et variable, entre cette che-

mise et le manchon. Cette chemise doit être protégée par un revêtement métallique extensible.

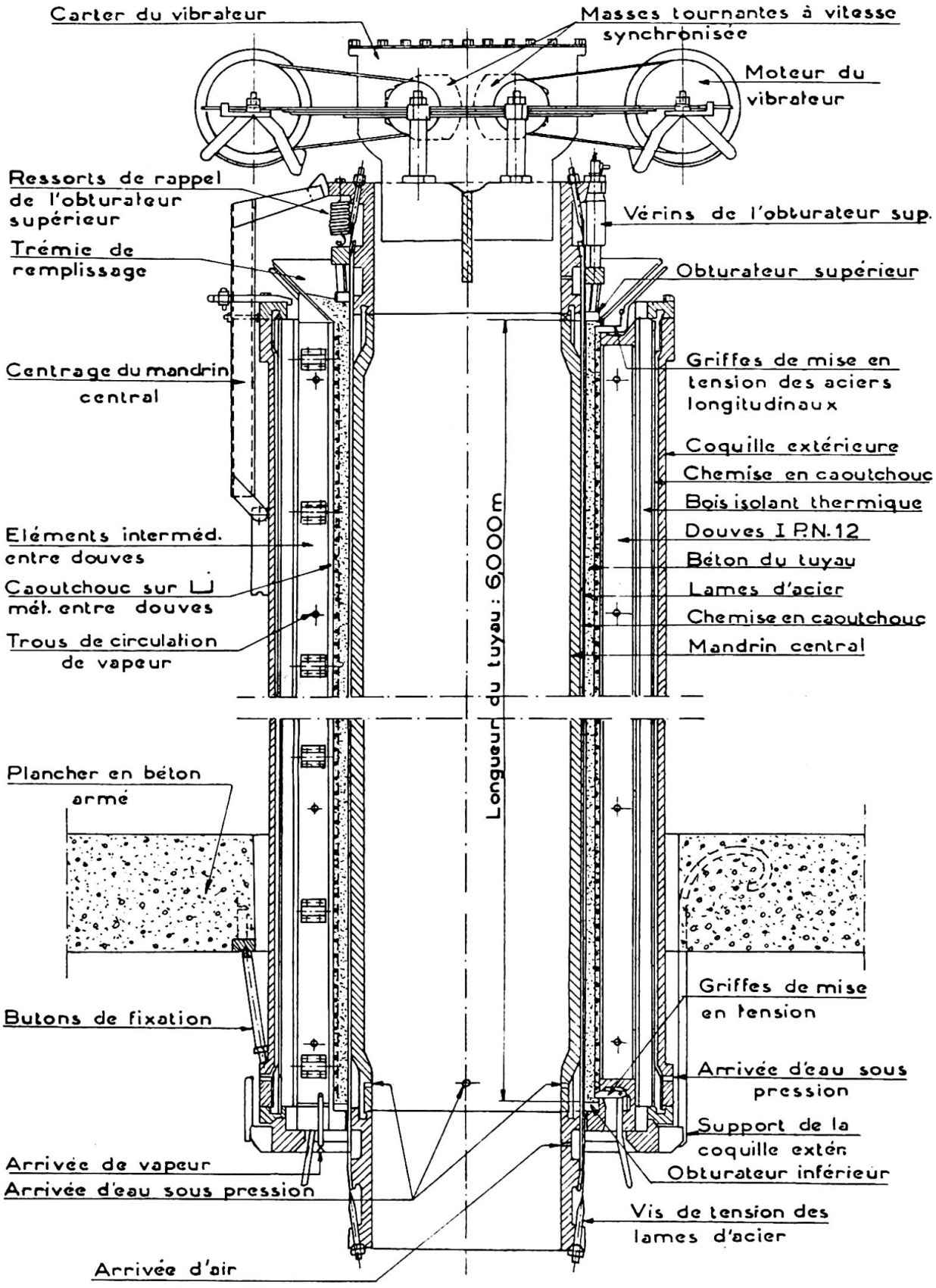


Fig. 2. Coupe diamétrale d'un moule.

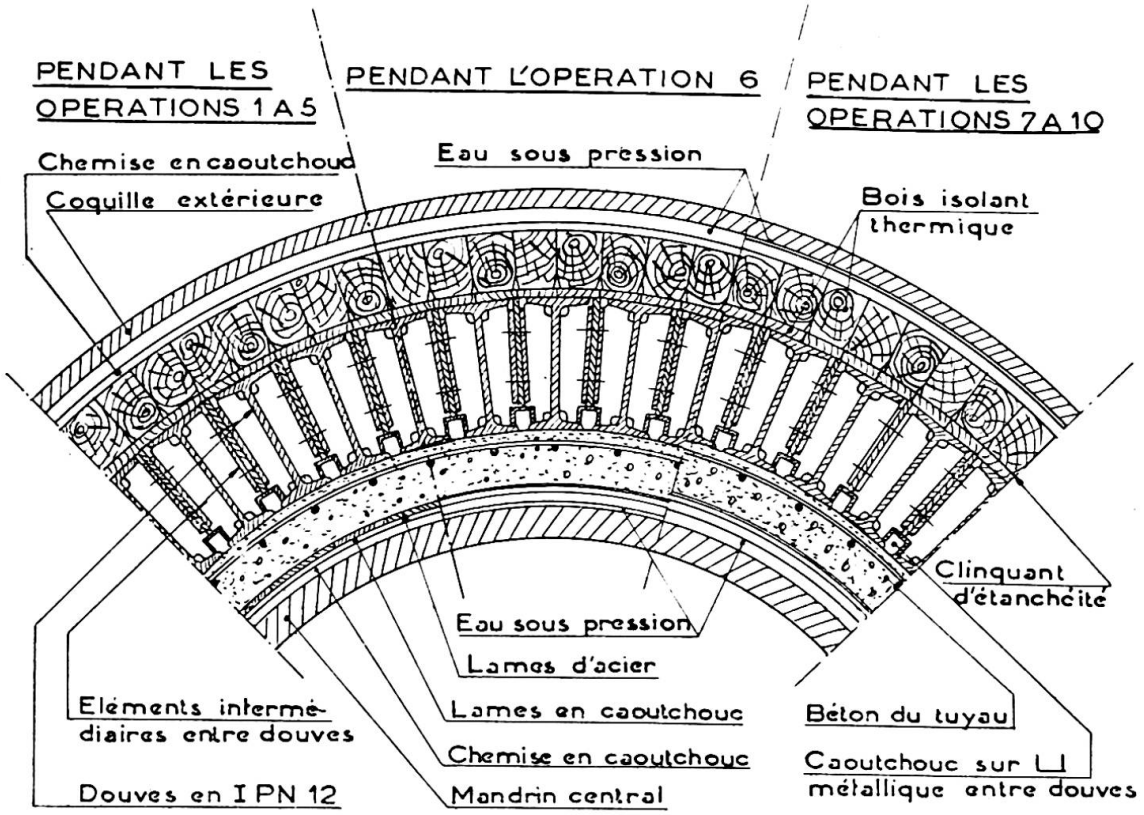


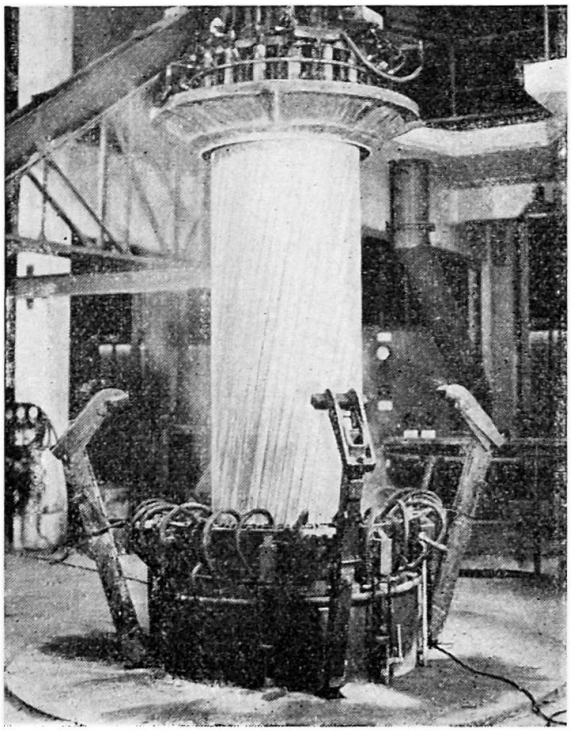
Fig. 3. Exposé du fonctionnement d'un moule :

1. – Mise en pression de la chemise extérieure en caoutchouc produisant le serrage des douves suivant le plus petit diamètre;
2. – Mise en place de la carcasse constituant l'armature et mise en tension des aciers longitudinaux;
3. – Mise en place du mandrin central;
4. – Mise en place du béton et vibration;
5. – Fermeture de l'obturateur supérieur;
6. – Essorage du béton par mise en pression progressive de la chemise en caoutchouc du mandrin intérieur;
7. – Agrandissement du diamètre et mise en tension des armatures transversales par augmentation de pression dans la chemise du mandrin intérieur;
8. – Introduction de vapeur entre les douves métalliques pour le chauffage du béton;
9. – Enlèvement des griffes de mise en tension des aciers longitudinaux;
10. – Enlèvement simultané de la pression dans les deux chemises pour le démoulage;
11. – Enlèvement du mandrin central;
12. – Enlèvement du tuyau terminé.

Le revêtement que j'ai imaginé et qui, dès les premiers essais, s'est révélé parfait, est constitué par deux couches de lames minces en acier inoxydable, de largeur un peu inférieure à l'épaisseur des tuyaux, presque jointives, enroulées en hélice à pas très long (inclinaison sur les génératrices environ 1/5), l'une à droite, l'autre à gauche, séparées par une nappe en caoutchouc, et fortement tendues (fig. 4).

Quand on gonfle l'espace tubulaire noyau-chemise, ces lames prennent un allongement élastique unitaire égal au 1/25 de celui du diamètre de l'enveloppe. Ce dernier peut donc atteindre 2 ou 3 %, sans que les lames en acier dur sortent de leur domaine de travail élastique; elles exercent une pression uniforme sur le mandrin, ce qui assure sa vidange. Elles prennent une forme exactement cylindrique et de plus elles transmettent les vibrations longitudinales du noyau au béton, ce que ne ferait pas une simple chemise de caoutchouc.

La construction du moule extérieur est plus difficile et ceux qui



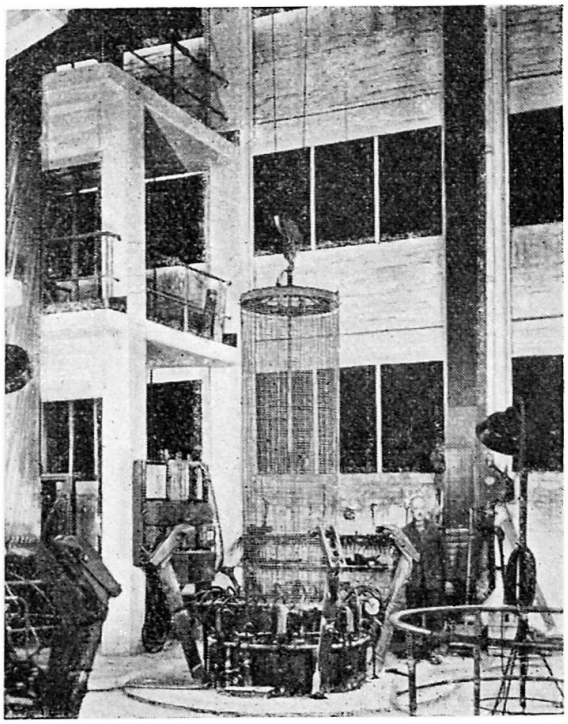
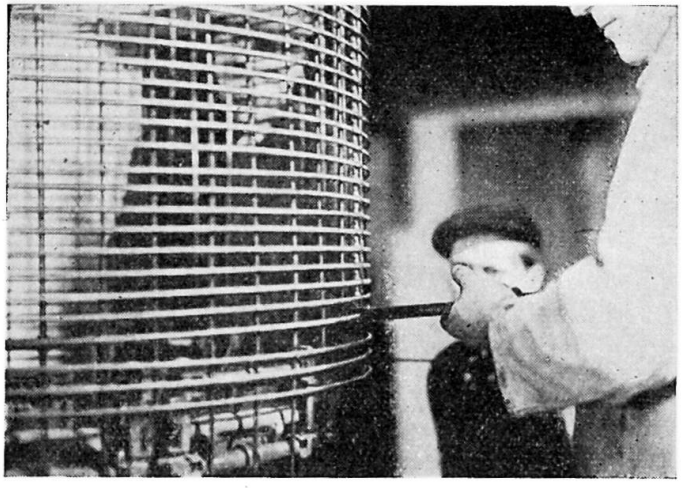
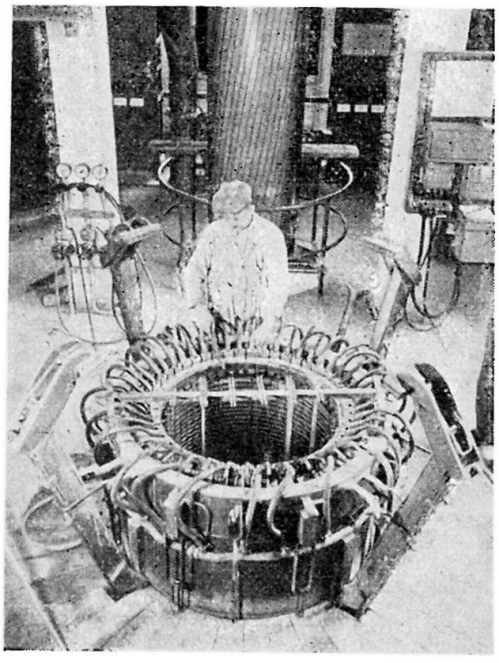


Fig. 4 et **5.** Fabrication de conduites forcées pour l'Oued-Fodda.

existent aussi bien en Algérie qu'en Allemagne sont susceptibles de perfectionnement, bien qu'ils aient donné de bons résultats industriels dans leur première forme. Ils sont constitués par une série de douves métalliques comportant des éléments solides à section trapézoïdale, d'épaisseur selon le périmètre, un peu inférieure à celle des tuyaux à fabriquer; et selon le rayon du double environ de cette épaisseur; une pression extérieure qui atteint plusieurs dizaines de kg/cm², exercée entre une coquille

Fig. 6 et **7.** Fabrication de conduites forcées pour l'Oued-Fodda.





métallique extérieure en acier, tôle ou béton fretté, et une chemise en caoutchouc, assemble ces douves en un anneau unique, rond et très solide.

On a ménagé entre ces douves du côté béton :

1° Des joints d'épaisseur très faible mais variable et réglable, par lesquels on peut évacuer les excès d'eau du béton;

2° Des canaux d'évacuation de cette eau;

3° Des canaux de chauffage à l'eau chaude ou à la vapeur.

En prenant appui soit sur les éléments du moule extérieur, soit dans les modèles plus récents, sur le mandrin intérieur, on tend les armatures longitudinales par des moyens dont le détail est sans intérêt, l'expérience ayant prouvé que tout ancrage de ces armatures autre que l'adhérence est inutile. Les armatures ainsi tendues, maintiennent en place les armatures transversales non tendues, formées d'une ou plusieurs spires hélicoïdales en fil d'acier dur, étiré ou laminé, simplement enroulées et accrochées aux génératrices (fig. 5 et 6). Pour cela, le mandrin intérieur est placé hors du moule.

Le mandrin intérieur et les armatures étant en place, à l'intérieur du moule extérieur (fig. 7), l'intervalle entre les deux moules étant fermé en bas par un organe extensible, on coule du béton relativement fluide dans cet espace annulaire, en provoquant une vibration très énergique mais exclusivement longitudinale du mandrin central.

Dans une telle vibration, les accélérations verticales étant variables de $-ng$ à $+ng$, on a jugé utile d'atteindre pour n les plus fortes valeurs possibles, de préférence 4 ou 5 unités pour des fréquences de l'ordre de 3 000. Certains mandrins intérieurs utilisés en Algérie, pour tuyaux de $1^{m}40$ intérieur, pesant plus de 12 000 kg, cela posait le problème de la construction de vibrateurs capables de $\pm$ 50 000 kg d'efforts verticaux, strictement unidirectionnels.

Beaucoup de solutions d'un tel problème sont possibles; mais, ne voulant pas perdre trop de temps en recherches, je m'en suis tenu à l'emploi de vibrateurs à masses tournantes, avec lesquels on peut aisément obtenir des vibrations unidirectionnelles en les associant deux par deux, en additionnant leurs composantes verticales et en opposant les composantes horizontales, par des moyens mécaniques ou électriques faciles à réaliser. Mais la consommation d'énergie dans les paliers, pour une masse tournante, augmente comme le produit de la force centrifuge réalisée, par sa racine cubique.

En passant sans précaution des quelques centaines de kilos des vibrateurs ususels à 50 000 kg, on risque de créer des monstres mécaniques horriblement lourds, encombrants, gaspilleurs d'énergie. Pour éviter cet écueil, j'ai conçu mes vibrateurs comme une association de vibrateurs petits et nombreux.

Les vibrateurs de l'usine de l'Oued Fodda associent 20 vibrateurs tournant à droite à 20 tournant à gauche; les efforts sont transmis par 80 roulements à aiguilles de 25 mm de diamètre seulement, grâce à quoi leur encombrement est resté modéré; leur consommation d'énergie variable, comme pour tout vibrateur, avec les conditions de liaison du vibrateur avec la masse à vibrer et le reste du monde extérieur restant comprise entre 20 et 40 chevaux.

Ces vibrateurs, à 3 000 périodes (il y aurait sans doute intérêt à augmenter cette fréquence choisie surtout pour des raisons de commodité de réalisation) sont simplement boulonnés sur le sommet du man-

drin, supporté élastiquement, et lui transmettent des accélérations pratiquement constantes du haut en bas du moule; que les lames hélicoïdales retransmettent au béton par frottement. (Dans de nouveaux moules, la vibration s'étendra aux fonds et aux armatures.) L'action des vibrateurs provoque un remplissage des moules quasi instantané, les débits de béton dépassant pour les tuyaux de 1^m40, un mètre cube par minute; puis un tassement du béton et un rassemblement d'une partie de l'eau en excès à la partie supérieure. On évacue cette eau en comprimant le béton avec l'organe de clôture supérieure des moules, actionné par des vérins hydrauliques. Dans les nouveaux moules, ces pressions pourront atteindre de très grandes valeurs et s'exercer en même temps que la vibration. Les vérins étant immobilisés par fermeture des arrivées d'eau, le moule se trouve clos.

La situation est alors la suivante. L'enveloppe déformable du mandrin intérieur est au contact de celui-ci. Les armatures sont enrobées de béton bien vibré uniformément sur toute sa hauteur et qui a déjà abandonné une partie de son excès d'eau. Les douves formant le moule extérieur sont fortement serrées entre elles par une pression de l'ordre de 20 à 100 kg/cm² selon les cas.

L'espace annulaire est clos en haut et en bas par un organe déformable en diamètre, fixe en hauteur.

On établit alors une pression hydraulique entre le noyau du mandrin intérieur et sa chemise, et on la fait croître progressivement. Cette pression, à part une fraction de l'ordre du kilo, absorbée par les lames hélicoïdales, entrebâille les joints des douves et se transmettant au béton préalablement vibré, l'oblige à perdre ses excès d'eau de gâchage, au point d'abaisser son $\frac{e}{c}$ de 0,45 à 0,30 par exemple.

Les nouveaux matériels à l'étude permettront de vibrer sous pression, de faire varier à volonté l'ouverture des joints et ainsi d'abaisser encore ces valeurs de $\frac{e}{c}$. On peut d'ailleurs attendre pour évacuer l'excès d'eau. L'eau ainsi évacuée est d'ailleurs rigoureusement claire et propre; aucune particule solide n'est entraînée. Par l'expulsion de son excès d'eau, le béton acquiert un coefficient de frottement interne élevé. Comme il est soumis à une pression en tous sens de l'ordre de 30 à 70 kg suivant les types de moule, il possède d'après le théorème des états correspondants de M. Caquot les propriétés mécaniques d'un béton dur.

Cet état du béton étant obtenu, on accroît la pression dans le mandrin intérieur, en la maintenant fixe dans le moule extérieur. On constate alors *une augmentation de diamètre du moule extérieur accompagnée d'une augmentation de diamètre égale des armatures transversales* qui se trouvent ainsi tendues à un taux qui peut être connu tant par la différence des pressions intérieure et extérieure que par l'augmentation du diamètre du moule. En même temps, on chauffe le moule avec de la vapeur à 100° (dans les nouveaux moules, de l'eau chaude).

On sait par mes publications antérieures, que le béton vibré et comprimé, donc très compact, supporte parfaitement l'action de la vapeur à 100° et durcit très rapidement sous son action dans un délai extrêmement bref.

Le procédé a été appliqué en Algérie pour les distributions d'eau de l'Oued Fodda, pour des tuyaux de 1^m00, 1^m20, 1^m40 de diamètre intérieur, avec pressions d'essai variables de 6 à 18 kg (fig. 8 et 9). Chaque tuyau

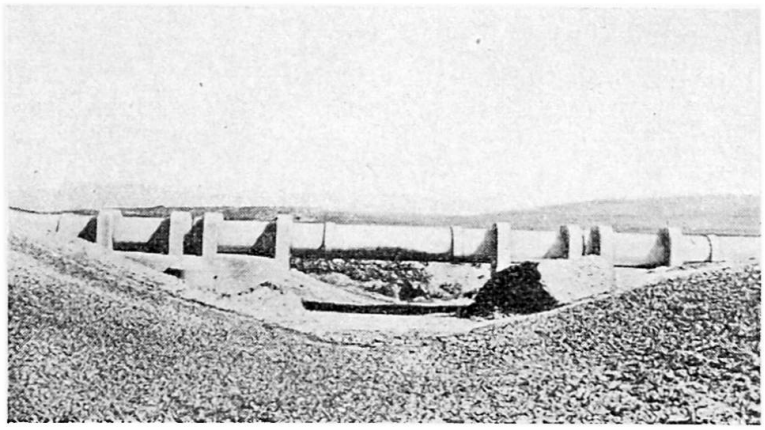


Fig. 8. Tuyau-poutre de 18 mètres utilisé pour les conduites forcées de l'Oued-Fodda.

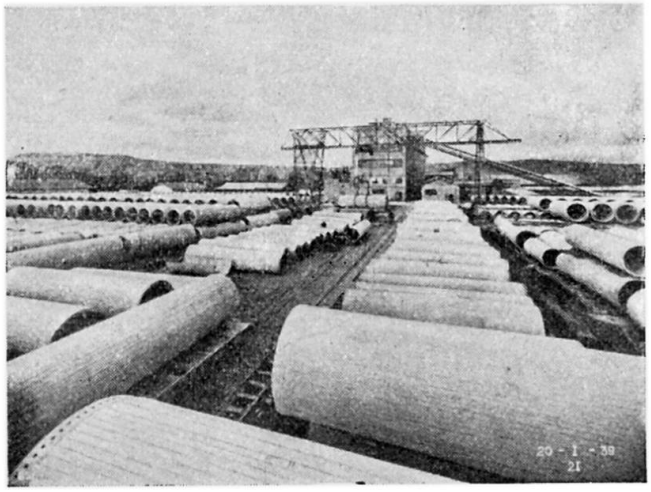
était effectivement essayé sous pression. Environ 12 km de tuyaux de 1 m, 15 km de 1m20, et 30 km de tuyaux de 1m40 ont été fabriqués. Pour certains, on a porté les résistances bien au delà de 18 kg par un frettage supplémentaire.

Une usine a été montée ensuite à Francfort pour tuyaux de 0m80 et 1m20.

Les deux usines ont été arrêtées pendant la guerre. L'usine de Francfort est à nouveau en ordre de marche mais aux prises avec les difficultés actuelles de l'économie allemande, n'a pu reprendre un rythme de fabrication normal. L'usine de l'Oued Fodda procède à la révision de son matériel.

Dans cette usine, on a réalisé la fabrication de 6 à 9 tuyaux *par moule et par 24 heures*; la fabrication atteint en pointe 36 tuyaux par jour pour toute l'usine équipée de quatre moules. Ces tuyaux avaient un léger défaut : de petites variations des dimensions extérieures, qui nécessitaient une mise au rond exacte par usinage pour l'exécution des joints (fig. 10). La transformation des moules actuellement envisagée fera disparaître radicalement ce défaut et facilitera ainsi beaucoup l'exécution des joints. On améliorera

Fig. 9 et **10.** Conduites forcées de l'Oued-Fodda : Parc de stockage et pose du joint.





en même temps la qualité des bétons tout en accélérant considérablement les fabrications.

En conservant les mêmes moules intérieurs et les mêmes principes, nous pensons arriver par des perfectionnements du moule extérieur à porter le rendement à 36 tuyaux de 6 mètres par jour (travail à trois postes) et par moule. Dans une usine neuve, je n'hésiterais pas à porter la longueur des tuyaux à 8 ou 10 mètres.

En dehors des usines à fonctionnement industriel régulier, des moules d'essai ont permis la réalisation de tuyaux pour des pressions qui ont atteint 100 kg/cm^2. En particulier, un tuyau de 40 cm de diamètre et 3,6 cm d'épaisseur seulement, essayé devant la R. S. Civ. Ing. de Londres, a pu supporter avant toute fuite 100 kg/cm^2. Brisé par des pressions plus fortes, il est redevenu étanche pour des pressions inférieures à 100 kg/cm^2. Cette expérience a pu être recommencée un grand nombre de fois sans altération du tuyau.

Les bétons de ces tuyaux soumis en fabrication à une vibration intense conjuguée avec des pressions qui, dans les nouveaux moules, varient entre 60 et 100 kg/cm^2, ont des résistances de l'ordre de 1 200 kg/cm^2 et sont imperméables et étanches, au point de résister parfaitement à des eaux acides qui détruiraient très vite des tuyaux ordinaires en béton. Il semble donc que ce procédé de fabrication soit appelé à un grand avenir.

De plus, ces tuyaux peuvent être construits pour toutes pressions; ils sont infissurables et peuvent recevoir des enduits intérieurs à base de produits plastiques (phénoplastes, caoutchouc chloré, etc.) ou métalliques : feuilles minces de cuivre ou autres métaux rendus adhérents au béton par un artifice approprié. On peut ainsi obtenir des tuyaux pour tous liquides même très actifs chimiquement. Le procédé peut être étendu à des ciments autres que les Portland.

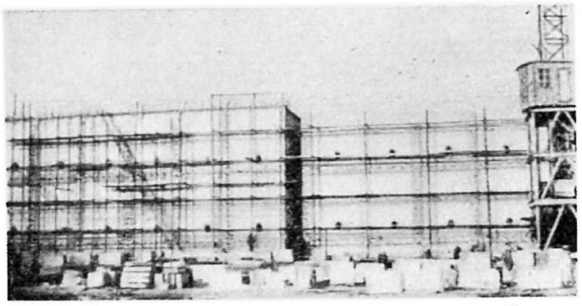
Un tuyau fermé par des calottes convenables constitue un laboratoire de réaction. Par le procédé de frettage par bouclage, on peut réaliser des résistances et des dimensions non limitées pour de tels organes.

Réservoirs et cuves

Dans une conférence du 19 avril 1944 de l'Institut technique du Bâtiment et des Travaux publics, M. Muzet, un de mes collaborateurs, a décrit avec détails un procédé de frettage sous tension applicable à des réservoirs de toute forme et toutes dimensions, sans limite de pression. Bien que ce procédé ait fait sur un chantier d'essai l'objet d'une mise au point complète, je n'ai pas encore rencontré l'occasion d'en faire l'application à grande échelle. La raison en est que mes collaborateurs et moi-même avons à faire face à des études si variées et si nombreuses qu'elles dépassent nos possibilités et que le choix entre les problèmes qui font l'objet de solutions concrètes est dicté par les demandes qui nous sont adressées plus que par la logique.

C'est ainsi que nous avons eu à exécuter au lieu des grands réservoirs ronds pour lesquels nous étions très bien outillés, des cuves et réservoirs à parois planes; emploi du précontraint à première vue moins heureux, et notamment des cuves à vin et des réservoirs d'eau potable.

L'application aux cuves à vin reçoit actuellement des développements importants. On les constitue par des parois planes moulées à l'avance en béton très soigné, perforées de trous en deux directions; trous dans lesquels



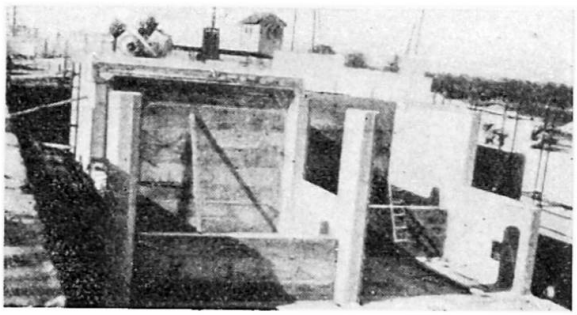


Fig. 11, 12 et **13.** Cuves à vin en béton précontraint, constituées par des éléments préfabriqués.

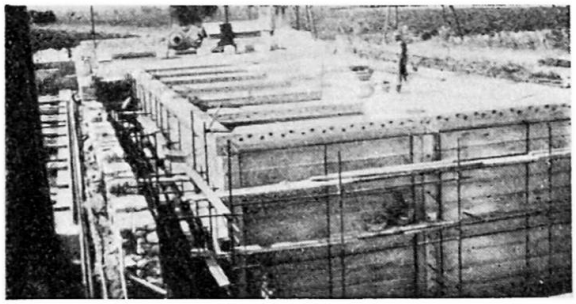
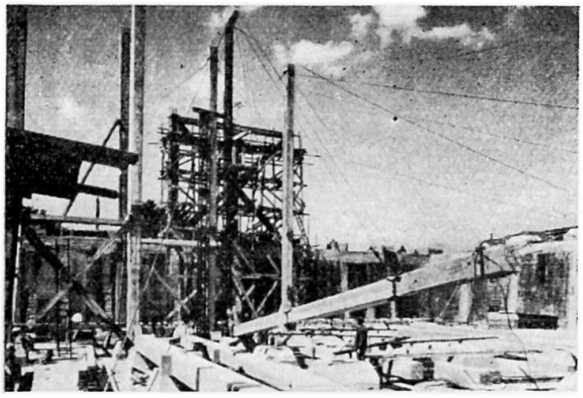
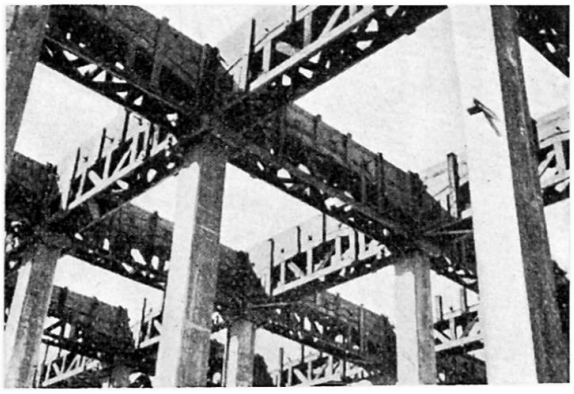


Fig. 14 et **15.** Assemblage du réservoir d'Orléans. (Levage d'une poutre et vue des nervures du radier.)





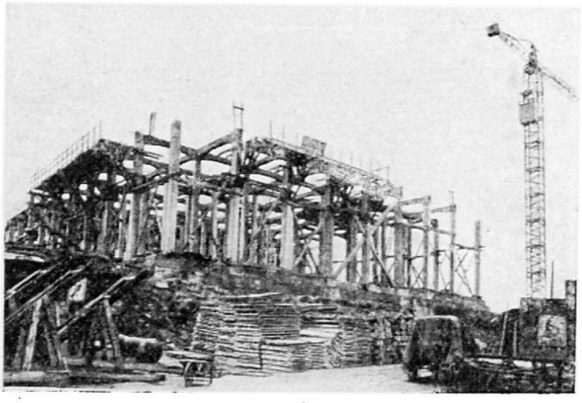
on enfile après montage et assemblage sur des éléments verticaux préfabriqués de préférence, des câbles à fils parallèles que l'on tend par la technique usuelle maintes fois décrite; tension suivie par une injection de mortier liquide.

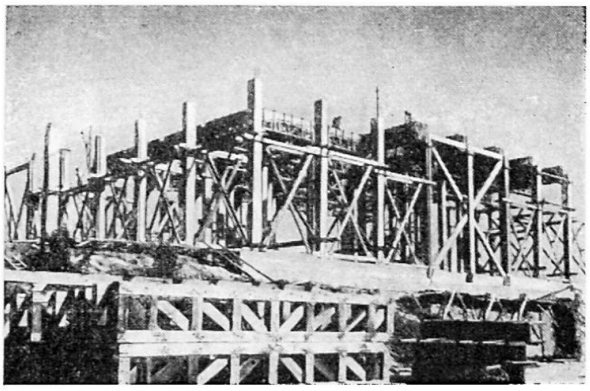
Ces cuves sont parfaitement étanches jusqu'à une pression largement supérieure à celle pour laquelle on les a établies. Pour des pressions croissantes au delà, elles fuient de plus en plus abondamment. Quand la pression redevient normale, elles redeviennent aussi étanches qu'au préalable (fig. 11, 12 et 13).

Dans le même ordre d'idées, nous achevons actuellement à Orléans, un réservoir d'eau potable sur plan rectangulaire, de 7 000 m³, dont la description par M. Lebelle, qui en a établi le projet et contrôlé l'exécution, est donnée ci-après (¹).

La technique utilisée à Orléans comporte une grande économie de coffrages. Il semble qu'elle puisse être poussée encore plus loin et qu'il y

(¹) Voir mémoire de M. Lebelle dans cette *Publication Préliminaire*, pp. 361 à 366.





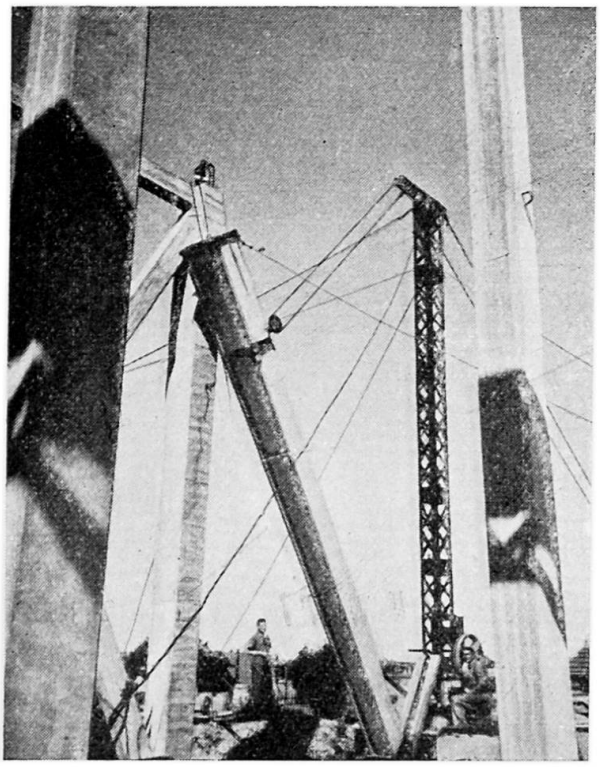


Fig. 16, 17 et **18.** Réservoir d'Orléans en cours de construction.

aurait intérêt, pour les parois verticales notamment, à avoir recours à des dalles préfabriquées; ce qui entre autres avantages, diminuerait les actions de retrait (fig. 14 à 18).

Le réservoir n'est pas achevé; nous espérons pouvoir donner le résultat de ces essais, lors du Congrès.

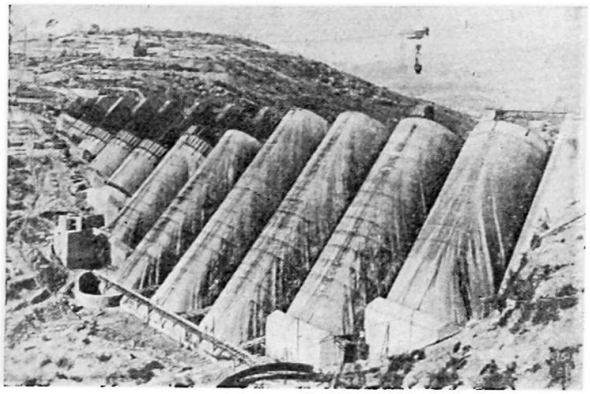
Barrages

Je ne puis donner sur cette question que des renseignements extrêmement sommaires. Pour entrer dans quelques détails, sur cette question, il me faudrait un volume entier.

Le premier barrage entièrement construit en béton précontraint est le barrage de prise d'eau des conduites forcées de l'Oued Fodda (Portes de Fer). Il comporte 4 passes principales de 19 mètres, fermées par des portes à chenille, équilibrées par contrepoids, de 5 mètres de hauteur, établies pour subir sans dommages l'action d'une lame déversante de 3 mètres (fig. 22).

Ce barrage est établi sur un radier général, supportant des piles qui reçoivent l'appui des vannes et les mécanismes de manœuvre.

Le radier, épais et toujours immergé, a été précomprimé à 30 kg/cm² par appui sur deux culées encastrées dans les berges rocheuses, après retrait





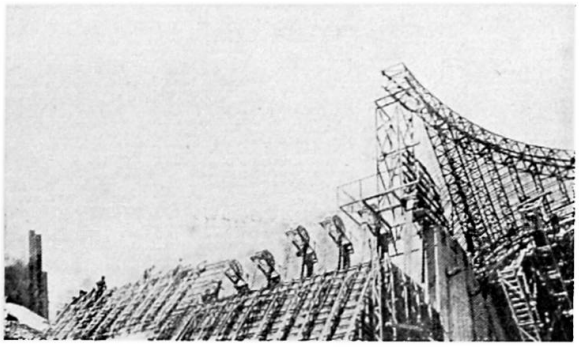


Fig. 19, 20 et **21.** Barrage de Béni-Bahdel. (Vue générale, contreforts et culées.)

notable du béton durci au soleil; retrait remplacé par un gonflement depuis la mise en eau. Cette compression a été obtenue par une série de vérins Freyssinet, que je décrirai plus loin.

Transversalement, la précontrainte du radier résulte de l'emploi de câbles en acier dur, enfilés dans des alvéoles garnies de tôle mince ménagées dans les bétons, tendus par action de vérins Freyssinet; les alvéoles ont été ensuite injectés au lait de ciment.

Les piles en béton ont été précontraintes préalablement par des méthodes analogues.

Les vannes mobiles en béton précontraint sont de véritables tabliers de ponts, formés de poutres comportant des armatures principales tendues avant coulage par appui sur des bases de moule en acier, et des armatures secondaires également tendues. Il est inutile d'insister sur les détails de la technique utilisée, entièrement périmée aujourd'hui en raison de l'invention des ancrages à cône.

Mis en service en 1939, l'ouvrage se comporte parfaitement bien depuis cette date.

Depuis nous avons étudié de nombreux barrages comportant des vannes mobiles de dimensions beaucoup plus considérables que celles de l'Oued Fodda, et il n'est pas douteux que le béton précontraint ne puisse donner une excellente solution de tous les problèmes de vannes qui pourront se poser, à quelque échelle que ce soit.

Barrage de Béni-Badhel

Le barrage des Beni Badhel sur la Tafna (Algérie, département d'Oran) était un barrage à voûtes multiples de 20 mètres de portée, le type absolu-

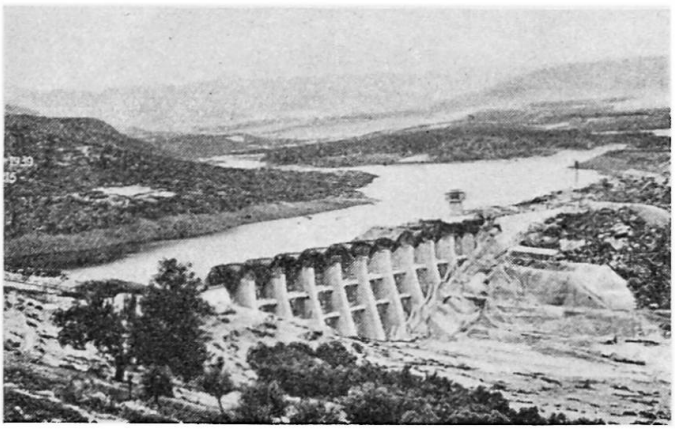


Fig. 22. Barrage de Béni-Badhel (vue générale).

ment classique. Alors qu'il était près d'être achevé, on décida d'augmenter sa hauteur de 7 mètres; ce qui le portait de 60 à 67 mètres dans le thalweg; la pression par suite passant de 1 800 à 2 250 t environ; soit une majoration de 25 %. Les terrains d'appui très fissurés et susceptibles de gonflement faisaient craindre des mouvements transversaux des fondations des contreforts et des séparations entre les culées des voûtes extrêmes et le sol d'appui.

Il fut décidé de remplacer l'allongement des contreforts classique en pareil cas, par la création d'une poussée active obtenue en installant à l'aval des contreforts des massifs de butée et en faisant agir entre eux et l'arrière des contreforts des vérins hydrauliques Freyssinet; sacs de tôle étanches dont les deux faces, d'abord au contact, sont reliées par un raccordement de forme étudiée pour que le gonflement détermine le minimum de déformation platisque du métal. Le prix de ces vérins est minime; leur encombrement en épaisseur, nul; les pressions peuvent y atteindre 200 kg/cm² et plus; les risques de fuite sont rigoureusement nuls.

On devait après mise en pression des vérins, remplir en ciment le vide ouvert par leur action.

En fait, ce calage n'a été fait qu'après plusieurs années, ce qui a permis au service responsable du barrage d'étudier les répartitions des charges sur les fondations en fonction des hauteurs de remplissage et des températures. Ce fait montre le degré de confiance des ingénieurs responsables de la tenue du barrage dans ces vérins; dont l'effort total, *par contrefort*, a dépassé 25 000 tonnes à certains moments.

La répartition des charges sur le haut des contreforts a, d'autre part, été améliorée par la création de contraintes obtenues sur leur bord amont à l'aide d'aciers ancrés dans ce bord à des hauteurs diverses et tendus par leur autre extrémité grâce aux méthodes classiques du béton précontraint.

D'autre part, des poussards transversaux en béton ont été établis entre les bases des divers contreforts pour empêcher leur déversement et leur déplacement normalement à leur plan. On a créé dans ces poussards, par des vérins de même type que ceux des contreforts, de puissantes compressions initiales; dans le but notamment d'appuyer effectivement contre les roches, les culées des voûtes extrêmes soumises à des pressions hydrauliques, parallèles au plan lisse des axes des voûtes, considérables (fig. 19 à 22).

Partout où l'on l'a jugé utile, on a précontraint non seulement les bétons, mais les roches sous-jacentes elles-mêmes à l'aide de câbles scellés

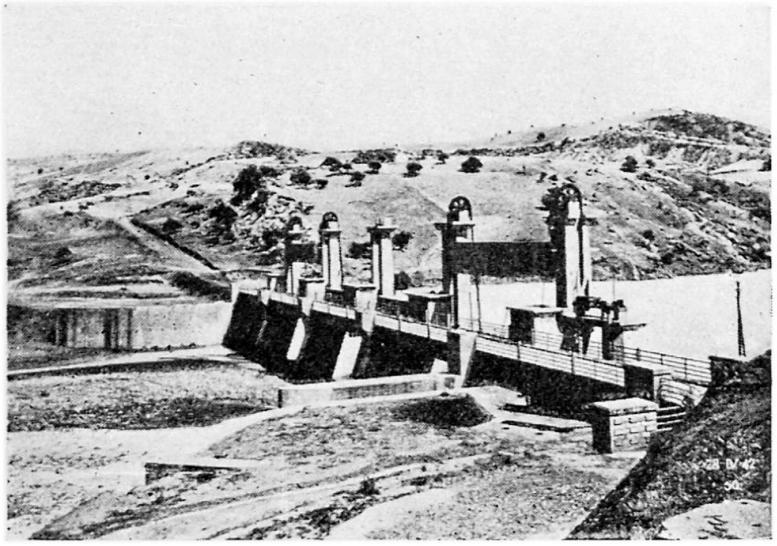


Fig. 23. Vue aval du barrage des Portes de Fer.

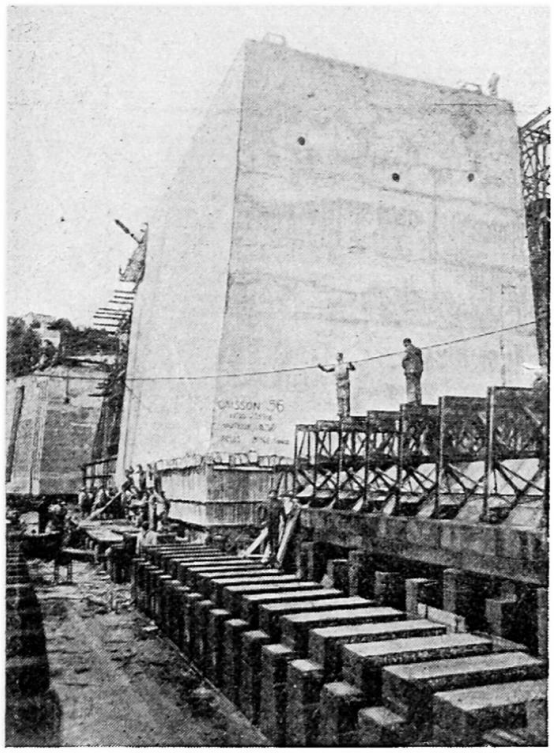
dans le roc à leur partie inférieure, maintenus libres sur le reste de leur hauteur, tendus, puis injectés de ciment.

On a pu ainsi en dépit de la surélévation, arrêter les mouvements qui avaient commencé à se manifester et éviter tout décollement des voûtes et des flancs de la vallée.

On n'a exécuté jusqu'à présent aucun grand barrage entièrement en béton précontraint. C'est assez normal, les décisions relatives à ces ouvrages très dispendieux exigeant à l'ordinaire d'assez longues discussions préalables. Toutefois, j'ai fait sur cette question nombre d'études et créé plusieurs types que je ne désespère pas de voir exécuter un jour, pour le plus grand avantage des contribuables; car l'emploi du précontraint entraînera des économies de temps et d'argent considérables.

Un des moyens qui peuvent être utilisés consiste à étendre sur le terrain, homogénéisé comme une fondation de piste d'avion, un rideau étanche en béton précontraint, relié à l'amont à une galerie de contrôle de l'étanchéité du terrain, à l'aval à un parafouille efficace contre les effets des eaux. Un rideau oblique ou vertical est relié par des tirants précontraints au rideau en contact avec le sol.

Il est aisé de régler la position et la dimension de ces rideaux, de manière à réaliser une pression sur le terrain, à peu près nulle quand l'ouvrage est vide, un peu inférieure à la pression hydrostatique quand il est plein. On peut donner aux parties d'un tel ouvrage en contact avec le sol la même souplesse qu'aux revêtements d'un barrage en enrochements. Il impose au terrain des contraintes verticales qui peuvent être réglées à volonté et qui ne dépassent jamais la pression hydrostatique, alors que celles des barrages en terre atteignent près du double de celles-ci. La proportion des composantes horizontales est à la volonté de l'ingénieur. De tels barrages peuvent être substitués à un barrage en enrochements ou en terre partout où ceux-ci sont possibles, en raison de l'extrême souplesse qu'il est possible de leur donner; telle qu'il devient possible de créer des barrages insensibles aux tremblements de terre; avec des économies de temps et d'argent de plus de moitié. La faible épaisseur des rideaux, qui peuvent recevoir les dispositions les plus variées, rend très commode l'installation de vannes d'évacuation de crues et de dispositifs de dévasage.



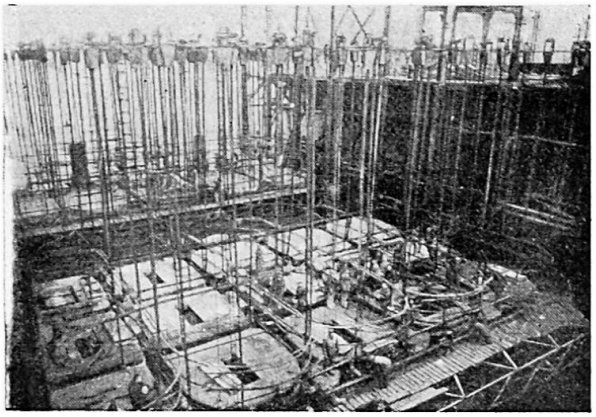


Fig. 24 et **25.** Quais à grande profondeur à Brest. Fabrication d'un caisson.

Ouvrages soumis extérieurement à une pression d'eau

Le béton précontraint se prête remarquablement à l'exécution de tunnels, galeries, puits de mine, etc., en toutes circonstances.

Les Entreprises Campenon Bernard exécutent sous le lit de la Seine une galerie de $3^{m}25$ de diamètre, construite en voussoirs préfabriqués associés par une précontrainte réalisée; transversalement : par la mise en tension d'armatures; longitudinalement : par l'action de vérins; le travail est fait sous la protection d'un bouclier et dans l'air comprimé.

On doit s'attendre à des développements considérables de ces applications, qui ont donné lieu à nombre d'études dont je ne saurais parler ici même sommairement et qui permettront des perfectionnements considérables des techniques de construction par boucliers.

On pourrait évidemment, joindre aux catégories d'ouvrages sur lesquels je viens de donner des renseignements malheureusement trop sommaires, toutes sortes d'ouvrages hydrauliques, revêtements de forme de radoub, caissons, docks ou écluses, pontons, etc. (fig. 24 à 26).

Les Entreprises Campenon Bernard ont exécuté à Brest entre 1934 et l'heure actuelle, d'après mes conseils, de très nombreux ouvrages appartenant aux types les plus divers, ayant en commun ce double caractère : lutter contre une pression d'eau par utilisation des précontraintes. Il m'est impossible d'en parler autrement que pour signaler la puissance et la souplesse des moyens ainsi obtenus.

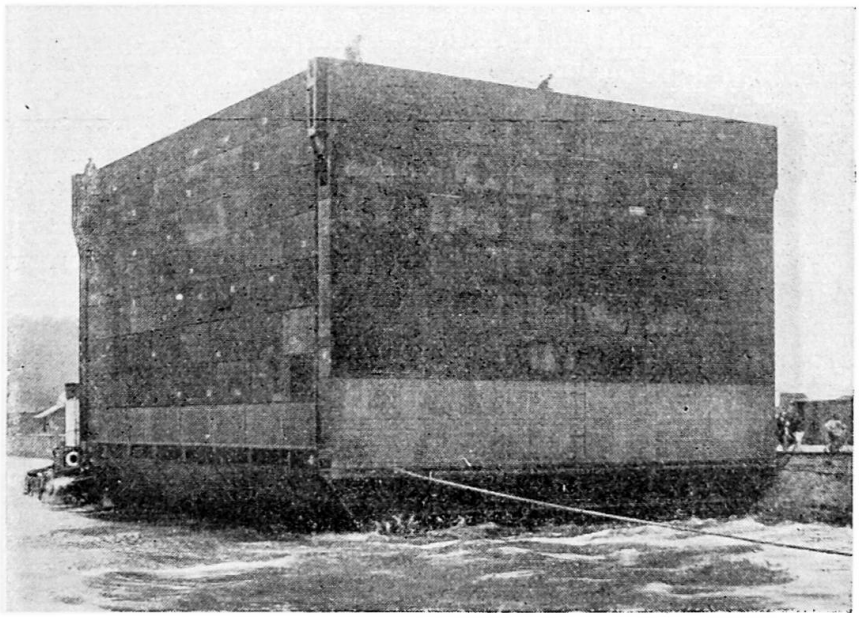


Fig. 26. Transport d'un caisson terminé par flottaison.

Résumé

Tuyaux

Ces tuyaux sont précontraints longitudinalement et transversalement au moyen d'armatures tendues avant et pendant la fabrication.

La protection des aciers est parfaitement assurée et le danger de fissuration est complètement supprimé. Les tuyaux réalisés industriellement pouvaient supporter des pressions de 6 à 18 kg/cm² selon les cas.

Réservoirs et cuves

Les réalisations actuelles se sont bornées notamment à des cuves à vin constituées d'éléments précontraints préfabriqués assemblés sur des montants verticaux et à un réservoir rectangulaire dont la description est donnée en annexe.

Barrages

Un barrage a été exécuté sur l'Oued Fodda. Le radier est précontraint longitudinalement par des vérins prenant appui sur les berges rocheuses, transversalement par des câbles. Les vannes mobiles sont des poutres précontraintes.

Le barrage de Béni Badhel est un ouvrage dont la hauteur a été portée de 60 à 67 mètres et où l'allongement des contreforts a été remplacé par la création d'une poussée active au moyen de vérins Freyssinet prenant appui sur des massifs de butée.

Ouvrages soumis extérieurement à une pression d'eau.

Les réalisations comportent des tunnels, galeries, caissons, revêtements de forme de radoub, docks, écluses, pontons, etc.

Zusammenfassung

Druckrohre

Diese Rohre werden vor oder während der Fabrikation in Längs- und Querrichtung vorgespannt.

Die Eisen sind vollständig geschützt und die Rissegefahr ist ausgeschaltet. Die fabrikationsmässig hergestellten Rohre genügen je nach Bedarf einem Innendruck von 6 bis 18 kg/cm².

Behälter und Tröge

Die neuesten Ausführungen beschränken sich hauptsächlich auf Weinbehälter, die aus einzelnen vorgespannten, vorfabrizierten Bauteilen bestehen, die auf vertikalen Stützen aufliegen und einem rechteckigen Behälter, wie in der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Staumauern

Eine Staumauer wurde am Oued Fodda ausgeführt. Die Sohle ist in Längsrichtung durch Pressen, die sich auf die felsige Böschung stützen und in Querrichtung durch Drahtseile vorgespannt. Die beweglichen Schützen bestehen aus vorgespannten Betonbalken.

Die Staumauer von Béni Badhel wurde von 60 auf 67 m erhöht, wobei die Pressen System « Freyssinet » angewendet wurden, die im Felswiderlager fundiert waren.

Unter äusserem Wasserdruck stehende Bauwerke

Die wichtigsten Ausführungen betreffen Tunnel, Gallerien, Caissons, Auskleidungen in Form von Trockendocks, Docks, Schleusen, Pontons, etc.

Summary

Piping

This piping is pre-stressed longitudinally and transversally by means of reinforcements stretched before and during the manufecture of same.

Protection of the steel reinforcement is thoroughly ensured and the danger of cracks is completely eliminated. Piping made in factories was able to withstand pressures of 6 to 18 kg/cm², according to various cases.

Reservoirs and vats

What has been created so far is restricted to wine-vats consisting of pre-stressed and pre-fabricated parts assembled on vertical supports and to one rectangular reservoir, of which a description is given in a schedule.

Dams

A dam was erected across the Oued Fodda. The floor is pre-stressed longitudinally by jacks resting against the rocky banks and transverse cables. The movable sluices consist of pre-stressed beams.

The Béni Badhel dam is a structure of which the height was increased from 60 to 67 metres and in which elongation of the buttresses has been replaced by the creation of an active thrust by means of Freyssinet screw-jacks resting on thrust-blocks.

Structures subjected exteriorally to pressure by water

Works of this kind comprise tunnels, galleries, caissons, surfacings for dry docks, docks, locks, pontoons, etc.