

**Zeitschrift:** IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen  
**Band:** 15 (1955)  
  
**Artikel:** Le frettage du siphon des Granges (aménagement hydroélectrique de Bort)  
**Autor:** Mary, M.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-14493>

### **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:** 08.01.2026

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

## **Le frettage du siphon des Granges (aménagement hydroélectrique de Bort)**

*Die Umschnürung des Siphons von Les Granges*

*Hoop reinforcement of the siphon of Les Granges*

M. MARY, Ingénieur en Chef Honoraire des Ponts et Chaussées, Directeur Régional de l'Équipement à Électricité de France, Paris

Dans un rapport que nous avons présenté en 1936 au deuxième congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes, sous le numéro VI 6, nous avons décrit le procédé de frettage que nous avons utilisé pour la construction des conduites forcées souterraines de l'Usine de Marèges, sur la Dordogne.

L'aménagement de la chute de *Bort*, sur la même rivière, nous a donné l'occasion de traiter un problème semblable, mais dans des conditions très différentes.

A Marèges, il s'agissait de construire un revêtement en béton fretté dans les quatre rameaux souterrains qui aboutissent aux entrées des turbines.

A *Bort*, le problème consistait à construire à l'air libre, puis à recouvrir de terre, un siphon de 900 mètres de longueur environ et de 4 mètres de diamètre intérieur, soumis, en son point bas à une pression d'eau de 13 kg/cm<sup>2</sup>.

Ce siphon fait partie des ouvrages d'adduction, dans le lac de Bort, des eaux d'un affluent de la Dordogne, la Rhue, dont le confluent naturel se trouve en aval du barrage.

Une conduite en tôle enterrée est toujours un ouvrage un peu inquiétant, en particulier parce que le revêtement extérieur de protection peut-être blessé au moment du remblaiement, ou il peut se dégrader par vieillissement au cours des années. L'oxydation peut ainsi produire insidieusement son effet et mettre un jour ou l'autre l'ouvrage en danger. La déchirure d'une conduite en tôle est toujours un événement très grave.

Un ouvrage en béton fretté par des cerces indépendantes nous semble infiniment plus satisfaisant, car si une cerce venait à manquer, elle n'entraînerait pas la rupture des cerces voisines, et les dégâts seraient très limités.

C'est la raison principale qui nous a conduits à prévoir une conduite en béton fretté. Mais il faut ajouter que le prix de cet ouvrage s'est accompagné d'une économie d'environ 13%. A cette économie directe, il faut d'ailleurs en ajouter une autre d'environ 20% résultant du fait que les conditions de sécurité propres à l'ouvrage en béton nous ont permis de supprimer la vanne amont de sécurité qui aurait été absolument nécessaire dans le cas d'une conduite en tôle et dont la présence même aurait exigé la construction d'une cheminée d'équilibre, le siphon étant précédé d'une galerie souterraine de 12 km de longueur. La solution tôle aurait donc coûté un tiers de plus que la solution béton.

### Caractéristiques générales

Le tuyau a 4 mètres de diamètre intérieur, et son épaisseur a été fixée à 0m 40.

Au point bas, la pression est de 13 kg/cm<sup>2</sup>. Sous l'effet de cette pression, la paroi de béton serait donc soumise à une traction de  $130 \times 2 = 260$  tonnes par mètre courant. Il a été décidé de lui donner une précontrainte de  $180 \times 2 = 360$  tonnes, ce qui donnait une section d'acier de 4000 mm<sup>2</sup> tendu à 90 kg/mm<sup>2</sup>.

Pour tenir compte de l'inégalité de tension le long des frettes, de la perte de tension de celles-ci au moment du calage, et des déformations plastiques ultérieures du béton et de l'acier, il a été décidé de porter la tension des frettes au moment de l'opération de frettage à 110 kg/mm<sup>2</sup>.

En dehors du point bas, la section d'acier au mètre courant de conduite a été déterminée par la même règle, c'est-à-dire les 18/13 de la pression statique.

Au point le plus chargé, la compression maximum du béton au moment du frettage atteignait donc 110 kg/cm<sup>2</sup>, les fluages pouvant faire baisser ce chiffre à 90 kg/cm<sup>2</sup>, et la pression d'eau à 25 kg/cm<sup>2</sup>, soit un résidu de compression largement suffisant pour mettre la conduite à l'abri des risques de fissuration par traction.

L'augmentation de traction des frettes due à la pression de l'eau est de 4 kg/mm<sup>2</sup> en supposant que le coefficient d'élasticité du béton soit de 300 000 kg/cm<sup>2</sup> ou 6 kg/mm<sup>2</sup> si on ajoute à l'expansion élastique du béton un gonflement de:  $\frac{1}{10000}$ . On voit donc que, entre la conduite vide et la conduite pleine, la différence des contraintes de traction de l'acier de précontrainte est faible, de l'ordre de 6% seulement.

Notons que tous les chiffres indiqués ci-dessus ne sont que des ordres de grandeur, et il n'est pas question ici d'entrer dans le détail des calculs. Nous signalerons simplement que de nombreux problèmes ont été étudiés à l'occasion

de l'établissement du projet de l'ouvrage et nous citerons par exemple les points suivants:

— La pression d'eau étant susceptible dans une certaine mesure de s'engager dans les vides interstitiels du béton, l'effort de traction à combattre par la précontrainte est peut être un peu supérieur à celui qu'on obtient en multipliant la pression d'eau par le rayon intérieur de la conduite, sans atteindre toutefois l'effort qu'on obtiendrait en prenant en compte le rayon extérieur.

— L'axe de la conduite étant horizontal au point bas et incliné sur le restant du tracé, les poids propres du béton et de l'eau induisent des contraintes de flexion qui s'ajoutent algébriquement à la contrainte moyenne; cette considération a conduit à tracer le contour d'extrados suivant une courbe funiculaire des forces; le diamètre horizontal a ainsi 5 cm de plus que le diamètre vertical, le contour d'intrados étant circulaire; les contraintes de traction dues à ces flexions acquièrent une valeur notable au moment du décoffrage, ce qui a conduit à n'effectuer ce décoffrage qu'après une légère mise en tension des frettes.

— La conduite repose sur des appuis semi-ponctuels, à raison de deux points par mètre courant, portant sur deux longrines de fondation situées à 30° de part et d'autre de l'axe vertical du tuyau; ce mode du support discontinu, exigé par la nécessité de réserver tous les espaces libres pour le passage des câbles de précontrainte, a pour conséquence des contraintes de flexion dans le sens longitudinal et dans le sens transversal.

— Les conséquences des inégalités d'épaisseur ou de forme dues à la tolérance inévitable de l'implantation des coffrages ont également été appréciées.

Ce sont toutes ces considérations qui nous ont conduits à tendre les frettes au delà de ce qui aurait été strictement nécessaire au simple vu des contraintes moyennes et à avoir ainsi un certain coefficient de sécurité, dont la définition même et la valeur seraient d'ailleurs difficiles à préciser. Ajoutons que ce coefficient de sécurité est relatif à la fissuration éventuelle de la conduite, et non pas à sa rupture.

Vis-à-vis de la rupture, un mode de calcul du coefficient de sécurité peut consister à déterminer la pression qui, après fissuration complète de la conduite, amènerait les aciers de précontrainte à leur limite élastique. Au delà, les fissures s'agrandiraient par suite des allongements plastiques de l'acier au point que l'ouvrage pourrait être considéré comme détruit; il n'éclaterait encore pas, mais les fuites seraient très importantes. Cette pression est de l'ordre de 200 mètres, et il est impossible d'imaginer quel événement pourrait conduire à cette valeur.

La rupture accidentelle d'un ou plusieurs fils n'aurait pas de conséquences graves. Elle diminuerait seulement le taux de précontrainte du béton. Les frettes sont espacées dans la zone la plus chargée de 77 mm. La répartition longitudinale des contraintes de frettage d'une frette isolée intéresse une



longueur de conduite atteignant 6 à 8 fois l'épaisseur du béton. (Voir rapport du Congrès de 1936, page 10.) En prenant en compte dans le présent calcul, à titre de sécurité, une longueur de répartition de deux fois seulement l'épaisseur de la conduite, soit 80 cm ou 10 frettes, on voit que la précontrainte du béton, dans le cas de la rupture d'une frette serait simplement diminuée de 10%, sans augmentation appréciable de la tension des frettes voisines de la frette rompue. De plus, chaque frette comprenant 8 fils, cette éventualité nécessiterait la rupture simultanée des 8 fils d'une même frette.

Enfin, pour terminer cet examen des lignes générales du projet, il convient de signaler que la conduite est soumise également à une précontrainte longitudinale grâce à l'utilisation de la pression de l'eau elle-même. A cet effet, la conduite est constituée de tronçons de 20 mètres de longueur terminés par des collets épaissis à 60 cm. Entre deux tronçons, une lame d'étanchéité en cuivre est disposée aussi près que possible de l'extrados. De cette sorte, la pression d'eau sur l'about s'exerce sur une surface annulaire qui dépasse d'un tiers la surface annulaire de la section courante; la précontrainte longitudinale dépasse ainsi d'un tiers la pression de l'eau et s'oppose à l'ouverture de fissures transversales. Des armatures longitudinales ont été placées dans la partie inférieure de la conduite, dans les zones des points d'appui, car dans ces régions, le frottement de la conduite sur ses supports apporte une gêne à la transmission de la précontrainte longitudinale, et on pouvait craindre l'apparition de fissures de retrait.

### Principe du frettage

Les conduites de petit diamètre, jusqu'à 2 m ou 2,50 m environ, sont toujours frettées dans un atelier séparé et les tronçons sont ensuite transportés pour être mis en œuvre.

Une conduite de 4,80 m de diamètre extérieur, soit environ 4,90 m en y comprenant la protection extérieure de béton fin ou de gunite, pèse environ 15 tonnes par mètre courant; il est exclus d'envisager le transport d'un tel tuyau et il n'y a pas d'autre technique que de construire la conduite à son emplacement définitif, puis de la fretter sur place.

C'est là qu'apparaît le problème crucial, qui a son origine dans le frottement de la frette sur le béton.

En effet, supposons qu'on enroule autour d'une conduite en béton une frette constituée par un câble ou des fils parallèles et formant une seule circonférence, puis qu'à l'aide d'un vérin on rapproche les deux extrémités de la frette pour la mettre en tension. Si l'on admet, à titre de première hypothèse, que le coefficient de frottement de la frette sur le béton est de 0,15, la tension de la frette à l'extrémité du diamètre opposée à celle de la mise en tension n'atteindra que la fraction:  $\frac{1}{e^{\pi \times 0,15}} = 0,62$ , soit moins des deux tiers de la tension exercée par les vérins.

En fait, le coefficient de frottement est supérieur à 0,15, quelles que soient les substances lubrifiantes interposées; l'expérience nous a montré en particulier qu'il augmente avec la tension, peut-être en partie en raison d'une légère dégradation de la surface du béton au contact de la frette par effet d'empreinte.

Nous avons trouvé effectivement des valeurs atteignant 0,30. La variation de tension le long de la frette est alors encore plus importante. Le rapport des tensions extrêmes dans ce cas tombe à moins de 0,40.

Une telle irrégularité de tension ne crée pas dans la conduite de flexions susceptibles de la fissurer; la courbe des pressions reste convenablement centrée.

D'autre part, on peut régulariser le taux de compression du béton en décalant d'une frette à l'autre la position des extrémités de la frette et en les disposant judicieusement sur toute la circonférence.

Mais ces dispositions, excellentes pour ce qui concerne le béton, ne corrigent que partiellement le fait que l'acier est mal utilisé et que le rendement effectif de la précontrainte est faible. Il est compris entre 60 et 70%, ce chiffre représentant le rapport entre la contrainte la plus faible du béton compte tenu de la régularisation et celle qu'on obtiendrait si la tension de l'acier était partout égale au maximum.

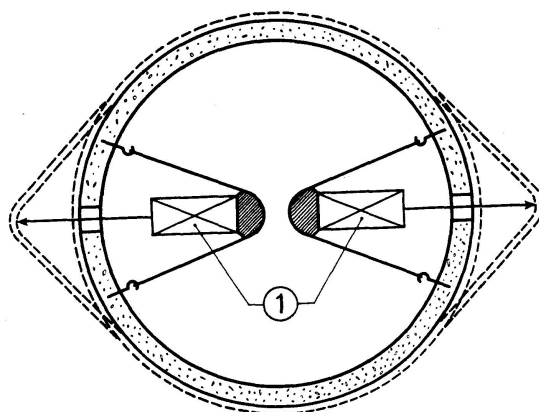


Fig. 1. Schéma de frettage adopté à Marèges.  
1 Vérins.

Pour améliorer ce rendement, un procédé consisterait à couper les frettes par longueur d'une demi-circonférence et à disposer des vérins aux deux extrémités d'un diamètre. Le frottement ne serait plus à prendre en compte que sur un angle au centre de  $90^\circ$  au lieu de  $180^\circ$ . Le rapport des tensions extrêmes serait alors compris entre 0,80 et 0,62, pour un coefficient de frottement compris entre 0,15 et 0,30.

A Marèges, on a utilisé un procédé de mise en tension tout à fait original, imaginé par M. GUERRIER, qui était à l'époque Ingénieur des Entreprises LÉON

BALLOT. Ce procédé consistait à écarter le câble de la conduite en deux points diamétralement opposés, à l'aide de vérins agissant depuis l'intérieur de l'ouvrage et prenant appui sur la paroi même du tuyau (fig. 1). La longueur de contact à prendre en compte pour le calcul du frottement ne correspondait plus qu'à un angle au centre de  $70^\circ$  environ.

Rappelons qu'il s'agissait d'une conduite souterraine. Le rapport cité plus haut au Congrès de 1936 a donné le détail des dispositifs réalisés, qui ont donné toute satisfaction.

Lorsque le problème s'est posé à Bort de construire une conduite à l'air libre, la première solution envisagée s'est d'abord inspirée du dispositif de Marèges, en combinant toutefois une traction directe des extrémités du câble et un écartement de ce câble par rapport à la conduite au point opposé. Les culots et les poussoirs des différents câbles n'étaient pas alignés sur une seule ligne, mais en quinconce sur deux lignes, de part et d'autre de l'axe vertical, de manière à régulariser les contraintes de compression du béton (fig. 2).

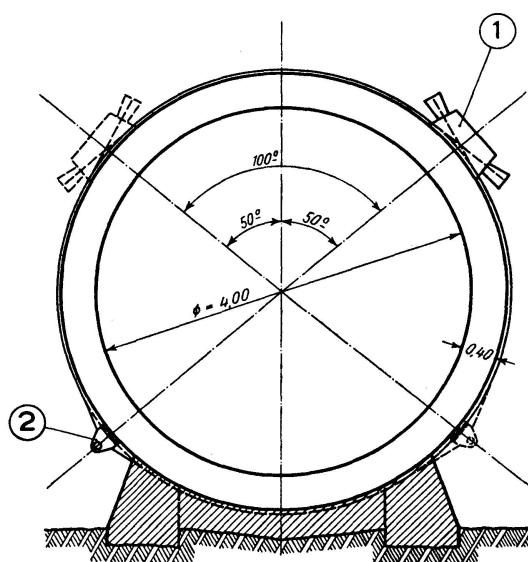


Fig. 2. Schéma de fretage du premier essai de Bort.  
1 Traction directe. 2 Traction par écartement du câble.

Un essai en vraie grandeur fut entrepris avec ce dispositif (fig. 3, 4 et 5) sur un tronçon de 7,50 m de longueur fretté à l'aide de 21 câbles, chacun d'eux étant formé de deux torons de 61 fils de 4 mm. Ce tronçon de conduite était obturé par deux fonds en béton armé reliés par des boutons longitudinaux précontraints de manière que les poussées longitudinales sur les fonds ne soient pas transmises au béton de la conduite. Les joints entre fonds et conduite étaient obturés par des lames de cuivre disposées sur les abouts de manière à obtenir une contrainte longitudinale sous l'action de la pression d'eau elle-même, comme il a été dit plus haut. Une traction de 120 tonnes était d'abord

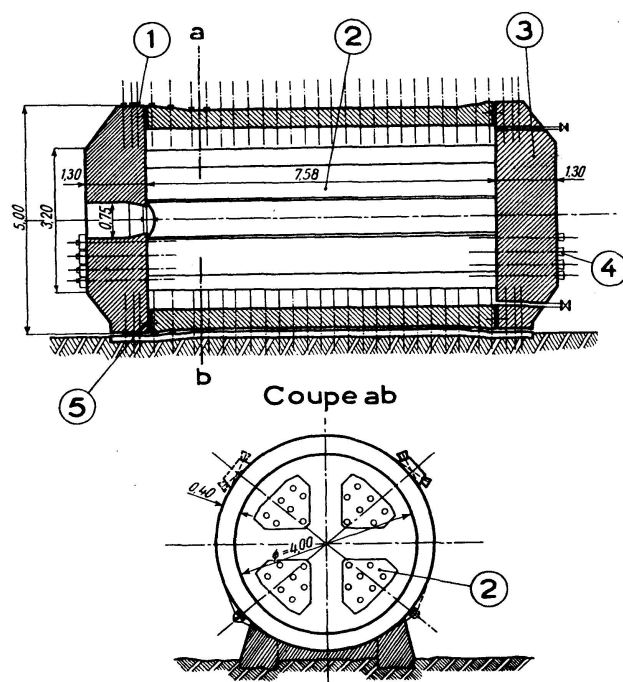


Fig. 3. Disposition générale du tronçon d'essai.

1 Frettes. 2 Butons. 3 Fonds en béton. 4 Câbles de précontrainte des butons. 5 Joints en cuivre.

exercée sur les culots d'extrémité des câbles, puis les vérins destinés à écarter le câble de la conduite étaient ensuite mis sous pression de manière à réaliser également une traction de 120 tonnes à l'extrémité du diamètre opposée aux culots. Après exécution des calages, la conduite fut mise sous pression. A la pression de  $11,8 \text{ kg/cm}^2$  apparurent deux fissures longitudinales suivant les deux génératrices d'appui des poussoirs d'écartement. Cette fissure se refermait lorsque la pression descendait à  $10 \text{ kg/cm}^2$ , puis les fuites de la conduite fissurée réapparaissaient à cette même pression de  $10 \text{ kg/cm}^2$ .

En poussant la pression plus haut, ce qui était possible parce que l'importance des fuites des deux fissures signalées était inférieure au débit de la pompe d'essai, deux autres fissures se produisirent sur les génératrices diamétralement opposées aux premières, c'est-à-dire au droit des mises en tension supérieures, pour une pression de  $12,3 \text{ kg/cm}^2$ . Ces fissures se fermaient et se rouvraient ensuite pour une charge de  $11,5 \text{ kg/cm}^2$ .

Ces résultats montrèrent que le procédé de frettage était satisfaisant dans son principe, mais que son rendement demandait à être amélioré.

Une vérification de la tension des câbles montra que ceux-ci étaient moins tendus qu'on ne le pensait; une reprise de cette tension et un nouveau calage permirent d'améliorer les chiffres précédemment constatés. Les fissures inférieures se rouvrirent dès lors à  $11 \text{ kg/cm}^2$  au lieu de  $10 \text{ kg/cm}^2$ , et les fissures supérieures à  $13 \text{ kg/cm}^2$  au lieu de  $11,5 \text{ kg/cm}^2$ .

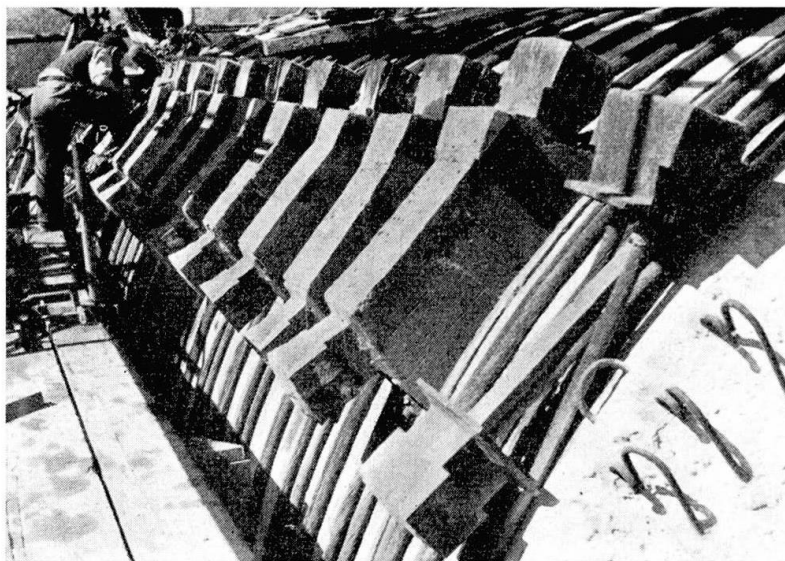


Fig. 4. Dispositif de traction sur les extrémités des câbles.

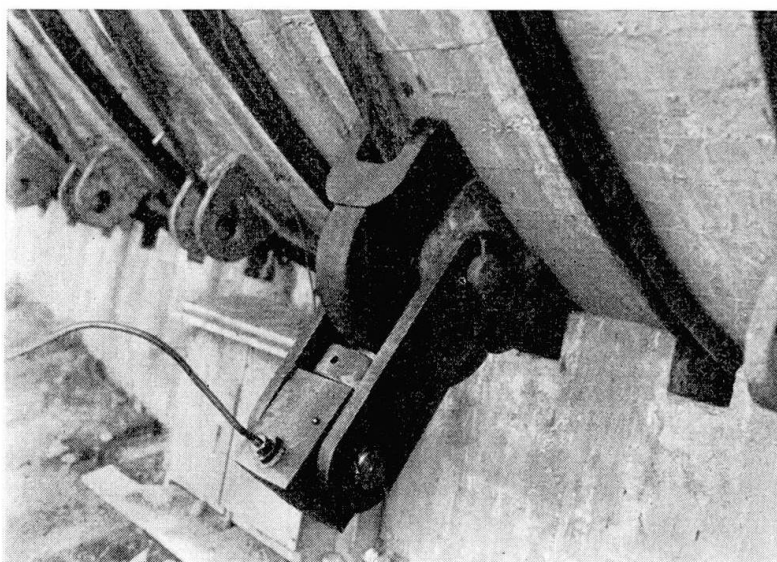


Fig. 5. Poussoirs de mise en tension par écartement du câble.

En dehors des pertes de tension au moment du calage, l'insuffisance de tension des câbles provenait en partie de ce que le coefficient de frottement câble sur béton atteignait 0,30 au lieu de 0,15 escompté.

Toutes ces opérations ont été accompagnées de mesures extensométriques à l'aide de cordes sonores, qui ont permis d'analyser l'évolution des contraintes du béton.

Un deuxième essai fut alors décidé sur une nouvelle conduite non fissurée. Mais les points d'écartement des câbles furent dédoublés de manière à diminuer les longueurs de frottement. Il y avait donc un point d'attaque directe sur les

culots et deux points d'écartement, les culots étant à  $26^\circ$  de part et d'autre de la génératrice supérieure et les poussoirs à  $104^\circ$  des culots (fig. 6). On utilisa dans cet essai des câbles formés de deux torons de 91 fils de 3,2 mm, et les joints de cuivre furent remplacés par des joints de caoutchouc; la longueur du tuyau étant ramenée de ce fait de 7,54 m à 6,84 m, 19 frettes furent disposées autour de la conduite, au lieu de 21 dans le premier essai. La mise en tension

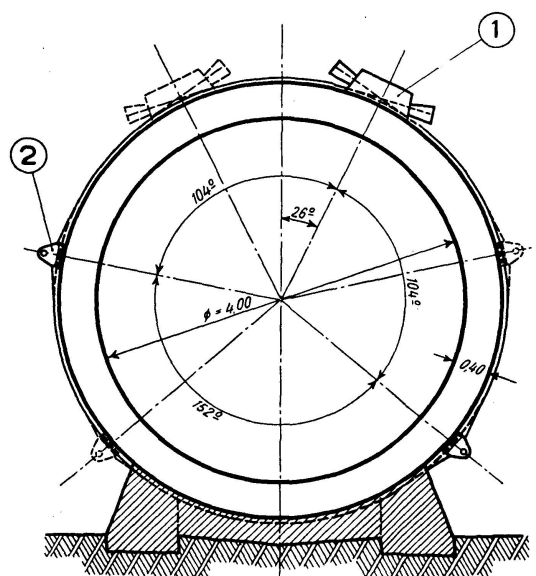


Fig. 6. Schéma de frettage du deuxième essai de Bort.

1 Traction directe. 2 Traction par écartement du câble.

supérieure fut portée à 150 tonnes et la mise en tension au droit des poussoirs à 162 tonnes. A l'essai, après quelques suintements de débit pratiquement nul, des fissures apparurent sous la pression de  $15 \text{ kg/cm}^2$  suivant deux génératrices correspondant aux deux lignes de poussoirs supérieurs.

L'ouvrage était donc très nettement amélioré par rapport au premier essai.

Mais, ces essais avaient mis en évidence, comme d'ailleurs on pouvait s'y attendre, le fait que les premiers points de fuite apparaissaient sur les génératrices des poussoirs. Il est bien évident en effet que, dans cette zone, la courbe des pressions est polygonale et qu'il en résulte des contraintes de flexion.

En définitive, ces essais ont permis de déterminer le rendement qu'on pouvait attendre de ce système de frettage compte tenu des variations de compression du béton tout le long de la couronne circulaire, ces variations étant dues, d'une part à la perte de tension des câbles par frottement sur le béton, d'autre part aux flexions localisées au droit du poussoir.

Pour obtenir aux points les moins comprimés la précontrainte nécessaire, il suffisait donc de renforcer les câbles en conséquence, et il était dès lors possible de dresser le projet définitif d'un ouvrage ne se fissurant que pour une pression de 17 à  $18 \text{ kg/cm}^2$ , comme on le souhaitait.

C'est alors que Monsieur le Président CAQUOT présenta à notre Entrepreneur, les Entreprises Métropolitaines et Coloniales et à nous-même une idée extrêmement ingénieuse pour résoudre les difficultés provenant du frottement et c'est cette idée qui fut mise en application.

L'idée consiste essentiellement à faire passer la frette sur des petits patins métalliques au lieu de la poser directement sur le béton, puis, au cours de l'opération de mise en tension qui se fait uniquement par traction des extrémités, de pousser à l'aide d'un petit marteau vibreur ces patins dans la direction des têtes de frette. La combinaison de la vibration et de la poussée détruit la résistance au frottement, et permet d'aboutir très aisément à une régularisation convenable de la tension de la frette sur toute sa longueur.

Du même coup, il n'est plus nécessaire de procéder à un complément de frettage par écartement de la frette par rapport à la conduite, et on supprime ainsi les points singuliers de la courbe des pressions qui, dans les essais précédents, apparaissaient comme étant à l'origine des premières fissures.

### Réalisation de l'ouvrage

La conduite est constituée d'éléments de 20 mètres de longueur. Afin d'éviter des terrassements importants, le tracé comporte des inflexions assez nombreuses (fig. 7) et le coffrage a été constitué d'éléments droits et d'éléments à onglets, ces derniers permettant de construire la conduite suivant un tracé polygonal équivalent à un cercle de 230 mètres de rayon au minimum.

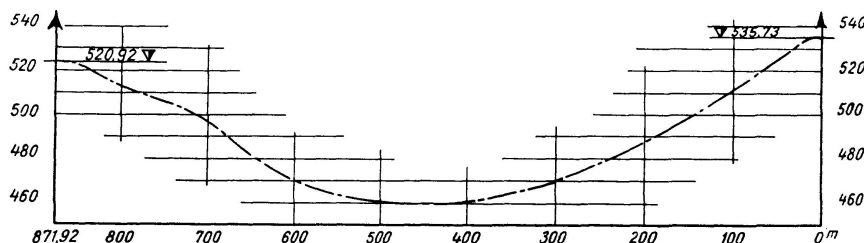


Fig. 7. Profil en long de la conduite.

Chaque élément de 20 mètres reposait, avant frettage, par l'intermédiaire de 19 plots en béton, sur deux longrines continues, disposées à 30° de part et d'autre de l'axe vertical de la conduite (fig. 8). Ces plots ménageaient, entre conduite et longrines, les vides nécessaires au passage des frettes. Ils avaient 12 cm de longueur et 20 cm de haut, et étaient écartés de 1 mètre d'axe en axe. Tous les deux mètres, les plots formaient berceau, entretoisant ainsi les deux longrines.

Après la mise en tension des frettes et avant la mise en eau, les vides ont été bétonnés, la conduite reposant dès lors sur deux appuis continus.

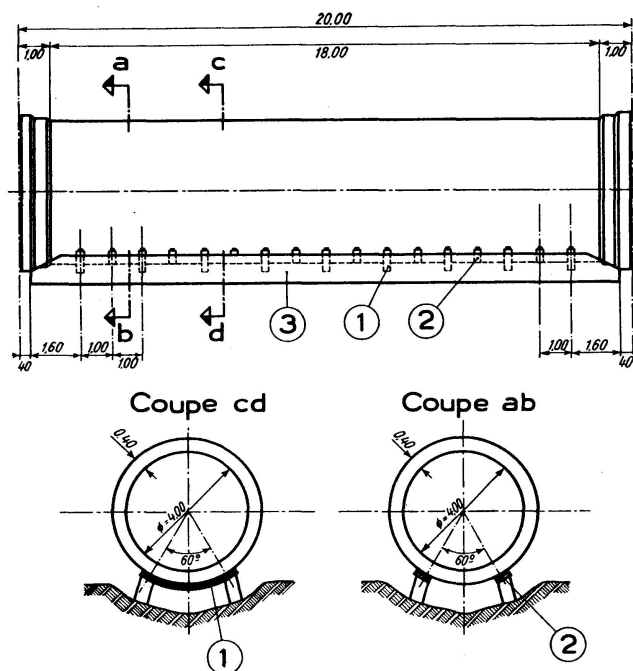


Fig. 8. Dispositions générales d'un tronçon de conduite et de ses supports.

1 Pièce de béton préfabriquée 1 tous les 2 m. 2 Pièce de béton préfabriquée 1 tous les 2 m. 3 Longrine.

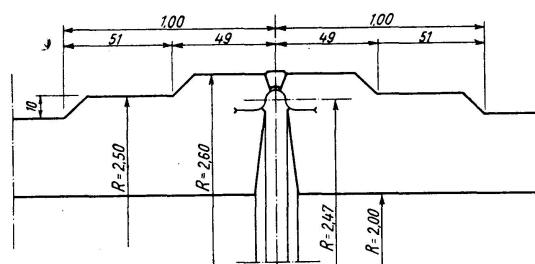


Fig. 9. Joint entre deux éléments de conduite.

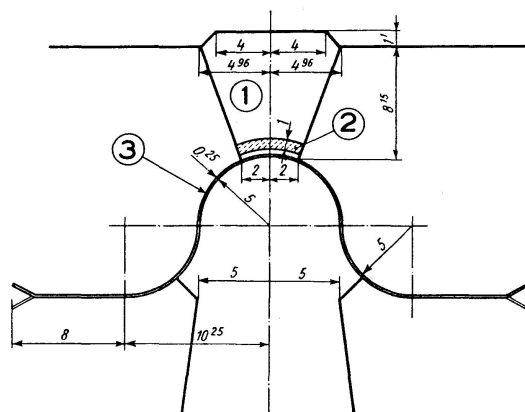


Fig. 10. Détail du joint.

1 Coin de béton coulé sur place. 2 Coquille de liège aggloméré. 3 Lambe emboutie cylindrique en cuivre.



Les abouts de tuyau sont épaissis; une lame de cuivre ferme le joint (fig. 9 et 10); une collerette en béton en forme de coin a été coulée après les essais de mise en eau pour protéger la lame de cuivre; cette collerette a été elle-même serrée par une frette.

Chaque frette est constituée de 8 fils de 7 mm. L'acier utilisé avait les caractéristiques suivantes:

limite élastique	120 à 135 kg/mm <sup>2</sup> ,
limite de rupture	143 à 160 kg/mm <sup>2</sup> ,
allongement de rupture	9 à 10%.

Le fil a été étiré en usine préalablement à son emploi.

Les huit fils de la frette sont engagés à chacune de leurs extrémités dans 8 trous d'une pièce spéciale (fig. 11) et ils ont été refoulés à froid à l'aide d'une presse hydraulique pour former la tête d'ancrage.

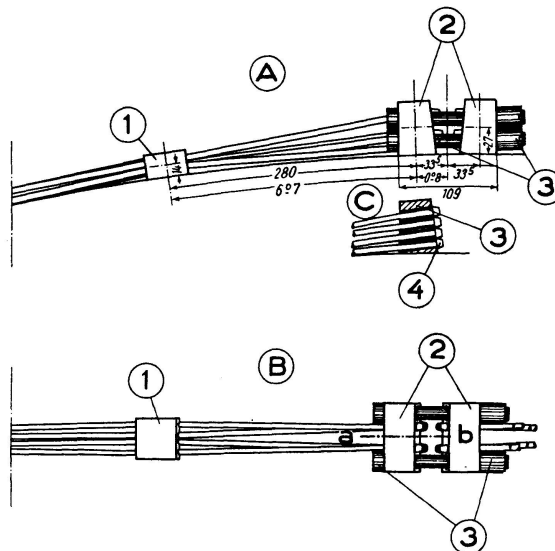


Fig. 11. About d'une frette.

A Vue en élévation. B Vue en plan. C Coupe a b. 1 Patin. 2 Tête de frette. 3 Boulons de liaison. 4 Tête de fil refoulé à froid.

Cette pièce d'ancrage présente quatre autres trous pour le passage des boulons de liaison avec la pièce semblable préparée à l'autre extrémité de la frette.

Après décoffrage extérieur de la conduite, les frettes étaient enroulées autour du tuyau; entre le béton et la nappe inférieure des fils étaient interposés 45 patins métalliques disposés régulièrement le long de la circonférence, de manière qu'en aucun point la frette ne touche le béton.

Les deux têtes d'extrémité étaient réunies par quatre boulons longs remplacés après la mise en tension par les quatre boulons définitifs. Pendant la mise en tension, les deux têtes d'extrémité se rapprochaient l'une de l'autre d'environ 9,5 cm au total. Outre l'allongement élastique, ce chiffre comprend

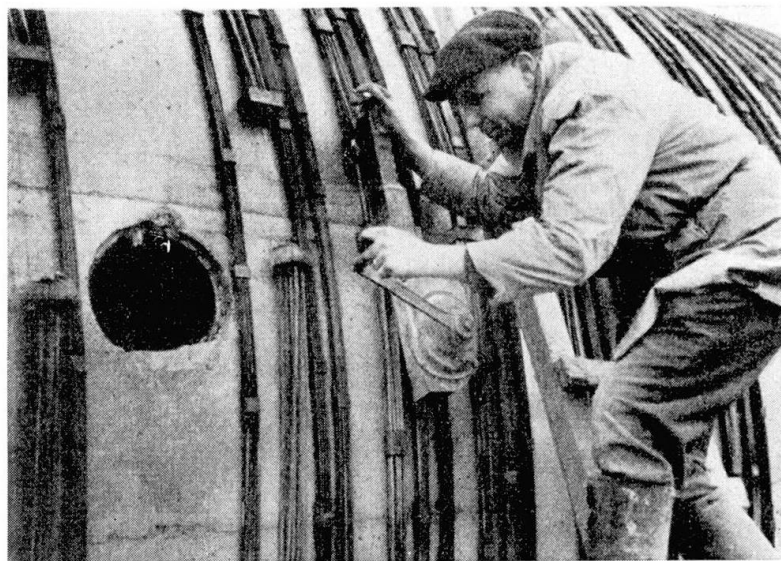


Fig. 12. Mise en tension à 10 tonnes avant décoffrage intérieur.

une part correspondant à la modification du tracé du câble (mise au polygone sur les patins) et divers éléments accessoires, tels que la déformation des patins, la déformation des têtes, etc.

Les têtes de frettes sont alignées sur quatre directrices de la conduite à  $17,5^\circ$  de part et d'autre du diamètre horizontal pour améliorer la répartition des contraintes dans le béton.

Aussitôt après leur pose, les frettes étaient tendues à 10 tonnes environ et maintenues dans cet état à l'aide des boulons provisoires; c'est à ce moment que le coffrage intérieur était enlevé; la précontrainte ainsi obtenue assurait la compensation des contraintes de traction dues à la flexion provenant du poids propre (fig. 12).

Pour la mise en tension définitive, deux portiques roulant sur des rails situés de part et d'autre de la conduite supportaient chacun quatre vérins hydrauliques ainsi que les tuyauteries d'air pour l'alimentation des vibrateurs et des marteaux-poussoirs (fig. 13).

Ainsi qu'on l'a indiqué précédemment, le serrage du câble était obtenu par traction sur les têtes, et l'égénération de la tension était assurée par une combinaison de vibration et de poussée sur les patins (fig. 14 et 15).

Les vérins prenaient appui sur les deux pièces d'about; leur effort était mesuré à l'aide de manomètres; on contrôlait également le rapprochement des têtes.

La poussée sur les patins était obtenue à l'aide de marteaux riveurs munis de poussoirs en forme; simultanément, des vibrateurs pneumatiques fixés sur cinq patins également espacés libéraient les frottements pendant cette opération; les vibrations étaient dirigées selon une directrice du tuyau, provoquant ainsi des mouvements louvoyants.

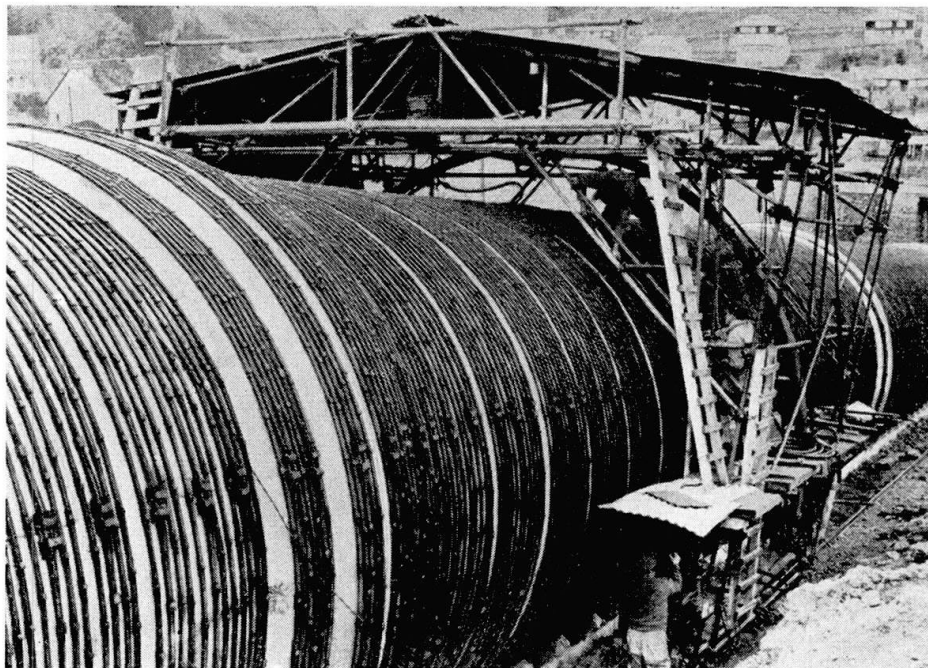


Fig. 13. Portique mobile supportant les vérins.

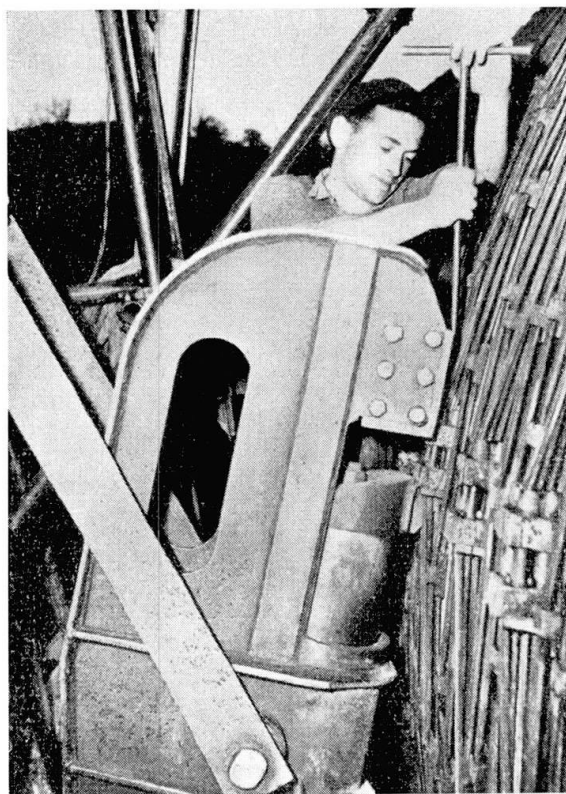


Fig. 14. Vérin hydraulique.

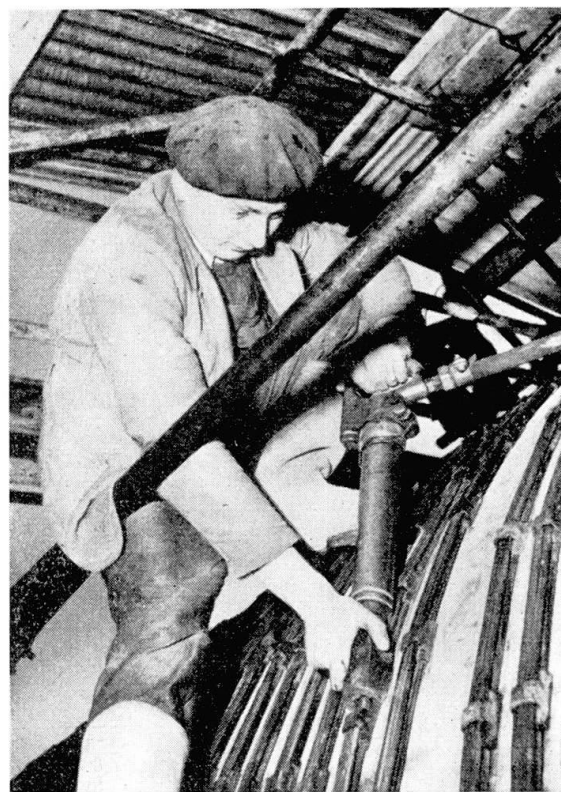


Fig. 15. Marteau poussoir.

De nombreux essais ont été effectués pour vérifier la répartition des tensions dans les frettes.

Une première méthode, simple et rapide, consistait à graver des repères à la pointe à tracer sur les fils des frettes, ainsi que sur le béton, à des espacements donnés, avant le début de l'opération. La mesure des déplacements et de l'écartement de ces repères permettait de connaître les allongements relatifs des portions de fils et, par conséquent, leur contrainte.

Cette méthode fut utilisée pour mettre au point le processus de mise en tension, mais elle manquait cependant de précision, car au cours du frettage, la frette passe de la forme circulaire à la forme polygonale. Cette déformation faisait apparaître un allongement apparent supérieur à l'allongement réel élastique, allongement apparent qu'il y avait lieu d'interpréter. La rectification aisément calculable dans les parties courantes était assez imprécise dans les extrémités en raison de la disposition des fils dans les pièces d'about.

La seconde méthode utilisait des strain-gauges répartis le long de la frette. Plus précise que la première, cette méthode n'était évidemment pas applicable en travail normal, mais elle permit de déterminer la technique de travail à employer pour obtenir à coup sûr le résultat recherché, et servait d'étalonnage à la première méthode.

Les frettes furent mise en tension une première fois, puis la tension fut reprise dans une deuxième opération de serrage, destinée à éliminer une grande partie des effets du fluage. Des essais de laboratoire ont montré qu'après cette deuxième opération, le fluage ultérieur n'était plus que de 20% de sa valeur initiale.

Les résultats obtenus par cette technique peuvent être ainsi résumés: la tension aux extrémités étant de 37 tonnes, la tension au point le moins tendu de la frette était de 22 tonnes, soit un rapport de 60%, alors qu'avec un coefficient de frottement de 0,30, le même rapport n'aurait été que de 40% sans l'emploi de la combinaison poussée-vibration.

Le rendement du frettage, c'est-à-dire, comme on l'a dit plus haut, le rapport de la plus faible contrainte du béton, compte tenu de la répartition des têtes de frette tout le long de la circonférence, à la compression qu'auraient donnée des frettes tendues partout au maximum, est voisin de 80%.

L'opération totale de frettage (mise en place et deux mises en tension) a été répartie sur 12 mois pour un nombre total de 9600 frettes. Le plus souvent, le nombre des vérins en action simultanée a été de 2, sur deux charpentes. Avec ces 4 vérins, on mettait en tension 40 à 50 frettes par poste de 8 heures à la première mise en tension et 80 à 100 frettes à la deuxième mise en tension. C'est, on le voit, un ensemble d'opérations rapides et compatibles avec les nécessités de délai d'un chantier normal.

Après mise en eau, les frettes ont été enrobées de béton dans la partie basse de la conduite et de gunite dans la partie haute, puis la conduite a été remblayée (fig. 16 et 17).



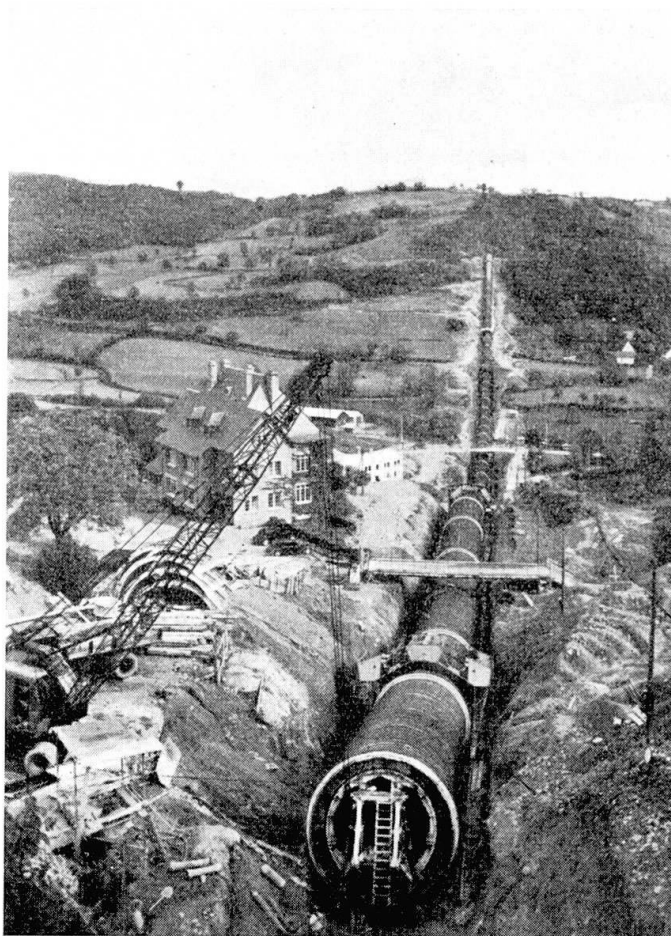


Fig. 16. Vue générale de la conduite avant gunitage.

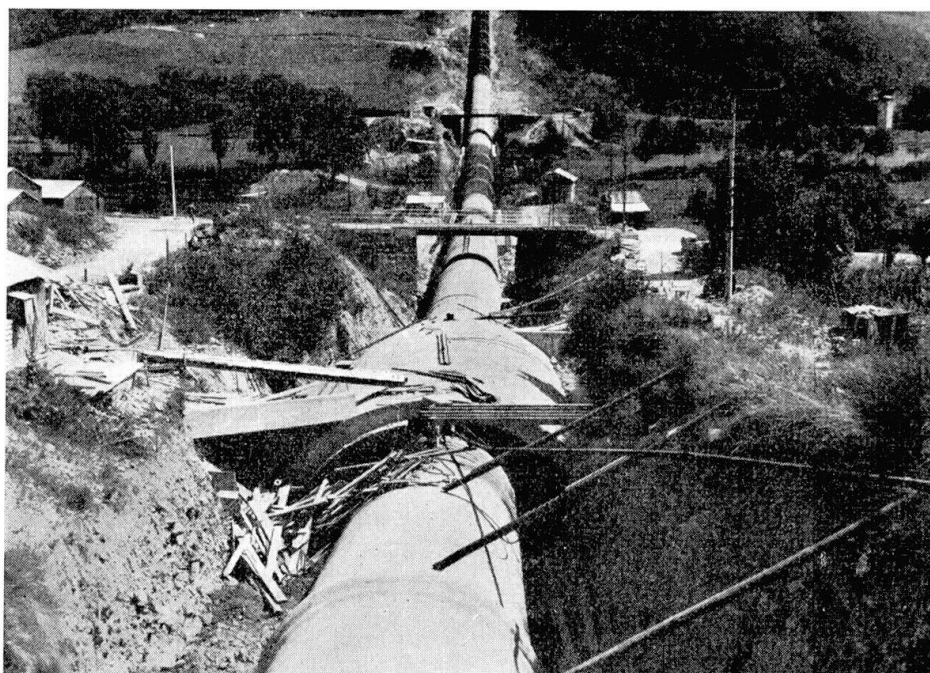


Fig. 17. Vue générale de la conduite en cours de gunitage.

### Conclusion

La construction en béton fretté du siphon des *Granges* a été une opération satisfaisante à tous les points de vue: sécurité, économie, délai. Un tel ouvrage nécessite, évidemment, de la part des projeteurs et des exécutants, un effort personnel plus grand que la construction d'une conduite métallique. Mais nous pensons que, dans beaucoup de cas, il est nécessaire, pour toutes sortes de raisons, de sortir des solutions faciles et routinières.

On peut ajouter que l'entretien de l'ouvrage construit est pratiquement nul.

Pour l'avenir, nous serions cependant tentés de couper les frettes en demi-circonférences et d'exercer l'effort de rapprochement des extrémités aux deux bouts d'un même diamètre.

On a vu que l'emploi de la combinaison poussée-vibration avait fait gagner 10 à 20% sur le coefficient d'utilisation de l'acier. Le rendement effectif du frettage serait porté de 80% à 95% si les frettes étaient, avec la même technique, tendues aux deux extrémités du diamètre. Il faudrait alors faire la balance entre le supplément de dépenses provoqué par le doublement des pièces d'extrémité, et l'économie provenant d'un meilleur rendement de l'acier de précontrainte. Il est bien possible que le bilan de l'opération soit favorable.

### Résumé

Le présent rapport donne la description du procédé de frettage employé dans l'aménagement hydroélectrique de *Bort* pour la construction d'une conduite en béton précontraint de 4 mètres de diamètre intérieur et devant supporter en service une pression d'eau de 13 kg/cm<sup>2</sup>.

Le frettage d'une conduite coulée à son emplacement définitif présente une difficulté particulière provenant du frottement de la frette sur le béton pendant la mise en tension; ce frottement se traduit par une inégalité de tension le long de la frette, et il en résulte quelques inconvénients, dont le plus grand est une mauvaise utilisation du métal.

Après avoir rappelé la technique utilisée à *Marèges* pour tourner cette difficulté, le rapport indique que, dans le cas présent, les frettes en fils parallèles passent sur des plaquettes métalliques. A l'aide d'un marteau vibreur poussant ces plaquettes, en leur imprimant un mouvement louvoyant, pendant l'opération de mise en tension, on a pu obtenir une amélioration importante de la régularité de la tension le long des frettes.

### Zusammenfassung

Der Bericht beschreibt den bei der hydroelektrischen Anlage von *Bort* angewendeten Umschnürungsvorgang für die Herstellung einer vorgespannten Beton-Rohrleitung mit einem Innendurchmesser von 4 Meter und einem Betriebsdruck von 13 kg/cm<sup>2</sup>.

Die Umschnürung einer am endgültigen Standort gegossenen Leitung bereitet wegen der Reibung der Stahlringe auf dem Beton beim Spannvorgang besondere Schwierigkeiten. Diese Reibung verursacht eine ungleiche Spannungsverteilung längs des Rings und daraus ergeben sich einige Unannehmlichkeiten, wie vor allem eine schlechte Ausnützung des Stahls.

Nach einem Rückblick auf die in Marèges verwendeten Mittel zur Überwindung dieser Schwierigkeit wird auf den vorliegenden Fall hingewiesen, wo die Ringe aus parallelen Drähten auf Metallplättchen auflagern. Diese wurden dann während des Spannvorgangs mit einem Vibrationshammer durch eine Rüttelbewegung vorwärts gestoßen und damit gelang es, eine wesentliche Verbesserung im Spannungsverlauf längs der Ringe zu erreichen.

### Summary

The report describes the method of hoop reinforcement used in the hydroelectric installation of Bort for the installation of a pre-stressed concrete pipe-conduit with a diameter of 4 m (13 ft) and a working pressure of 13 kg/cm<sup>2</sup> (185 lb/sq. in).

The binding of a pipe-conduit cast in its final position represents a special difficulty by reason of the friction of the steel rings on the concrete with the onset of stress. This friction causes an uneven distribution of stress along the rings, with some inconvenience, such as, worst of all, an uneconomic use of the steel.

After a review of the methods used at Marèges to overcome this difficulty, the report indicates that for the present case the rings of parallel wires are bedded on small metal plates. These were then pushed forward intermittently during the onset of stress, with a vibration hammer, and by this means a definite improvement in the stress distribution along the rings was achieved.