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

Band: 2 (1936)

Artikel: Le frettage des conduites forcées de l'usine hydroélectrique de Marèges

Autor: Mary, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2980

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: 07.01.2026

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

VI 6

Le frettage des conduites forcées de l'usine hydroélectrique de Marèges.

Umschnürung der Druckleitungen des Kraftwerkes in Marèges.

Hoop Reinforcement of Pressure Pipe Lines for the Hydro-Electric Plant at Marèges.

M. Mary,
Ingenieur des Ponts et Chaussées, Paris.

Le 5 Octobre 1935, M. le Ministre des Travaux Publics inaugurait le barrage et l'usine hydroélectrique de *Marèges,* destinés à l'électrification des Chemins de fer de Paris à Orléans et dont la réalisation a été confiée au Service Spécial d'Aménagement de la Haute-Dordogne, sous la direction de *M. Coyne,* Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

Cet aménagement a fait l'objet de nombreuses descriptions dans la presse technique[1]. Voici brièvement résumées; les dispositions essentielles de ces ouvrages.

Un barrage-voûte de 90 m de hauteur et de 247 m de développement en crête, construit sur la Dordogne, à 18 km en aval de Bort-les-Orgues, crée un lac artificiel de 230 hectares contenant 47 millions de mètres cubes d'eau, dont 35 millions utilisables.

A 250 m environ en aval du barrage, dans un épanouissement de la vallée dû à la présence de ruisseaux secondaires, a été édifiée la centrale hydroélectrique qui comprend 4 groupes à axe vertical de 34 000 Kw et 2 groupes auxiliaires de 2300 Kw.

La présente note a pour objet la description détaillée d'un mode de construction entièrement nouveau utilisé sur une partie du trajet des conduites forcées.

I. — *Position du problème.*

L'eau est amenée du barrage à l'usine par des galeries souterraines. Des ouvrages de prise d'eau, dont le seuil est à 35 m au-dessous du niveau de la retenue normale, partent deux galeries d'amenée à faible pente, de 6,20 m de diamètre intérieur et de 135 m de longueur environ.

Chacune de ces galeries se subdivise en 2 conduites forcées également souterraines, de 4,40 m de diamètre intérieur dont les longueurs s'échelonnent entre 120 et 150 m.

---

[1] Voir notamment les numéros des 7 Juillet 1934 et 26 Octobre 1935 du „Génie Civil".

Ces conduites souterraines débouchent dans l'usine et sont raccordées aux turbines par des tronçons de conduite métallique de 20 m de longueur.

Les figures 1, 2a et 2b donnent la disposition d'ensemble de ces ouvrages.

Les galeries d'amenée supportent au maximum une pression intérieure de 45 m d'eau; elles traversent une masse rocheuse compacte; aussi a-t-on jugé inutile d'armer le revêtement, qui est constitué par une épaisseur de béton

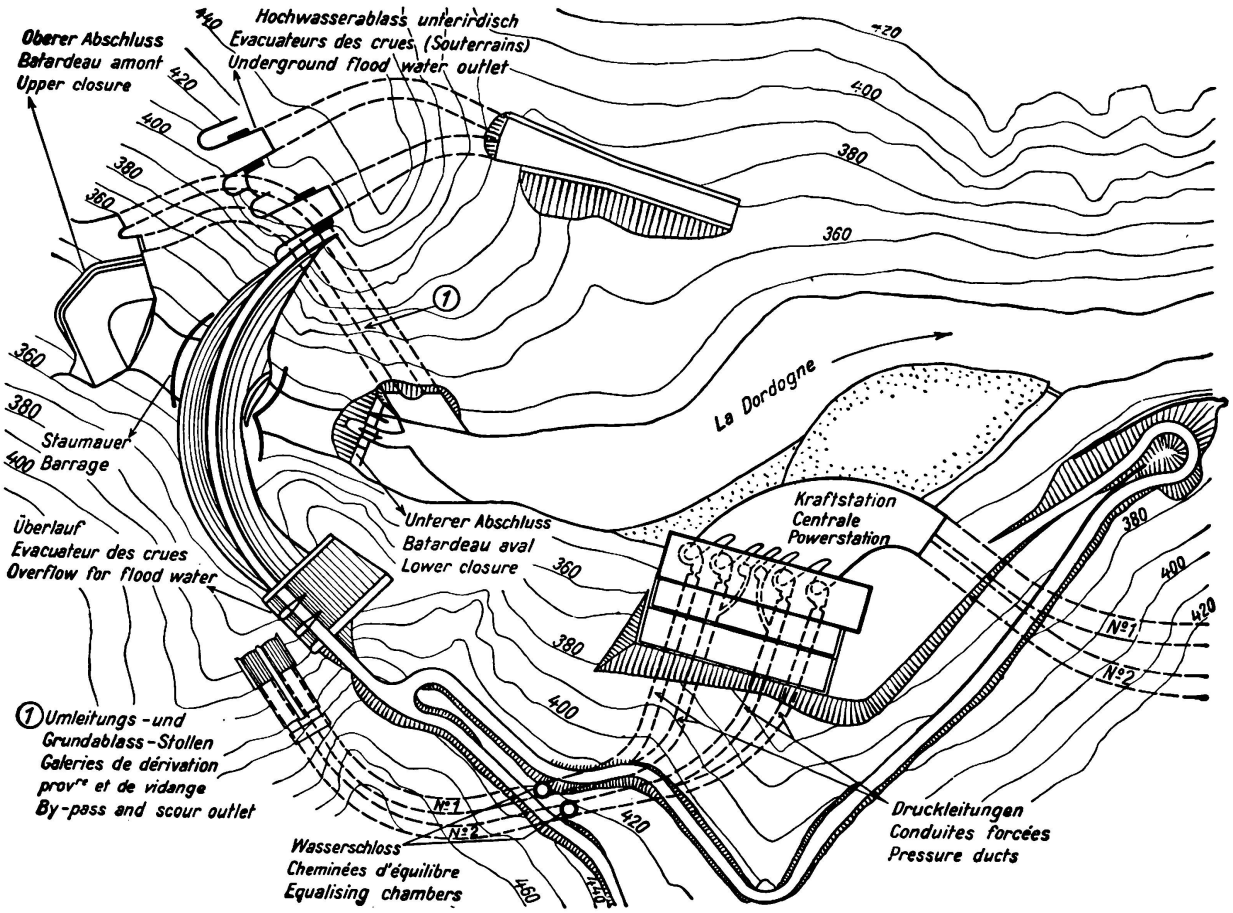


Fig. 1.

Barrage. Plan d'ensemble.

bloqué à pleines fouilles de 0,35 m en moyenne enduit au cement-gun (fig. 3). Une injection assure la liaison béton-rocher et le remplissage des diaclases.

A partir du pied des cheminées d'équilibre, la pression devient plus forte en raison de la pente des galeries et des coups de bélier provoqués par la fermeture brusque des turbines et peut atteindre, à la partie basse 102,50 m dont 72,50 m de charge statique et 30 m de majoration due aux coups de bélier. Dans cette région le rocher est de moins bonne qualité. Le revêtement a donc été fortement armé. Il est constitué par une épaisseur moyenne de 0,35 m de béton ordinaire bloqué au rocher et d'une gunite armée (fig. 4).

L'épaisseur de la couverture rocheuse ayant été jugée suffisante pour qu'on puisse en tenir compte dans la résistance de l'ouvrage, la section des cerces d'acier constituant l'armature de la gunite a été calculée de manière que le métal,

supposé seul pour résister à la pression interne, subisse une fatigue voisine de la limite élastique. En raison du concours apporté à la résistance de l'ouvrage par le revêtement bétonné et la couverture rocheuse, le taux de travail réel est beaucoup plus faible, dans une proportion qu'il était difficile de prévoir mais on était assuré qu'en aucun cas, il ne pouvait dépasser la limite élastique. Dans

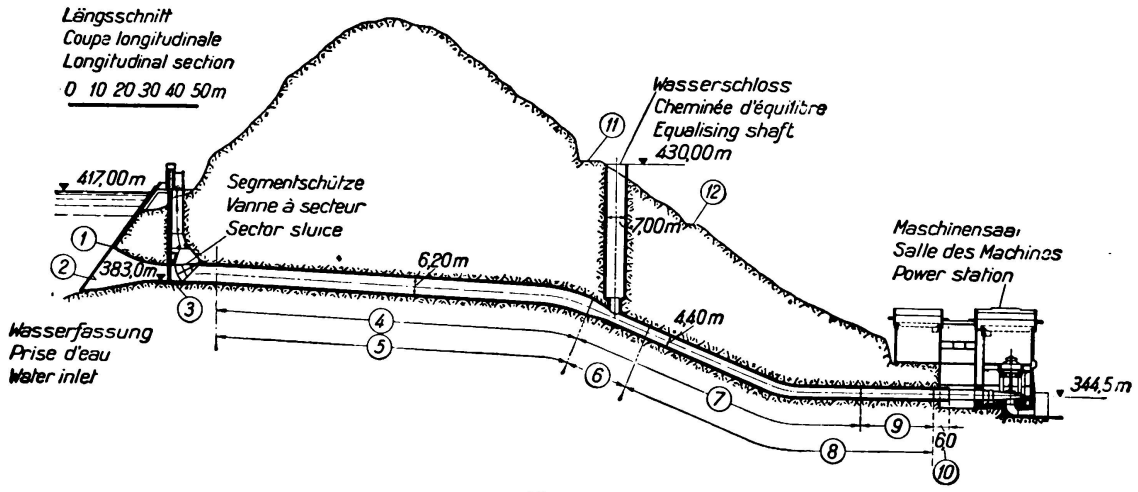


Fig. 2a.

Centrale hydro-électrique de Marèges. Prise d'eau et conduite forcée No 1.

1) Rails du dégrilleur
2) Grille
3) Batardeau
4) Gunite
5) Galerie d'amenée No 1
6) Embranchement des conduites 1 et 2
7) Gunite armée
8) Conduite No 1
9) Zone frettée
10) Ancrage de la conduite métallique
11) Route d'accès au barrage
12) Route d'accès à l'usine.

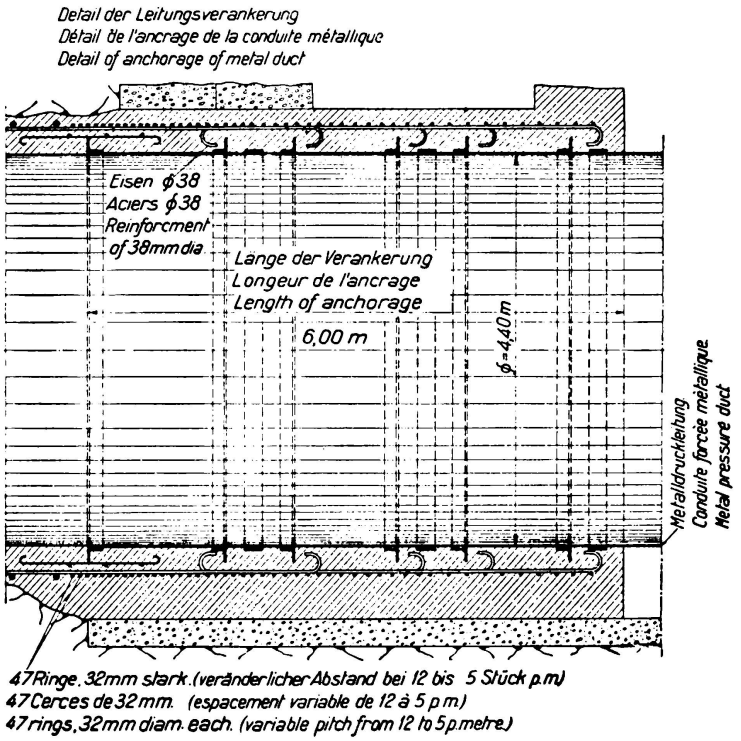


Fig. 2b.

Détail de l'ancrage de la conduite métallique.

cet ouvrage également une soigneuse injection assure la liaison parfaite béton-rocher. Des témoins sonores du système imaginé par *M. Coyne* ont été disposés en plusieurs endroits pour contrôler en service le taux de fatigue des armatures. Le 15 Janvier 1936, ce taux de fatigue s'élevait à 2,500 kg environ par mm², alors que la pression constatée au même moment aurait produit dans les armatures seules une fatigue de 10 kg/mm².

Dans les 30 derniers mètres du parcours, avant de déboucher dans les sous-sols de l'usine, où elles se raccordent avec les conduites métalliques, les galeries souterraines traversent un rocher de qualité médiocre et l'épaisseur de la cou-

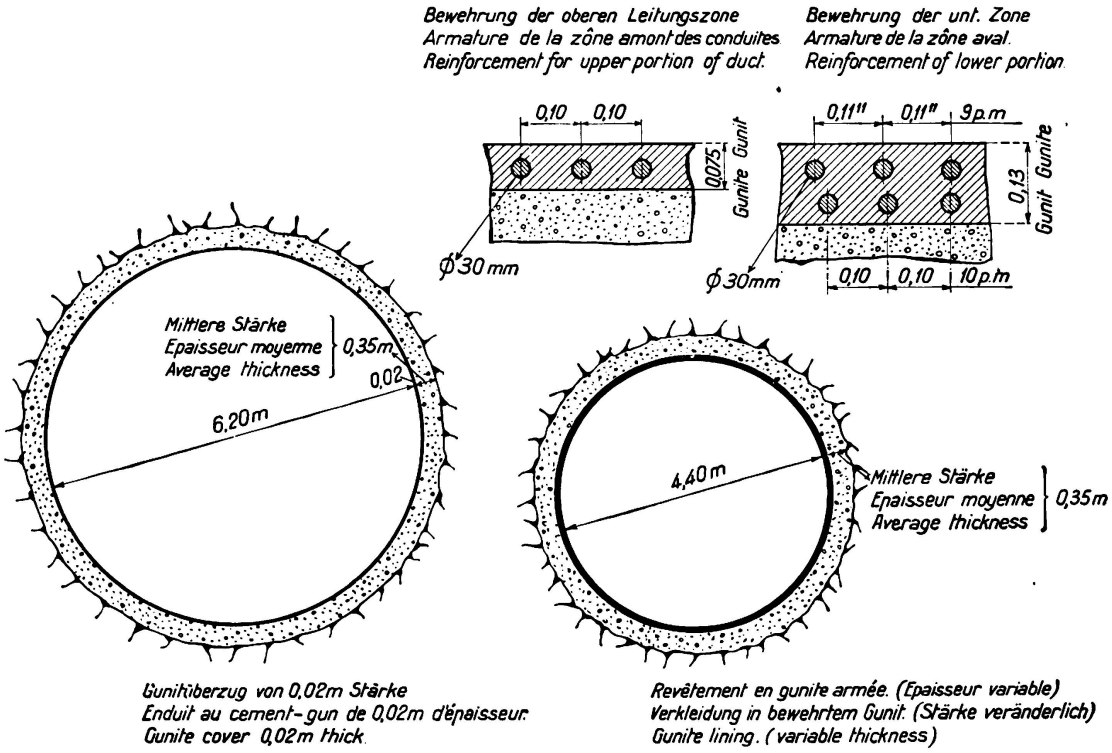


Fig. 3 et 4.

Coupe transversale des galeries d'amenée.
Coupe transversale des conduites forcées et détails d'armatures.

verture rocheuse tombe à 10 m. C'est dans cette zone que la pression de l'eau est la plus forte et peut atteindre 102,50 m y compris le coup de bélier.

Le système de construction adopté pour le reste du parcours n'a pas paru présenter dans cette zone de garanties suffisantes. En effet, tenant pour négligeable, par mesure de sécurité, la résistance de la couverture rocheuse, le problème revenait à donner à la conduite les caractéristiques de résistance d'une conduite à l'air libre.

Or, il n'existe pas, à notre connaissance, de conduites en béton armé, ayant des caractéristiques de diamètre et de pression approchant, même de très loin, des caractéristiques imposées dans notre cas. Les connaissances actuelles sur les conduites en béton armé conduisent les Ingénieurs à respecter les deux règles essentielles suivantes: 1° donner à l'armature une section suffisante pour résister seule à la pression; 2° donner au béton une épaisseur suffisante pour

que sa limite de résistance à l'extension, compte-tenu de la présence des armatures, ne soit pas dépassée. — Cette deuxième règle est essentielle, car une conduite est rendue pratiquement inutilisable par la fissuration. — L'application de ces deux règles dans notre cas aurait conduit à mettre une section d'acier de 200 cm² par mètre courant de conduite et à donner au revêtement une épaisseur d'au moins 1 m. Avec un revêtement aussi épais, les règles élémentaires de résistance à la traction simple du béton armé sont-elles applicables? C'est peu probable. Malgré l'importance et le coût de l'ouvrage ainsi réalisé, il n'était pas certain que de graves fissurations ne viendraient pas mettre en cause la bonne tenue de l'ouvrage et ne nécessiteraient pas dès le début de la mise en route de l'usine d'importants travaux de consolidation.

La conduite en béton armé étant rejetée, la seule solution classique consistait à prolonger à l'intérieur du souterrain, sur une trentaine de mètres de longueur, la conduite métallique.

Deux procédés étaient possibles: le premier consistait à disposer la conduite libre dans un souterrain assez grand pour qu'on puisse la visiter à l'extérieur, mais cela conduisait à une excavation énorme, avec l'obligation de la revêtir pour s'opposer aux éboulements du rocher. Le deuxième qui est le procédé le plus classique consistait à bloquer de béton l'espace compris entre la conduite et le rocher, ce qui constitue un travail malcommode et coûteux.

Quelle que soit la solution choisie, le prix de l'ouvrage aurait atteint des chiffres considérables.

C'est dans une recherche d'économie que nous fûmes conduit à chercher une autre solution et à proposer la réalisation d'une conduite en béton ordinaire frettée par des câbles d'acier.

II. — *Premières recherches — expériences préliminaires.*

L'une des plus grosses difficultés à résoudre était de réaliser le frettage en souterrain. Dès le début de l'établissement du projet, on considéra que le frettage devait être nécessairement réalisé sous la forme suivante (fig. 5): le déblai de la galerie étant exécuté sur la totalité de la section les câbles seraient mis en place contre la paroi rocheuse dans des tubes circulaires; puis la conduite serait bétonnée, le béton étant bloqué au rocher, et les tubes noyés dans le béton; après quelques jours de durcissement, le câble serait mis en tension et calé, puis le tube rempli de ciment pour assurer la conservation du métal; une injection entre béton et rocher augmenterait le coefficient de sécurité, en faisant participer le rocher à la résistance de l'ouvrage.

La principale difficulté à résoudre était de déterminer le mode d'attaque des câbles pour leur mise en tension.

Le premier projet (fig. 6) comportait une galerie latérale laissant accessible l'une des extrémités du câble, l'autre extrémité étant noyée dans le béton. Mais avec cette disposition la tension du câble diminue progressivement de l'extrémité soumise à l'attaque des vérins jusqu'à l'autre extrémité, en raison du frottement du câble sur sa gaine.

Des expériences furent dès lors entreprises pour déterminer le coefficient de frottement câble/tôle, et pour essayer de trouver des substances susceptibles de

réduire ce coefficient dans la plus large mesure possible. Nous n'avons pas trouvé de substance réduisant le coefficient de frottement au-dessous de 0,10 à 0,15; en admettant 0,15 la tension à l'extrémité scellée du câble n'atteindrait que

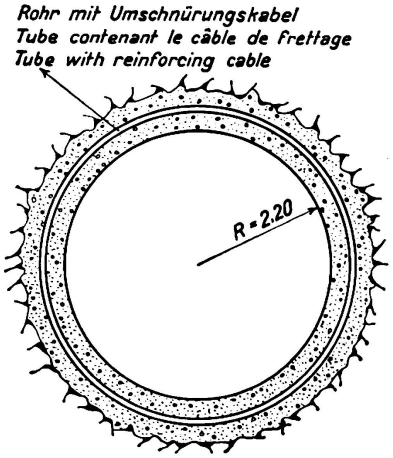


Fig. 5.
Coupe schématique d'une conduite frettée.

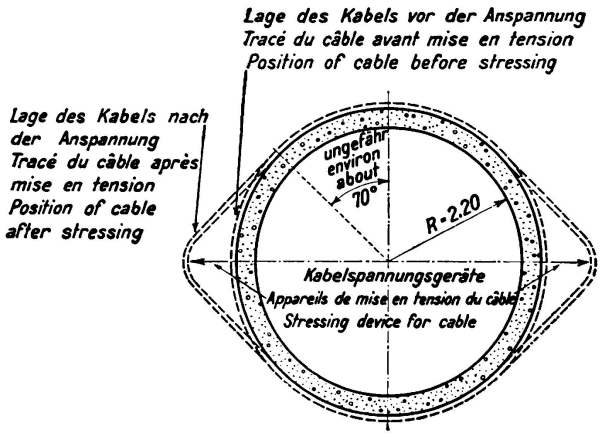


Fig. 7.
Deuxième projet schématique de frettage.

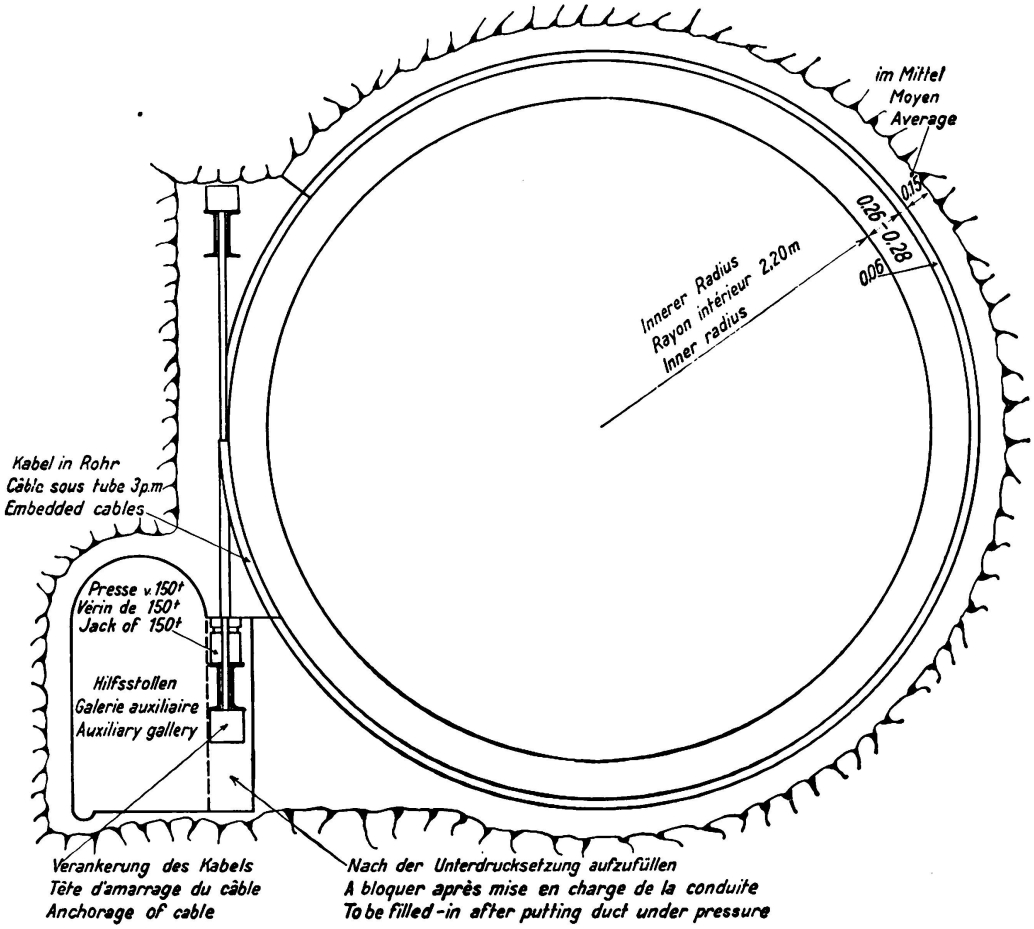


Fig. 6.
Projet de frettage, par mise en tension de câbles métalliques, d'une conduite forcée souterraine.

la fraction $\frac{1}{e^{2\pi \times 0,15}} = 0,385$ soit le tiers environ de la tension exercée par les vérins à l'autre extrémité. Une telle irrégularité de tension ne crée pas dans la conduite de flexions susceptibles de la fissurer: la courbe des pressions reste très bien centrée et ne s'écarte de la fibre moyenne que de quantités très petites, mais il n'en reste pas moins que le câble est très mal utilisé. Pour améliorer ce dispositif, il faudrait tout au moins rendre libres les deux extrémités du câble, de manière à les soumettre toutes les deux à l'action des vérins et à réduire à une demi-circonférence la longueur de la surface frottante. Le rapport des tensions extrêmes du câble s'élèverait alors à $\frac{1}{e^{\pi \times 0,15}} = 0,62$ soit une réduction de 38 %.

Il doit être possible d'aller plus loin dans cette voie notamment en utilisant des graphites pour le graissage du câble, mais nous n'avons pas poursuivi cette

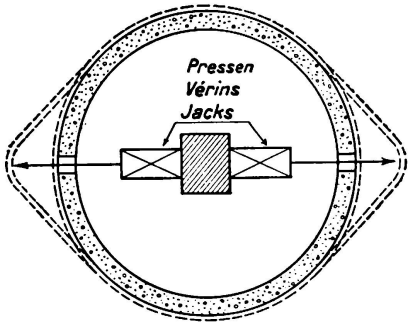


Fig. 8.
Schéma.

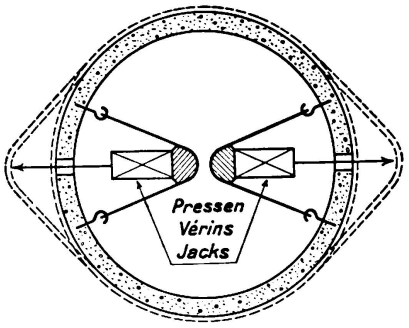


Fig. 9.
Schéma adopté.

recherche car une suggestion particulièrement intéressante nous a été faite à cette époque par *M. Guerrier,* Ingénieur des Entreprises *Léon Ballot,* suggestion qui nous a permis de donner à l'opération du frettage une forme très pratique et où le coefficient de frottement ne joue plus qu'un rôle tout à fait secondaire: *M. Guerrier* nous a proposé de mettre le câble en tension en déformant son tracé comme l'indique la fig. 7.

Cette disposition permet de placer les vérins à l'intérieur de la conduite elle-même et de supprimer la galerie auxiliaire. Les effets du frottement du câble sur sa gaine se trouvent réduits à une portion de circonférence ayant environ 70° d'angle au centre.

Le dispositif qui pouvait paraître le plus simple à priori consistait à appuyer les deux vérins l'un contre l'autre (fig. 8); mais le câble ne portant sur la conduite que sur une partie de la circonférence, crée une tendance à l'ovalisation: la courbe des pressions s'éloigne d'une manière considérable de la fibre moyenne. Pour rétablir un équilibre élastique tel que la courbe des pressions reste voisine de la fibre moyenne, on aurait pu songer à ajouter des tirants dont l'état de tension aurait été minutieusement réglé à chaque instant de l'opération. Cette condition est extrêmement délicate à remplir et n'a pas paru compatible avec une réalisation pratique. On a jugé préférable d'adopter le dispositif consistant à laisser les deux vérins indépendants l'un de l'autre, chacun d'eux prenant appui sur la conduite elle-même à l'aide de câbles scellés comme l'indique la fig. 9.

Ce point essentiel étant réglé, le projet du frettage a pris la forme définitive indiquée sur la fig. 10. Le tube de protection du câble présente sur les deux extrémités du diamètre horizontal deux épanouissements en forme de boîte plate permettant au câble de prendre la déformation nécessaire pour sa mise en tension. A la partie basse, les deux extrémités du câble sont munies de culots d'ancrage

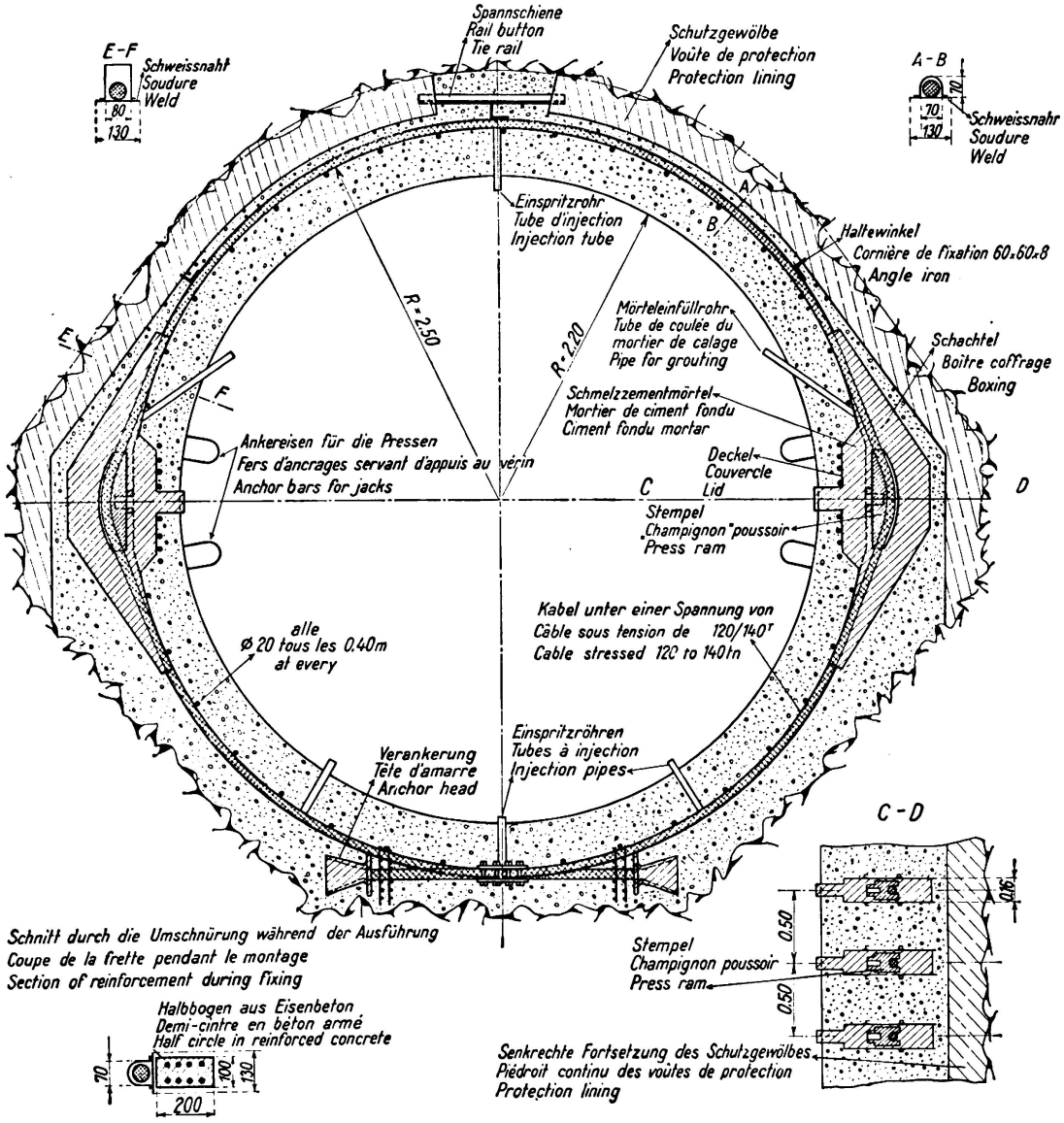


Fig. 10.

Conduites forcées. Partie frettée. Coupe sur une frette.

en acier coulé noyés dans le béton et s'appuyant l'un sur l'autre par l'intermédiaire de ce béton. A son passage dans les boîtes latérales, le câble est accessible aux vérins placés à l'intérieur de la conduite, grâce à un orifice ménagé à cet effet; les vérins exercent leur action sur le câble par l'intermédiaire de pièces en acier coulé, appelées champignons, enfermées dans les boîtes et dont l'objet est de donner au câble, dans la zone déformée, un rayon de courbure assez grand pour empêcher la rupture des fils par flexion. Les vérins prennent appui

sur la conduite par l'intermédiaire de fers d'ancrage encadrant les boîtes. Tous ces dispositifs seront décrits en détail plus loin.

Le projet ainsi conçu présente un certain nombre de hardiesses, qui ne permettaient pas de se lancer dans une réalisation en grand, sans que des essais préalables eussent donné des apaisements suffisants:

Tout d'abord l'importance et l'encombrement du matériel mis en oeuvre autour de chaque câble entraînaient l'obligation de réduire dans toute la mesure possible le nombre de câbles par m courant de conduite; diverses conditions nous ont conduit à fixer ce nombre à deux, chaque câble devant être tendu à 110 t au moins. Mais comment se comporterait une conduite en béton soumise à des charges localisées aussi élevées? Seule l'expérience pouvait le dire.

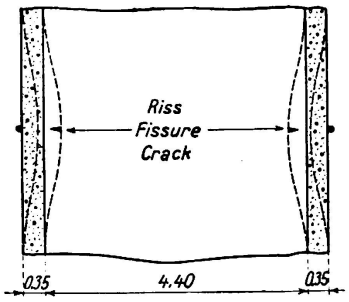


Fig. 11.

Déformation longitudinale d'une conduite frettée localement.

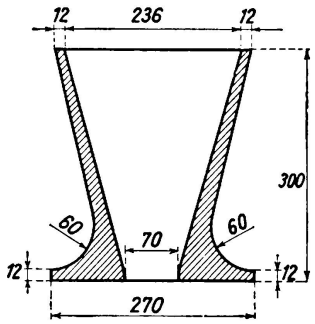


Fig. 12.

Coupe d'un culot d'ancrage.

D'autre part: la théorie montrait bien que malgré la localisation d'efforts résultant de l'attaque du câble par les vérins en deux points seulement de la circonférence, la courbe des pressions restait très voisine de la fibre moyenne. Mais ce fait méritait d'être vérifié expérimentalement.

Enfin, l'expérience seule pouvait dire comment se comporterait le béton sous l'énorme pression locale exercée par le câble et de quelle importance serait l'empreinte du câble dans le béton.

On décida donc de faire un essai en vraie grandeur sur un cylindre vertical de 4,40 m de diamètre et de 25 cm d'épaisseur très peu armé. Les conclusions essentielles qu'on en a tirées sont les suivantes:

1° — Une seule fissure a été observée, lorsque la tension du câble a atteint 125 t, fissure de flexion ne présente en réalité, aucun caractère de gravité pour câble. C'est une fissure due à la flexion longitudinale des parois (fig. 11). On en déduit que, dans les conditions de l'expérience, si on veut pousser la tension des câbles au delà de 125 t, il faut s'abstenir de mettre en tension un câble isolé, et effectuer la mise en tension simultanée de plusieurs câbles voisins. On voit d'ailleurs immédiatement que, un câble ayant été tendu par exemple à 120 t, de manière à éviter la fissuration, les forces de traction qui tendent à produire cette fissuration décroissent beaucoup au fur et à mesure de la mise en tension des câbles voisins, de sorte que, le frettage de la conduite étant terminé, il n'y a plus aucun danger que la fissuration se produise par la suite. Il convient d'ailleurs d'ajouter que cette

fissure de flexion ne présente, en réalité, aucun caractère de gravité pour la conduite, mais nous avons cependant tenu à l'éviter.

2° — La tension du câble ayant été poussée jusqu'à 156 t aucune autre fissure n'est apparue et notamment aucune fissure longitudinale; de telles fissures n'auraient pas manqué de se produire si la courbe des pressions était sortie du tiers central de la section.

3° — Les appareils de mesure disposés sur la surface (témoins sonores de *M. Coyne)* ont montré que, dans le sens longitudinal, la fatigue du béton se répartissait sur une longueur de 1 m de part et d'autre du câble, bien que l'épaisseur de la paroi ne fût que de 0,25 m. Ce résultat donnait tout apaisement sur le projet définitif comportant des câbles espacés de 0,50 m pour une épaisseur minimum de paroi de 0,40 m: on était sûr, dès lors, que malgré la concentration du frettage en un petit nombre de câbles très fortement tendus, la compression du béton serait pratiquement uniforme.

4° — Enfin, on put constater que la câble et sa gaine ne laissaient pas sur la surface du béton d'empreinte sensible.

Les essais ayant parfaitement réussi, il fut décidé de passer à l'application du procédé sur une longueur de 28,50 m à la partie basse de chaque conduite forcée, soit en tout 114 m.

D'autres essais furent également effectués pour fixer certains détails du projet.

L'une des premières questions à résoudre était de définir un dispositif économique de fixation du câble à ses extrémités. Une solution à priori possible consistait simplement à noyer ces deux extrémités dans le béton de la conduite elle-même, en comptant sur l'adhérence pour assurer l'ancrage. Il était nécessaire dans ce cas de détoronner complètement le câble sur une certaine longueur aux deux bouts, car on ne peut pas compter sur l'adhérence d'un câble ou d'un toron, un effort de traction produisant une diminution sensible du diamètre. Mais ces innombrables fils enchevêtrés les uns dans les autres auraient rendu difficile le bétonnage de la conduite. On a donc jugé préférable de terminer le câble par des culots analogues à ceux qu'on emploie dans la construction des ponts suspendus. Les essais ont montré que des culots en acier coulé pesant 30 kg (fig. 12) étaient largement suffisants pour supporter un effort de traction supérieur à 220 t. Aucune rupture de culot, ni aucune rupture d'adhérence des fils n'a pu être constatée. Le câble s'est toujours rompu à sa limite normale de rupture; de plus il ne s'est presque jamais rompu à sa sortie du culot: ce point paraissait cependant à priori légèrement affaibli par la courbure des fils. Ajoutons que, au lieu de faire le remplissage en métal fondu comme on le fait habituellement pour les ponts suspendus, nous l'avons effectué en mortier de ciment et le résultat est tout à fait probant. Nous avons également réussi à faire des culots entièrement en béton armé, mais notre choix s'est porté finalement sur le culot en acier.

Un autre problème très important était d'effectuer le calage des câbles après mise en tension, calage à interposer entre le champignon en acier et le couvercle de la boîte plate et permettant la libération des vérins. Il était impossible d'introduire dans cet espace un corps façonné d'avance, on ne pouvait qu'y couler une

matière fluide susceptible de faire prise, et il fallait que cette matière fût capable d'acquérir en peu de temps une résistance suffisante pour supporter une compression de plus de 100 kg/cm². Après quelques essais infructueux de calage au sable sec, notre choix s'est fixé définitivement sur un calage au mortier de ciment fondu qui nous a donné toute satisfaction: Au bout de 6 ou 7 h après la coulée, on peut sans danger enlever les vérins; le ciment ainsi coulé dans une boîte complètement close de toute part et fretté en quelque sorte dans toutes les directions ne subit qu'un tassement minime au moment de l'enlèvement des vérins (moins d'un millimètre, alors que la déformation subie par le câble pour sa mise en tension est d'environ 13 cm).

Des essais furent en outre effectués sur les câbles pour déterminer leur allongement élastique et leurs déformations permanentes, de manière à calculer notamment la profondeur à donner aux boîtes plates. Ces essais nous ont montré que l'on pouvait compter sur une déformation à peu près élastique, le coefficient d'élasticité étant environ la moitié de celui de l'acier.

Signalons enfin les essais de perte de tension du câble avec le temps, qui nous ont montré que cette porte ne pouvait pas atteindre de chiffres bien considérables, et qui nous ont simplement incités à pousser la tension à 135 t, au lieu des 110 t strictement nécessaires.

III. — *Description détaillée du dispositif.*

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue tous les détails du projet d'exécution, et indiquer brièvement les raisons qui nous ont conduit à ces dispositions:

1° — *Câbles:* Ainsi qu'il est dit au dernier alinéa du chapitre précédent, les câbles ont été tendus à 135 t. Cela nous a conduit à prendre des câbles ayant une résistance à la rupture de 220 t. Le taux de travail, voisin de la limite élastique, peut paraître élevé en comparaison des taux admis usuellement dans les constructions. En réalité, au moment de la mise en tension du câble, on règle la tension à un chiffre parfaitement connu; l'essai de frettage d'un cylindre vertical nous avait montré que le câble ne présentait en aucun point de flexions susceptibles de réduire sa charge de rupture; il n'y a donc pas lieu de craindre que le taux de travail réel puisse être supérieur au taux de travail prévu, et par conséquent de conserver dans cette opération une marge exagérée de sécurité. D'ailleurs dans les instants qui suivent la mise en tension et le calage, la tension du câble ne peut avoir que tendance à diminuer. Une fois le calage effectué, l'anneau de béton comprimé et le câble, dès lors solidaires, subissent sous l'action de la pression d'eau intérieure des allongements égaux, mais ces allongements sont très faibles: la pression statique donne au câble un supplément de tension qu'on peut évaluer à 3 t environ, et le coup de bélier une augmentation de 1 t appliquée progressivement pendant la durée de la fermeture des aubes, soit 4 secondes environ. Ce sont ces suppléments de tension, par rapport à la tension initiale de 135 t qui constituent les seules forces mal connues du problème et pour lesquelles on dispose d'un très large coefficient de sécurité.

Les câbles sont constitués de 6 torons de 19 fils clairs de 4,15 mm de diamètre et de 130 kgm/mm² de résistance à la rupture.

2° — *Culots d'ancrage:* La fig. 12 déjà commentée au chapitre II indique clairement la solution adoptée.

3° — *Tubes et Boîtes plates:* L'organe de protection du câble comprend trois tronçons de tube et deux boîtes plates. Pour la commodité de l'exécution, dont le détail est donné plus loin, les tronçons de tube ont été faits en deux parties: un demi tube dont la section est en forme de Ω et un plat de fermeture; le demi tube est cintré au rayon de 2,50 m.

Les boîtes plates dont l'objet est de permettre la déformation du câble sont constituées comme l'indique la fig. 13; elles sont en deux parties: boîte proprement dite et couvercle, ce dernier muni d'un tube court formant orifice d'accès au câble après bétonnage.

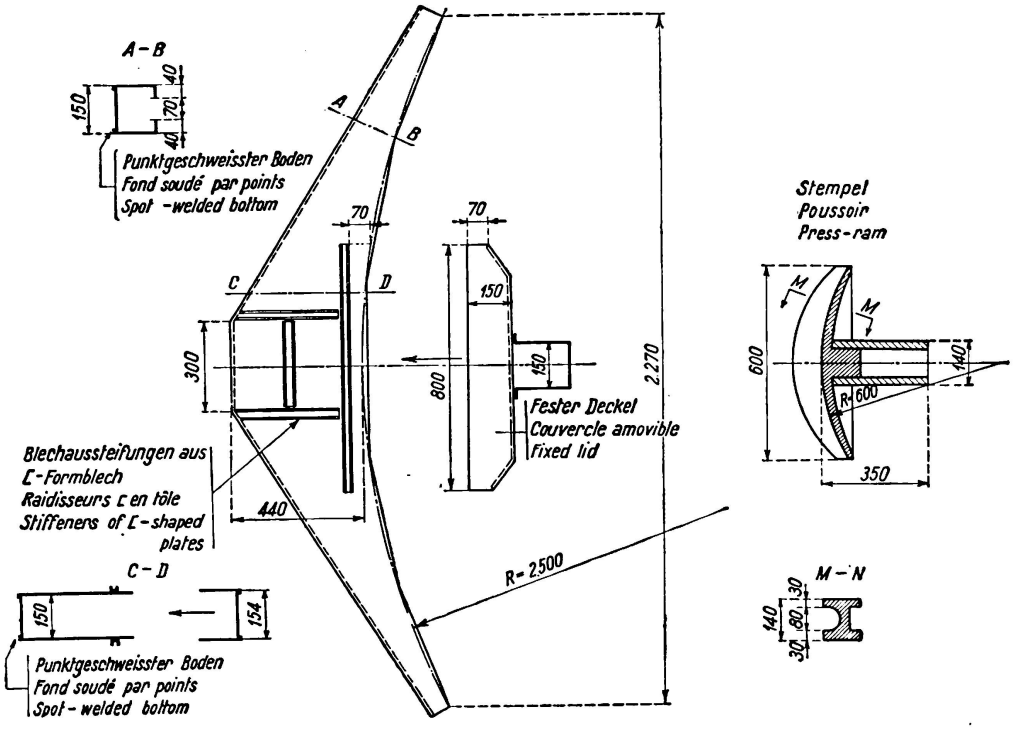


Fig. 13.

Conduites forcées. Boîte métallique pour procédé de frettage.

4° — *Champignons:* Le champignon en acier coulé (fig. 14) est logé dans la boîte; c'est par son intermédiaire que le vérin agit sur le câble, et il a pour objet de donner au câble un rayon de courbure acceptable. C'est le mortier coulé entre le champignon et le couvercle de la boîte qui forme calage permettant l'enlèvement des vérins.

5° — *Armatures:* Aucune armature circulaire n'a été prévue; quelques barres de 20 mm espacées de 0,40 m forment une très légère armature longitudinale, que nous considérons d'ailleurs comme superflue étant donnée l'étendue de la répartition longitudinale de l'effort exercé par chaque cerce. Cette armature longitudinale est considérablement renforcée à l'extrémité aval de la partie frettée par les fers d'ancrage des conduites métalliques.

Les ferraillages les plus importants sont ceux que nécessite d'une part l'ancrage des vérins, d'autre part la réaction permanente du câble s'exerçant, au

droit des boîtes plates, sur la faible épaisseur de béton restant entre le couverte des boîtes et l'intrados de la conduite forcée.

La fig. 15 dans laquelle sont représentés en outre les fers longitudinaux de 38 mm formant ancrage de la conduite métallique, montre le dispositif adopté.

Au milieu de chaque intervalle entre deux câbles consécutifs: deux étriers de 28 mm dont les plans sont parallèles et distants de 7 cm, constitués chacun d'une

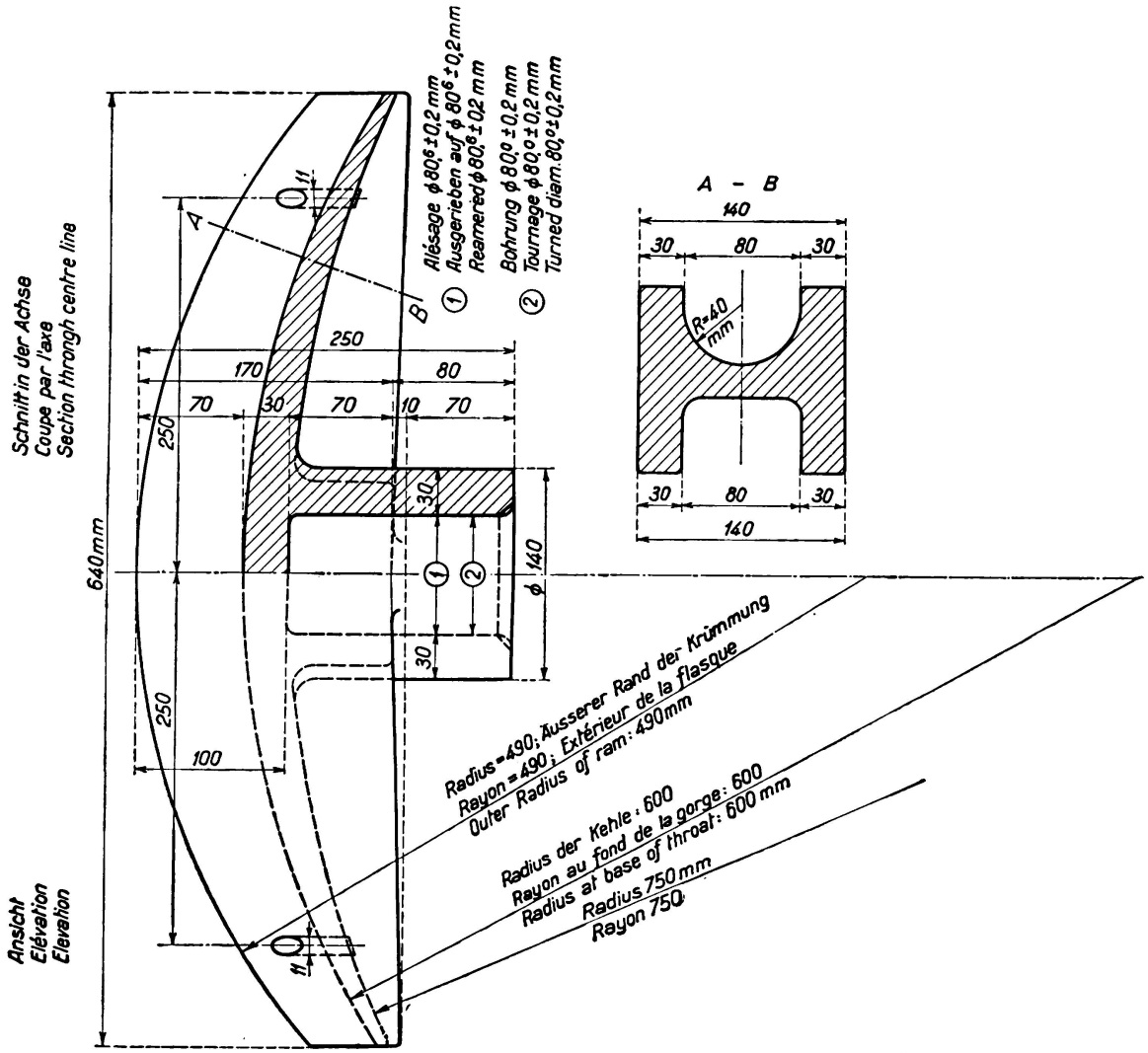


Fig. 14.

Frettage des conduites forcées. Poussoir.

seule pièce, laissent sortir à l'intérieur de la galerie deux boucles de 150 mm de diamètre à 0,325 m au-dessus et au-dessous de l'axe horizontal de la conduite. Le vérin chargé de mettre le câble en tension peut ainsi prendre appui sur 4 boucles doubles dont chacune doit pouvoir supporter un effort de traction de 30 t en travail normal.

Les fers chargés de reporter dans toute l'épaisseur de la conduite la pression de 100 à 120 t exercée, après calage, par le champignon sur la languette de béton enrobant le couvercle de la boîte, sont placés horizontalement et réalisent par leur courbure régulière à grand rayon un frettage de cette languette.

Enfin, devant chaque culot d'ancrage des extrémités de câbles une double grille en fers de 8 mm à maille de 6 cm assure un frettage du béton qui est fortement comprimé par le culot (fig. 10).

6° — *Chariot porte-vérins:* Les vérins sont portés par un chariot roulant sur une voie provisoire. Deux chariots ont été utilisés, l'un porte deux vérins, l'autre quatre (fig. 16).

Chaque vérin repose sur un sommier métallique porté par le chariot, mais libre de ses mouvements par rapport à celui-ci avec un jeu de 10 à 15 mm dans tous les sens. Le sommier est traversé par deux tiges filetées de 110 mm avec écrou, placées de part et d'autre du vérin, sur une même horizontale et à 25 cm

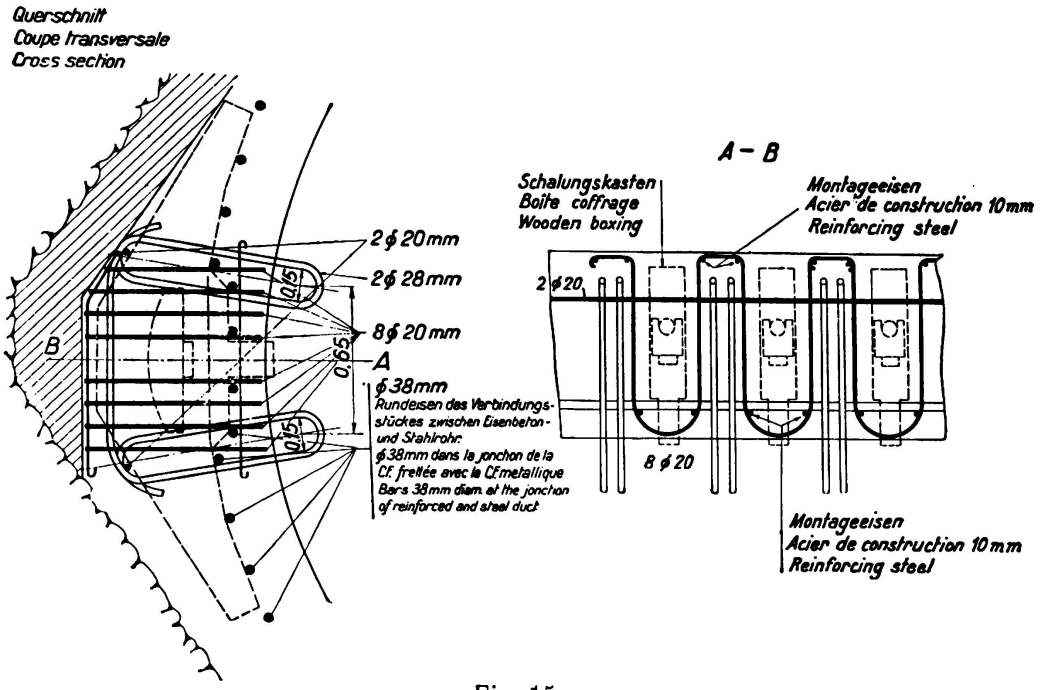


Fig. 15.

Conduites forcées. Partie frettée. Ferraillage au droit des poussoirs.

de celui-ci; chacune de ces tiges porte une fausse poulie sur laquelle passe un câble muni de boucles à ses extrémités et qu'on peut fixer à l'aide d'axes, rondelles et goupilles aux boucles d'ancrage décrites au paragraphe 5 ci-dessus.

En position de repos, les vérins sont portés par un dispositif de pointage à vis qui permet de les diriger rapidement dans l'axe de l'orifice d'accès au câble. En position de travail, ils prennent appui sur les ancrages et les jeux dont dispose le sommier assurent la non-participation du chariot aux efforts développés.

IV. — *Réalisation du frettage.*

1° — *Préparation des câbles de frettage:* Les câbles sont approvisionnés en longueur de 18,50 m, chaque longueur étant nécessaire et suffisante pour former une frette. Ils portent une ligature à 32 cm de chaque extrémité. On enfile à chacune d'elles un culot d'ancrage, puis on détoronne le câble en fils, qu'on termine en crochets et le chignon ainsi préparé est scellé dans le culot avec

du mortier de ciment fondu au dosage de 50 kg pour 50 kg de sable de 0 à 5 mm. La fig. 17 montre les phases de ce travail.

2° — *Préparation des frettes: M. Pfaff,* Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat, qui a mis au point toute la réalisation du frettage, a eu l'idée de constituer les cerces d'une manière rigide avant leur transport en souterrain, plutôt

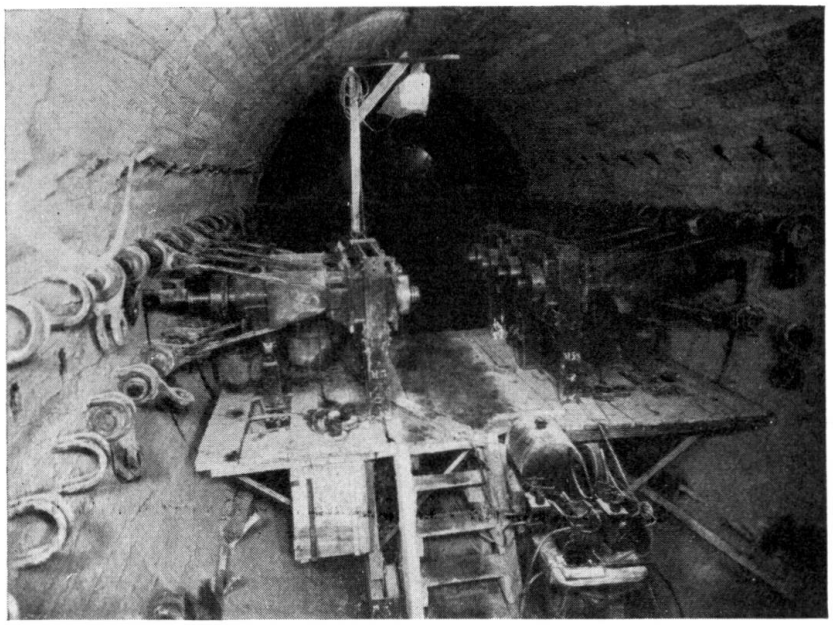


Fig. 16.

Chariot porte-vérins.

que de faire sur place l'assemblage des câbles, des gaines et des boîtes, qui se serait révélé fort malaisé.

Il a donc construit en dehors du souterrain une plateforme d'assemblage composée de deux demi-cintres mobiles en béton armé de ciment fondu au rayon extérieur de 2,50 m, placés horizontalement à 1 m du sol (fig. 18).

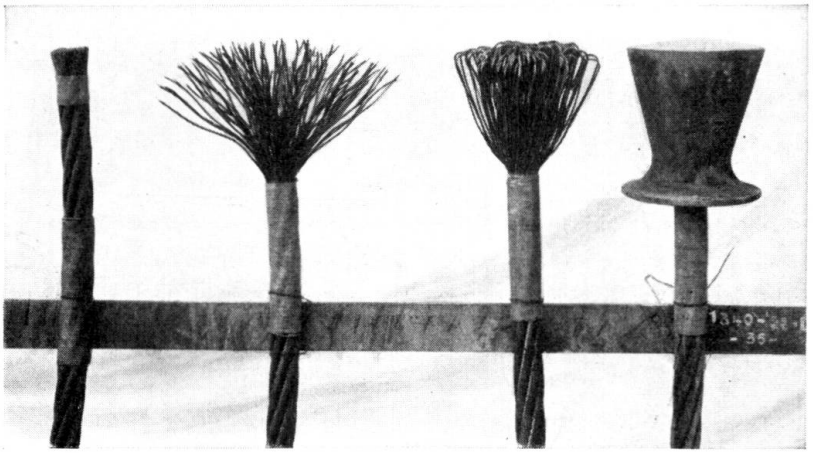


Fig. 17.

Exécution des culots d'ancrage.

Le câble est d'abord mis en place autour de ce cintre et posé provisoirement sur des cales; puis les trois éléments de plat de fermeture des gaines sont introduits entre le câble et le cintre, ensuite les deux extrémités du câble sont serrées, à leur point de rencontre, à l'aide d'une mordache, deux vérins à vis placés entre les extrémités des demi-cintres sont alors actionnés pour tendre légèrement le câble et lui donner exactement le diamètre de 5,00 m. Enfin, les gaines en Ω, et les boîtes sans leurs couvercles, sont mises en place et soudées par points au plat de fermeture.

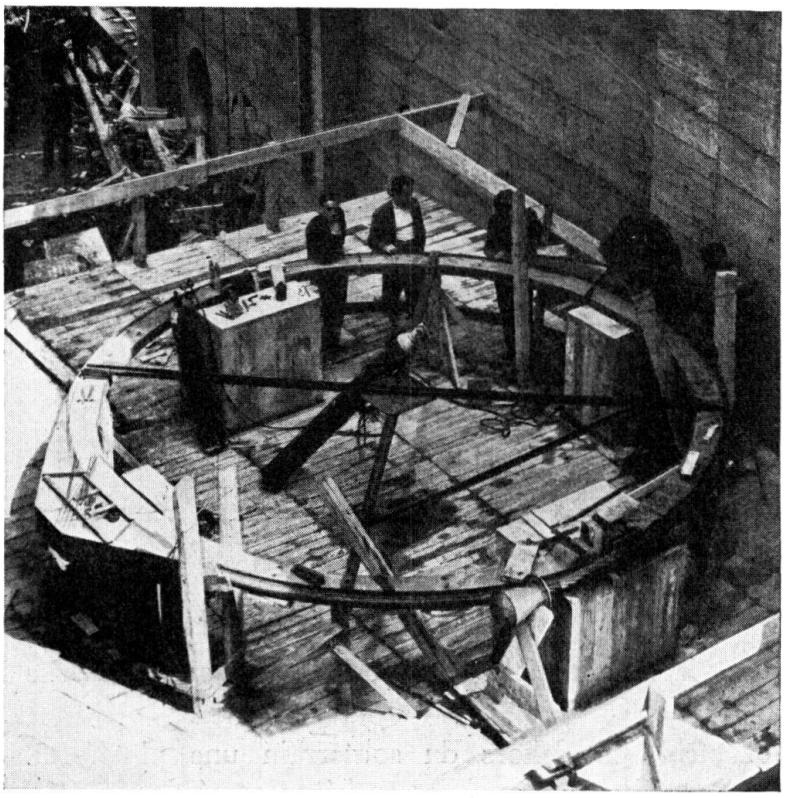


Fig. 18.

Préparation d'une frette.

La préparation d'une frette demande moins de trois heures et l'erreur commise sur le diamètre est seulement de quelques millimètres.

3° — *Mise en place des frettes:* L'ensemble rigide ainsi constitué, pesant environ 600 kg, doit être transporté et mis en place dans le souterrain, dont le gabarit est à peine plus grand. Il y est amené par un derrick, et transporté par un chariot roulant sur deux voies latérales (fig. 19). Puis on procède au réglage et à la fixation des frettes sur quelques cours de cornières scellées au rocher pour éviter les déplacements ultérieurs (fig. 20).

4° — *Suite des opérations de construction:* On bétonne d'abord la partie inférieure de la conduite, puis on met en place les champignons poussoirs, les couvercles des boîtes, les armatures. Les fig. 21 et 22 montrent l'aspect de la conduite après ces opérations.

Le bétonnage est alors effectué. On l'a réalisé en béton de gravier cassé de

70 mm, sauf dans les parties armées où il a fallu descendre à 30 mm. Le dosage adopté a été de 400 kg de ciment métallurgique «Portland de fer».

5° — *Mise en tension et calage des frettes:* Au bout d'une quinzaine de jours de durcissement, on procède à la mise en tension des frettes (fig. 16). Le chariot

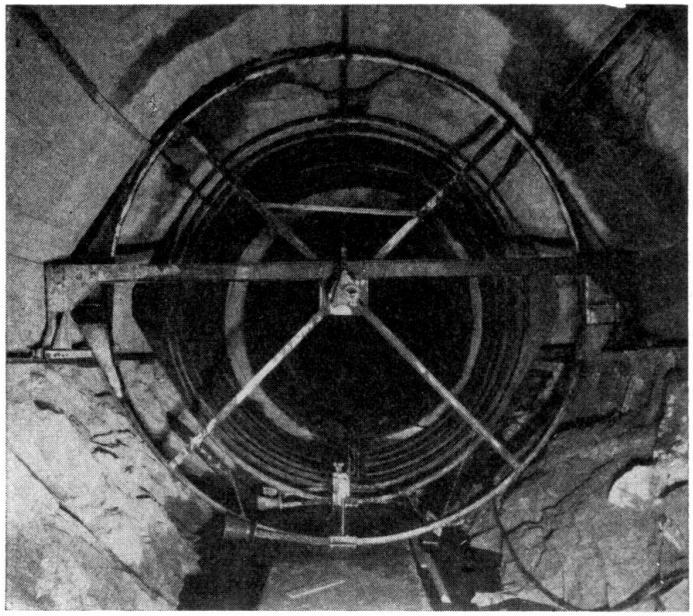


Fig. 19.
Mise en place des frettes.

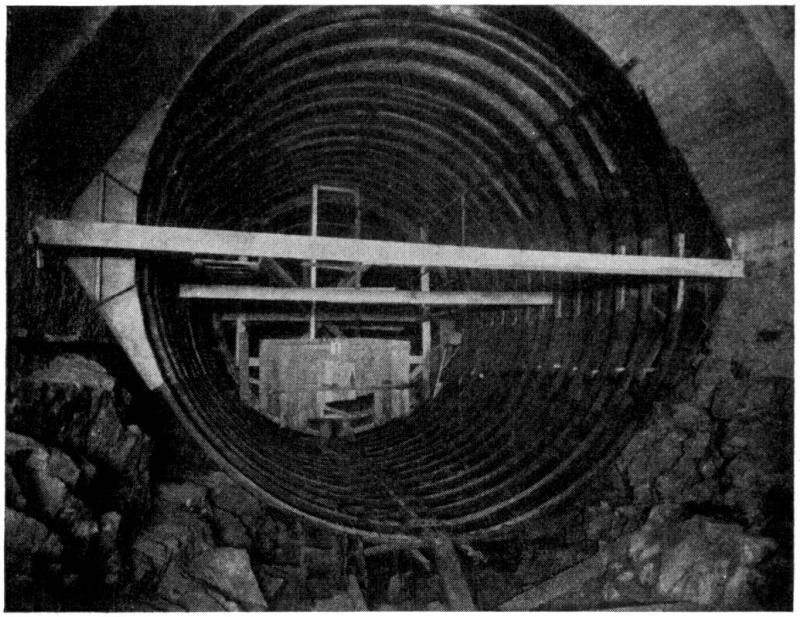


Fig. 20.
Vue des frettes après réglage.

porte-vérins est amené devant le câble à mettre en tension, chaque vérin est pointé vers l'orifice du couvercle de la boîte plate; une tige poussoir est interposée entre le champignon et la tige du vérin, et le vérin calé en position. Les élingues latérales

sont accrochées aux boucles d'ancrage et légèrement tendues à l'aide des écrous des tiges filetées.

On introduit alors dans le corps du vérin la pression d'huile pour la mise en tension du câble, en mettant en route une petite pompe électrique, qui agit

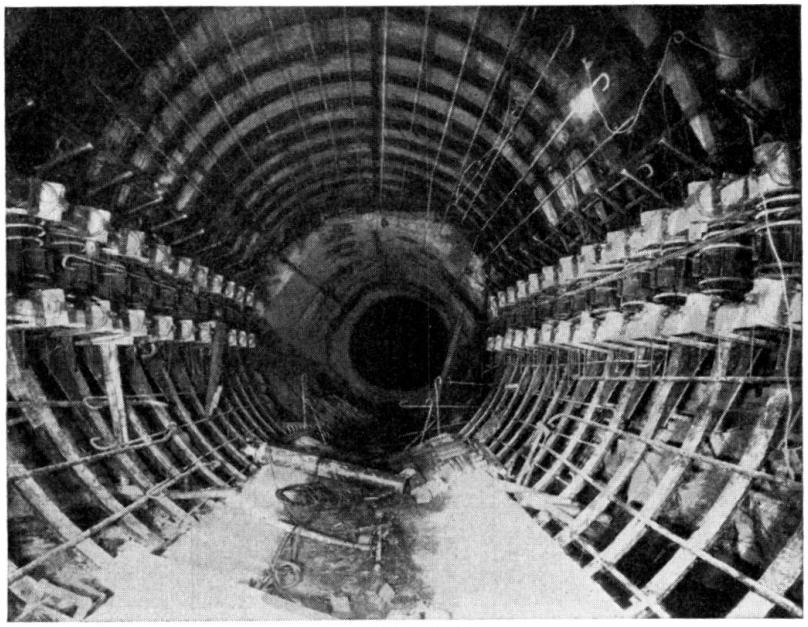


Fig. 21.
Vue de la conduite avant bétonnage.

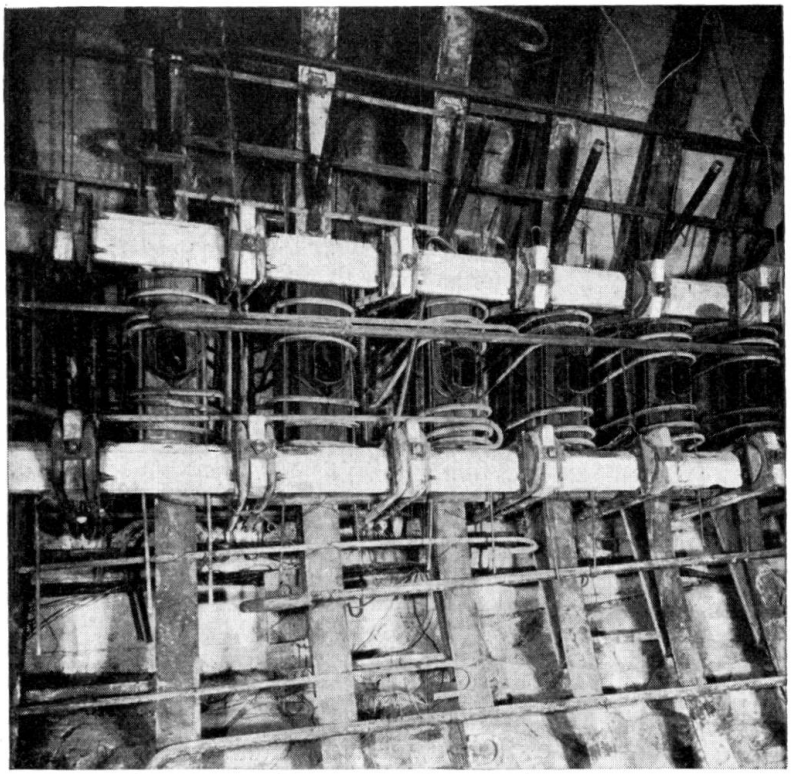


Fig. 22.
Vue des boîtes et des armatures avant bétonnage.

simultanément sur les deux vérins se faisant vis à vis. Un abaque donne à chaque instant la valeur de la tension du câble en fonction de la poussée exercée par le vérin et de la déformation imprimée au câble, mesurée par l'enfoncement du champignon poussoir. Lorsque la tension du câble atteint 135 t environ, on cale les vérins sur leur écrou de sécurité et on remplit les boîtes plates de mortier au $^1/_3$ de ciment fondu, en le coulant par un petit tube ménagé à la partie supérieure des boîtes. Au bout de 7 h environ, le mortier est assez résistant pour supporter la réaction du câble qui est de l'ordre de 100 t. On enlève alors les vérins avec précaution, et on passe au câble suivant. Ajoutons que l'enfoncement du champignon est de l'ordre de 13 cm et que le retour en arrière au décalage n'est que de 1 mm environ, ce qui correspond à une perte infime de tension du câble.

Le total de l'opération de mise en tension ne dépasse pas 12 h, ce qui permet, en travail continu de tendre deux câbles par jour avec une paire de vérins.

6° — *Parachèvement de la conduite:* Les tubes sont ensuite remplis de ciment par injection pour assurer la conservation du câble. L'injection s'étend également au joint béton-rocher et aux diaclases. Puis les boucles d'ancrage sont coupées et la conduite enduite intérieurement au cement-gun.

V. — *Controle du frettage — Controle en Service.*

Des témoins sonores, du système imaginé par *M. Coyne,* ont été disposés en assez grand nombre dans l'épaisseur du revêtement de béton pour mesurer l'état de compression de ce revêtement et pour s'assurer par la suite, en exploitation, de la conservation de cet état.

La fig. 23a donne à titre d'exemple l'état de compression du béton entre les câbles n° 11 et n° 12 de la conduite n° 1. On peut distinguer dans ce graphique trois périodes:

1° — Période de la mise en tension des câbles avoisinant la zone auscultée (du 27 Octobre au 8 Novembre 1934): la courbe montre très nettement la variation du taux de compression du béton lorsqu'on met successivement en tension les 5 câbles numérotés 9—10—11—12—13 qui encadrent le point ausculté.

Ces lectures confirment pleinement ce qui avait été constaté dans l'essai préliminaire, à savoir que la zone d'action d'un câble s'étend à plus d'un mètre de distance de part et d'autre, ce qui donne l'assurance que la conduite est comprimée d'une manière très uniforme malgré l'espacement notable des frettes, à la fin de cette période la déformation a atteint 500 microns par m. Si on admet, le béton étant peu âgé, que le coefficient d'élasticité est de 150 000 kg/cm² environ, cela représente un taux de fatigue de 75 kg/cm².

2° — Période des déformations lentes (du 8 Novembre 1934 au 14 Juin 1935): le béton continue à se déformer sous l'action prolongée des charges qui lui sont appliquées. La déformation plastique dépasse 100 microns par m.

3° — Période de la mise en eau de la conduite (à partir du 14 Juin 1935): Sous l'action de la pression intérieure, le béton se décomprime partiellement. Pour une charge d'eau de 71 m, la décompression atteint 135 microns

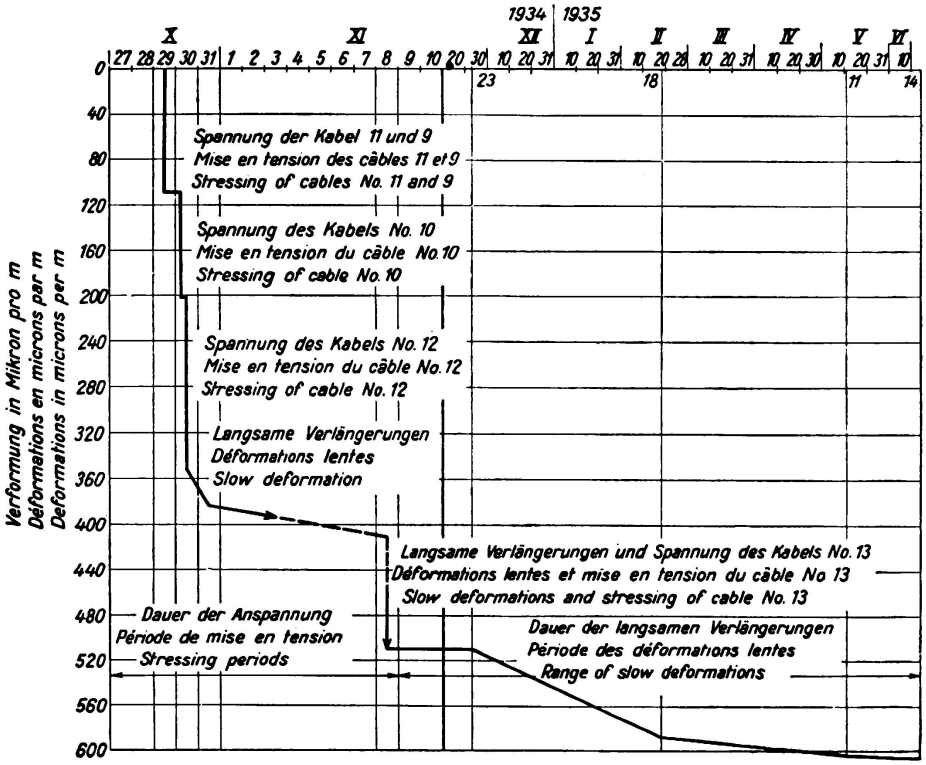


Fig. 23 a,

Première période. Mise en tension des câbles 9 à 13 (du 29 octobre au 8 novembre 1934) et déformations lentes (jusqu'au 14 juin 1935).

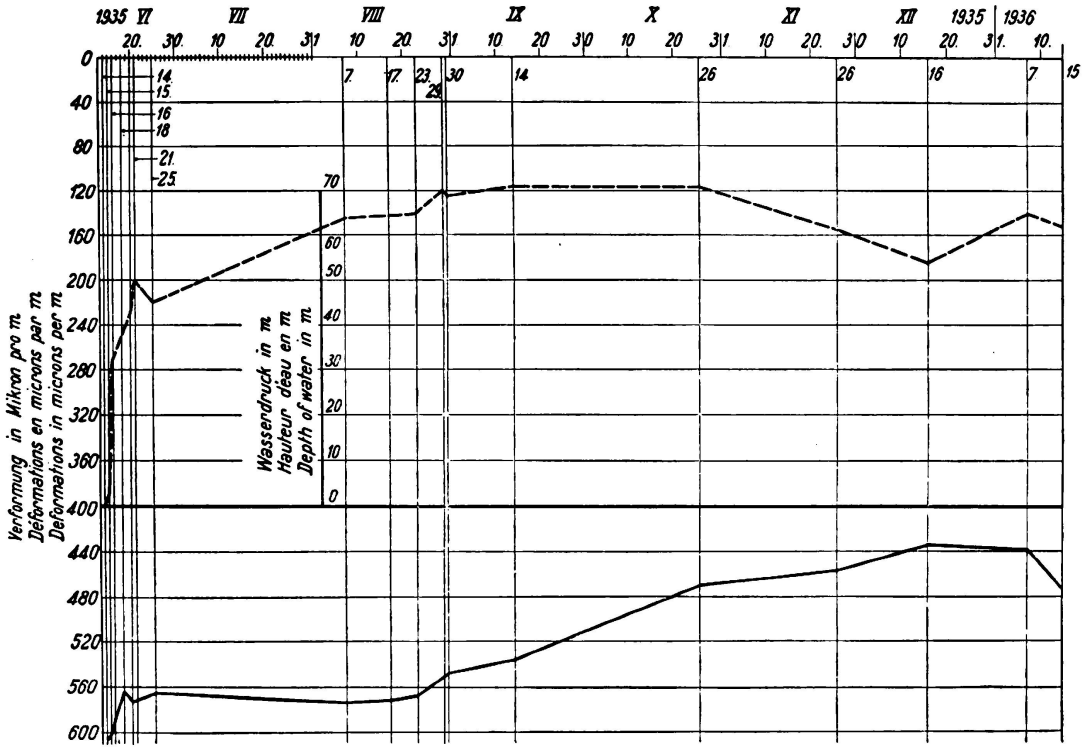


Fig. 23 b.

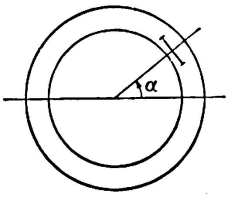
Deuxième période. Mise en eau de la conduite.
Graphiques des déformations de la conduite No 1 (mesurées à l'aide des témoins sonores).

par m. Si la conduite était libre et que le rocher n'intervienne pas dans la résistance de l'ouvrage, la décompression serait d'environ 300 microns par m.

On peut constater sur la fig. 23b un parallélisme tout à fait satisfaisant entre les variations du taux de compression du béton et les variations de la pression d'eau. Les petites anomalies de la courbe proviennent certainement en majeure partie des variations de la température de l'eau qui introduit une légère erreur dans la lecture des témoins sonores.

Si maintenant on examine les taux de compression et de décompression obtenus aux divers points auscultés, on constate, compte-tenu des variations d'épaisseur de la conduite, une concordance satisfaisante des résultats, qui sont rassemblés dans le tableau ci-après:

Nos des témoins	Nos des câbles encadrant le témoin	Position du témoin dans sa section α (1)	Taux de compression après frettage	Taux de compression résiduelle avec pression d'eau de 71 m	Observations
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0—1	α = 60°	300	170	(1) Signification de α
3	7—8	α = 90°	580	440	
4	11	α = 135°	465	360	
10	11—12	α = 120°	530	420	
11	11—12	α = 60°	605	470	
13	12—13	α = 0°	450	220	
14	14—15	α = 90°	270	170	
18	38—39	α = 90°	470	345	



Résumé.

Le frettage décrit dans cette note est une application nouvelle de la méthode générale de construction qui consiste à soumettre l'ouvrage à des contraintes préétablies pour mieux répartir les fatigues ultérieures. On connaît les belles applications de cette méthode déjà réalisées notamment par *M. Freyssinet* et par *M. Coyne.*

Des difficultés tout à fait spéciales ont été rencontrées dans cette réalisation du fait de l'exécution en souterrain. La même méthode serait à fortiori applicable, et dans des conditions infiniment plus simples, au frettage des conduites en béton à l'air libre. Nous pensons que c'est une méthode susceptible de recevoir des applications nombreuses dans le cas notamment de conduites de grand diamètre.

Leere Seite
Blank page
Page vide