

Zeitschrift:	Bulletin technique de la Suisse romande
Band:	75 (1949)
Heft:	17
Artikel:	Sur un nouveau mode de pose des câbles électriques souterrains en campagne et leur traversée du Rhône à Genève
Autor:	Bourquin, Robert
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-56878

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: 28.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 20 francs
Etranger : 25 francs

Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 17 francs
Etranger : 22 francs

Pour les abonnements
s'adresser à la librairie
F. ROUGE & Cie
à Lausanne

Prix du numéro :
1 fr. 25

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. — Membres : Fribourg : MM. † L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; Vaud : MM. F. CHENEAUX, ingénieur ; E. D'OKOLSKI, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte : Genève : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. ODIER, architecte, Neuchâtel : MM. J. BÉGUIN, architecte ; G. FURTER, ingénieur ; R. GUYE, ingénieur ; Valais : MM. J. DUBUIS, ingénieur ; D. BURGENER, architecte.

Rédaction : D. BONNARD, ingénieur. Case postale Chauderon 475, LAUSANNE

TARIF DES ANNONCES

Le millimètre
(larg. 47 mm) 20 cts

Réclames : 60 cts le mm
(largeur 95 mm)

Rabais pour annonces
répétées

ANNONCES SUISSES S.A.

5, Rue Centrale
Tél. 2 33 26
LAUSANNE
et Succursales



CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE

A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte ; R. NEESER, ingénieur.

SOMMAIRE : Sur un nouveau mode de pose des câbles électriques souterrains en campagne et leur traversée du Rhône à Genève, par ROBERT BOURQUIN, ingénieur civil E.P.F., attaché aux Services Industriels de Genève. — DIVERS : Les congrès, journées internationales de la Précontrainte. — BIBLIOGRAPHIE. — CARNET DES CONCOURS. — SERVICE DE PLACEMENT.

Sur un nouveau mode de pose des câbles électriques souterrains en campagne et leur traversée du Rhône à Genève

par ROBERT BOURQUIN, ingénieur civil E.P.F., attaché aux Services Industriels de Genève

I. Le problème qui se posait

Généralités

Le Service de l'électricité de Genève avait posé, au cours des années 1941, 1942 et 1945, neuf câbles souterrains à haute tension entre l'usine génératrice de Verbois et l'usine thermique de secours de Genève, dont cinq sur la rive droite du Rhône et quatre sur la rive gauche ; cet équipement devait en principe être suffisant jusqu'aux environs de 1951 pour faire face aux plus grandes pointes du diagramme de charge du réseau. L'augmentation très rapide de la consommation d'énergie — de 14 millions de kWh durant l'hiver 1947/48 par rapport à l'hiver précédent — conduisit à une nouvelle étape dans la pose des câbles primaires Verbois-Genève.

Le Service de l'électricité, sur la base des études qu'il avait entreprises, décida dès lors de poser encore :

trois câbles de $3 \times 150 \text{ mm}^2$ allant de l'usine de Verbois (centre d'alimentation) à l'usine thermique de secours (centre répartiteur) en suivant un tracé nouveau, situé en majeure partie sur la rive droite du Rhône ; et

deux câbles de $3 \times 150 \text{ mm}^2$ entre l'ancienne station de coupure de Vernier et la même usine thermique.

La longueur totale des câbles tirés en 1948 est d'environ 44 km ; elle se décompose comme suit :

32 265 m entre Verbois et Genève, et
11 686 m entre Vernier et Genève.

Le nouveau tracé est plus court que les précédents et réalise de ce fait une économie de câbles de

266 m sur le tracé de 1945, et
490 m sur le tracé de 1941/42.

Il en diffère surtout par le choix du tracé, la méthode de terrassement, la pose mécanique et la traversée du Rhône.

Les caractéristiques des câbles

Les câbles utilisés sont du type HT 18 kV, section de $3 \times 150 \text{ mm}^2$, système Höchstädt, à conducteurs sectoriaux en cuivre électrolytique, avec isolation au papier imprégné de 6 mm d'épaisseur et enveloppe de papier métallisé, le tout recouvert d'un manteau de plomb de 2,7 mm d'épaisseur allié à 0,5 % d'étain. Deux rubans extérieurs de papier imprégné, avec enveloppe de jute asphalté, forment la protection contre l'action corrosive des eaux et des terrains. La protection mécanique est assurée par une armure de fils de fer méplats zingués au feu de 1,7 mm d'épaisseur au pas d'environ 365 mm, remplaçant les deux couches de feuillard des câbles ordinaires. Les fils de fer sont protégés par une enveloppe de jute asphalté et talqué.

Les fils de fer méplats sont repliés et ligaturés à l'extrémité côté tirage pour former une boucle dans laquelle vient s'accrocher le câble tracteur. Les efforts de traction exercés à l'extrémité du câble pendant le tirage sont absorbés par ces fils de fer méplats.

Le diamètre du câble fini est de 7,5 cm et son poids de 16,2 kg/m.

La tension de service des câbles est de 18 kV entre phases et celle contre terre de 10,4 kV. Les charges admissibles pour chacun des cinq câbles placés en parallèle dans la même fouille sont de 250 A pour dix heures de marche continue.

Le *profil sinueux du tracé*, comportant plusieurs dénivellations, a imposé l'emploi d'une matière d'imprégnation plus visqueuse que d'ordinaire afin qu'à 50° C elle conserve une viscosité telle que les déformations du plomb dans les parties basses, par mise en pression du câble, soient réduites au minimum. L'écoulement de la matière d'imprégnation pourrait, en effet, avoir tendance à vider le câble dans la partie haute à cause de la chaleur qui se dégage dès le début de l'exploitation et conduire ainsi à des « claquages » électriques par défaut d'isolation. Le mélange imprégnant doit être à la fois suffisamment visqueux pour ne pas être entraîné lors du tirage, et n'être pas trop fluide pour éviter les inconvénients précités.

Pour éviter un *partage des responsabilités*, tous les câbles d'une même ligne provenaient du même fournisseur. Ces câbles ont été fournis dans la proportion suivante :

21 500 m, pour deux lignes complètes Verbois-Genève, par la Société d'exploitation des *Câbles électriques de Cortaillod*,
16 630 m, pour une ligne Verbois-Genève et une ligne Vernier-Genève, par les *Câbleries et Tréfileries de Cossonay*, et
5 870 m, pour une ligne Vernier-Genève, par les *Kabelwerke Brugg*.

Les deux tiers des tronçons comportaient des longueurs normales de câble de 500 m, le reste, des longueurs comprises entre 150 et 300 m.

Pour *jonctionner* ces différents tronçons, il a fallu couler au total quatre-vingt-quinze boîtes de jonction, cinq boîtes d'arrêt et seize boîtes terminales.

Le choix du tracé

La dépense entraînée par la pose de câbles souterrains de cette importance est fonction essentiellement :

de la longueur des câbles entre deux points donnés, du coût des travaux de génie civil, lesquels représentent environ 20 à 25 % du montant total.

On a intérêt à réduire au minimum le nombre des tronçons de câbles, afin de réduire d'autant le nombre des boîtes de jonction, points délicats de l'exploitation, dont la fourniture et le montage représentent environ 1,5 % du montant total de la dépense.

Il faut éviter en outre, dans toute la mesure du possible, des réfections de chaussées et les travaux dispendieux de remise en état des lieux à la fin du chantier.

De plus, comme on avait en vue une mécanisation des travaux de fouille, on se décida à rechercher un tracé qui, sur de grandes longueurs, passerait à *travers champs*.

Entre le poste intérieur à 18 kV de l'usine de Verbois et le village d'Aire-la-Ville, les câbles suivent le tracé de ceux précédemment posés. Ils s'en séparent alors pour traverser le Rhône dans un caniveau construit sous le tablier en béton armé du nouveau pont de Peney. Une fois sur la rive droite, ils suivent celle-ci à *travers champs*, de Peney jusqu'à la nouvelle station de coupure sise à l'entrée du village de Vernier. Dès ce point, ils côtoient les nappes de câbles existantes jusqu'à leur entrée en ville, notamment à travers les prairies du château de Vernier, à quelque 30 m de distance

de la berge du Rhône, traversent ensuite le Nant de l'Avanchet sur un ponceau construit spécialement et remontent par le chemin du Lignon jusqu'à l'usine à gaz de Châtelaine. Ils entrent en ville par l'avenue d'Aire pour aboutir au plateau de Saint-Jean. Ici, ils traversent la falaise verticalement dans une cheminée de 37 m de hauteur puis, au bas de celle-ci, passent dans un tunnel horizontal de 42 m de longueur jusqu'au bord de la rive droite du fleuve pour finalement traverser le Rhône dans une tranchée sous-fluviale de 90 m de longueur, émerger au sentier des Saules et finalement aboutir à la station à 18 kV de l'usine de secours.

Si, par un parcours en campagne, on évitait les terrassements les plus coûteux, on avait en revanche la perspective d'avoir à traiter à l'amiante avec une cinquantaine de propriétaires, pour obtenir de chacun d'eux l'autorisation d'inscrire au Registre foncier une servitude de passage, et d'occuper temporairement les terrains nécessaires à la mise en dépôt des déblais et au passage des camions de ravitaillement du chantier.

Pendant ces tractations, une campagne de sondages préliminaires fut entreprise pour reconnaître aux endroits douteux la nature du terrain et la position exacte de canalisations existantes.

II. La mécanisation des travaux de terrassement et le tirage mécanique

Les raisons de la mécanisation

La pénurie de main-d'œuvre qui régna sur la place de Genève pendant une bonne partie de l'année 1948 a été l'une des raisons du choix de la mécanisation pour la fouille et le remblayage de la tranchée. Le *travail manuel* aurait nécessité, en effet, la présence d'une équipe constante de cent cinquante hommes dont l'effectif aurait dû être porté de manière intermittente à deux cent cinquante hommes pour le tirage des câbles. Or, c'est moins de cinquante hommes au maximum qu'a nécessité le procédé employé.

De plus, le Conseil d'administration des Services industriels de Genève avait ordonné, en vue d'une réduction massive des travaux en régie, l'établissement d'une série de prix très détaillée (comportant environ soixante articles) et d'un cahier des charges spécial. Ces documents une fois mis au point paraissent avoir répondu à ce qu'on en attendait, puisque le montant des travaux en régie n'a pas atteint 8 % du montant total des travaux, compte tenu du tirage des câbles (à savoir : 1,5 % du montant des travaux de génie civil, sans les frais de tirage).

Il s'agissait cependant de se rendre compte si, sur les bases établies, il était vraiment possible d'obtenir les résultats espérés. Il fut donc décidé d'exécuter d'abord, à titre d'essai, un tronçon d'une longueur de 1000 m entre l'usine de Verbois et le village d'Aire-la-Ville, et c'est sur la base de résultats tout à fait probants que les marchés ont pu être régularisés et conclus avec l'entreprise *Jean Piasio Fils* à Genève pour les fouilles en campagne, et avec les entreprises *Piasio & Auberson* pour le tracé urbain — sauf la traversée du Rhône.

Le profil-type de la tranchée et les dallettes de protection des câbles

Dans le travail en question, la tranchée a partout une profondeur de 1,20 m, tandis que sa largeur théorique varie avec le nombre de câbles à déposer, cette largeur étant de

0,95 m	pour	5	câbles
0,75 m	»	3	»
0,60 m	»	2	»

Les câbles utilisés sont logés dans le fond de la fouille, espacés de 7 cm les uns des autres — pour permettre la dispersion de la chaleur — et finalement recouverts d'une couche de sable de 10 cm, puis de *dallettes en béton* de 4 cm, d'épaisseur ; la pénurie de briques à cette époque avait obligé, en effet, de recourir à des dalles en béton dont il paraît intéressant de dire quelques mots.

* * *

Ces dalles furent l'objet d'une intéressante fabrication en série, par les soins de l'entreprise *Louis Charles S. A.* ; leur nombre a atteint 118 000 dalles de $25 \times 25 \times 4$ cm, pesant 5,5 kg chacune. Elles furent posées en rangées de deux dans les tranchées de deux et trois câbles et en rangées de trois dalles dans les tranchées de cinq câbles, débordant ceux-ci de part et d'autre pour constituer la protection mécanique contre des coups de pioche donnés lors d'une ouverture ultérieure de la fouille.

Ces dalles en béton, non armées, ont été fabriquées à l'aide d'un agrégat comportant approximativement 800 litres de gravier fin et 400 litres de sable, le mélange étant dosé à raison de 200 kg C. P. ; la granulation a d'ailleurs été établie et contrôlée au cours de la fabrication. Des essais de flexion étaient exécutés périodiquement, chaque dalle devant être alors à même de supporter sans se briser un poids de 175 kg en son milieu, ce qui impliquait une contrainte de l'ordre de ± 15 kg/cm² ; certaines dalles ont supporté jusqu'à 260 kg de charge.

Les dalles étaient damées sur une table à secousses permettant la fabrication simultanée de six éléments ; elles n'étaient utilisées qu'un mois après leur confection, après avoir été soumises à l'essai suivant : dix dalles étaient prélevées au hasard dans chaque lot de dix mille et soumises à l'essai de flexion ; au cas où quatre dalles sur dix ne répondraient pas aux conditions prescrites et présentaient des fissures, le lot entier de dix mille pièces était refusé.

Une équipe de quatre ouvriers arrivait à fabriquer de mille deux cents à mille cinq cents dalles par jour, et le pourcentage de casse au cours des diverses manœuvres a été inférieur à 4 %.

Le terrassement mécanisé

La fouille et le remblayage des tranchées s'effectuaient par tronçons de 500 m à l'aide de deux *pelles mécaniques* travaillant l'une sur un tronçon à trois câbles, l'autre sur un tronçon à cinq câbles. Ces pelles (fig. 1), d'un poids de 9,5 tonnes, entraînées par un moteur Diesel de quarante ch, quatre cylindres et démarrage électrique, fabrication Lister, équipées de chenilles de 350 mm de largeur avec dents pour disloquer le terrain, fonctionnaient « en rétro » et travaillaient à cheval sur la tranchée. La pression spécifique exercée sur le terrain par un de ces engins était de 0,53 kg/cm², ce qui a permis d'exécuter le remblayage à cheval sur la tranchée sans provoquer d'éboulement. L'encombrement d'une pelle est de 2,35 m transversalement et 2,70 m longitudinalement. Sa vitesse de déplacement atteint 3,8 km/h pour son transport sur route. La profondeur du front d'attaque, en rétrogradant, pouvait atteindre jusqu'à 4 m au-dessous des chenilles.

Lorsque la distance entre le bord de la tranchée et la nappe des câbles existants était égale ou supérieure à 50 cm, la fouille mécanique était possible et elle s'est effectuée sans incident.

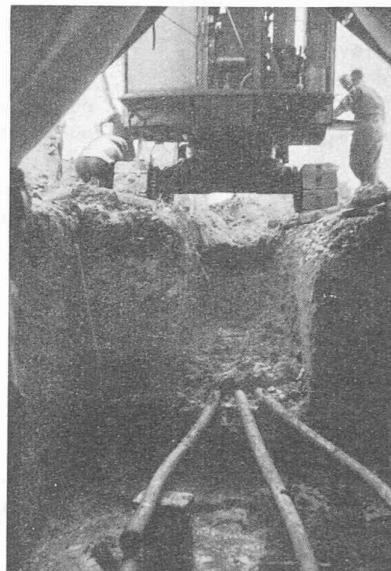


Fig. 1. — La pelle mécanique en action.

Cette mécanisation s'est étendue sur :

les $\frac{5}{8}$ du tracé dans le lot I (en campagne),
les $\frac{2}{5}$ du tracé dans le lot II (en ville),

soit sur une longueur totale de 6000 m sur 10 350 m de tranchée.

En ville, le damage du remblai a été fait au « crapaud » par couches de 40 cm. Cette méthode a permis de rétablir la consistance primitive du terrain et de diminuer certainement les frais d'entretien des chaussées nécessités par des terrassements ultérieurs.

Des doutes subsistaient néanmoins au début du travail : on se demandait entre autres si les économies envisagées n'allait pas être compensées par des dépenses supplémentaires dues aux hors-profil et aux boisages nécessités par la dislocation des terrains sous les engins mécaniques. Il n'en fut rien. Les talus se sont comportés normalement, sauf à de rares exceptions ; leur fruit a varié entre 0 et 1/20 en fonction de la cohésion des terres. L'économie ainsi réalisée par ces pelles sur la totalité des travaux de génie civil peut être évaluée à 12 %. Une des pelles a dû exécuter un travail très dur sur une longueur de 1500 m ; elle devait démolir un caniveau en béton longeant la tranchée et destiné à d'anciens câbles ; elle l'a arraché par dessous, évitant ainsi le travail de dislocation au marteau à air comprimé.

L'équipe accompagnant la pelle mécanique comprenait, outre le conducteur, deux ou trois hommes ; l'un pilotait la pelle et préparait le terrain pour permettre aux chenilles de travailler dans un plan à peu près horizontal, le deuxième réglait le fond de la fouille en ramenant dans la benne les déblais restants et talutait, alors que le troisième exécutait une banquette de 50 cm de largeur de chaque côté de la tranchée. Ces banquettes ont facilité le ravitaillement du sable et des dalles et la surveillance des opérations de tirage.

L'avancement journalier a été fonction de la nature et de la cohésion des terrains ; il a atteint, en moyenne, une longueur de 58 m de terrassement et de remblayage et, au maximum, 160 m par jour dans les terres végétales ou grasseuses.

Les heures d'attente de ces engins, dues au tirage mécanique ou à toute autre cause, n'ont pas atteint 5 % des cent trente journées de travail, preuve de la bonne coordination du programme d'avancement. D'ailleurs, ces heures ne sont jamais tombées à charge du maître de l'œuvre, car un article du bordereau des prix prévoyait une attente hebdomadaire, de six heures au plus, à la charge de l'entreprise.

La conclusion à tirer de cette expérience est que la mécanisation s'applique économiquement à la campagne — et aussi partiellement en ville, mais seulement si l'on a pris soin de repérer soigneusement, par sondage, la position des canalisations étrangères. Dans notre cas, l'économie réalisée par la fouille mécanique de la tranchée s'est élevée finalement à 50 % du prix de la tranchée creusée à la main.

Le tirage des câbles dans la tranchée

Un tirage des câbles avait été appliqué jusqu'ici couramment aux câbles téléphoniques, mais on n'avait pas tenté de le faire à une aussi grande échelle pour des câbles du type à haute tension. Aussi cette nouvelle technique a-t-elle demandé une sérieuse étude de mise au point.

La condition primordiale à remplir, c'est que le manteau de plomb et l'isolation du câble, soit le papier métallisé et les bourrages, n'aient en aucune manière à souffrir durant le tirage mécanique. L'effort de traction transmis aux fils de fer méplats tend à allonger le pas, à exercer un effort de compression sur les bourrages et la gaine de plomb et à les allonger longitudinalement. Il convient de remarquer que l'effort de traction ne se répartit pas uniformément le long du câble électrique, mais qu'il décroît proportionnellement de l'extrémité de tirage à l'extrémité enroulée sur la bobine. Cet effort est fonction du frottement, des résistances provoquées par les galets de roulement, de l'espacement de ces derniers, ainsi que des différentes courbures imprimées au câble électrique pour l'obliger à épouser les sinuosités de la tranchée tant horizontalement que verticalement. Il en résulte dès lors que l'extrémité côté tirage doit supporter l'effort maximum ; les risques de déformation dans cette partie du câble sont donc les plus grands.

Ne connaissant pas ce que pourraient être les résultats pratiques du tirage, on a estimé nécessaire de procéder d'abord à *l'essai complet de deux tronçons de 500 m*. Dans ce but et avant d'armer le câble, on avait pris soin de tracer en usine, sur le manteau de plomb, à l'extrémité tirée et sur une longueur de 3 m, des repères espacés tous les 10 cm. Le tirage terminé, des coupons de 3 m de longueur furent prélevés aux extrémités des câbles et renvoyés en usine

où l'on mesura les allongements permanents du plomb après décorticage. On mesura également la distance entre l'extrémité des conducteurs et celle du plomb, ainsi que la longueur de l'isolation pouvant dépasser l'extrémité des conducteurs.

L'examen de ces échantillons ne révéla ni bourrage cassé, ni isolation blessée ou arrachée, ni papier métallisé déchiré. Le plomb ne présentait aucune anomalie de recristallisation et son allongement est resté au-dessous de 4 %, à une distance de 2,70 m de la boucle de tirage.

Après discussion avec les câbleries intéressées, on admis que des câbles électriques de 500 m pouvaient subir sans dommage *un effort de traction de 2000 kg*, mais on convint toutefois qu'avant de procéder à l'épissure, on couperait chaque fois un tronçon de 3 m de longueur côté boucle de tirage, et de 1,50 m côté tambour d'enroulement.

* * *

L'opération de tirage s'effectue de la manière suivante : Des bobines de 500 m de câble sont amenées le plus près possible d'une des extrémités du tronçon. On procède alors au déroulage (fig. 2) et au freinage du câble, comme on le fait pour le tirage à bras, en faisant glisser le câble sur des galets métalliques, fournis par les câbleries et montés sur bagues de bronze, ces galets étant posés dans le fond de la tranchée (fig. 3) à une distance de 2,50 m environ les uns des autres. Quand le fond est argileux, il est prudent de recouvrir le fond d'une couche de 10 cm de gravier roulé pour faciliter l'opération. Dans les courbes, trois galets d'angle de 1 m de longueur, enfoncés obliquement, empêchent le câble tracteur de frotter contre les talus tout en évitant les éboulements.

Le tirage proprement dit s'effectua, dans notre cas, à l'aide d'une corde d'acier de 10 mm de diamètre enroulée sur un cabestan mû par un moteur Diesel de 18 ch monté sur roues pneumatiques. L'extrémité du chariot opposée au cabestan était amarrée à un camion ou à des « crayons » enfouis profondément dans le sol. Entre les points d'ancrage et le chariot, deux dynamomètres de 1000 kg chacun avec curseur, montés en parallèle, permettaient de lire les valeurs instantanées de l'effort agissant sur les câbles. Un observateur

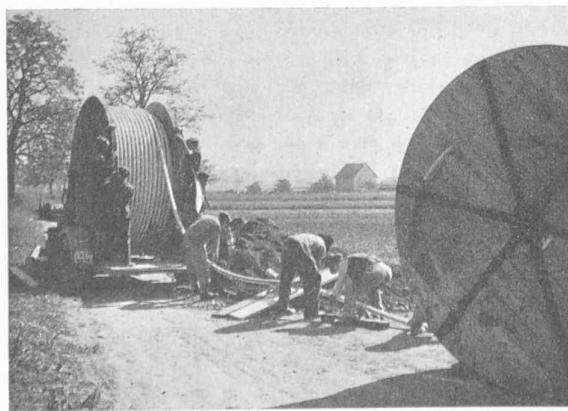


Fig. 2. — Le tirage mécanique : le débobinage.



Fig. 3. — Le tirage mécanique dans un coude de la tranchée.

restait à demeure pour effectuer les lectures et arrêter l'opération dès que la tension totale atteignait 2000 kg.

La manœuvre des bobines doit être *commandée* par l'observateur des dynamomètres et il est indiqué de le relier téléphoniquement avec la station de déroulement. Quant aux ordres donnés sur le parcours du tracé, ils peuvent être transmis par fanions.

La durée du tirage d'un câble de 500 m varie entre vingt-quatre minutes et une heure selon le nombre de courbes, l'étayage de la tranchée et la stabilité des galets. Sur certains parcours en alignement droit, la vitesse a atteint 0,50 m/sec ; en moyenne, elle a été de 0,26 m/sec.

Le personnel de l'entreprise comprenait sept hommes. De son côté, le Service de l'électricité mit à disposition pour l'opération de tirage proprement dite une équipe variant de vingt-cinq à quarante manœuvres selon les difficultés du tracé (alors qu'il en aurait fallu deux cent cinquante pour un tirage similaire à bras). Durant le tirage mécanique, on a pu notamment constater ce qui suit :

Il faut éviter le plus possible des arrêts pendant le déroulement du câble, car le supplément d'effort au démarrage atteint facilement 700 kg. Il faut éviter aussi les courbes à faible rayon ou à angle droit, qui donneraient lieu à un supplément d'effort du même ordre.

Il peut se faire que le câble subisse, lors du tirage, une torsion autour de son axe pouvant atteindre jusqu'à six tours sur une longueur de 500 m ; afin de diminuer cette torsion, on intercale un émerillon à roulement à billes au point d'attache du câble tracteur et du câble électrique, et on empêche ainsi la propagation de la rotation à ce dernier.

Un dépassement de l'effort limite de 2000 kg a été observé à deux reprises. Pour en avoir le cœur net, on a coupé alors les tronçons terminaux sur une longueur de 5 m, et on les a décortiqués en usine : l'examen ne révéla, ainsi qu'on l'avait prévu, aucune déformation anormale ou exagérée.

En résumé, le tirage mécanique ordonné avec soin n'implique aucune difficulté particulière, raccourcit singulièrement l'opération et réduit d'environ 80 % la main-d'œuvre nécessaire, du fait aussi de la diminution des heures imprédictives. Il fut assuré dans le cas présent par la maison *Kummell & Matter* d'Aarau, sur la base d'un cahier des charges et d'une série de prix soigneusement mis au point.

III. La traversée du Rhône à la Jonction

Diverses solutions envisagées

L'inconvénient majeur du nouveau tracé, par ailleurs plus court que les précédents, consistait dans la traversée du Rhône, pour laquelle il fallait trouver un emplacement et un tracé convenables. On en étudia plusieurs qui se révélèrent difficiles, à cause surtout des autorisations de passage et d'occupation momentanée des terrains.

Le tracé définitif comporte l'alternative d'ouvrages de surface économiques et d'*ouvrages enterrés* plus coûteux destinés à racheter la différence de niveau entre le Rhône et le plateau de Saint-Jean. Le projet d'une cheminée extérieure adossée à la falaise

aurait mal convenu, du fait de la nature du sol et de son comportement sous l'effet alterné du gel et du dégel ; le point de vue esthétique jouait aussi son rôle.

La solution définitive, telle qu'on la décrira plus loin, a fait l'objet à son tour d'un cahier des charges spécial et d'une série de prix forfaitaires par mètre courant d'ouvrage. Une durée de trois semaines fut laissée aux entrepreneurs pour l'étude des prix et, l'adjudication passée à l'*entreprise Conrad Zschokke*, le délai d'exécution de cent jours fut respecté à un jour près.

Les ouvrages nécessaires

Pour descendre du plateau de Saint-Jean et traverser le Rhône (fig. 4) on a prévu finalement les ouvrages suivants :

a) *Une cheminée* verticale, soit un puits de 1,30 m de diamètre, de 37,30 m de hauteur, situé à 12 m au minimum du bord de la falaise dans l'alluvion ancienne supportant une faible couche de moraine glaciaire. Ce terrain, durci superficiellement par l'air et par les eaux chargées de carbonate de chaux, se transforme par places en véritable conglomérat ou en lentilles de sablon très dur.

Cette cheminée a été pourvue d'un revêtement annulaire de 25 cm d'épaisseur en béton dosé à 250 kg C. P./m³. Elle se termine en haut par une dalle percée de deux trous (fig. 5 et 6), l'un pour l'accès, l'autre pour la ventilation ; le trou d'accès est fermé par un plateau en fonte de 0,80 m de diamètre, le trou de ventilation par deux grilles précédant une chambre de ventilation adossée à la cheminée et en communication avec cette dernière. Le courant d'air qui s'établit ainsi assure aux câbles un refroidissement suffisant.

La perforation du puits a été effectuée à l'aide d'un marteau à air comprimé, en deux étapes : la première comprenait les 22,50 m supérieurs qui furent perforés de haut en bas et bétonnés de bas en haut, avant d'entreprendre la seconde étape comportant la partie inférieure et le coude de raccordement au tunnel ; cette dernière fut perforée et bétonnée en sous-œuvre.

Le béton était mis en place par anneaux de 2,20 m de hauteur à l'aide de coffrages joints glissants comportant deux coquilles semi-circulaires articulées (fig. 7). L'équipe de bétonnage comportait six manœuvres dont trois chargés de la fabrication du béton et de son transport dans une benne suspendue à un treuil fixé en tête du puits.

En plus de la perforation et du bétonnage, il y avait à assurer la pose d'un certain nombre d'objets de serrurerie, notamment douze échelles d'accès faisant communiquer entre eux douze paliers distants verticalement de 3 m.

Dans la cheminée sont fixés les cinq câbles, par le moyen de brides métalliques amovibles et boulonnées sur des corbeaux ancrés dans le béton ; une feuille de plomb de 5 mm est intercalée entre le câble et chaque collier, de façon à répartir la pression de serrage.

b) *Un tunnel* de 42,1 m de longueur, du bas de la cheminée jusqu'à la berge du Rhône, le radier étant situé à 2,70 m au-dessus

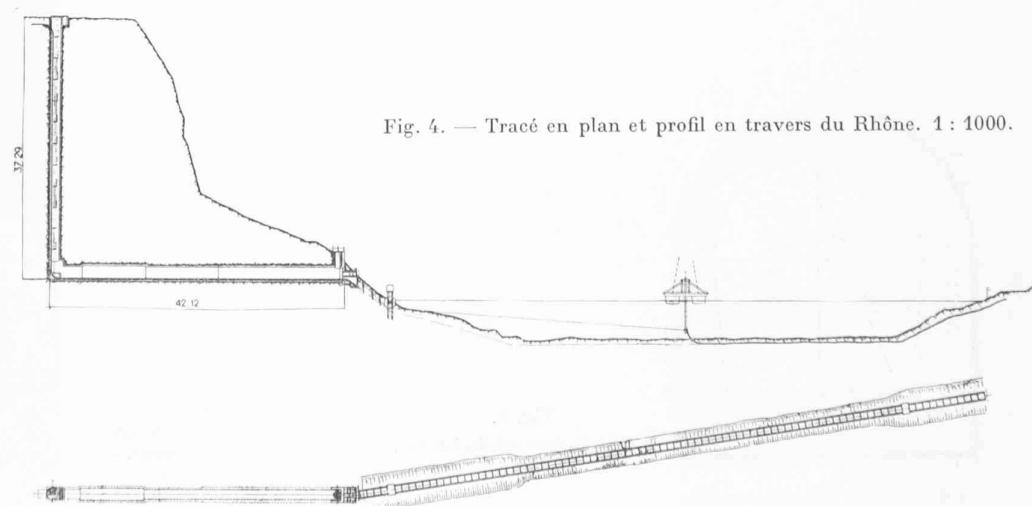


Fig. 4. — Tracé en plan et profil en travers du Rhône. 1 : 1000.

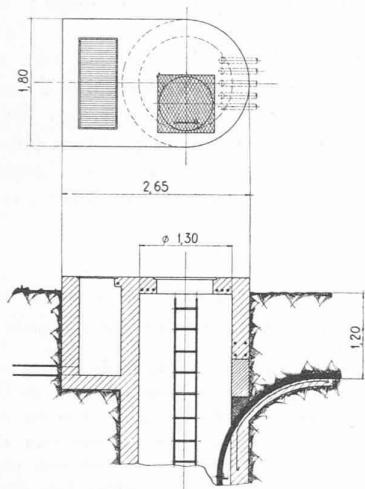


Fig. 5.
L'entrée dans la cheminée.
1 : 100.

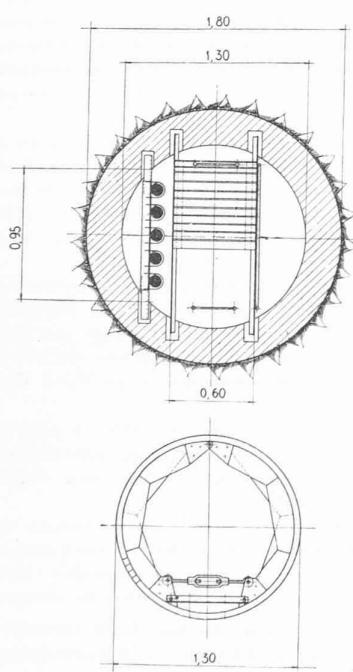


Fig. 7.
Coupe horizontale
par la cheminée.
1 : 50.

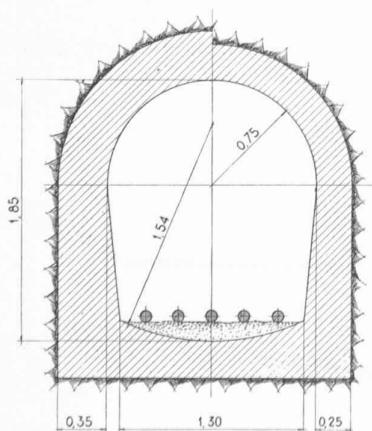


Fig. 8.
Profil en travers du tunnel.
1 : 50.



Fig. 6. — La descente du câble dans la cheminée.

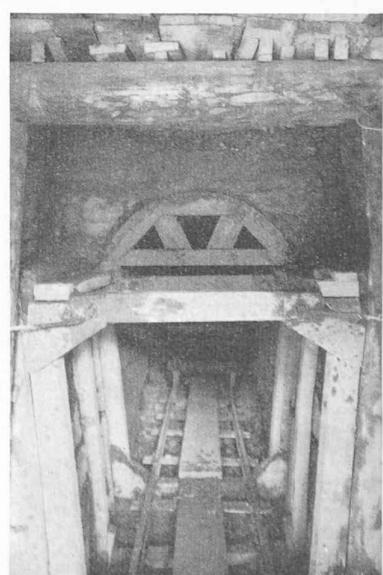
du niveau des plus hautes eaux du fleuve. Son profil en fer à cheval, de 1,85 m de hauteur libre et de 1,30 m de largeur au radier, comporte une voûte en plein cintre de 0,75 m de rayon, deux piédroits avec fruit de $1/10^{\text{e}}$ et un radier incurvé selon un rayon de 1,54 m (fig. 8).

Le revêtement en béton, dosé à 250 kg C. P./m³, a été prévu de 25 cm d'épaisseur dans la falaise proprement dite, et renforcé à 35 cm pour la traversée des éboulis, sur une longueur d'environ 20 m à partir du portail d'entrée. Les câbles eux-mêmes reposent sur une couche de gros gravier d'environ 10 cm d'épaisseur, déposée sur le radier (fig. 9).

A une distance de 28 m environ de ce même portail, on a constitué une chambre de 1,60 m de largeur et de 9 m de longueur dans laquelle sont placées les cinq boîtes d'arrêt et de jonction des câbles, scindant ainsi en deux parties la hauteur de 45 m environ franchie par les câbles ; ces boîtes ont pour but de limiter à un taux acceptable la pression provoquée en service normal par le ramollissement de la matière d'imprégnation dû à l'échauffement des câbles.

Une fois les câbles tirés et jonctionnés, le portail d'entrée a été fermé par une cloison en béton de 30 cm d'épaisseur, dans laquelle on a réservé un trou de 50 cm de diamètre pour la ventilation. Un accès au tunnel se fait par un puits dans le voisinage de l'entrée.

c) Enfin une tranchée a été pratiquée, de 1,40 m de profondeur dans les berges, et de 0,80 m de profondeur dans le lit même du Rhône, pour y déposer et finalement enterrer les câbles une fois tirés selon un procédé que nous décrirons plus loin.



Les travaux de fouille dans le lit même du fleuve ont été exécutés en eaux vives par 5,50 à 6,50 m de fond à l'aide d'une pelle mécanique montée en dragline sur un plancher en bois accouplant deux pontons (fig. 10). Dans la partie horizontale du lit, le procédé cependant s'avéra défectueux, car la benne ne ramenait plus les déblais en suffisance ; l'engin fut alors équipé en benne preneuse d'un poids de 650 kg ; par endroits, le sol était si dur qu'il fallut le miner pour obtenir sa désagrégation. Ces travaux de fouille dans l'eau comportèrent un volume de 290 m³ et durèrent dix-sept jours.

Après achèvement de l'excavation du lit, des profils en travers furent levés et on fit régler soigneusement le fond par des scaphandriers.

Les câbles une fois posés et espacés de 9 cm les uns des autres, ont été recouverts d'une couche de gravier de 10 cm. Sur cette couche reposent des dalles en béton armé de 1,00 × 1,20 m qui débordent la nappe des cinq câbles de 15 cm de chaque côté. Enfin, on remblaça le reste de la tranchée à l'aide de gros galets, jusqu'à obtenir son raccordement au fond naturel du Rhône.

Par cette méthode, on entendait protéger les câbles contre certaines eaux acides provenant des égouts et qui pourraient provoquer à la longue de lentes corrosions ; et les protéger aussi contre des engins d'accrochage en relation un jour ou l'autre avec la navigation.

IV. Le tirage des câbles à travers le Rhône

Nous ne nous allongerons pas sur les précautions prises pour la descente des câbles dans la cheminée, en vue d'éviter que la matière d'isolation ne subisse dans le puits un effort de traction sous l'effet du seul poids du câble.

Les installations mises sur pied

Pour la traversée du Rhône, diverses méthodes avaient été étudiées comparativement et l'on s'arrêta finalement à la suivante :

Les cinq câbles sont tirés simultanément par le moyen d'une herse mobile suspendue à un équipage monté entre deux pontons accouplés (fig. 11), la position de ces pontons étant réglée par quatre câbles d'amarrage fixés sur les rives.

L'avancement des pontons a lieu par le moyen d'une corde de 230 m de longueur, qui, après avoir été guidée par une



Fig. 10. — L'équipage préparé pour exécuter la fouille dans le Rhône. (Photo Détraz.)

poulie de renvoi située dans le fond du tunnel, s'enroule finalement sur le tambour d'un treuil mû à bras, à l'entrée de la galerie.

Cette installation permet le réglage des têtes de câbles durant toute l'opération du tirage, selon deux plans orthogonaux :

— dans le plan horizontal, pour corriger la dérive, par le moyen de quatre treuils,
— dans le plan vertical, pour régler la profondeur, par le moyen de la herse suspendue.

L'opération est rendue délicate par la manœuvre synchronisée des six treuils (fig. 12) ; il est en effet indispensable que les efforts de traction aient lieu partout à la fois de façon continue, afin d'éviter des effets de flexion qui pourraient compromettre toute la manœuvre.

De plus, la herse doit être maintenue à une hauteur constante au-dessus du fond variable de la tranchée pour éviter une dérive intense.

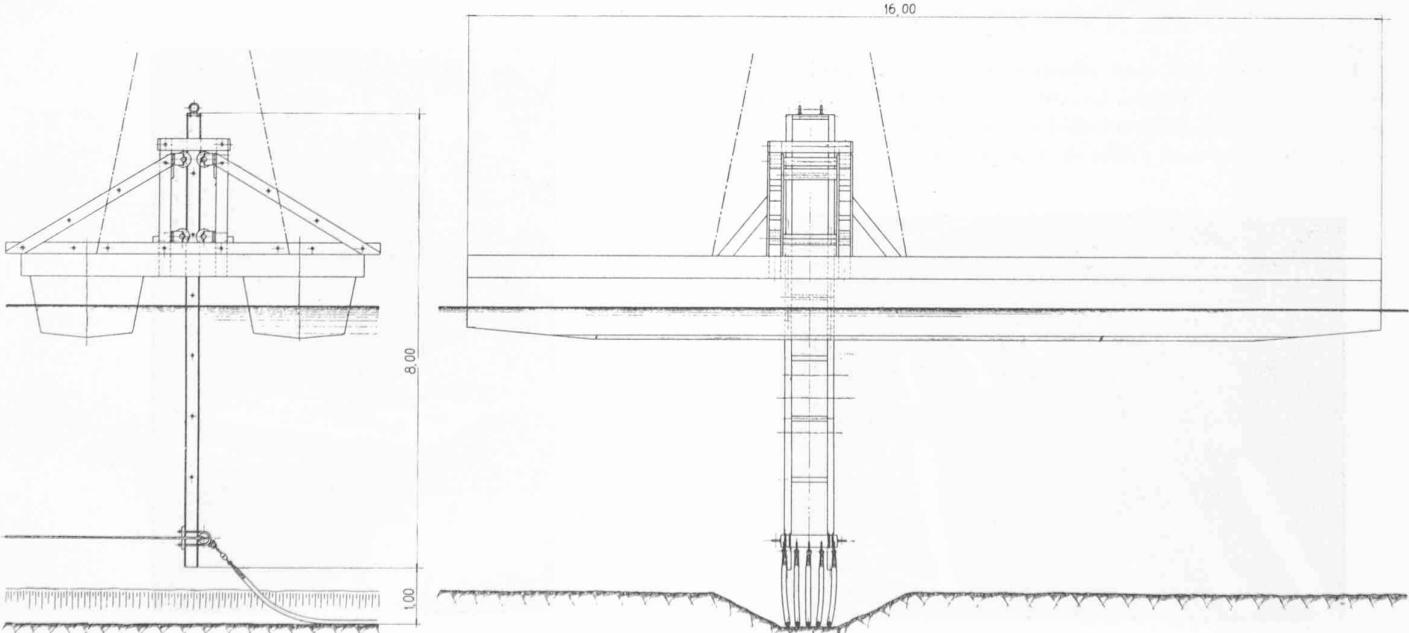


Fig. 11. — La herse et le ponton. 1 : 125.

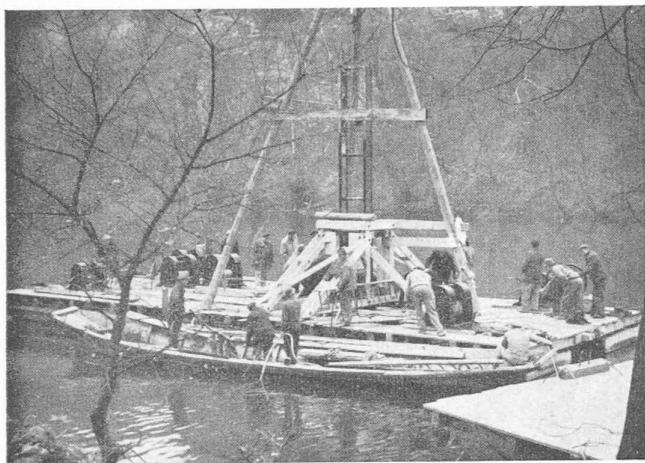


Fig. 12. — La traversée du Rhône : le tirage.

Essai préalable du tirage

Afin de prévenir des accidents durant l'opération proprement dite, on procéda notamment à un essai partiel, par dynamomètres, de tous les câbles devant entrer en jeu. Toute l'installation ayant été trouvée correcte, on procéda en outre à une épreuve de traversée sur la moitié du fleuve, pour habituer les diverses équipes à la manœuvre de leurs engins.

L'opération proprement dite

Le tirage définitif s'effectua en date du 24 novembre 1948. Cinq bobines étaient placées sur la rive gauche du Rhône (fig. 13), en face du tunnel, dans l'alignement de la tranchée. Les câbles furent enduits de graisse consistante avant l'immersion, pour faciliter leur glissement sur le fond de la tranchée, et ils passaient à travers trois grilles fixes construites sur la berge pour maintenir l'écartement voulu, avant d'être fixés sur la herse d'accrochage.

L'opération s'effectua (fig. 14) par un débit du Rhône de $190 \text{ m}^3/\text{sec}$ auquel correspondait une vitesse moyenne de $0,50 \text{ m/sec}$. La dérive des pontons qui en résultait fut être corrigée facilement par la manœuvre des quatre treuils de réglage.

La traversée, qui s'est effectuée sans aucun incident, a duré environ deux heures. Les câbles ont pris dans la tranchée un tracé sinueux, d'ailleurs désiré, pour permettre des tassements ultérieurs sous l'effet de leur propre poids.



Fig. 14. — L'extrémité tirée des câbles.

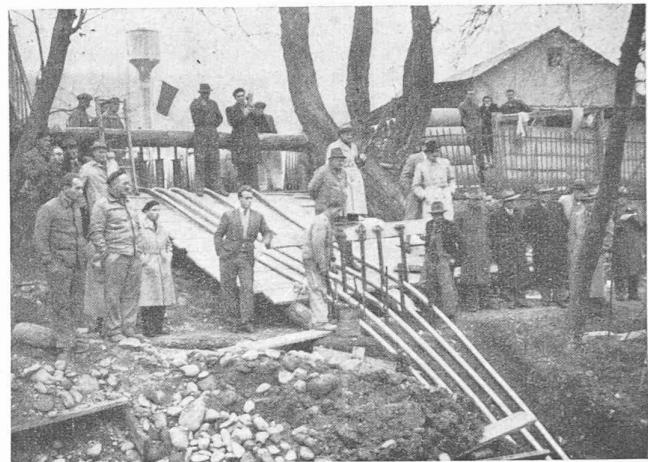


Fig. 13. — Le déroulage des câbles.

Au cours de l'opération de tirage, deux scaphandriers ont vérifié constamment la pose des câbles ; le premier accompagnant les pontons, avait pour mission de surveiller l'accrochage des câbles et le contact avec le fond de la tranchée ; le second parcourait le tronçon déjà terminé pour signaler au besoin toute anomalie éventuelle.

Une inspection de la pose des câbles dans la tranchée après tirage eut lieu finalement, à l'aide d'une lunette sous-marine (fig. 15) qui permit de contrôler la bienfaire du travail.

L'effort maximum de traction des câbles électriques s'est élevé à 2300 kg , correspondant à un coefficient de frottement maximum des câbles sur le fond de $0,45$ au démarrage.

V. Coût des travaux et conclusion

Il intéressera sans doute le lecteur de connaître dans ses grandes lignes le coût des travaux qui viennent d'être décrits. Il convient évidemment de séparer nettement à cet égard les travaux de terrassement et le tirage proprement dit.

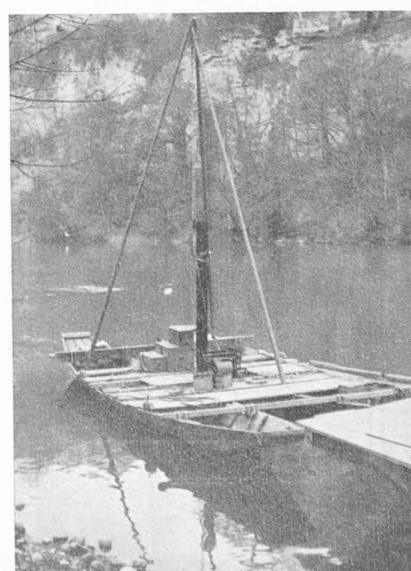


Fig. 15. — La lunette sous-marine montée sur ponton.

Terrassement mécanisé

Le montant des travaux de génie civil, à savoir : la fouille, le remblayage mécanique, la fourniture et la pose du sable et des dallettes en béton, l'évacuation des excédents et des terres argileuses, et la réfection provisoire des chaussées s'est élevé à 435 000 fr. en chiffres ronds, montant dont le total se décompose comme suit :

Main-d'œuvre	56,5 %
Pelle mécanique	11,1 %
Camionnage	11,0 %
Etayage et pompage	2,7 %
Fourniture du sable	4,0 %
Rouleau compresseur	3,6 %
Fourniture des dallettes . .	8,0 %
Divers.	3,1 %

Au mètre courant de tranchée, compte tenu de la réfection des chaussées, mais sans les frais de tirage des câbles, la dépense moyenne s'est élevée à *la campagne*

pour la tranchée de 3 câbles, à 29 fr. 95 le m¹
pour la tranchée de 5 câbles, à 51 fr. 25 le m¹

En ville, ce prix au m¹ s'est révélé plus élevé d'environ 28 %.

Tirage mécanique des câbles

Sauf pour la traversée du Rhône dont il sera question plus bas, le coût moyen du tirage, compte tenu du transport des bobines depuis la gare de livraison, ainsi que du réglage et du gardiennage, est revenu en moyenne à

1 fr. 75 par m¹ de câble simple.

Comparé au montant global de la pose complète (sans le coût des câbles eux-mêmes) le coût du tirage s'est élevé à 13 % de la dépense totale pour un poids des tambours transportés de 880 tonnes.

Dans ce coût du tirage, le camionnage seul représente 10 %.

Traversée du Rhône

Le coût total des travaux de cette traversée, y compris la cheminée et le tunnel décrits au chapitre III, a atteint en chiffres ronds 105 000 fr. toutes fournitures comprises dans cette somme, sauf les câbles.

Dans ce total l'opération de tirage elle-même a comporté

le coût des installations spéciales et la location	
du matériel	Fr. 4 400.—
la main-d'œuvre nécessaire.	» 7 100.—
Soit en tout . . .	Fr. 11 500.—

Au total l'exécution complète des travaux de pose des nouveaux câbles a nécessité, tout compris :

10 200 journées de travail manuel	
155 » d'engins mécaniques	
400 » de camions	

Conclusion

Malgré les ouvrages spéciaux nécessités par la traversée du Rhône, le montant total des dépenses de cette campagne de pose a pu être abaissé d'environ 20 %, vis-à-vis du montant des opérations de même importance des campagnes précédentes.

Genève, mars 1949.

LES CONGRÈS**Journées internationales de la Précontrainte**

Les 27, 28 et 29 juin 1949 se sont réunis à Paris les représentants des milieux techniques de plus de dix-huit Etats pour participer aux Journées internationales de la Précontrainte organisées par l'Association scientifique de la Précontrainte à Paris.

Cette manifestation avait pour but d'établir une prise de contact entre les ingénieurs des divers pays s'intéressant au béton précontraint, pour leur permettre de réaliser de nombreux échanges de vues.

Des conférences présentées par MM. Caquot, Freyssinet, Lossier, Colonnetti et Lévy, des communications des représentants des différents pays, ont alterné avec des visites d'ouvrages ou de chantiers à Orléans, Rouen, et dans la région de la Marne. Une remarquable organisation a permis à quatre cent cinquante participants de visiter ainsi en peu de temps d'importants chantiers de béton précontraint situés dans une région de 150 à 200 km autour de Paris.

Le nouveau réservoir d'eau potable de la ville d'Orléans sera constitué par trois cuves rectangulaires de 7000 m³ de capacité, de 45 m de longueur sur 33 m de largeur et 4,50 m de hauteur d'eau, suspendues à 13,50 m au-dessus du sol (fig. 1). La première cuve est actuellement en service ; la deuxième est en construction. Les dalles continues formant le plancher et les parois de chaque cuve, composées de champs de 4 m sur 4 m, sont en béton précontraint au moyen de câbles en acier à haute limite élastique posés dans le béton



Fig. 1. — Réservoir d'eau de la ville d'Orléans (capacité 7000 m³). On distingue à gauche les poteaux du deuxième réservoir en construction.

à l'intérieur de gaines ; les câbles courrent d'une façade à l'autre de la construction dans les deux sens, et assurent ainsi la solidarité de tous les éléments, tout en créant la précontrainte du béton. Le comportement de l'ouvrage s'est révélé tout à fait satisfaisant : l'étanchéité des dalles est parfaite sans application d'aucun enduit, ni sur le fond, ni sur les parois.