

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin technique de la Suisse romande
<b>Band:</b>	89 (1963)
<b>Heft:</b>	23
<b>Artikel:</b>	L'aménagement hydro-électrique du Tavropos (Megdova), Grèce
<b>Autor:</b>	Rallis, R.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-66357">https://doi.org/10.5169/seals-66357</a>

### **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:** 24.02.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

## ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes  
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)  
de la Section genevoise de la S.I.A.  
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique  
de l'Université de Lausanne)  
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole  
polytechnique fédérale de Zurich)

## COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève  
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne  
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève  
Membres:  
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.  
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgruin, arch.; J.-C. Ott, ing.  
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.  
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.  
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;  
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »  
Président: D. Bonnard, ing.  
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre,  
arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.  
Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

## RÉDACTION

D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua,  
architecte  
Rédaction et Editions de la S. A. du « Bulletin technique »  
Tirés à part, renseignements  
Avenue de Cour 27, Lausanne

## ABONNEMENTS

1 an . . . . .	Suisse Fr. 34.—	Etranger Fr. 38.—
Sociétaires . . . . .	» 28.—	» 34.—
Prix du numéro . . . . .	» 1.60	

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,  
N<sup>o</sup> II 57 75, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au  
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie  
La Concorde, Terreaux 29, Lausanne

## ANNONCES

Tarif des annonces:  
1/1 page . . . . . Fr. 350.—  
1/2 » . . . . . » 180.—  
1/4 » . . . . . » 93.—  
1/8 » . . . . . » 46.—

Adresse: Annonces Suisses S. A.  
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



## SOMMAIRE

L'aménagement hydro-électrique du Tavropos (Megdova), Grèce, par R. Rallis, ingénieur EPUL, Athènes.

Actualité industrielle (26).

Bibliographie. — Divers. — Société suisse des ingénieurs et des architectes. — Carnet des concours. — Erratum.

## L'AMÉNAGEMENT HYDRO-ÉLECTRIQUE DU TAVROPOS (MEGDOVA) GRÈCE

par R. RALLIS, ingénieur EPUL, Athènes<sup>1</sup>

L'aménagement hydro-électrique du Tavropos, affluent de la rivière Achéloos, constitue la sixième étape du programme d'électrification de l'Entreprise Publique d'Électricité de Grèce, après l'achèvement et la mise en service des ouvrages hydro-électriques du Ladon, d'Agra, du Louros et des centrales thermiques d'Alivéri et de Ptolémaïs.

L'aménagement du Tavropos a ceci de particulier, par rapport aux aménagements ordinaires, qu'il permet la mise en valeur d'abord d'une rivière, pratiquement tarie pendant les mois d'été, mais se transformant en torrent redoutable grâce aux apports du torrent Karitsiotis et surtout d'un bassin versant si étendu qu'il permet de réaliser une accumulation de 400 millions de mètres cubes d'eau, en scellant un barrage au droit de la gorge calcaire de Kakavakia, située au cœur même de la Grèce continentale; cet aménagement comporte ainsi la puissance installée la plus importante de Grèce, soit de 120 000 kW, en trois groupes de 40 000 kW, pouvant produire annuellement 250 millions de kWh. En outre, cet aménagement est conçu de façon à dériver

les eaux du Tavropos vers la plaine de Karditsa, en Thessalie, après utilisation de l'énergie, au profit de l'alimentation d'un réseau d'irrigation de 11 400 hectares créé à cet effet.

Enfin, en raison de la très faible pente du lit du Tavropos, la prise d'eau a pu être placée à un point tel qu'une chute nette de 560 m a pu être mise en valeur à l'aide d'une galerie d'aménée de 3,5 m de diamètre et seulement de 2690 m de longueur, et une conduite forcée de 3,0 à 2,4 m de diamètre et 2985 m de longueur.

L'étude, la surveillance générale et l'exécution des travaux avaient été confiées à la Société française Omnia Lyonnais — Coteci.

La disposition générale de cet aménagement est représentée sur la figure 1.

Dans le présent exposé, nous nous bornerons à décrire les particularités caractéristiques de cet aménagement,

<sup>1</sup> Cette étude est tirée du Recueil de travaux offert au professeur A. Stucky, en hommage de reconnaissance, sur l'initiative de l'Association amicale des anciens élèves de l'Ecole polytechnique de Lausanne, le 27 octobre 1962, l'année de son 70<sup>e</sup> anniversaire.

et notamment les dispositions adoptées et les résultats obtenus dans le contrôle des bétons et du barrage, dans les traitements d'étanchement et de consolidation des ouvrages principaux, c'est-à-dire du barrage et de la galerie d'aménée avec leurs installations annexes. L'exécution de ces travaux spéciaux avait été confiée à la Société italienne Ing. Giov. Rodio & Co.

### I. Barrage de Kakavakia

#### 1. Type

Ce barrage, du type voûte-mince avec déversoir central, de 83,5 m de hauteur maximum, et de 188 m de longueur en crête, constitué par 17 plots séparés par 16 joints hélicoïdaux verticaux, situé dans une région fortement ébranlée par des tremblements de terre peu avant le commencement des travaux, devait être conçu de façon à répondre aux exigences de stabilité en cas de séismes, notamment pendant la construction et à retenue vide.

A cet effet, avec le précieux concours du professeur A. Stucky, conseiller de l'Entreprise Publique d'Électricité de Grèce, il a été envisagé deux solutions qui en définitive peuvent être considérées comme plus ou moins équivalentes :

La première de ces solutions consisterait à prévoir, sur la partie inférieure du parement amont, un « berceau » compact de béton supplémentaire, indépendant de la voûte jusqu'aux fondations, sur lequel s'appuierait la voûte-mince, pour des raisons de stabilité et uniquement pendant la durée d'exécution. Mais après mise en eau et clavage, cette voûte travaillerait seule, le berceau devenant alors inutile, même en cas de séisme.

La seconde solution consisterait à découper le béton en excès du berceau, par un réseau de joints horizontaux et verticaux susceptibles de s'ouvrir lors de la déformation de la voûte mince seule clavée.

C'est en définitive cette deuxième solution qui a été retenue comme présentant une meilleure stabilité de l'ouvrage, tant en cours de construction qu'en cas de séisme. En effet, en cas de mise en charge, la présence des protubérances de béton accrochées à l'extrados des voûtes dans le sens horizontal ne troublerait que légèrement la déformation élastique des arcs horizontaux ; l'épanouissement des lignes d'égale fatigue dans le béton de ces protubérances, qui créerait une concentration des fatigues au fond des saignées verticales, ne donnerait pas lieu à des fissurations, puisque ces dernières correspondent précisément aux plans des joints de clavage des voûtes. Dans le sens vertical, le poids des consoles accrochées au parement amont tendrait à diminuer les efforts de traction qui pourraient se présenter dans la voûte supposée isolée, en sorte que dans ce cas aussi, aucune fissuration de la voûte ne serait à craindre.

En cas de secousse séismique avant clavage des voûtes, les nombreux blocs formés par le réseau de fentes horizontales et verticales dans la surépaisseur, et destinées à assouplir le barrage, sont tous liés au corps du barrage par la plus grande de leurs faces, ce qui exclut pratiquement tout risque d'entrechoquement. Par ailleurs, les efforts de cisaillement étant répartis dans la masse même de l'ouvrage, grâce à la monolithicité plot/protubérances, et leur intensité étant réduite au minimum, toute rupture par cisaillement des

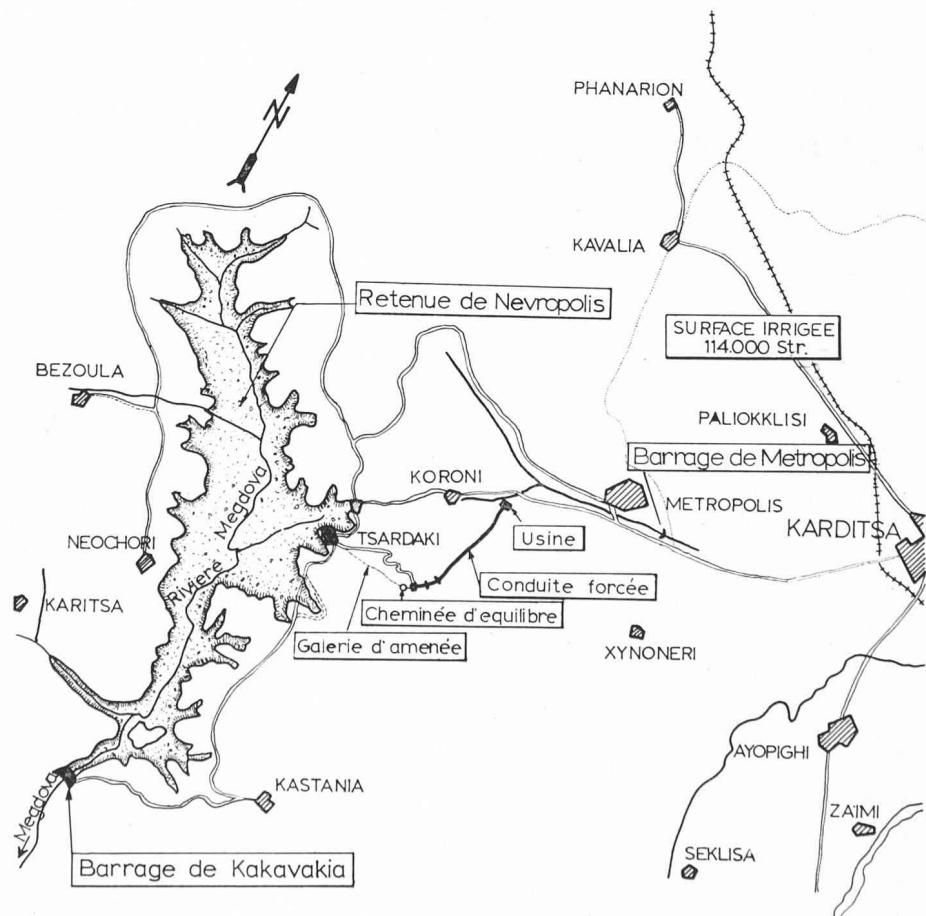


Fig. 1.

tranches de béton comprises entre deux fentes horizontales est rendue improbable. Quant aux efforts de flexion des blocs horizontaux encastrés sur le parement amont du barrage et soumis à des réactions différentielles réciproques par suite des ébranlements sismiques, ils seront prévisiblement très affaiblis grâce à l'effet favorable des forces de frottement et de cisaillement qui prendraient naissance dans les plans des fentes horizontales. Ces considérations sont également valables pour la stabilité des voussoirs considérés isolément sur toute la hauteur, dans le cas de retenue vide et de secousse séismique dirigée vers l'aval.

## 2. Prescription de la qualité du béton

Comme il s'agissait du premier barrage de ce type et de cette envergure pour la Grèce, un soin tout particulier a été donné au contrôle du béton : d'abord une série d'essais préliminaires, effectués en laboratoire, visait à déterminer, par interpolation de résultats d'essais analogues effectués pour d'autres barrages à l'étranger, puis par confirmation avec les matériaux provenant du chantier même, les caractéristiques générales des bétons vibrés qui seront fabriqués pour les essais principaux.

A l'aide de ces essais préliminaires, on a fixé, au jugé, les degrés de maniabilité désirés du béton vibré, en faisant varier les proportions de ciment et d'agrégats correspondant aux dosages 250 et 200, le facteur E/C et le pourcentage d'adjuvants (FRO-B ou Frioplast) ajoutés. On a ainsi déterminé que pour l'obtention de la meilleure maniabilité possible, les facteurs E/C devaient être, indépendamment des compositions granulométriques envisagées, de 0,55 pour un dosage en ciment de 250 kg/m<sup>3</sup> (ou 0,52 dans le même cas mais avec adjonction d'adjuvant) et de 0,66 pour un dosage de 200 kg/m<sup>3</sup> (ou 0,62 avec adjonction d'adjuvant). Il est à noter qu'une légère variation de ces chiffres était admise pour tenir compte de fortes variations de température et d'humidité.

Sur la base de ces données préliminaires, on a procédé à l'exécution d'un programme systématique d'essais en laboratoire, pour les deux dosages en ciment de 250 et 200 kg/m<sup>3</sup> (le ciment grec normal contenant environ 10 % de terre de Santorin). Pour chacun de ces dosages, on a examiné les résistances à compression (cubes de 30 cm à 7, 28, 90 et 365 jours), flexion (prismes 20/20/60 cm à 90 jours), des essais de perméabilité sur cubes de 20/20 cm et des essais de gélivité sur prismes de 20/20/60 cm à 90 jours seulement, obtenus pour cinq compositions granulométriques différentes, comprises à l'intérieur d'un fuseau standard prescrit d'avance, avec et sans adjuvants.

Tous les bétons d'essais étaient tamisés, en éliminant le refus sur tamis à mailles de 60 mm, les plus gros agrégats étant de 100 mm. En outre, le programme comprenait aussi des essais avec du ciment à 20 % de terre de Santorin pour les deux sondages et les cinq granulométries susmentionnées. Enfin, des essais spéciaux visaient à déterminer, pour un dosage en ciment de 200 kg/m<sup>3</sup> et la composition granulométrique moyenne, l'effet sur la résistance à compression, d'une part d'une variation du facteur E/C de 0,69 à 0,64 et d'autre part d'une variation de la proportion de terre de Santorin de 10 à 30 %. Bien entendu, on avait égale-

ment eu soin d'effectuer des essais parallèles destinés à fixer la qualité du ciment utilisé dans ces essais.

L'interprétation des résultats obtenus sur les 341 cubes (et prismes) que comportait ce programme, a conduit aux conclusions suivantes :

- a) La composition granulométrique moyenne du fuseau prescrit donnait bien une résistance moyenne du béton par rapport aux autres granulométries envisagées. La moyenne de tous les essais à compression à 90 jours, indépendamment de la granulométrie, a donné :
  - 376 kg/cm<sup>2</sup> pour dosage 250 et une résistance du ciment à 28 jours de 537 kg/cm<sup>2</sup>.
  - 317 kg/cm<sup>2</sup> pour dosage 200 et le même ciment.
- b) L'influence de l'adjuvant FRO-B (0,7 cm<sup>3</sup>/kg de ciment) se traduisit par une augmentation de la résistance à la compression des bétons de 2 à 18 %, à qualité de ciment égale. En outre, l'effet favorable des adjuvants sur la maniabilité des bétons était caractéristique.
- c) L'influence du dosage en ciment sur la résistance minimum des bétons était d'autant plus importante que la résistance des ciments grecs variait elle-même dans de larges limites. Compte tenu de ces variations, un dosage de 250 kg/m<sup>3</sup> de ciment grec normal (à 10 % de terre de Santorin), devait être retenu pour atteindre la résistance de béton correspondant au taux de travail désiré de 60 kg/cm<sup>2</sup> avec un coefficient de sécurité de 4,2.
- d) L'augmentation de la teneur du ciment en terre de Santorin de 10 à 30 % conduit bien entendu à une diminution de la résistance du béton, surtout au cours des premiers jours de prise. Cette diminution tend toutefois à s'annuler à l'âge de 90 jours.
- e) Le délai de mise en place du béton était fortement influencé par l'effet de l'évaporation assez intense en Grèce. La quantité d'eau à utiliser pour la confection du béton devrait être réglée sur le chantier même.
- f) Au point de vue des essais de gélivité, il a été établi que les bétons avec entraîneur d'air ont supporté 200 cycles de gel et dégel et peuvent donc être considérés comme non gélifs, ce qui n'a pas été le cas pour les bétons ordinaires, pour lesquels le module dynamique ne pouvait être déterminé que jusqu'à 140 cycles seulement, par suite de la fissuration des prismes.

## 3. Qualité des bétons obtenus sur le chantier

Le bétonnage du barrage a été exécuté en deux campagnes : pour la partie basse en 1958, et pour le reste en 1959/60. Le volume total du béton mis en place s'élevait à environ 90 000 m<sup>3</sup>, dont 21 800 m<sup>3</sup> étaient coulés en 1958 et 68 200 m<sup>3</sup> en 1959/60.

Le cubage coulé était de 273 m<sup>3</sup>/jour en moyenne générale, avec une pointe de 783 m<sup>3</sup>/jour. Le ciment utilisé était du ciment Héraclès grec normal à 10 % de terre de Santorin, et le béton confectionné contenait 0,7 cm<sup>3</sup>/kg C.P. d'entraîneur d'air FRO-B.

Le béton de la première campagne, coulé à l'aide des installations basses, était constitué d'agrégats roulés provenant de la rivière Tavropos elle-même, concassés et gradués suivant la courbe granulométrique moyenne ci-dessus, dans une station située à environ 2 km en amont du barrage. Par contre, le béton de la deuxième campagne était confectionné à l'aide d'agrégats provenant d'une carrière calcaire située à proximité du barrage, suivant la même composition granulométrique.

Pour le contrôle des bétons de chantier, on effectuait quotidiennement quatre prélèvements par poste dans une même gâchée pour les essais de compression à 7 et 90 jours, les deux premiers (à 7 jours) étant destinés à vérifier l'effet du ciment, et les seconds étant considérés comme déterminants pour le contrôle de la

résistance effective des bétons. En outre, on préparait également deux prismes par semaine pour les essais de flexion à 90 jours, deux cubes par semaine pour les essais de compression à 365 jours, et enfin quatre cubes par mois pour les essais de perméabilité à 90 jours, sous des pressions croissantes de 0 à 20 kg/cm<sup>2</sup>.

Il a ainsi été préparé sur le chantier le chiffre important de 1660 éprouvettes d'essai, dont 500 environ pour la campagne 1958 et le reste pour celle de 1959/60. Ces essais nous ont conduit aux interprétations ci-après ; séparément pour chacune des deux campagnes en raison de la différence de provenance des agrégats, et en notant que chaque essai comprenait la moyenne des résistances de deux éprouvettes.

*Campagne 1958 (agrégats roulés) :*

Nombre d'essais . . . . .	174
Résistance moyenne générale à compression (90 jours) .	374 kg/cm <sup>2</sup>
R <sub>7</sub> /R <sub>90</sub> . . . . .	0,64
Résistance moyenne générale à flexion (90 jours) . . .	59 kg/cm <sup>2</sup> (dis. 10,5 %)
Dispersion par levée (moyenne)	5,4 % (1,6-11,5)
Dispersion par plot (moyenne)	5,5 % (2,4-7,4)

*Campagne 1959/60 (agrégats de carrière) :*

Nombre d'essais . . . . .	300
Résistance moyenne générale à compression (90 jours) .	343,00 kg/cm <sup>2</sup>
R <sub>7</sub> /R <sub>90</sub> . . . . .	0,66
Résistance moyenne générale à flexion (90 jours) . . .	62,55 kg/cm <sup>2</sup> (dis. 12,5 %)
Dispersion par levée (moyenne)	9,70 % (4,00-16,40)
Dispersion par plot (moyenne)	11,60 % (9,40-17,10)

Les éprouvettes de béton coulé avaient les mêmes dimensions que celles confectionnées préalablement au laboratoire. Les bétons produits dans la tour à béton sur le chantier, au dosage de 250 kg/m<sup>3</sup>, présentaient en moyenne des résistances égales ou légèrement inférieures à celles des bétons du laboratoire, ce qui peut être considéré comme un véritable succès, compte tenu de la diversité des facteurs influençant la confection des bétons sur le chantier.

Les coefficients de sécurité admis, en fonction de la dispersion des résultats des essais de contrôle, ont été admis à 3,65 pour les cas de charge normaux (poids propre, effet de la poussée d'eau et effet de température) et à 2,8 pour les cas de charge exceptionnels (les ci-dessus plus l'effet séismique). Dans ces conditions, on a constaté que dans les cas de charge normaux, les résistances obtenues sur le chantier ont été en moyenne de 87 % supérieures aux valeurs exigées, et dans les cas de charge exceptionnels, les résistances effectives étaient au moins deux fois supérieures à celles exigées. Dans chacun de ces cas, aucun cas isolé n'a présenté de résistance effective inférieure à la résistance moyenne exigée.

Les résistances à la compression obtenues au bout d'une année s'élevaient en moyenne générale à 470 kg/cm<sup>2</sup> avec une faible dispersion moyenne de 7,2 %.

Les essais de perméabilité, effectués sur béton tamisé à l'anneau de 75 mm, n'ont décelé des infiltrations que pour la pression finale maximum de 20 kg/cm<sup>2</sup> ; leur valeur totale variait entre 0 et 85 cm<sup>3</sup> (moyenne des infiltrations de trois cubes pendant 10 jours), ce qui conduit à des coefficients de perméabilité extrêmement faibles, de l'ordre de  $6 \times 10^{-8}$  à  $6 \times 10^{-9}$ .

Enfin, des forages de contrôle effectués dans la masse du béton des plots centraux, ont donné des carottes de béton absolument compact sans le moindre nid de gravier. On a profité de ces forages pour y effectuer des mesures de température du béton, en vue de la détermination des époques de clavage les plus favorables, comme il sera expliqué plus loin.

*4. Traitements d'imperméabilisation et consolidation du rocher au barrage*

Le barrage de Kakavakia a été construit dans une gorge entaillée dans un banc de calcaires très lités, sensiblement perpendiculaire à la rivière, présentant un plongement vers l'amont de 60-70°. A l'amont de la gorge calcaire, on a décelé dans les deux rives des terrains beaucoup moins perméables ; sur la rive droite, le banc est obliqué, pour se poursuivre à peu près en direction du versant, ce qui a facilité le clavage des lits rocheux et, par suite, provoqué la couverture de la pente de gros blocs plus ou moins mêlés d'argile rouge sous forme d'un gros éboulis. Sur la rive gauche, par contre, les éboulis sont moins épais et le banc calcaire est mieux visible ; vers l'amont, l'obliquité des couches fait que l'on retrouve plus rapidement le flysch superposé au calcaire. Au droit des fondations du barrage, l'érosion (surtout dissolution) ne paraît pas avoir eu le temps de s'attaquer profondément aux joints des bancs calcaires ; les fissures de ces bancs apparaissent souvent colmatées par de la calcite secondaire. Dans la partie superficielle, il y a donc eu lieu d'exécuter un dérochage assez important. Enfin, aucune cavité importante n'avait été décelée.

Dans ces conditions, le programme des traitements comprenait un écran d'étanchement et consolidation principal de la roche sous le barrage, prolongé par deux voiles au large sur les rives, un traitement de collage et consolidation roche/béton, et le clavage des joints de dilatation.

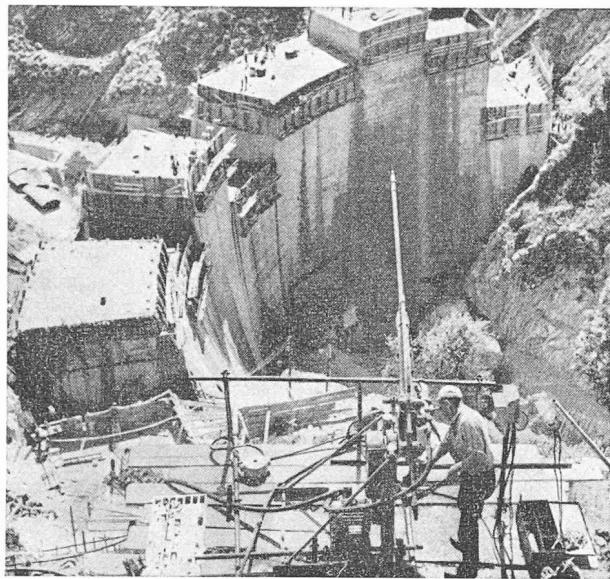
*a) Ecran d'étanchement et de consolidation principal*

Comme solution de départ, on avait prévu, au début, un écran constitué de deux files de sondages (primaire et secondaire) espacées de 6 m, les trous de chacune des files étant distants entre eux de 12 m et disposés en quinconce.

Cet écran était placé approximativement sur l'axe de la ligne médiane des fouilles, entre les parements amont et aval. Vers les deux rives, la file amont coïncidait sensiblement avec le parement amont de la voûte active, tandis que dans la partie centrale du barrage, les deux files chevauchaient le parement amont de la voûte active. Pour la profondeur des forages, on a fixé en principe des valeurs minima pour la file amont (primaire) et la file aval (secondaire), correspondant à une fraction de la hauteur du barrage en chaque point.

L'exécution des forages et leur injection consistait à forer et injecter d'abord 4-5 trous consécutifs du primaire (P), puis à procéder de même sur la file secondaire (S), et en poursuivant ainsi le traitement par tronçons.

Sur un total de 34 forages du primaire, les 12 ont été carottés pour vérifier les caractéristiques du terrain ; il en est résulté que la zone superficielle désagrégée du



banc calcaire atteignait en moyenne les 15 m. Côté R. G., la roche saine ne commençait qu'à une profondeur de 25-30 m. Côté R. D., les couches étaient moins feuilletées, mais les lits d'argile de décalcification interposés présentaient des vides assez importants.

En général, les injections étaient exécutées par passes remontantes ; à l'exception du côté R. D. ou à cause des vides susmentionnés, les injections devaient s'opérer en descendant, par cimentations et reforages successifs.

Tous les trous de l'écran ont été injectés au coulis de ciment pur, dans des rapports C/E variant de 1 à 0,5 (minimum 0,25). La pression maximum d'injection a été fixée à 50 kg/cm<sup>2</sup> pour les profondeurs supérieures à 50 m et réduite progressivement en remontant. De faibles pertes de coulis étaient décelées en surface et en aval des deux rives, vraisemblablement à travers la zone désagrégée mentionnée plus haut ; l'injection des trous correspondants étaient donc suspendue temporairement pour être reprise plus tard après la prise, jusqu'à atteindre le refus à la pression prescrite.

Les essais de perte d'eau étaient exécutés dans tous les forages et sur leur longueur totale, par passes de 5 m, suivant le critère Lugeon, à la pression de 5 atm pour les tranches supérieures à la cote 755 et de 10 atm pour les tranches inférieures à cette cote. La durée totale de ces essais d'eau était de 14 minutes, soit 2 minutes à 3 atm, 2 minutes à 6 atm, et 10 minutes à 10 atm.

En réalité, la nécessité d'un resserrement des forages en plan et d'une prolongation en profondeur n'a pas tardé à se manifester, tant par suite des absorptions

d'eau relativement fortes obtenues au début au cours de l'exécution des essais de perméabilité, que par suite d'absorptions de coulis importantes, localisées en certains points.

Ainsi, au point de vue disposition, en plan, on a dû intercaler une troisième file de trous (ligne de serrage T) au milieu des deux files susmentionnées, les diagrammes pression/durée d'injection présentant, entre les files primaire et secondaire, des marges assez importantes de traitement incomplet. En outre, dans la partie centrale — où, à cause du bétonnage, les forages n'avaient pas encore commencé — il a été jugé nécessaire de ramener l'écartement des deux files de trous à 2,00 m. Ceci présentait le double avantage de permettre l'exécution de tous les forages à partir de la galerie de pied (et non depuis l'extérieur, ce qui aurait supprimé la verticalité de l'écran), et la possibilité de renforcer éventuellement l'écran plus tard, même sous lac plein.

Au point de vue de la profondeur des forages, il avait été constaté que la perméabilité de la roche variait dans de larges limites, indépendamment de la profondeur. Pour cela, il a été décidé de prolonger les forages au-delà du minimum prescrit, partout où le critère Lugeon était dépassé et jusqu'à ce que ce critère soit satisfait, mais en tout cas pas au-delà d'une profondeur maximum égale à la hauteur du barrage au droit du trou, quelle que soit la perméabilité obtenue à cette profondeur maximum.

La disposition générale des forages et des résultats d'injection est représentée sur les figures 2 et 3.

Il est à noter que pour compléter le traitement de serrage tertiaire, on a dû exécuter également deux auréoles d'étanchement et consolidation de huit trous chacune, écartées entre elles de 2 m et en alternance autour de la galerie de dérivation sur la R. G., au point d'intersection de l'axe du barrage et de celui de la galerie.

Les résultats obtenus pour l'écran principal sont résumés dans le tableau I ci-après, où pour 113 forages au total, d'une longueur de 5642 m, il a été absorbé au total 1705 t de ciment, y compris le traitement de contrôle. (Voir tableau I.)

En comparant les chiffres du tableau I, on constate que la réduction de l'absorption moyenne des essais d'eau est moins sensible que celle du coulis de ciment : c'est que la première indique la perméabilité du rocher sous une pression de 10 atm seulement, tandis que la seconde était obtenue sous des pressions bien supérieures. Par ailleurs, au point de vue des absorptions de coulis, il a été constaté une nette diminution en passant du traitement primaire au secondaire ; par contre, le

TABLEAU I

Caractéristiques	File primaire (P)	File secondaire (S)	Serrage tertiaire (T)	Auréole galerie dérivation	Moyenne générale	Contrôle
Absorption moyenne d'eau, l/min/m	1,92	1,87	1,03	0,524	1,44	0,30
Absorption maxima d'eau, l/min/m	15,60	19,00	6,74	5,00	19,00	—
Absorption moyenne de ciment, t/m	0,350	0,234	0,381	0,184	0,329	0,108
Absorption maxima de ciment, t/m	8,15	2,15	7,75	2,34	8,15	0,230
Absorption moyenne par m <sup>2</sup> d'écran t/m <sup>2</sup>	0,025	0,016	0,031	0,036	0,067	—

traitement de serrage (tertiaire) a décelé un indice moyen d'absorption plus élevé, ce qui s'explique par le fait que les rayons d'action des primaire et secondaire étaient trop faibles pour intéresser l'espace intermédiaire. Ceci justifiait donc pleinement le traitement de serrage. Enfin, il est encore à noter que la plupart des absorptions de ciment dans le primaire et secondaire avaient lieu à des pressions plus basses, alors que celles du tertiaire dépassaient pratiquement toujours le seuil Lugeon. On peut donc dire qu'il y a eu une amélioration certaine et importante du rocher. Ces remarques, ainsi que le comportement du terrain, sont d'ailleurs confirmés dans le graphique ci-après (fig. 4) illustrant l'allure caractéristique des pressions d'injection par rapport au temps, entre primaire-secondaire-tertiaire.

Enfin, la baisse de l'indice moyen de perte d'eau a signalé une amélioration croissante des conditions du rocher, bien que la sécurité Lugeon n'ait pas toujours été atteinte au fond de tous les forages.

Le contrôle effectif de l'homogénéité du traitement de cet écran principal a été réalisé par l'exécution de dix forages de contrôle, interceptant le plus grand nombre de forages (P, S, T) possible et explorant en même temps les zones de plus forte absorption de coulis. Les résultats de ce contrôle sont indiqués dans le tableau I et illustrés sur la figure 5, qui indique également la distribution, par zones, des densités d'absorption de coulis et les variations des pertes d'eau correspondantes.

L'absorption moyenne générale d'eau qui, pour les

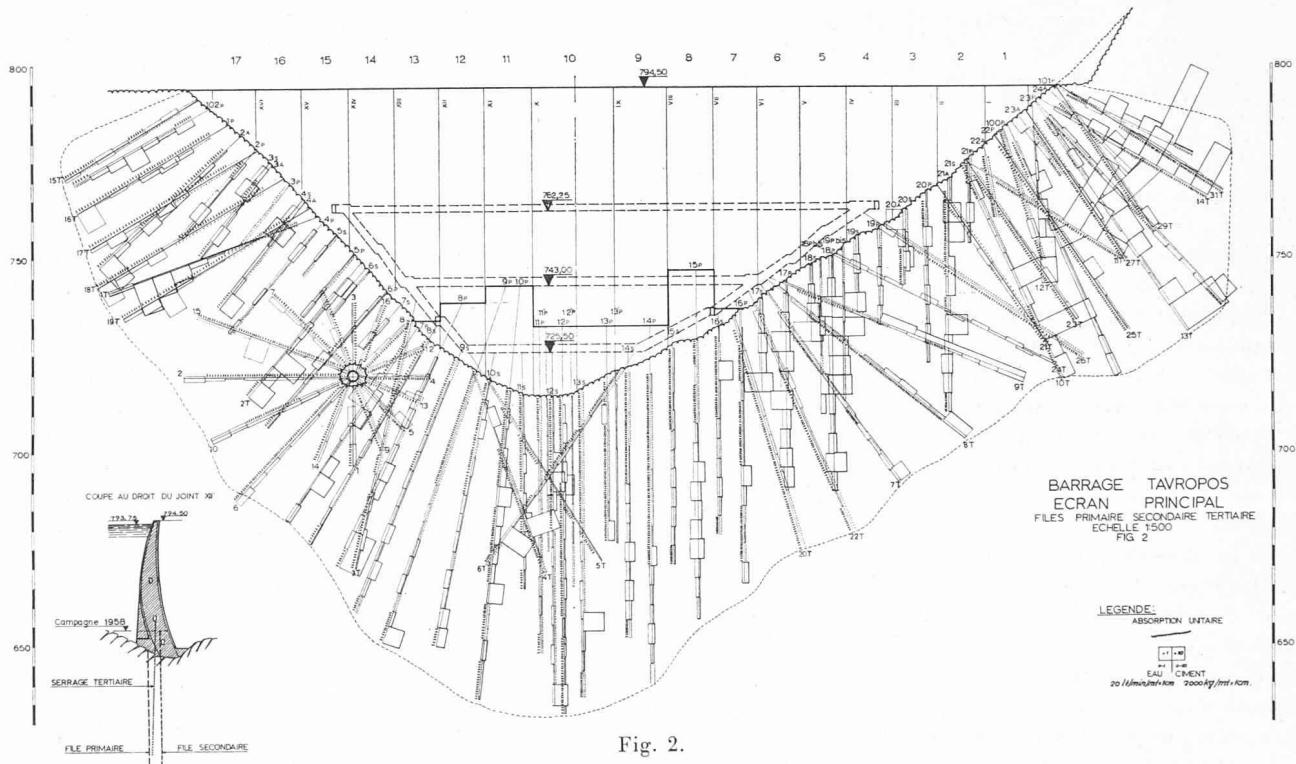


Fig. 2.

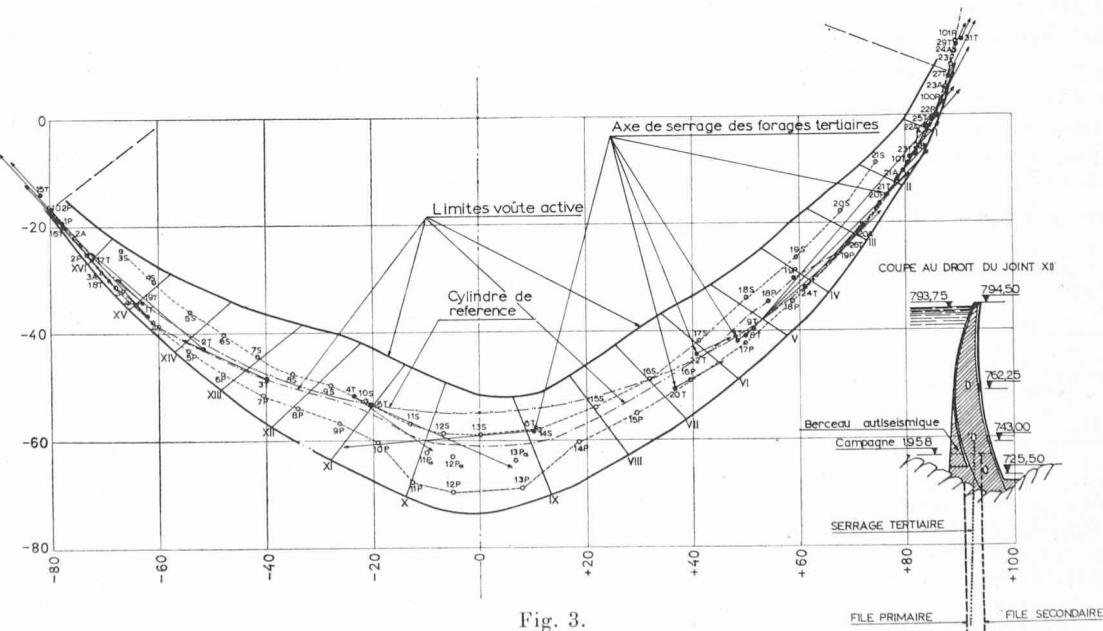


Fig. 3.

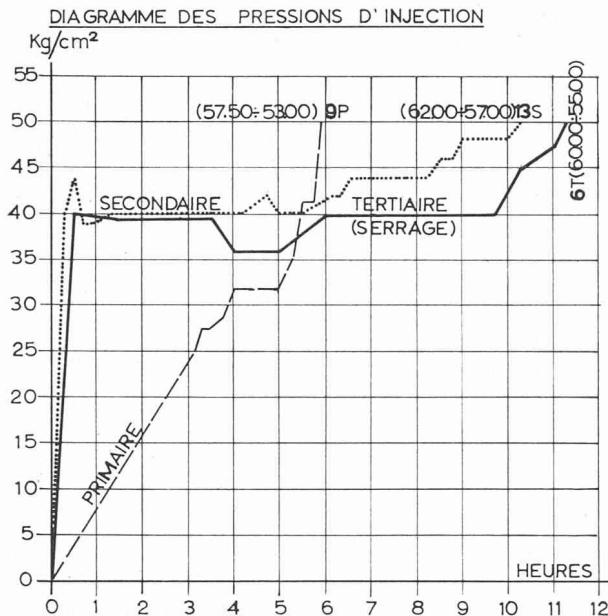


Fig. 4.

trous primaires, secondaires et tertiaires, était de 1,44 l/min/m, a été abaissée à 0,30 l/min/m dans les trous de contrôle.

Ainsi qu'il ressort du diagramme (fig. 6) ci-après, sur un total de 193 essais d'eau exécutés, 96,7 % ont donné des pertes inférieures ou égales à l'unité Lugeon.

Il découle enfin du tableau I que lors du contrôle, l'absorption moyenne de coulis a été réduite au tiers, alors que la moyenne des absorptions maxima a été abaissée au  $1/22$  de la moyenne des absorptions maxima initiales (fig. 6).

#### b) Etanchement et consolidation des voiles au large

Pour éviter tout contournement de l'écran principal vers l'aval par l'eau de la retenue, on a prolongé cet

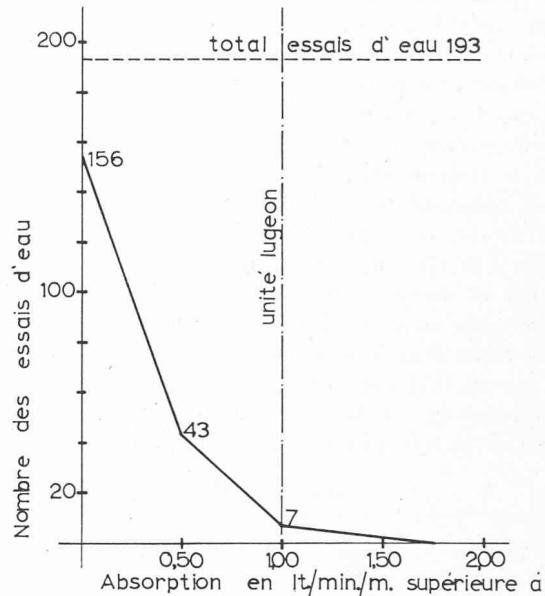


Fig. 6.

écran par deux voiles sur la R. D. et un voile sur la R. G.

Sur la R. D., il a été prévu deux voiles distincts : le premier voile, constitué par deux files de trous verticaux distantes de 5 m suivant la cote des crues 795,00 intéressait une zone extrêmement désagrégée et parfois karstifiée et traversée par des courants d'eau souterrains, où il a été nécessaire de mélanger au coulis C/E = 1/1, de la bentonite (10 % sur poids du ciment) activée par du carbonate de soude. Le plan du second voile, décalé de 26° vers l'aval par rapport à la direction de la corde du barrage et constitué par six forages disposés en éventail, intéressait une roche calcaire compacte (fig. 7).

Sur la R. G., le voile, constitué par seize trous, dont dix primaires et six secondaires, espacés de 8 à 10 m

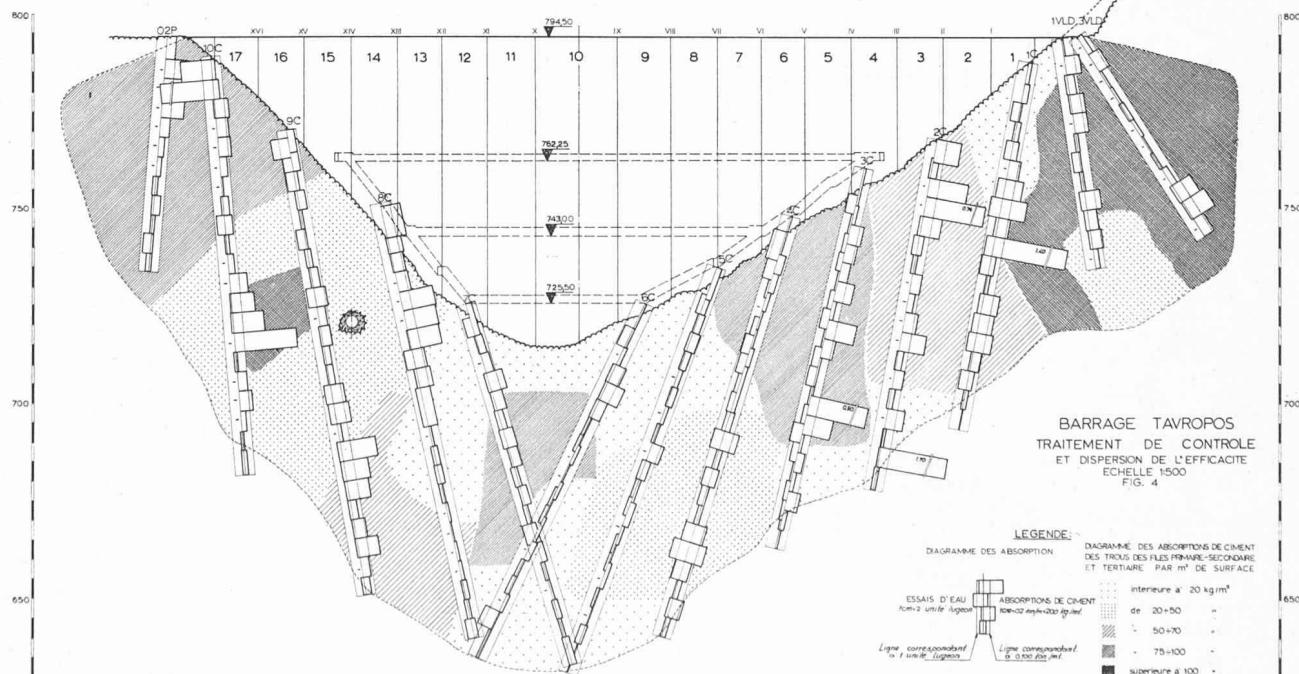


Fig. 5.

et disposés en éventail, était implanté en prolongement de la corde du barrage.

A l'exception du premier voile R. D., qui avait dû être injecté par passes descendantes à cause de la perte de l'eau de circulation, les autres voiles au large étaient injectés suivant les modes opératoires et critères suivis dans le traitement de l'écran principal.

Les résultats de ces traitements ont donné, pour la rive droite, des absorptions moyennes de 0,83 t/m (max. 2,46 t/m) dans les deux files du premier voile normal au barrage, et 0,09 (max. 0,16 t/m) dans le second voile en éventail, tandis que pour la rive gauche, où la roche était plus saine, l'absorption moyenne n'a été que de 0,21 t/m (max. 0,33 t/m). Cette différence notable est due au fait de la qualité plus saine des calcaires de la rive gauche.

TABLEAU II

Caractéristiques	Voiles R.D.		Voile R.G.
	Premier	Deuxième	
Absorption moyenne d'eau, 1/min/m . . . . .	7,480	0,097	0,526
Absorption maximum d'eau, 1/min/m . . . . .	—	0,720	—
Absorption moyenne coulis, t/m forage . . . . .	0,950	0,089	0,236
Absorption moyenne coulis, t/m <sup>2</sup> voile . . . . .	0,108	0,010	0,029

c) *Traitements de collage et de consolidation du contact rocher-béton*

Ce traitement a été exécuté après les injections de l'écran principal, en commençant par les plots centraux

vers les rives, afin de permettre le démarrage de la mise en eau de la retenue. Le traitement a été limité à la fondation de la voûte active. Les forages ont été exécutés soit depuis la galerie de visite soit depuis le parement aval. La densité des forages correspondait à un trou par 15 m<sup>2</sup> de surface de fondation. Le coulis de ciment C/E = 4/1 à 1/1 était injecté à une pression maximum de 8 atm pour les basses absorptions et 6 atm lorsque celles-ci dépassaient 0,5 t/m.

Pour un total de 128 trous du traitement de collage, l'absorption moyenne a atteint 0,329 t/m de forage.

Les forages de contrôle du collage, exécutés sous les plots n°s 3, 6, 10, 13, 14, 15 et 16 (200 m de longueur), n'ont donné qu'une absorption supplémentaire de 0,011 t/m de forage.

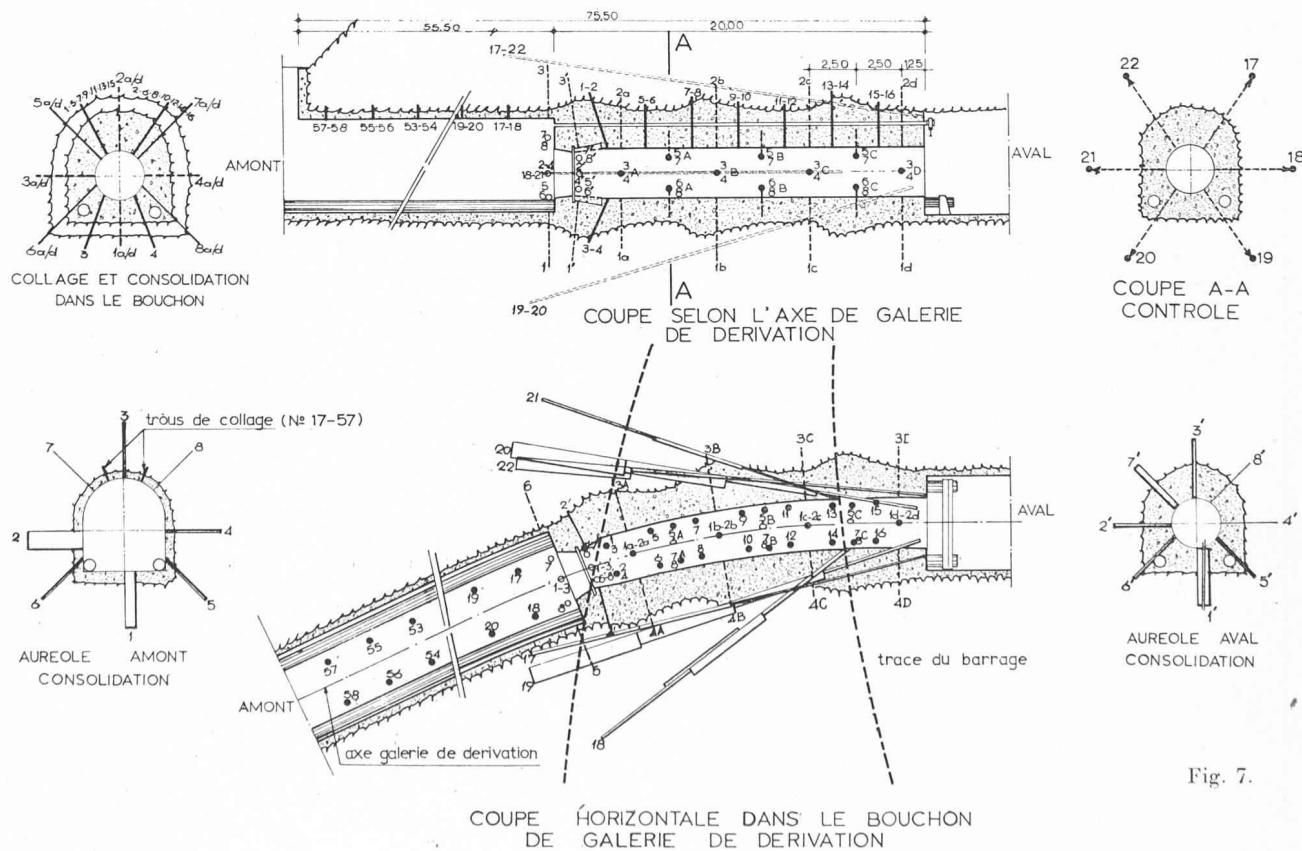
d) *Traitements de la galerie de dérivation et du bouchon sautable*

La galerie de dérivation sur la rive gauche, d'une longueur d'environ 130 m, comportait un léger revêtement sur une distance de 55,5 m depuis son extrémité amont, qui était suivi d'un revêtement massif encastré dans la roche au droit du bouchon sautable en acier, de 20 m de longueur.

Les traitements exécutés sont illustrés sur la figure 7.

Le traitement de collage avait été appliqué dans des trous forés au marteau, sur toute la longueur de revêtement de 75,50 m : dans le tronçon de 55,50 m de longueur vers l'amont, il comportait seulement deux trous en calotte tous les 2,50 m, décalés de 30° par rapport à l'axe vertical. Pour une longueur totale de forages de 86,65 m, l'absorption moyenne avait atteint 0,312 t/m de forage.

Un traitement supplémentaire de collage et consoli-



dation avait été exécuté sur le tronçon d'ancrage du bouchon sautable, sur 20 m de longueur : il était réalisé par des séries de quatre trous espacés de 2,50 m et disposés symétriquement par rapport à l'axe de la galerie, chacune des séries étant décalée de 45° par rapport à la précédente. Pour un total de 104,2 m de forages, l'absorption moyenne était de 0,27 t/m de forage.

En outre, à proximité aval et amont du bouchon, il avait été exécuté deux auréoles de consolidation de huit trous chacune. Pour une perforation totale de 48,65 m, l'absorption moyenne était de 0,45 t/m de forage.

Le remplissage des vides entre la tôle de revêtement du bouchon et le béton avait été réalisé à l'aide d'une pompe à main à travers des trous forés au marteau pneumatique. Pour arrêter des suintements qui étaient apparus à l'aval du bouchon après la mise en eau, on a également injecté à la pompe à main une auréole complémentaire de trous dans le béton : l'injection s'effectuait par alternance et par passes descendantes. L'absorption moyenne correspondante avait atteint la valeur infime de 0,055 t/m de forage.

Enfin, il avait été jugé opportun de prévoir un traitement supplémentaire de contrôle pour vérifier l'état de saturation de la roche sous la R. G. du barrage, étant donné que cette région était plus ou moins détendue par suite du creusement de la galerie, donc un siège préférentiel des trajectoires d'éboulement. A cet effet, on avait réalisé une auréole disposée en parapluie vers l'amont, interceptant ainsi le plus grand nombre de couches possible, et injecté six forages issus depuis la galerie de dérivation, au droit du bouchon sautable. L'absorption moyenne, dans ces deux cas, était d'environ 0,011 t/m de forage seulement.

#### e) Clavage des joints de construction du barrage

Pour le clavage des joints hélicoïdaux, il a été adopté le système de la SEIL, largement utilisé en France. Ce système est constitué d'un réseau de rainures d'alimentation verticales et de rampes à faible inclinaison portant des clapets réinjectables « Capitaine », mis en place lors du bétonnage du premier des plots du joint. Dans chaque joint, ce réseau est subdivisé en un certain nombre de champs d'injection délimités par le joint d'étanchéité du parement amont (waterstop), le joint d'étanchéité aval (polyvinyle), et les divers niveaux correspondant aux arrêts de joint horizontaux (éventuellement radiers des galeries de visite).

L'époque la plus favorable à l'injection des joints a été déterminée en fonction :

- du programme de bétonnage ;
- du programme de mise en eau de la retenue ;
- du refroidissement naturel du béton, dépendant des variations de température de l'air ambiant, de la chaleur dégagée par le ciment en fonction du temps, du dosage du béton en ciment, de l'époque du bétonnage et de la forme et dimension du massif, et en sorte que le béton ait atteint la température de clavage fixée à 16°C, et que le niveau de la retenue n'ait pas atteint la limite inférieure du champ à injecter.

Ces conditions étaient bien remplies pour la zone du béton coulé pendant la campagne 1958, et pour celui de la zone de couronnement, de sorte que le clavage des joints des champs correspondants (inférieur et supérieur) pouvait être exécuté au printemps 1959 et res-

pctivement après l'achèvement du bétonnage du barrage.

Par contre, pour les champs intermédiaires, le refroidissement naturel du béton ne devait atteindre la température désirée de 16°C qu'après la mise en eau de la retenue, entraînant une légère flexion des plots sous l'effet de la poussée de l'eau. Une étude détaillée de cette question a toutefois montré que les contraintes, les déformations radiales et la préflexion des plots non clavés de ces champs pouvaient demeurer dans des limites acceptables et non dangereuses, même en cas de crue exceptionnelle, à condition que les niveaux de la retenue n'atteignent environ que la mi-hauteur des champs correspondants, au moment de l'exécution des clavages respectifs. En outre, comme le clavage de ces champs intermédiaires devait s'effectuer pendant que la température moyenne du béton correspondant demeurait encore supérieure à la température de clavage (16°C), il a été prévu de procéder à une injection complémentaire, à l'époque où le béton aura atteint sa température minimum.

Dans ces conditions, le clavage des joints a été exécuté comme suit : après avoir procédé à l'élimination de l'air contenu dans les joints et à leur lavage à l'eau propre, on a commencé l'injection à une pression de 3-4 kg/cm<sup>2</sup> seulement, en ayant soin d'étancher les fuites éventuelles, et avec du coulis à faible densité. Le coulis au ciment normal, activé dans des mélangeurs spéciaux, était ensuite injecté dans la proportion E/C = 1/1, à des pressions allant jusqu'à 8 kg/cm<sup>2</sup> (exceptionnellement 12 kg/cm<sup>2</sup> au cas où le coulis ne sortait pas par la rainure collectrice). L'injecteur utilisé travaillait en circuit fermé, de façon à éviter tout coup de pression néfaste dans les joints.

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau III ci-après qui donne les absorptions moyennes en kg/m<sup>2</sup> de joint :

TABLEAU III

Champs	Absorptions des injections (kg/m <sup>2</sup> ) de clavage		
	Primaire	Secondaire	Complémentaire
I (inférieur) .	7,09	—	0
II . . . . .	5,19	4,74	1,83
III . . . . .	1,86	4,96	1,93
IV . . . . .	0,860	4,68	—
V (supérieur) .	0,864	1,78	—
Moyenne . . .	2,12	4,45	1,89

#### II. Galerie d'aménée

La galerie d'aménée, d'une longueur totale de 2691 m, a été creusée presque entièrement dans du flysch constitué, de la tête amont à la P. K. 1000, de schistes argileux stratifiés, et de là à la tête aval d'une succession de couches gréseuses tantôt dures et homogènes, tantôt fissurées avec interstratifications schisteuses plus ou moins décomposées. Vers la sortie, sur une longueur de 150 m environ, le grès dur interceptait une zone de congolomérats plus ou moins cimentés. En général, le rocher était de mauvaise tenue, le creusement ayant

occasionné des gonflements et des décollements en calotte ainsi que des hors-profilis importants.

L'avancement était en moyenne de 4,75 m/jour environ (max. 6,30 m/jour). Des venues d'eau s'étaient présentées en plusieurs points, mais de débit réduit.

Cette galerie comprend une chambre de vannes, à une distance de 156 m de la prise d'eau, une cheminée d'équilibre à 119 m de la sortie, le dernier tronçon aval de 128 m comportant un blindage de protection métallique.

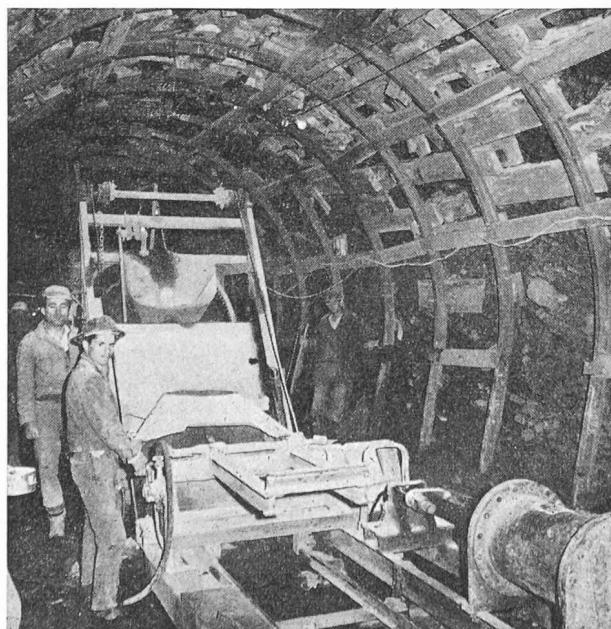
Le béton utilisé pour la construction du revêtement comportait un dosage en ciment de 250 kg/m<sup>3</sup> pour le radier, et des dosages de 275 à 300 kg/m<sup>3</sup> pour les piédroits et la voûte. Les résistances moyennes à la compression à 28 jours étaient respectivement de 245, 247, 269 kg/cm<sup>2</sup>, avec des dispersions de l'ordre de 14,7 à 12,5 % respectivement.

### 1. Traitements de collage et de consolidation

En raison de la présence de hors-profilis importants et de la dislocation superficielle de la roche, comme mentionné plus haut, il a été décidé de procéder à un traitement systématique de collage, suivi d'un traitement de consolidation de la roche encaissante sur toute la longueur de la galerie. Des traitements semblables ont également été appliqués aux ouvrages annexes de cette galerie, conformément aux dispositions exposées ci-après :

#### a) Traitement de collage rocher/béton

En prévision des absorptions importantes qui devaient se présenter pour les raisons exposées ci-dessus et en vue de réduire le coût de ce traitement, il a été décidé, dès le début, d'utiliser les déblais marneux de la galerie, en produisant une argile colloïdale qui, mélangée au coulis ciment-eau, permettrait d'obtenir une résistance de la zone de contact revêtement/rocher au moins égale à celle de la roche elle-même. A cet effet, il a été prévu dès le début une installation complète de préparation du coulis binaire de composition optimum, à l'extérieur (amont) de la galerie, et une installation mobile à l'intérieur de celle-ci.



Plusieurs essais effectués sur place, dans la centrale installée à la tête amont de la galerie, ont permis d'obtenir un coulis binaire ciment/argile/eau répondant aux caractéristiques les plus favorables soit, par mètre cube de mélange :

— Poids du ciment Portland grec . . . . .	0,601 t
— Poids de l'argile colloïdale . . . . .	0,300 t
— Quantité d'eau . . . . .	697 litres
— Poids spécifique . . . . .	1,598 t/m <sup>3</sup>
— Rendement volumétrique par décantation naturelle . . . . .	96 %

Le mélange argile-ciment-eau devait être confectionné avec une homogénéité spéciale par malaxage des deux coulis (ciment-eau et argile-eau) dans la galerie même, parce que sa viscosité était si élevée que l'injection directe ne pouvait se faire à une distance supérieure à 50 m.

L'adoption de ce mélange présentait de considérables avantages, tant au point de vue technique qu'au point de vue économique :

#### Avantages techniques

- Le coulis d'argile confectionné aux caractéristiques ci-dessus était très stable et donnait un rendement volumétrique à décantation naturelle de l'ordre du 96 %, tandis que les coulis pour injection eau-ciment et eau-ciment-sable, même les plus épais, n'ont qu'un rendement volumétrique toujours inférieur à 65 — 70 %. La quantité d'eau qui se sépare par décantation du coulis est, de ce fait, très basse, ce qui est de grande importance dans le cas de terrains argileux où l'on doit éviter tout effet d'imbibition. Au contraire, l'injection d'un coulis ordinaire amène un excès d'eau qui risque toujours d'amollir le terrain.
- Le coulis d'argile demeure homogène et de composition toujours uniforme sans risque de séparation des éléments composants, soit dans le cas de décantation naturelle, soit dans le cas de filtrage sous pression. Par contre, pour le coulis ciment-sable, la décantation du sable est presque inévitable et plus ou moins rapide suivant la finesse de l'aggrégat et son rapport avec le ciment. Pour des rapports sable-ciment de l'ordre de 2/1 à 3/1, le sable décante tout près d'un trou où le remplissage résulte par conséquent pauvre en ciment ; le ciment se dépose plus loin, créant des zones avec des caractéristiques de résistance très variable. Il est vrai qu'on peut réduire la vitesse de décantation, en réduisant l'eau contenue dans le coulis, mais alors, ce serait au préjudice de la pénétrabilité du coulis.
- Toutes les composantes étant de granulométrie très fine, le coulis d'argile peut pénétrer dans les fissures les plus minces, à la pression de 6 kg/cm<sup>2</sup> qu'on a adopté comme seuil maximum. D'ailleurs, la thixotropie du mélange binaire réalisé empêche les déperditions de coulis, ce qui conduit à admettre que le coulis adopté est le plus efficace, tant dans le cas de gros vides que dans celui de la présence de fissures minces.
- Enfin, la résistance à la compression étant, après 28 jours, de l'ordre de 70 kg/cm<sup>2</sup>, peut être considérée assez élevée, et généralement supérieure à la résistance du rocher environnant la galerie.

#### Avantages économiques

- A cause de son rendement volumétrique très élevé, le mélange argile-ciment-eau est sans doute le plus économique. En effet, la quantité de coulis nécessaire pour le remplissage d'un vide de 1 m<sup>3</sup> dans le cas du coulis argile-ciment adopté est de 0,939 tonnes, tandis que pour les coulis sable-ciment-eau ou ciment-eau, les quantités nécessaires sont de l'ordre de 1,5 à 1,6 t/m<sup>3</sup>, c'est-à-dire à peu près doublées.
- Grâce à ses propriétés thixotropiques et à sa viscosité, le mélange argile-ciment-eau est économique dans le cas de fortes absorptions en rocher très crevassé. Le rayon d'action est réduit, une pression relativement élevée étant nécessaire pour atteindre la pénétration du coulis au-delà d'un certain seuil. Il résulte, par conséquent, que les absorptions ne sont pas abusives.

Des observations sur la pénétrabilité de ce coulis binaire pendant l'injection avaient permis de fixer à 1,20 m l'espacement des forages de collage suivant l'axe de la galerie, en prévoyant trois trous sur 3,60 m disposés dans trois plans équidistants et normaux à la galerie : le premier en clef et les deux autres décalés de 60° de part et d'autre du sommet. Toutefois, il a fallu prévoir par la suite encore deux forages de part et d'autre du radier (voir fig. 8), cette zone inférieure n'ayant pu être atteinte par communication, lors du traitement de collage en calotte, même sous une pression de 6 kg/cm<sup>2</sup>, en raison de la viscosité du coulis. Ainsi, sur toute la longueur de la galerie, la disposition de collage comprenait cinq forages au total, à raison de 1,4 trou par mètre de galerie, correspondant à 1,17 m de forage par mètre de galerie.

La longueur totale des forages au marteau a été de 2930 m, avec une consommation totale de coulis ciment/argile de 5563 tonnes, soit une absorption moyenne de 2,25 t/m de galerie (ou 1,9 t/m de forage). Cette absorption plutôt élevée s'explique par le fait qu'à part le collage proprement dit, ce traitement a permis en même temps de réaliser un colmatage de la roche disloquée par le creusement jusqu'à une certaine distance du revêtement. La distribution des absorptions de collage est représentée sur le diagramme de la figure 8.

## 2. Traitement de consolidation

Ce traitement, appliqué également sur toute la longueur de la galerie, comportait la disposition de forages représentée sur la figure 8. Les trous, forés au marteau, étaient disposés en principe sur deux auréoles consécutives, de 3 et respectivement de 2 trous écartées de 1,80 m, ce qui correspond à une distribution de 5 trous tous les 3,60 m, ou 1,4 trou/m de galerie.

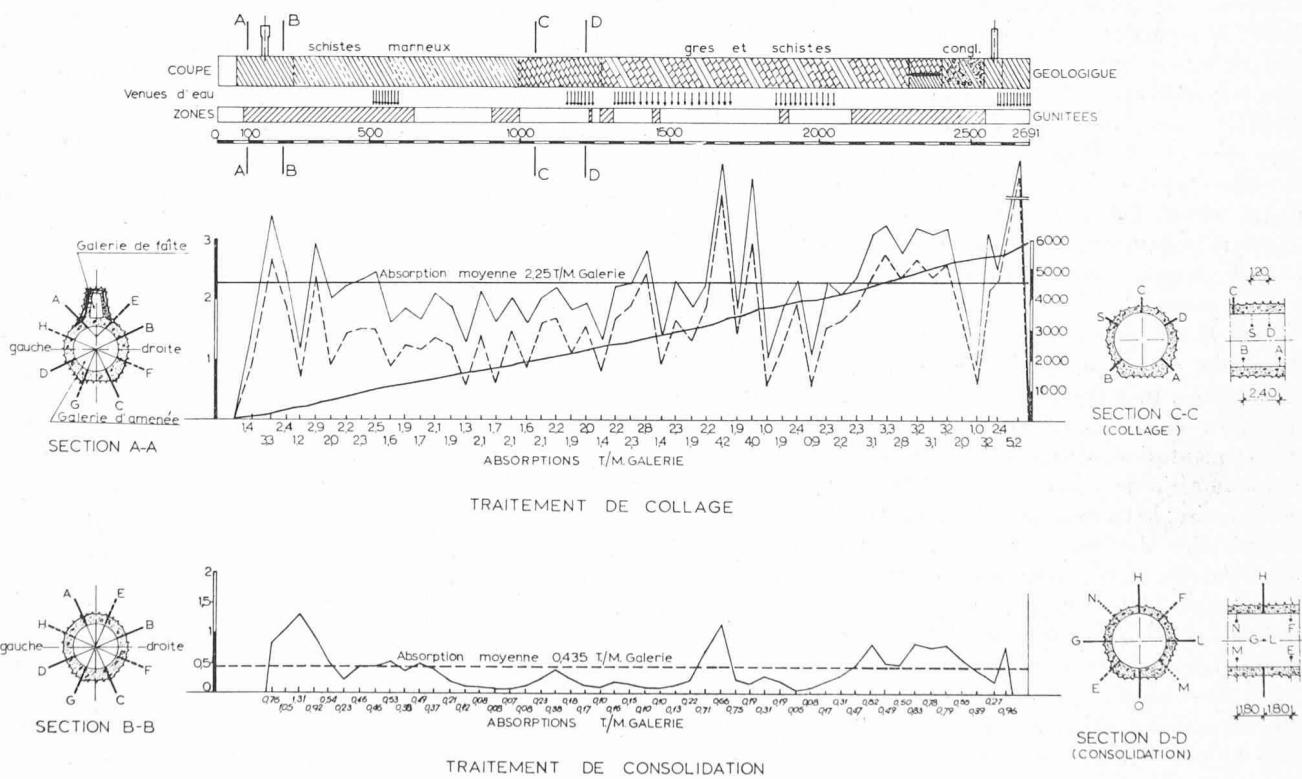


Fig. 8.

La profondeur de ces trous était de 2,00 m dans les grès et seulement de 1,00 m dans les schistes argileux.

Le coulis utilisé pour le traitement de consolidation était constitué d'un mélange ciment-eau, dans des proportions C/E pouvant être automatiquement réglées de  $1/1$  à  $1/4$ , suivant l'intensité des absorptions. Ce traitement était décalé d'une dizaine de jours par rapport à l'achèvement des tronçons correspondants du traitement de collage. Les pressions adoptées variaient de 10 à 15 atm au maximum, suivant les caractéristiques locales du rocher.

En fait, des modifications de disposition ont dû être adoptées dans certaines zones de la galerie, pour les raisons suivantes :

Tout d'abord, déjà près de l'extrémité amont, entre les P. K. 165 et 475, constituée en partie de congoliers et en tout cas sous couverture naturelle relativement faible, le traitement de consolidation avait dû être interrompu à cause des fortes absorptions sous pression stationnaire inférieure à 7 atm et pour parer à tout danger de dislocation de la roche. Il avait d'ailleurs été décidé, dès le début, de suspendre toute injection dès que l'absorption atteignait 3 t/trou. Le traitement de cette zone a nécessité 62 trous de contrôle supplémentaires et, après une période d'attente appropriée, leur traitement a été porté régulièrement jusqu'au refus. L'absorption moyenne de ces trous de contrôle a été de 0,817 t/trou.

En outre, dans les zones comprises entre les P. K. 1050-1282 et 1925-2367 et affectées par des venues d'eau lors du percement de la galerie, il s'était avéré nécessaire de procéder à 215 trous supplémentaires de 3 m de longueur et inclinés à 30° vers l'aval pour intercepter le plus grand nombre possible de clivages du rocher. Dans cette zone, l'absorption moyenne des trous supplémentaires était de 0,71 t/trou.

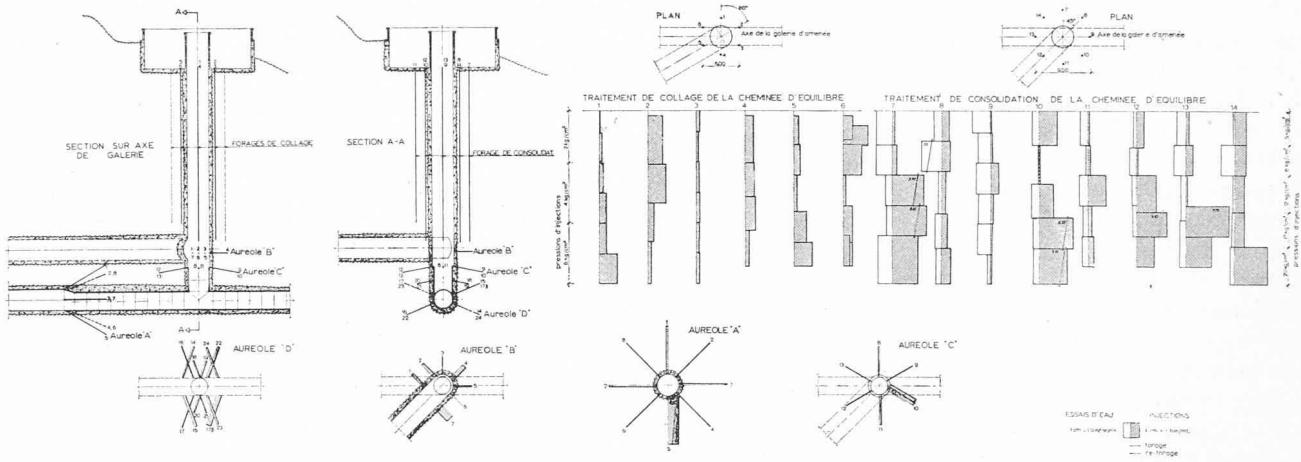


Fig. 9.

Enfin, dans le voisinage de la fenêtre (P. K. 1658-1737) et du blindage aval (P. K. 2531-2560), la disposition de forage avait dû être renforcée en prévoyant 4 trous par auréole disposés à 90°, ce qui représente une distribution locale de 2,2 trous par mètre de galerie.

Dans l'ensemble, pour ce traitement, il a été exécuté 9614,90 m de forages (soit environ 4 m de forage par mètre de galerie, en moyenne), avec une consommation totale de ciment de 1041 tonnes, soit une absorption moyenne de 0,435 tonne de coulis/mètre de galerie, y compris les injections de contrôle (fig. 8), ou 0,147 t/m de forage.

### 3. Etanchement du puits des vannes

Le traitement du puits des vannes, à la tête amont de la galerie, s'était avéré indispensable à cause de l'état fortement disloqué des schistes argileux et du voisinage de la surface naturelle du terrain. Il a été prévu, à cet effet, 8 forages longitudinaux (verticaux), pour le traitement de collage autour du puits, exécutés à la sondeuse et dépassant de 6 m le radier de la galerie, puis 18 forages radiaux, exécutés au marteau suivant trois auréoles espacées de 3 m et comportant 6 trous chacune ; ces auréoles étaient contenues dans des plans normaux de l'axe de la galerie et destinées à créer un écran étanche pour l'arrêt des infiltrations provenant du lac artificiel. Enfin, 13 trous supplémentaires forés au marteau devaient contrôler l'efficacité du traitement de base, dans la partie inférieure du puits, à sa jonction avec la galerie.

Dans le traitement de collage, parallèlement à l'axe et autour du puits, qui s'effectuait dans une roche décomposée, et présentant des éboulements locaux, les injections devaient se faire par passes descendantes avec cimentation progressive, tout au moins pour la première série de trous impairs. Après cette opération préliminaire, le traitement s'est poursuivi régulièrement par reforage des trous et injection du coulis binaire ciment/argile (2/1), sous des pressions réduites de 4-6 kg/cm<sup>2</sup>. L'absorption moyenne était de 0,933 t/m de forage, contre une absorption des forages de contrôle de 0,107 t/m de trou seulement.

Les auréoles d'étanchement ont également été injectées au coulis binaire, comme ci-dessus, sous pression de 6 kg/cm<sup>2</sup> d'abord dans les moitiés des trous, avec une absorption moyenne de 0,768 t/m de forage, puis

dans les trous restants, avec une absorption de 0,318 t/m de forage.

### 4. Traitement de la cheminée d'équilibre

Le traitement adopté ici était en principe semblable à celui du puits des vannes, mais intensifié pour obtenir une consolidation plus efficace, à haute pression.

Le collage a été réalisé à l'aide de six forages verticaux à la sondeuse disposés sur une circonférence de 6 m de diamètre injectés au coulis ciment/eau (1 : 1) sous pression de 2 à 6 kg/cm de la surface vers le fond.

Les mêmes difficultés s'étant présentées ici à cause du terrain disloqué, on a dû injecter quatre des trous par passes descendantes. Ce traitement ne s'étendait que jusqu'au niveau de la galerie de compensation, soit jusqu'à une profondeur de 27 m. L'absorption moyenne avait atteint 0,664 t/m de forage.

Pour le traitement de consolidation, une disposition longitudinale des forages a été préférée à un système d'auréoles horizontales, qui aurait pu laisser subsister des zones non consolidées. Dans ce but, on a exécuté huit forages parallèles à ceux du collage mais distribués sur une circonférence de 9 m de diamètre. La densité du coulis utilisé (C/E) variait de 1 : 1 à 1 : 2, en raison de grandes absorptions. L'injection était effectuée à une pression maximum de 20 kg/cm<sup>2</sup>, d'abord dans les trous pairs puis dans les trous impairs. L'absorption moyenne des premiers atteignit 1,44 t/m de forage, tandis que celle des seconds était de 1,25 t/m de forage.

Dans ces huit trous, les essais d'eau exécutés par passe de 5 m et aux pressions de 2, 4, 6 kg/cm<sup>2</sup>, ont donné des absorptions toujours supérieures à l'unité Lugeon (moyenne 7,07 l/min/m).

Enfin, en ce qui concerne le traitement du raccord entre la cheminée d'équilibre et le blindage correspondant de la galerie, on a prévu quatre auréoles de 3 à 8 m de longueur de forages, dont l'injection au coulis de ciment pur (1 : 1) a conduit à une absorption moyenne générale de 0,667 t/m de forage, sous une pression maximum de 12 kg/cm.

### 5. Tronçon blindé aval de la galerie d'amenée

Les traitements effectués sur ce tronçon comportaient un collage rocher/béton et béton/tôle sur la longueur totale de 128 m et une consolidation du rocher sur une

longueur de 96 m seulement. Avant la mise en place des éléments du blindage, on avait aménagé dans la tôle des trous de 2" de diamètre, filetés, à travers lesquels on a pu exécuter les forages au marteau nécessaires.

La disposition des forages indiquée sur le plan (fig. 9) comportait des séries de quatre trous en auréoles disposés dans un plan normal à l'axe de la galerie, et espacées de 0,8 à 1,58 m et décalées de 90° d'une auréole à l'autre.

L'injection de collage a été effectuée avec du coulis ciment/eau dans la proportion de 2 : 1 jusqu'à la pression maximum de 4 kg/cm<sup>2</sup>. Pour la consommation totale de ciment de 507 tonnes, l'absorption moyenne a été de 3,06 t/m de forage, ou 3,95 t/m de galerie. Cette valeur, élevée par rapport au reste de la galerie, est surtout à attribuer au fait du rendement volumétrique inférieur du coulis au ciment pur utilisé dans ce cas par rapport au coulis binaire ciment-argile précité ; en effet, l'utilisation d'un coulis binaire était exclu ici, à cause de la grande distance à laquelle se trouvait la station de malaxage de l'argile. Par contre, le traitement de collage tôle-béton, effectué à la pompe à main, n'a donné qu'une absorption moyenne minime de 0,0116 t/m de blindage.

Pour le traitement de consolidation sur ce tronçon blindé, la disposition des trous était la même que précédemment, mais par séries de quatre trous, écartés de 0,80 à 1,56 m et atteignant des profondeurs de 2 à 3 m, soit à raison d'un trou par 0,46 m de blindage (ou 7,10 m de forage par mètre de blindage). Les injections, exécutées au coulis C/E = 2/1 à la pression maximum de 8 kg/cm<sup>2</sup>, ont donné une absorption moyenne de 0,46 t/m de blindage.

A la fin des traitements ci-dessus, le revêtement de la galerie a été gunité sur quelques tronçons présentant des suintements, d'une longueur totale de 790 m seulement. Ce gunitage était exécuté en trois couches au

mortier de ciment au dosage de 500 kg/m<sup>3</sup> de sable sec, propre, dépoussiéré de 0,7 mm de diamètre moyen.

#### 6. *Essais de mise en charge*

Malgré la réalisation du programme sérieux d'injections susmentionné, sur l'ensemble de la galerie et ses ouvrages annexes, mais étant donné que le terrain traversé ne présentait guère une tenue très favorable, il a été décidé de soumettre cette galerie à des essais de mise en charge. Toutefois, comme la mise en service de l'usine ne présentait que des délais disponibles très réduits, on a dû se contenter d'exécuter deux essais sous la pression de la retenue maximum 794,70 (et non pour la surpression correspondant à la cote 798,80 dans la cheminée d'équilibre) ; la cote naturelle du lac lors des essais n'ayant atteint que 784,85, le remplissage de la galerie au-dessus de cette cote avait été réalisé par pompage. De plus, il a été exécuté un essai supplémentaire sous charge correspondant à la cote naturelle 784,85.

Ces essais, exécutés suivant la méthode Montagne, comportaient quatre écrans en bois, dont deux aux extrémités de la galerie et deux intermédiaires ; chacun de ces écrans comportait un orifice de 50 cm de diamètre à sa partie inférieure, portant au centre un moulinet hydrométrique à contact électrique de haute précision, taré avant et après les essais. Les débits de fuite obtenus sur toute la longueur de la galerie ont varié de 0,56 à 1,30 l/sec, ce qui correspondait à l'ordre de précision des mesures, en sorte que la galerie pouvait être considérée comme pratiquement étanche.

Il ressort de tout ce qui précède dans cet exposé que, tout en limitant au minimum l'étendue des traitements appliqués dans chacun des cas examinés, on est arrivé à atteindre des efficacités d'étanchement et de consolidation maxima, et en tout cas comprises dans des limites parfaitement satisfaisantes.

## ACTUALITÉ INDUSTRIELLE (26)

### Automatique-activité de la section genevoise de l'ASSPA

Le comité de la section genevoise de l'ASSPA a tenu une conférence de presse, le 30 septembre 1963, dans les locaux de l'Union des industriels en métallurgie du canton de Genève (UIM). Le but de cette conférence était de présenter le programme d'activité 1963-1964 et d'orienter également la presse sur certains aspects de l'automatique.

M. A. de Meuron, président de l'UIM, exposa ce que l'industrie attend de l'automatique, exposé dont nous reproduisons les extraits suivants :

*Consciente des problèmes que pose l'automatique, l'Association suisse pour l'automatique pense, à juste titre, qu'il convient d'attirer l'attention de milieux étendus sur l'importance d'une science relativement nouvelle encore ainsi que sur l'influence capitale qu'elle exercera à l'avenir sur nos industries et la formation des ingénieurs et des techniciens.*

*L'automatique — comme d'ailleurs d'autres concepts modernes — n'est pas encore toujours bien comprise et l'UIM est heureuse de s'associer à l'initiative de l'ASSPA pour la faire mieux connaître. Il m'est particulièrement agréable de remercier MM. les représentants de la presse de l'intérêt qu'ils ont bien voulu nous témoigner en assistant à cette réunion. Votre collaboration nous est précieuse et je vous prie de croire que nous vous en sommes très spécialement reconnaissants.*

*De nos jours, les conditions de concurrence, qui deviennent de plus en plus sévères sur tous les marchés, nous obligent, pour rester en tête du progrès, à utiliser les méthodes les plus perfectionnées de la science moderne. Nous avons à cet effet besoin d'un personnel de plus en plus compétent et qualifié qu'il est souvent difficile de recruter dans les conditions actuelles.*

*La réunion de ces facteurs pousse nos entreprises — et c'est là un élément qui dépasse largement nos frontières — à promouvoir toutes les méthodes de calcul et de fabrication permettant de faire face aux exigences modernes et*