

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 70 (1944)
Heft: 4

Artikel: La construction du barrage de Bou-Hanifa (Algérie)
Autor: Ott, J.-C.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-53238>

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: 26.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE

DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 13,50 francs

Etranger : 16 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 11 francs

Etranger : 13,50 francs

Prix du numéro :

75 centimes.

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

Paraissant tous les 15 jours

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 d'ingénieurs 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 : M. IMER, à Genève ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; EPITAUX, architecte ; E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. ODIER, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur ; *Valais* : M. J. DUBUIS, ingénieur ; A. DE KALBERMATTEN, architecte.

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

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte.

SOMMAIRE : *La construction du barrage de Bou-Hanifia (Algérie)*, par J.-C. OTT, ingénieur E. I. L. (suite et fin). — *Concours pour la construction d'une nouvelle maison d'école à Orsières (Valais)*. — *Remarques sur la composition du jury et la rédaction des programmes des concours d'architecture*. — *BIBLIOGRAPHIE*. — *SERVICE DE PLACEMENT*. — *DOCUMENTATION*.

La construction du barrage de Bou-Hanifia (Algérie)¹

par J.-C. OTT, ingénieur E. I. L.
(Suite et fin.¹)

IV. Les éléments constitutifs du barrage proprement dit.

(Suite.)

2. Les écrans d'injection.

a) But des injections :

Le but des écrans d'injection est de réduire les pertes d'eau, tout en réduisant également l'étendue de la surface de résurgence, de diminuer les vitesses de circulation des eaux de percolation et par conséquent le risque d'entraînement du terrain.

b) Disposition des écrans :

En plan (fig. 16), un écran principal et un écran de sécurité viennent tous deux s'attacher à la naissance du barrage. Sur la rive gauche il s'agit de fermer une lacune bien délimitée par la « Faille Nord » et le mur de pied (fig. 10), tandis que sur la rive droite les écrans ne peuvent s'appuyer entièrement sur des formations étanches. Il reste une possibilité de contournement. Le but des écrans est ici d'augmenter le cheminement des eaux.

Pour éviter la perforation de terrains stériles en-dessus du niveau de la retenue, les écrans sont attaqués, sur chacune des rives, à partir de galeries situées environ à la cote du plan d'eau maximum. Ces galeries non boisées ont un coût relativement réduit, qui est largement compensé par l'économie réalisée sur la perforation. Sur la rive gauche, une deuxième

galerie, située à la cote 256, partage en deux la hauteur de l'écran, dans le but de faciliter la perforation dont le coût augmente très rapidement avec la profondeur.

Pour l'implantation des écrans il faut, autant que possible, s'efforcer de bénéficier des circonstances naturelles qui favorisent le tranchage, surtout lorsqu'on se trouve en présence de couches de composition très variable passant du grès à la marne et de la marne au sable.

L'écran principal rive gauche est orienté de façon à fermer, avec le minimum de surface, un canal dont la forme est bien déterminée. L'écran de sécurité longe approximativement une ligne de niveau, ce qui lui donne une direction rayonnante par rapport à l'écran principal.

Sur la rive droite, l'écran principal s'enfonce profondément dans le flanc de la vallée. L'écran secondaire, également rayonnant, est implanté en suivant les mêmes principes que pour la rive gauche, c'est-à-dire suivant une ligne de niveau.

Au cours des travaux on a reconnu l'importance primordiale de faire coïncider la direction des écrans avec des directions privilégiées selon lesquelles le tranchage du terrain s'effectue le plus facilement. Il est difficile de reconnaître ces directions qui, dans les marnes, n'apparaissent qu'après une longue dessication. A ce point de vue, les écrans les mieux orientés sont l'écran principal rive gauche et l'écran secondaire rive droite. Par contre, l'écran principal rive droite était beaucoup moins favorisé et on a jugé bon de parfaire le traitement en creusant ultérieurement un puits à partir duquel les couches les plus dangereuses ont été traitées par des forages rayonnants (fig. 10), en profitant de la présence de la faille sud.

Le fonctionnement des écrans a été également examiné au moyen d'essais sur modèle réduit (fig. 17).

c) Les terrains :

Les terrains sont de perméabilité très variable. Une étude

¹ Voir *Bulletin technique* du 5 février 1944, p. 25.

Publicité : TARIF DES ANNONCES

Le millimètre (larg. 47 mm.) 20 cts.

Tarif spécial pour fractions de pages.

En plus 20 % de majoration de guerre.

Rabais pour annonces répétées.



ANNONCES-SUISSE S.A.
5, Rue Centrale,
LAUSANNE
& Succursales.

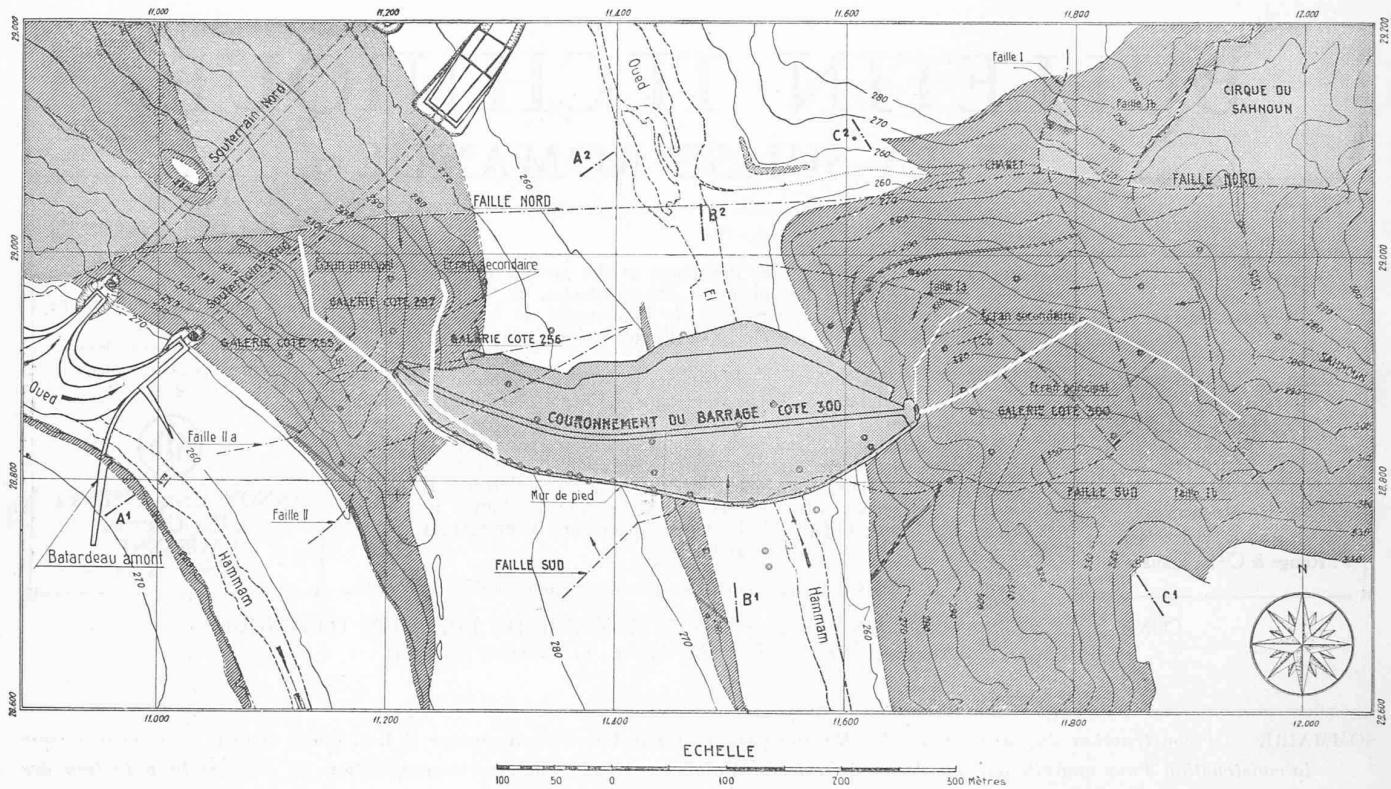


Fig. 16. — Plan de situation du barrage.

En blanc les écrans d'injection.

Les injections de collage du mur de pied ne sont pas figurées.

Document SEC.

préliminaire complète, au moyen d'essais de laboratoire sur des échantillons, en a été faite. Disons brièvement que l'on dresse des profils de perméabilité basés sur de nombreux prélèvements. La perméabilité moyenne est établie en tenant compte de l'épaisseur de chaque couche afférante à un échantillon, si bien que l'on a en quelque sorte une moyenne pondérée, où les poids sont représentés par les épaisseurs des couches. La perméabilité dans le sens de la stratification est environ cinq fois plus forte que dans le sens perpendiculaire aux couches.

Premier projet. Un premier projet prévoyait de ne traiter par des injections de ciment que les grosses fissures et les diaclases, ainsi que les terrains fissurés. Les injections de produits chimiques ne devaient intervenir qu'à titre complémentaire pour faciliter les injections de ciment proprement dites.

Deuxième projet. Le perfectionnement des procédés d'injections amena les ingénieurs à envisager également l'étanchement des sables, ce qui conduisait à diminuer encore le débit des pertes. Une autre raison majeure qui militait en faveur d'un traitement plus poussé était l'augmentation de la sécurité en diminuant la vitesse de circulation dans les couches sableuses exposées à l'érosion interne, en particulier les niveaux sableux *S* et *P* (fig. 10).

La question du nombre des écrans a été fortement discutée. Valait-il mieux faire un seul écran et concentrer tous les moyens dans un espace réduit en provoquant une perte de charge importante mais très localisée, ou valait-il mieux prévoir deux écrans successifs ? Cette dernière solution finit par l'emporter. De cette façon les pertes de charge sont réparties sur un plus grand trajet, la pente de la nappe souterraine est moins raide, les imperfections éventuelles sont moins dangereuses. Elles se compensent.

d) Exécution des sondages :

Tous les sondages d'injections furent exécutés par la méthode à rotation au diamètre de 45 à 85 mm. Leur écartement varie de 1,50 m à 3,50 m. Dans les zones sableuses, essentiellement au-dessous de

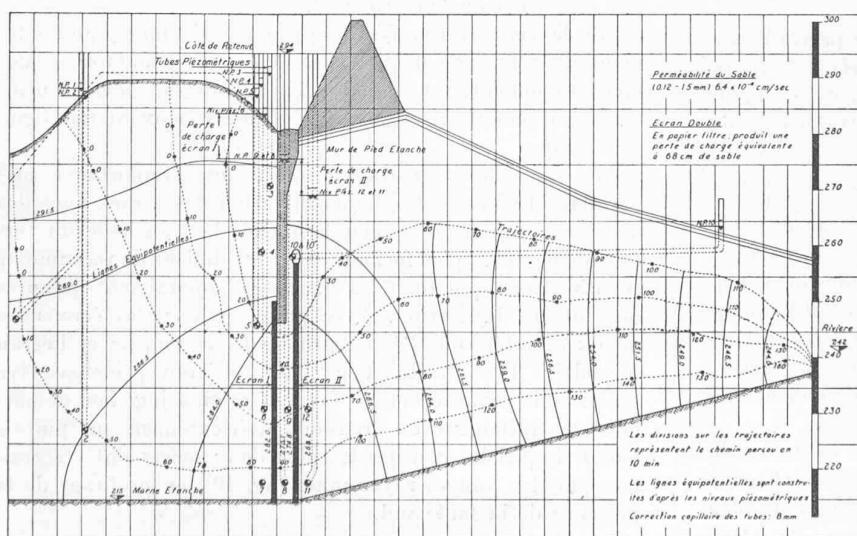


Fig. 17. — Essai d'écoulement sur modèle réduit.

On distingue les deux écrans et les pertes de charge qu'ils provoquent. Le modèle est déformé dans le sens vertical pour tenir compte de la perméabilité qui varie suivant la direction de la stratification.

D'après rapport Congrès des grands barrages. Washington 1936.

la galerie cote 256, les forages furent tubés pour éviter l'éboulement des cavités.

L'injection s'effectuait par passes descendantes de 3-4 m de longueur. L'absorption augmentait légèrement si l'on faisait des passes plus courtes.

Ce procédé, avantageux près de la surface parce qu'il empêche les fuites de coulis, nécessite de nombreuses reperforations.

Une amélioration sensible des méthodes d'injections fut réalisée par un système de tube à clapets. Ce tube est scellé dans le forage. Il est muni d'une série de clapets étagés à différents niveaux, qui fonctionnent de l'intérieur vers l'extérieur, mais empêchent le retour en arrière des produits d'injection. A l'intérieur du tube, on déplace en remontant un obturateur. L'injection se fait alors d'une façon continue, ce qui est un gain de temps appréciable.

e) Choix du procédé d'injection :

Les suspensions. Dans les terrains grossiers, il est possible d'injecter des suspensions. C'est le procédé classique de l'injection de ciment.

Dans les terrains plus fins, par exemple des sables, les grains de la suspension sont retenus ; l'eau du coulis est absorbée par le sol et un bouchon se forme immédiatement. Il faut recourir alors au procédé des injections chimiques.

Ce procédé a été employé sur une large échelle au barrage de Bou-Hanifia. A titre d'orientation, disons que dans la catégorie des suspensions on peut injecter soit du ciment, soit de la marne, soit encore des argiles spéciales telles que la bentonite et d'autres.

L'avantage du ciment est la stabilité, mais c'est un produit cher, vis à vis d'une marne brute.

La marne convient dans certains cas, mais à condition d'être traitée. En effet, si elle est injectée sans préparation spéciale, elle peut être délavée.

La bentonite, à ce point de vue, lui est un peu supérieure, mais elle présente le même défaut qui n'est d'ailleurs grave que lorsque l'on a des terrains avec des cavités de grandes dimensions. Les terrains très fins, les sables par exemple, forment un squelette qui maintient les produits injectés.

Les solutions véritables. Pour arriver à pénétrer des milieux extrêmement fins, il faut recourir à des solutions véritables, qui font prise au bout d'un certain temps.

Ce sont les gels.

Ils ont l'aspect de la gélatine et leur résistance propre est relativement faible. Ils ne sont pas destinés à consolider le terrain, mais simplement à en obturer les pores. Cependant ils doivent être suffisamment résistants pour ne pas être entraînés. La plus grande partie des travaux a été faite au moyen d'un gel de silice fabriqué selon les « procédés Rodio ».

On avait

- 1) une solution de silicate de soude ;
- 2) une solution coagulatrice, : lait de chaux ou ciment.

Lorsque le lait de chaux est mis en contact avec la première solution, il se forme d'abord un précipité qui est éliminé par décantation ; le liquide surnageant est clair, il a une viscosité relativement faible, environ deux fois celle de l'eau ; la pénétration dans les terrains les plus fins est possible.

Le gel ainsi formé est constitué d'une part d'un squelette de silice gélatineuse, d'autre part d'un liquide intramicellaire non gélifié. La stabilité du gel augmente au fur et à mesure que le silicate non gélifié flocale à son tour. Les agents qui peuvent provoquer la flocculation sont les sels contenus en dissolution dans les eaux souterraines.

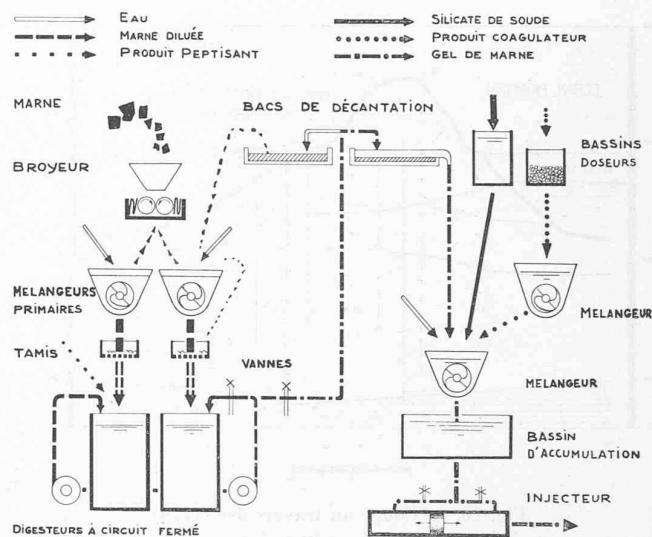


Fig. 18. — Centrale de préparation du gel de marne.

J. C. O. d'après document SEC « procédés Rodio ».

Gel de marne. Au début de la guerre, il a fallu s'ingénier à trouver un système d'injections moins coûteux que les injections chimiques. Il fallait également arriver à diminuer la consommation de silicate de soude.

L'entreprise chargée des travaux d'étanchement a alors mis au point un gel qui présente à la fois les avantages des suspensions et des solutions. Les suspensions de marne brute sont délavables. On a donc cherché à préparer de telles suspensions en leur additionnant une certaine quantité de gel qui leur confère une bonne résistance physique à l'entraînement. Au point de vue chimique, c'est l'inverse ; la marne contenue dans le gel est plus stable que le gel lui-même.

La préparation de ce gel de marne est assez complexe (fig. 18).

L'installation est divisée en deux, verticalement. A gauche arrive la marne sèche, qui est broyée, puis mélangée à l'eau dans des mélangeurs à axes horizontaux ; le lait de marne passe ensuite dans des tamis qui retiennent les particules grossières provenant d'un broyage imparfait. Il passe ensuite dans les digesteurs à circuit fermé, où on lui ajoute un produit peptisant qui favorise la dispersion complète des grains de marne. Cette préparation est très importante pour obtenir une suspension extrêmement fine, qui puisse pénétrer même dans les vides les plus ténus. Une pompe refoule le matériau dans les bacs de décantation, où les grains les plus grossiers se déposent. Dans la partie des installations située à droite le silicate concentré est additionné d'eau. Enfin, en dernier lieu,

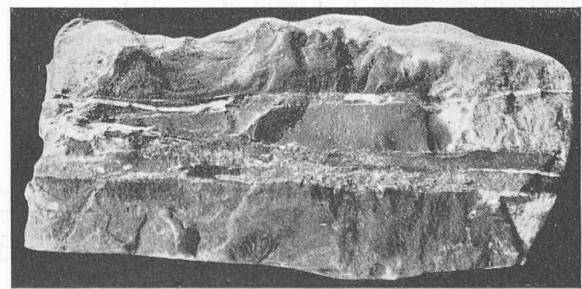


Fig. 19. — Echantillon de terrain injecté.

On voit une veine de ciment entourée d'une auréole. Cette auréole est produite par le gel de silicate qui réagit en présence des sels de fer contenus dans le terrain.
Cliché P. et G.

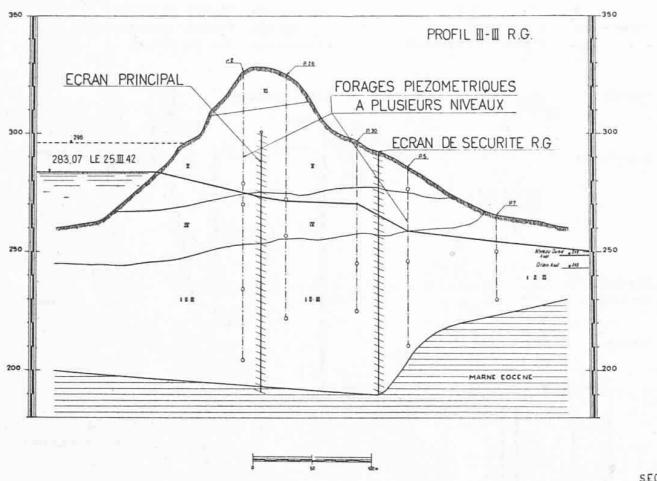


Fig. 20. — Coupe au travers des écrans.

On remarque le niveau piézométrique indiquant la perte de charge due aux écrans d'injection.

J. C. O. d'après document SEC

le produit flocculent est ajouté au lait de marne. Le produit a un aspect fluide grisâtre et fait une prise en gelée au bout d'un temps réglable selon la quantité de produit flocculant ajoutée. Il est injecté de la même manière que le ciment, mais c'est une suspension incomparablement plus fine.

f) Contrôle des injections :

Le contrôle de l'efficacité des injections s'effectue de différentes manières.

D'abord, avant la mise en eau, par des essais d'eau dans les forages effectués immédiatement après les injections. Ces essais d'eau ne peuvent pas être faits avec le système de tubage à clapets.

Pour se rendre compte de la répartition des produits dans le sol, on s'est arrangé à excaver la galerie de travail inférieure de la rive gauche après le traitement des terrains supérieurs. On a ainsi recoupé les zones injectées et on a pu se rendre compte de la répartition des produits dans le sol. C'est à cette occasion-là que l'on a constaté l'importance de la direction des écrans par rapport au système de diaclases.

D'autres puits de reconnaissance ont été également exécutés dans le plan de l'écran principal RG :

à l'extrême de l'écran de sécurité RG ; dans le plan de l'écran principal, RD.

Des échantillons de terrain injecté étaient prélevés et soumis à des essais de perméabilité et d'entraînement (fig. 19).

À la suite de l'exécution du puits de reconnaissance de la rive droite, on a reconnu la nécessité de parfaire le traitement des zones sableuses du fait de la mauvaise orientation du système de diaclases.

Une troisième méthode de contrôle avant la mise en eau a consisté à exécuter des pompages dans de petits puits de reconnaissance situés dans le plan des écrans au-dessous du niveau de la nappe.

La mise en eau et les nappes souterraines qui se sont développées par la suite ont été suivies d'une façon très serrée par une série de mesures de niveau piézométriques (fig. 20). A cet effet, un réseau de forages a été équipé pour prendre les pressions à différents niveaux. Sur la figure 21 on aperçoit en coupe les deux écrans, la ligne d'eau, ainsi que les quatre forages piézométriques qui permettent d'effectuer les mesures du plan d'eau de part et d'autre des écrans. Le premier écran provoque une perte de charge relativement faible, tandis que l'écran de sécurité a un effet plus marqué. Dans d'autres profils, le phénomène s'inverse.

Avant de terminer la question des injections, disons encore que le mur de pied a été également traité par de nombreux forages de contrôle qui recoupent les joints obliques, ainsi que les reprises de bétonnage, et qui permettent de se rendre compte de son étanchéité.

Enfin, un dernier contrôle chimique de l'eau des résurgences fut fait pour s'assurer qu'il n'y avait pas entraînement des produits injectés. La teneur en silice primitive des eaux de l'oued était de 3 mgr/litre. Elle a légèrement augmenté pour passer à 7 mgr/litre une fois les circulations établies.

La façon dont on laisse monter le plan d'eau joue un rôle important. Il est prudent de ne pas accroître la charge trop rapidement, de façon à permettre le colmatage du bassin par les argiles apportées par l'oued.

Le débit des fuites a été très minime lors de la première mise en eau (en décembre 1940). Le débit total comprenant tous les ouvrages aussi bien le masque que les écrans injectés, a été de l'ordre de 120 lit/min avec le lac à la cote 273, dont environ la moitié peut être attribuée aux écrans d'injections et au mur de pied. Il faut naturellement attendre que le plan d'eau ait atteint la cote maximum pour se prononcer d'une façon définitive sur le résultat des travaux d'étanchement.

3. *Les enrochements.*

Les massifs d'enrochements sont constitués par des blocs de grandes dimensions extraits d'une carrière située à 5 km, et amenés par voie étroite jusqu'à l'emplacement du barrage. Les gros blocs sont posés à la grue, les blocs plus petits sont rangés à la main. On obtient ainsi un blocage très serré dont le volume de vide ne dépasse pas 26 %. Le volume des enrochements posés atteint 700 000 m³, c'est-à-dire environ le tiers de la grande pyramide d'Egypte.

La croissance du barrage est relativement lente (fig. 21). Au fur et à mesure que le barrage s'élève, les couches inférieures sont comprimées par le poids des couches supérieures et se déforment. Le terrain également participe à ces déformations qui intéressent aussi les couches profondes (fig. 23).

Les déformations mesurées (max. 11 cm) sont légèrement plus fortes que les déformations calculées (max. 4 cm), mais en définitive la coïncidence est bonne. Les tassements de la marne se font relativement lentement et se prolongent un certain temps après l'application de la charge.

Le tassement des enrochements sur eux-mêmes est important (fig. 22). Si on pouvait imaginer une machine mer-

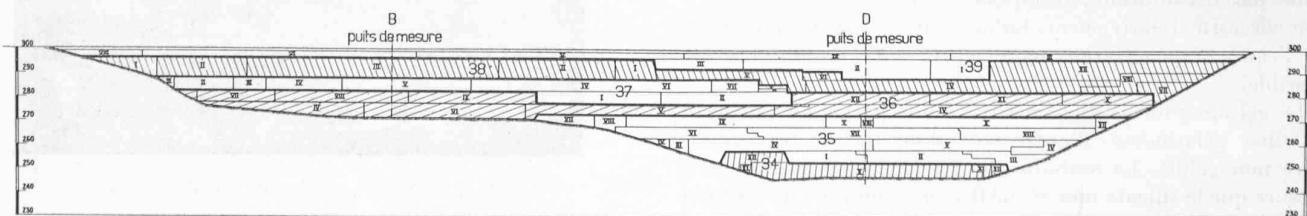


Fig. 21. — Diagramme d'avancement de la pose des enrochements.

Les chiffres arabes indiquent l'année, les chiffres romains les mois.

J. G. O. d'après document Chagneaud.

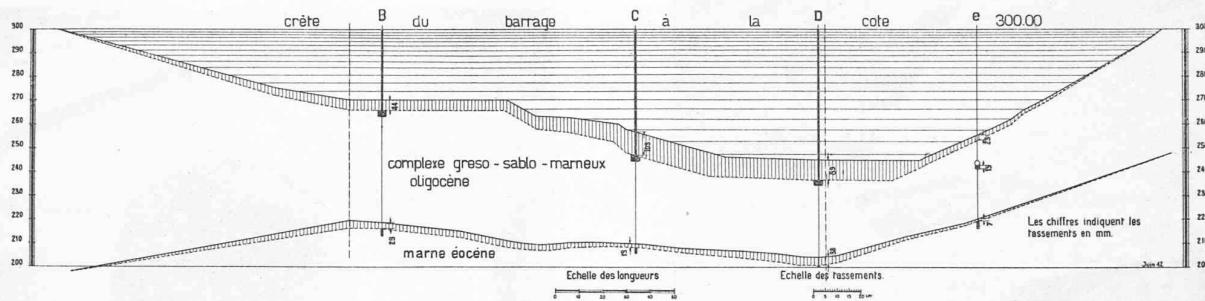


Fig. 23. — Tassements observés du terrain sous le poids du barrage.

Document SEC.

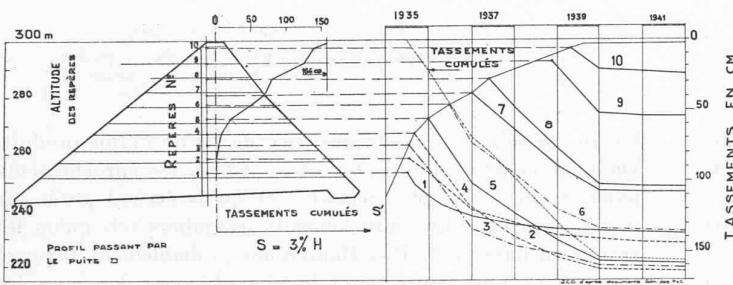


Fig. 22. — Tassement du massif d'enrochements sur lui-même.

Observation des repères placés dans le puits D.
J. C. O. d'après document P. et C.

Fig. 25. — Déformation du parement amont.

Décollement de la couche de béton poreux d'égalisation.
Cliché P. et C.

veilleuse construisant le barrage en quelques heures, le tassement total en crête, qui est représenté par la courbe des tassements cumulés, s'élèverait à 1 m 56. En réalité le tassement de chaque couche est moindre, car celles des couches inférieures a déjà eu le temps de se faire. Le profil du barrage se modifiait sous l'effet des déformations d'où (fig. 24) le décollement de l'enduit poreux appliqué au parement amont (fig. 25). On y remédia en faisant des joints horizontaux garnis d'une composition de bitume-liège (fig. 35 au premier plan).

Le pied amont du barrage, sous l'effet de la charge et au moment où les enrochements atteignaient la cote 280, se mit à se déplacer horizontalement vers l'amont, provoquant

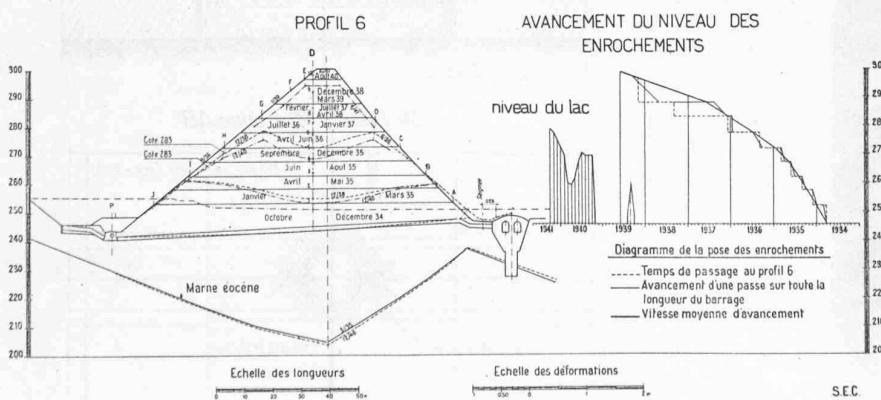
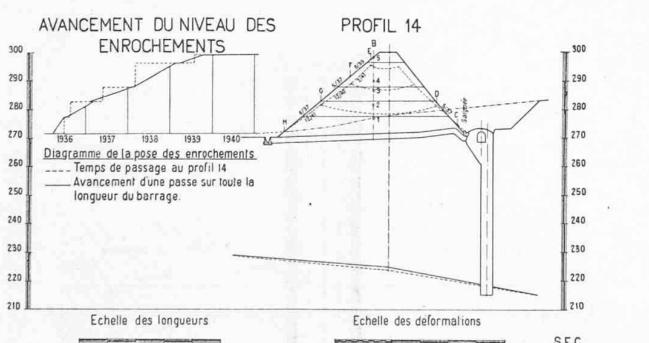


Fig. 24. — Déformation du massif d'enrochements.

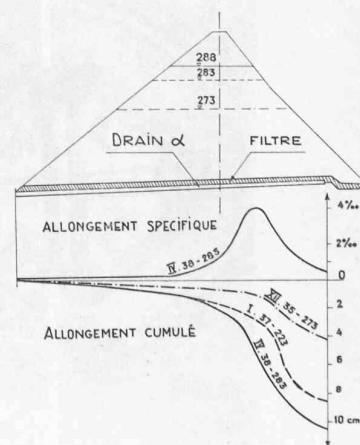
L'échelle des déformations est fortement exagérée. Remarquer le glissement du pied vers l'amont.
J. C. O. d'après document P. et C.

Fig. 26. — Allongement des drains transversaux dans le talweg.

Obtenu par la mesure de l'ouverture des joints.
J. C. O. d'après document P. et C.

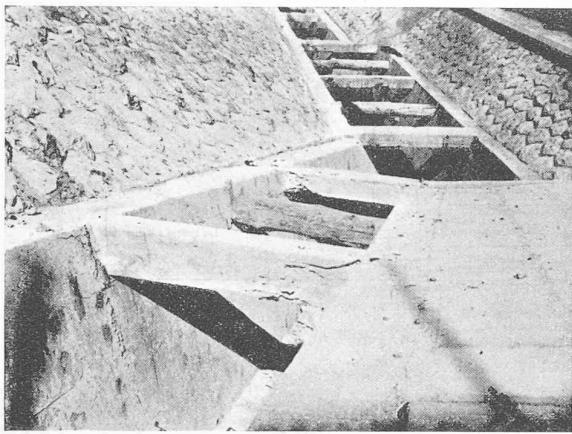


Fig. 27. — Caniveau aval écrasé par la poussée des enrochements.

Cliché P. et C.

une forte poussée sur le mur de pied. Ce phénomène pouvait être constaté également dans les drains transversaux, dont les joints commencèrent à s'ouvrir (fig. 26).

Le drain *a* situé dans le talweg accusa les mouvements les plus marqués.

En résumé, le barrage avait tendance à s'allonger à la base.

A l'aval le mouvement provoqua l'écrasement du caniveau (fig. 27). Pour obvier à cet inconvénient, on se décida à remplacer le caniveau aval par un drain fermé, surmonté d'un massif d'enrochements formant butée.

Les mouvements horizontaux de translation du pied du parement amont n'en continuèrent pas moins et provoquèrent une sollicitation excessive du mur de pied qui se fissura à la base du sabot et au niveau des galeries (fig. 28). Pour empêcher que ce phénomène ne s'aggravât, on pratiqua entre le mur de pied et le parement du barrage une saignée qui recoupe la couche maçonniée, formant une liaison trop rigide (fig. 29 en haut à gauche).

Il est difficile de déterminer la cause exacte de ces mouvements. Le filtre fut incriminé. En effet, au barrage du

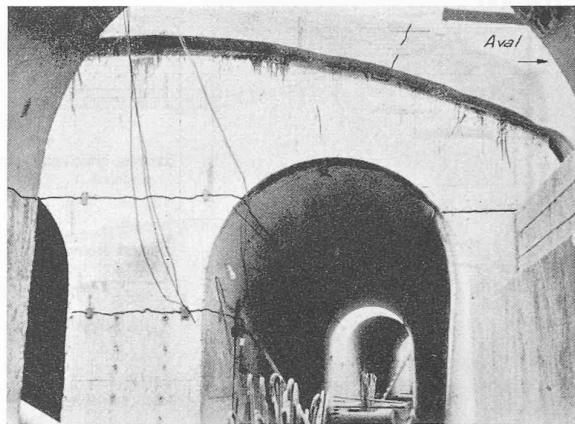


Fig. 28. — Mur de pied. Galeries de visite.

On distingue les fissures provoquées par la poussée du pied du barrage par l'intermédiaire de la couche maçonniée (figure 29).

Cliché P. et C.

Ghrib, où celui-ci n'existe pas, rien de tel ne s'était produit. On peut cependant objecter qu'au Ghrib les enrochements avaient une forme plus régulière et qu'ils étaient posés sur des faces planes. Les enrochements irréguliers tels qu'on les trouve au barrage de Bou-Hanifia ont probablement favorisé une sorte d'arc-boutement du massif avec des poussées obliques concentrées au voisinage des parements.

4. Le mur de pied.

Le mur de pied descend jusqu'à la marne éocène, ce qui lui donne par places une hauteur considérable qui atteint presque 70 m. Il n'a que 4 m d'épaisseur (fig. 10, 28 et 29).

Deux galeries de visite donnent accès aux forages de con-

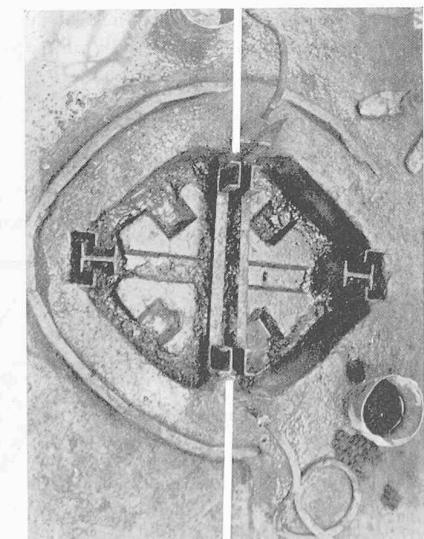
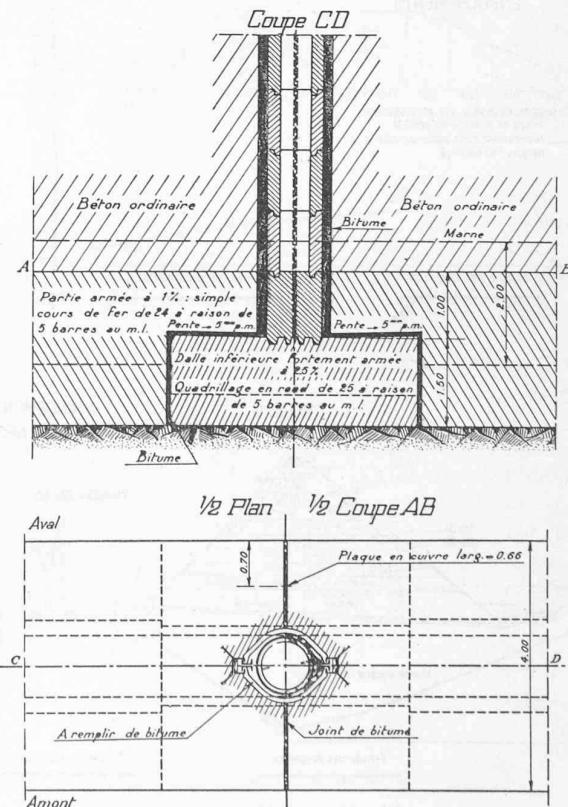


Fig. 33. — Exécution d'un joint vu de dessus.

Garnissage au bitume de l'espace annulaire.
Cliché P. et C.

Fig. 34. — Détail d'un joint selon le projet initial.
D'après rapport Congrès des grands barrages Washington, 1936.

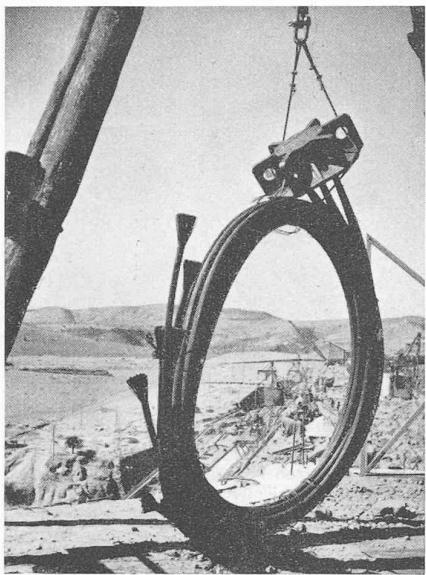


Fig. 30. — Déchargeement d'un tirant métallique de 1000 tonnes.
Cliché J. C. O.

On distingue les épanouissements des fils en vue du scellement, la tête en acier coulé, les six oreilles qui permettent d'accrocher le câble au dispositif de mise en tension.

Cliché J. C. O.

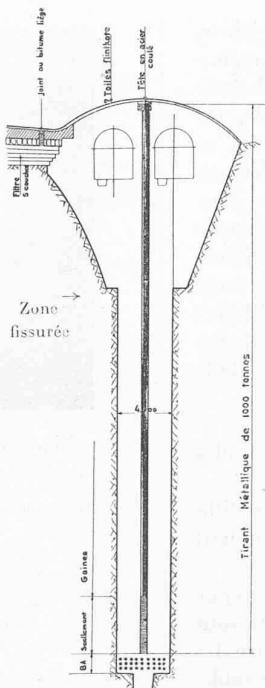


Fig. 29. — Coupe en travers du mur de pied.
Tirant métallique de 1000 tonnes.
J. C. O. d'après document SEC.

trôle des joints et recueillent une partie des eaux d'infiltration du masque et du filtre. Les galeries ont permis d'attaquer les injections de collage destinées à solidariser le mur de pied avec le terrain.

Il eût été évidemment possible de prolonger le mur de pied sur la rive gauche, mais les profondeurs devenaient tellement grandes que l'on a préféré le relayer par un écran d'injections. Le tracé du mur de pied a été établi de façon à éviter en plan des angles vifs où se produiraient des concentrations de déformations.

Une armature horizontale a été prévue à la base du mur de pied. Elle a pour but non pas d'empêcher totalement les fissurations, mais de les répartir. On a reconnu qu'un grand nombre de fissures fines sont beaucoup moins dangereuses qu'un petit nombre de fissures larges, à ouverture totale égale.

On a parlé plus haut des fissurations provoquées par la poussée des enrochements. Pour empêcher que la dislocation ne se poursuive, on rechercha un système de consolidation. Les ingénieurs décidèrent alors de mettre en place des tirants métalliques, de façon à précontraindre le béton non armé du mur de pied pour lui permettre de résister à des efforts de flexion¹. La précontrainte sur le béton est relativement faible. Elle s'élève à environ 4 kg par cm². On escomptait en outre solidariser les différents éléments fissurés et injecter les fissures sans provoquer de soulèvement généralisé.

Les tirants métalliques sont placés dans des forages de gros diamètre sans élargissement exécutés par des sondeuses à grenade. Les tirants sont d'une conception issue de la réalisation faite au barrage des Cheurfas,

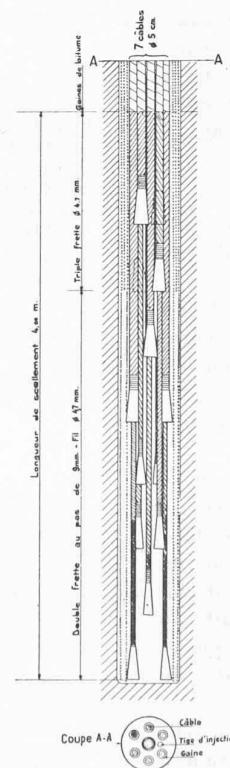


Fig. 32. — Scellement d'un tirant.
J. C. O. d'après document SEC.

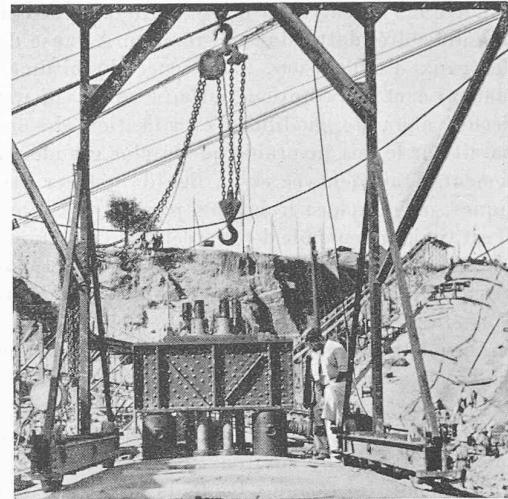


Fig. 31. — Mise en tension d'un tirant au moyen de quatre vérins de 300 tonnes. Cliché J. C. O. Le dispositif est déplacé d'un tirant à l'autre au moyen d'un portique.

mais améliorée. Alors qu'aux Cheurfas les tirants, constitués par une série de fils parallèles, avaient été fabriqués sur place, on a préféré un autre système. Les câbles sont fabriqués en usine et sont munis à leur partie supérieure d'une tête en acier coulé, d'un volume très réduit si on le compare aux têtes de plusieurs mètres cubes, en béton, qui existent au barrage des Cheurfas. Les têtes en acier coulé peuvent être complètement noyées dans le mur de pied. La partie la plus délicate est le scellement de la partie inférieure des câbles. Ce ne fut qu'après une longue mise au point que l'on arriva à un résultat satisfaisant (fig. 32).

Le scellement des premiers câbles d'essai n'étaient pas munis d'une frette et les épanouissements des câbles provoquèrent l'éclatement du béton. Cet inconvénient a été supprimé en étaçant d'une façon judicieuse les épanouissements des différents torons sur une hauteur de 4 m, et en plaçant une frette spirale en acier dur, composée de trois nappes.

Le scellement proprement dit est fait au moyen d'un tube d'injection de ciment qui descend jusqu'à la base du câble. Pour permettre dans la partie supérieure le libre jeu du tirant, chaque toron est enduit d'abord d'une composition à base de bitume, dans le cas particulier du « flintkote », puis entouré d'une bande de toile. 78 câbles métalliques ont été mis en place dans toute la partie basse du mur de pied. Leur écartement moyen est de 4-5 m¹.

Le mur de pied est articulé par un grand nombre de joints qui lui permettent de se déformer dans son plan (fig. 10). Le projet initial comportait un système de joint assez complexe (fig. 34). On avait une chambre annulaire contenant du bitume. Le joint était complété par une feuillure de tôle engagée de chaque côté du joint.

¹ La mise au point du système de consolidation par câbles préparés d'avance a été faite par la société « SEC procédés Rodio » en collaboration avec les Ets. Imbault.

Lorsque l'on entreprit de couler du bitume dans ces joints, une difficulté inattendue se présenta. A cause de la présence des eaux d'infiltration, l'adhérence du bitume chaud était mauvaise et l'obturation parfaite se révéla impossible. On décida alors de modifier l'organisation des joints. On se basait sur le fait favorable que la plus grande partie des tassements était achevée et au lieu de réaliser des joints plastiques, on remplaça le bitume par des injections de ciment. Il est toujours possible de compléter ces injections, si les joints s'ouvrent sous l'effet de mouvements ultérieurs. Les puits furent donc remplis de gravelettes, on fixa des tubes d'injection étagés à différents niveaux et on procéda à l'injection en bouchant la partie supérieure des puits par une dalle en béton armé.

L'exécution du mur de pied a été réalisée par des fouilles blindées alternées d'environ 40 à 15 m de long.

Au début, les terrains boulants ont causé de grosses difficultés, l'épuisement des fouilles par pompes provoquait l'entraînement des éléments fins.

On remplaça les pompes par un rabattement de nappe généralisé. On constitua une enceinte de puits filtrants tout autour des fouilles du mur de pied. A cause de la nature des drains, chaque forage était équipé d'abord d'un filtre à sable, puis d'un filtre métallique. Les pompes étaient du type à balancier pour forages profonds. L'écartement moyen des puits filtrants était de 8 m.

Les débits soutirés se révélèrent très variables et variaient entre 0 et 30 l/min par puits.

A cause de la structure feuillettée des couches, on avait affaire à un égouttement sur toute la hauteur des couches traversées plutôt qu'à un véritable rabattement de nappe.

Grâce à cette méthode radicale, mais coûteuse, les fouilles du mur de pied furent poursuivies sans aucun incident.

5. *Le masque.*

La nécessité d'avoir un masque souple a été suffisamment démontrée par les mouvements des enrochements décrits plus haut.

Le masque se compose d'abord d'une couche de béton poreux d'égalisation, appliquée directement sur les enrochements. Celle-ci a été divisée en panneaux séparés par des joints horizontaux garnis d'un mélange de bitume-liège qui a des propriétés à la fois plastiques et élastiques, cela pour parer aux décollements dont on a parlé déjà (fig. 25).

Le béton poreux est peint au moyen d'une dissolution de bitume dans de l'essence, ce qui favorise l'adhérence du béton bitumineux. Le béton bitumineux est placé en deux couches de 6 cm d'épaisseur. La première couche contient un grillage « Zimmermann » qui doit empêcher de grosses déchirures. La mise en place du béton bitumineux s'est faite au moyen d'un télécharge pour la partie basse du masque et au moyen d'un pont roulant pour la partie supérieure du masque.

La fabrication du béton bitumineux est analogue à celle en usage pour un revêtement routier. Sa composition a demandé une mise au point très complète, faite déjà pour le barrage du Ghrib. Des essais de laboratoire furent poursuivis à Bou-Hanifia.

Les conditions où se trouve le masque sont très dures. La température d'un corps noir exposé au soleil peut s'élever à 70°. La température admissible a été réduite à 45° en adoptant un masque de protection. La pente du parement atteint 125 %. Il faut que le béton bitumineux soit suffisamment rigide pour ne pas fluer sur la pente lorsqu'il fait chaud.

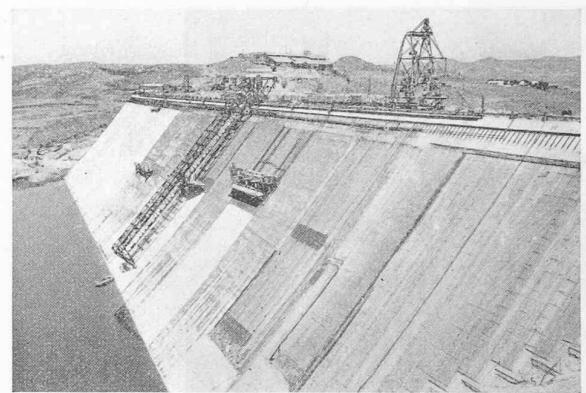


Fig. 35. — Exécution du masque en béton bitumineux.

Au premier plan le béton d'égalisation avec ses joints de dilatation. Par dessus le grillage d'armature du béton bitumineux. Plus loin les fils d'armature continus du masque de protection. Au fond le masque est terminé.
Cliché Chagneaud.



Fig. 36. — Avarie au tapis d'étanchéité composé de sept couches de toiles enduites de « Flintkote ».

Poinçonnement au droit de la saignée sous l'effet de la pression.
Cliché P. et C.

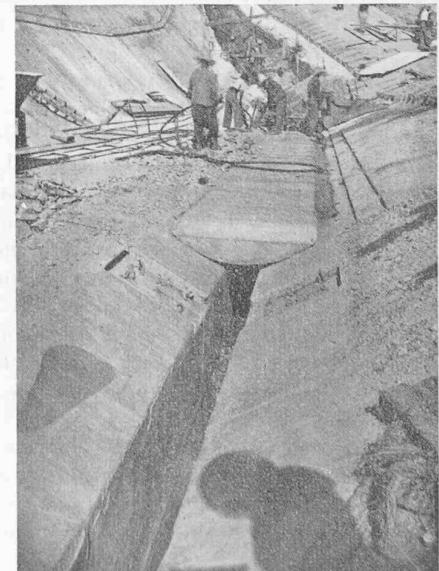


Fig. 37. — Reconstruction de la saignée.

Celle-ci recoupe la couche maçonnerie entre le mur de pied et le massif d'enrochements (fig. 29). Dispositif autorisant les déformations relatives du mur de pied et du masque.

Cliché P. et C.

D'autre part, il faut qu'il soit encore assez plastique pour suivre les déformations même à basse température.

Il s'agissait donc de trouver la composition optima. En choisissant une composition granulométrique présentant un minimum de vide et des bitumes durs (pénétration 10/20), on obtenait un matériau rigide, mais extrêmement difficile à travailler et à mettre en place. En augmentant les éléments fins et le pourcentage du bitume, la mise en place devenait plus facile, mais le risque de fluage augmentait. Un compromis satisfaisant entre ces deux désirera opposés fut trouvé. La composition granulométrique du masque est la suivante :

	Ø des grains	% partiel	% total
gravelettes	plus grand que 25 mm	2,9	100
	25/18	17,64	97,10
	18/12	14,65	79,64
	12/5	19,96	64,81
	5/2,5	6,75	44,85
sables et filer	2,5/0,63	10,17	38,10
	0,63/0,28	13,90	27,93
	0,28/0,1	4,28	14,03
	plus petit que 0,1	9,75	9,75
Bitume (20-30 pénétration). Dosage 8 % du poids des matériaux secs.			

Le masque de protection en béton est armé de fils parallèles continus, descendant de haut en bas du parement (fig. 35). Ceux-ci sont dressés et soudés sur place. Le masque de protection est suspendu par l'armature à la crête du barrage. Pour lui permettre de jouer indépendamment du masque d'étanchéité en béton bitumineux une couche de papier est interposée.

La mise en place du béton bitumineux a été faite à partir d'une plateforme de travail mobile. La compacité fut obtenue par un rouleau oblique qui circulait horizontalement en étant suspendu à la crête du barrage. Des essais ont montré qu'un roulage de haut en bas, techniquement plus simple à réaliser, provoque des vagues sur la surface du béton bitumineux.

La jonction entre le masque et le mur de pied était un point particulièrement délicat.

La saignée ouverte (fig. 29) comprise entre la base du parement amont et le mur de pied, et dont nous avons déjà

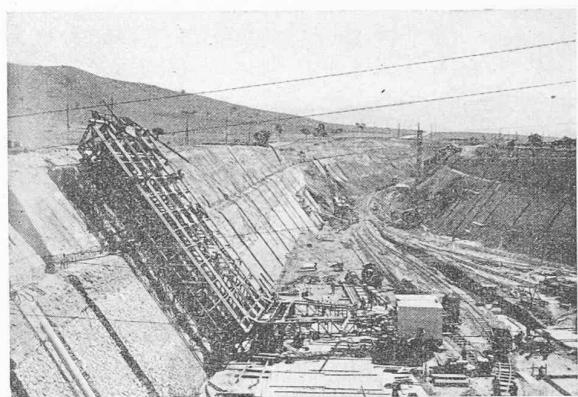


Fig. 38. — Ancien profil trapézoïdal du canal de fuite.

Au premier plan coffrage roulant.

Cliché Chagneaud.

parlé, devait pouvoir se resserrer encore, les mouvements n'étant pas encore complètement stabilisés. On imagina de la remplir avec une composition de bitume-liège qui est fortement compressible et étanche. Un recouvrement composé de 7 toiles de coton enduites au moment de leur pose avec une émulsion de « flintkote » surmontait le tout.

Lors de la première mise en eau, ce dispositif occasionna de graves déboires. En effet, sous la charge croissante de l'eau qui à ce moment-là atteignait environ 15 m, le produit placé dans le joint se comprima à tel point que les toiles d'étanchéité se déprimèrent et finirent par se déchirer sur certains points saillants. Il se produisit alors une fuite d'eau que l'on arriva à localiser au moyen d'essais à la fluorescéine. Un débit considérable qui approchait 800 l/min s'échappa par le trou (fig. 36).

Cet incident, qui n'eut heureusement pas de conséquences graves, nécessita cependant la vidange des eaux déjà accumulées derrière le barrage. Celle-ci dut être achevée par pompage de la tranche inférieure, car aucun organe d'évacuation n'existe pour l'eau comprise entre la base du batardeau amont et le barrage lui-même.

A la suite de cet incident, le joint entre le mur de pied et le masque fut transformé. On construisit une saignée en forme de V munie de clavettes en béton armé, le tout surmonté d'un tapis bitumineux recouvrant la tête du mur de pied (fig. 37).

V. Exécution du déversoir et du canal de fuite.

1. Les divers tracés adoptés.

Le déversoir est un des organes qui a subi les plus nombreuses modifications en cours d'exécution.

Le premier tracé devait passer à travers le ravin du Chabet el-Guendoul pour se jeter directement dans l'Oued el-Hamman (fig. 39). Ce tracé était le plus court.

Dès les premiers coups de pelle, des éboulements se produisirent et on décida de reporter le tracé plus au nord, dans le plateau quaternaire, de façon à asseoir le canal de fuite dans des terrains que l'on estimait plus solides (10). Les nombreux sondages et des puits de reconnaissance furent exécutés et on constata une série de dépressions gênantes dans la surface

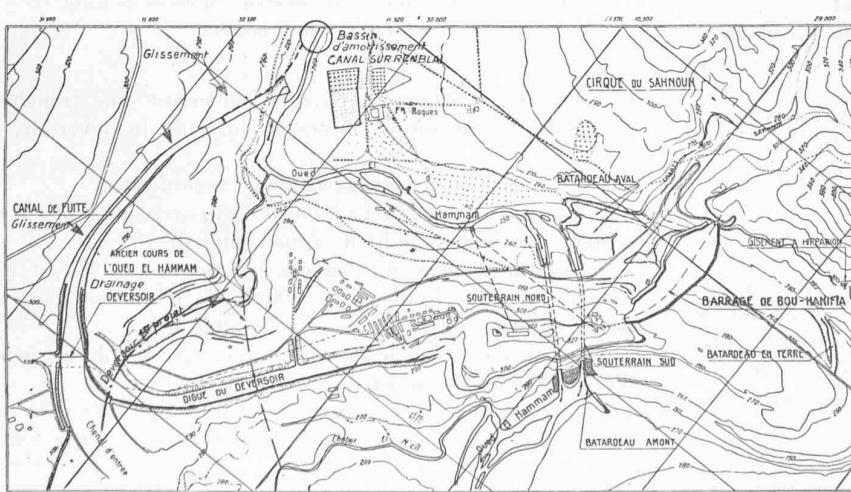


Fig. 39. — Plan de situation du déversoir et du canal de fuite.

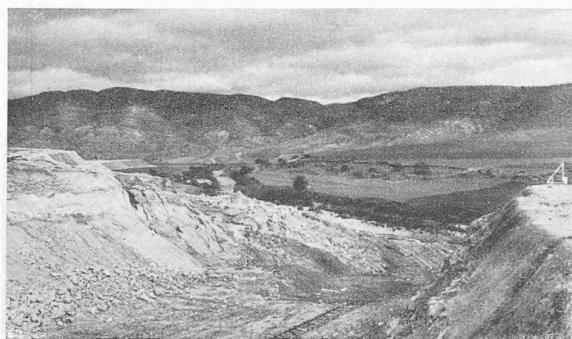


Fig. 40. — Grand glissement au débouché du canal de fuite dans l'Oued-el-Hamam.

Cliché J. C. O.

des assises marneuses, ce qui obligea à abaisser encore la cote du radier du canal. Le seuil du déversoir fut aussi déplacé vers l'aval pour profiter d'une culmination de la marne.

Le projet prévoyait un canal de forme trapézoïdale (fig. 38), qui fut attaqué sur une certaine longueur.

2. *Les glissements des talus.*

En 1937, alors que l'excavation des terres n'était pas encore terminée, des glissements commencèrent à se produire sur le bord des talus.

Mais les mouvements de terrain les plus graves apparurent à l'intersection du canal avec le flanc de la vallée, à l'endroit où le canal devait rejoindre le lit de la rivière. Ces glissements se développèrent et intéressèrent un volume considérable de terrains (fig. 40).

Ils sont dus à la désagrégation des marnes par l'action des eaux souterraines fortement alcalines et chargées de sulfates et de carbonates alcalins.

3. *La forme trapézoïdale est remplacée par un profil semi-circulaire.*

Suivant le conseil de l'ingénieur Caquot, on décida alors d'abandonner le profil trapézoïdal pour adopter un nouveau profil à revêtement semi-circulaire, résistant infiniment mieux aux poussées (fig. 41).

L'idée génératrice de ce projet était la suivante :

Les glissements étaient localisés dans les terrains inférieurs marneux, tandis que les couches supérieures du quaternaire, formées de poudingues et de galets, quoique assez disloquées, étaient beaucoup moins sujettes aux glissements.

Le revêtement semi-circulaire travaillait donc en quelque sorte comme une voûte renversée dont les culées s'appuient sur les terrains supérieurs, plus résistants.

Alors que l'ancien revêtement devait être exécuté par un béton coulé sur place derrière un immense coffrage roulant (fig. 38), on adopta une toute autre technique pour le revêtement semi-circulaire.

Celui-ci se compose de blocs en béton, moulés d'avance suivant un certain nombre de types standardisés (fig. 41). Ces blocs, de grandes dimensions, furent posés à la grue.

La zone des glissements aval nécessita encore une déviation et un prolongement du tracé (fig. 39). On évita d'approfondir le fond de la tranchée. Au contraire, l'extrémité du canal de fuite fut assise sur des terrains rapportés, soigneusement cylindrés.

4. *Attaque des bétons par les eaux séléniteuses.*

Les eaux, circulant dans des marnes salées et riches en



Fig. 41. — Nouveau profil semi-circulaire.

Revêtement en blocs de béton moulés d'avance.
A gauche zone d'éboulement remblayée avec des matériaux sains.

Cliché P. et C.

pyrite, étaient fortement chargées et séléniteuses¹. On craignait avec raison l'attaque des bétons. Pour parer à cette éventualité, le seuil du déversoir fut pourvu d'un cuvelage et béton de « Ciment Fondu », le cœur seul étant constitué par un ciment Portland. Plus à l'aval, le revêtement était protégé par une couche drainante destinée à empêcher le contact des eaux souterraines avec le béton.

On s'aperçut assez rapidement que même les ciments fondus ne résistaient pas à l'attaque des eaux, probablement à cause de l'acidité très élevée des eaux². On sait en effet que le ciment fondu résiste parfaitement aux eaux sulfatées, à condition de se trouver en solution neutre (11). Pour préserver

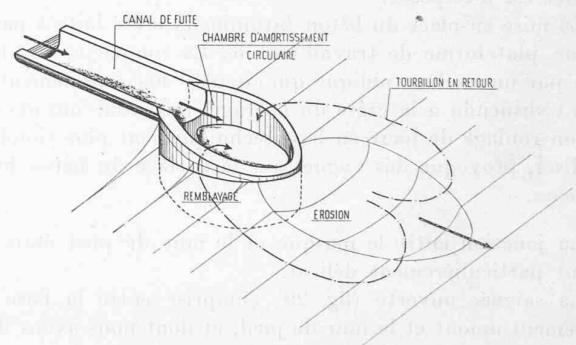


Fig. 42. — Bassin d'amortissement du canal de fuite.
Schéma de fonctionnement.

le béton d'une attaque ultérieure, on creusa une tranchée drainante, encaissant les ouvrages du seuil du déversoir.

5. *Fonctionnement du bassin amortisseur.*

Il s'agissait d'amortir l'action de l'eau arrivant à une très grande vitesse dans le lit de l'oued (plus de 10 m/sec).

Le bassin amortisseur, en construction en 1941, est un immense bassin circulaire de 100 m de diamètre, dont le bord supérieur est découpé en sifflet (fig. 42).

Son but n'est pas de supprimer toute érosion du lit, mais d'empêcher qu'elle se propage en remontant.

En voici le fonctionnement : Le jet d'eau qui débouche du canal de fuite forme deux tourbillons symétriques, qui vien-

¹ Sulfates exprimés en SO_4^{2-} : 0,5 à 2 gr/lit.

² Alcalinité exprimée en CaO : 23 mg/lit.

ment buter latéralement contre les parois extérieures du bassin amortisseur et déversent par-dessus. En ce point-là les vitesses sont suffisamment diminuées pour qu'il y ait sédimentation des matériaux en suspension, ce qui empêche le déchaussement de l'ouvrage.

VI. Conclusions.

La description des travaux donne une idée de la complexité des problèmes qu'il faut résoudre souvent dans un délai très bref pour mener à bien un ouvrage de l'envergure de Bou-Hanifia, dans des conditions aussi difficiles.

Tous les obstacles que la nature se plaisait à accumuler jour après jour furent en définitive surmontés, grâce à la ténacité des ingénieurs et à la parfaite collaboration qui a toujours régné entre les diverses entreprises chargées de l'exécution des travaux et le maître de l'œuvre.

Dans le cadre des grands travaux d'irrigation, le barrage de Bou-Hanifia est une réalisation remarquable qui montre ce que l'on peut oser, malgré des circonstances défavorables, en faisant appel aux moyens de la technique moderne des fondations.

Références bibliographiques.

1. VERGNEAUD et DROUHIN : *Barrages de Bakhadda et de Bou-Hanifia*. « Annales Institut technique du Bâtiment », septembre-octobre 1936.
2. PIRAUD : *Le barrage de Foum-el-Gueiss*. « Annales Institut technique du Bâtiment », septembre-octobre 1936.
3. MARTIN : *Le barrage du Ghrib*. « Annales Institut technique du Bâtiment », janvier-février 1937.
4. MARTIN et DROUHIN : *II^e Congrès des grands barrages, Washington*. 1936. Question VI.
5. STUCKY : *Le barrage des Beni-Bahdel*. « Bulletin technique Suisse romande » du 5 juin 1937.
6. GUTMANN : *Barrages récents en Algérie*. « Eng. News Record », 2 décembre 1937.
7. — *Constitution et mode de fondation des barrages en terre en Algérie*. « Eng. News-Record », 26 mai 1938.
8. MARTIN : *Les grands barrages et les irrigations en Algérie*. « Chantiers », juillet 1938.
9. H. LINK : *Die Steindämme in Algerien*. « Wasserkraft und Wasserwirtschaft », 15 juin et 15 août 1939.
- 9 bis. P. BAUMANN : *Der San Gabriel Dam N° 1 bei Los Angeles*. « Schweizerische Bauzeitung », 9 avril 1938.
10. FALCONNIER et LOMBARD : *Etude géologique des terrains de fondation du barrage de Bou-Hanifia*. « Bulletin technique Suisse romande », 13 juin 1942.
11. REUGADE et LHOPITALIER : *Revue des matériaux de construction et de travaux publics*. 1936. Recherches sur les causes de certains phénomènes d'altérations des bétons de ciment alumineux.

Concours pour la construction d'une nouvelle maison d'école à Orsières (Valais).

Extrait du rapport du jury.

Le jury, composé de MM. K. Schmid, architecte, Th. Dubelbeiss, architecte, C. Besson, architecte, C. Pouget et H. Rausis, s'est réuni le 27 décembre 1943.

Vu la présence des cinq membres du jury, il estime superflu de faire appel au suppléant et prend acte : que dix-neuf projets livrés en temps utile sont soumis à son examen ; que tous les projets correspondent aux exigences du programme du concours ; qu'une police d'assurances a été contractée pour une valeur de 20 000 fr.

La vérification des documents et des cubes est faite séance tenante. Les membres du jury décident de procéder à un premier examen individuel des projets avant de fixer le mode d'appréciation des dits.

Pour la classification des concurrents, les bases suivantes sont adoptées :

1^o Orientation, implantation des bâtiments et voies d'accès.

2^o Distribution générale.

3^o Architecture.

4^o Cube et économie du projet.

Ce travail a occupé la journée du 27 décembre 1943. Le 28 décembre, le jury procède à différents tours d'élimination.

Au premier tour sont éliminés les projets portant les devises : « Saint-Bernhard », « Saint-Bernard », « La Fouly ». Au deuxième tour sont éliminés les projets : « Est-Ouest », « Condémines », « 1945 », « Montattuay ». Au troisième tour, les projets : « Arpettes », « Entremont II ».

Restent en présence dix projets qui sont appréciés très en détail. Le jury décide à l'unanimité d'accorder les prix suivants : 1^{er} prix, 2000 fr. au projet « Oseris » ; 2^{me} prix, 1700 fr. au projet « Lumen » ; 3^{me} prix, 1300 fr. au projet « 2 × 2 ».

Le jury propose en outre l'achat de sept projets pour un prix variant de 500 à 900 fr.

Il approuve le protocole de ses délibérations. Les enveloppes accompagnant les projets primés sont ouvertes et révèlent les noms des lauréats suivants :

1^{er} prix : M. L. Praz, architecte, à Sion.

2^{me} prix : M. M. Zwissig, architecte, à Sierre.

3^{me} prix : MM. M. et D. Burgener, architectes, à Sierre.

Remarques sur la composition du jury et la rédaction des programmes des concours d'architecture.

A propos du concours pour la maison d'école d'Orsières.

Les concours de ces dernières années, bien que la création d'une instance de recours ait pu faire craindre le contraire, ont, en général, donné satisfaction à chacun.

L'exposition des projets de concours pour la maison d'école d'Orsières nous a laissé en revanche l'impression qu'on aurait facilement pu donner au problème posé une meilleure solution et qu'en procédant un peu différemment le jury aurait obtenu un meilleur résultat d'ensemble.

Le point de départ de ce concours (par quoi il faut entendre son programme) était fort succinct. Aucune dimension de pièces n'y figurait ; la liste des locaux demandés ne faisait pas état de certaines exigences qui ne se trouvent précisées que dans les réponses aux questions des concurrents. De plus, le programme ne donnait aucune indication autre que cette liste.

Certes, il est recommandé dans les principes de la S. I. A. de laisser le maximum de liberté aux concurrents. Cette liberté a toutefois des limites et l'interprétation d'un programme imprécis entraîne les concurrents à présenter des projets fort disparates qu'il est difficile d'opposer les uns aux autres, parce que les données ne sont pas les mêmes.

Ceci explique cette impression d'incertitude qui se dégage de l'examen des résultats du concours. Parmi les dix projets