

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 58 (1932)
Heft: 19-20: Assemblée générale de la SIA à Lausanne, le 24/25 septembre 32

Artikel: Barrages et géologie
Autor: Lugeon, Maurice
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-44870>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.03.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE

Rédaction : H. DEMIERRE et
J. PEITREQUIN, ingénieurs.

DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE DE PUBLICATION DE LA COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN

ORGANE DE L'ASSOCIATION SUISSE DE TECHNIQUE SANITAIRE

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

SOMMAIRE : Barrages et géologie, par M. LUGEON, professeur à l'Université de Lausanne. — *Ende der Grosstadt*, von Dr. J. GANTNER. — Concours pour la révision du plan d'extension de Lausanne : rapport du jury et reproduction des projets primés. — Chronique. — Bibliographie. — Sociétés.

Barrages et géologie

Conférence faite à l'Aula de l'Université de Lausanne, le 24 septembre 1932,
à l'occasion de l'assemblée générale de la Société suisse des ingénieurs et des architectes

par

M. MAURICE LUGEON

Professeur de géologie à l'Université et à l'École d'ingénieurs de Lausanne.

Note de la Rédaction. — La Société vaudoise des ingénieurs et des architectes, section de la S. I. A., ayant exprimé le désir que la conférence de M. Maurice Lugeon soit reproduite dans le numéro spécial du *Bulletin technique* distribué aux participants à l'assemblée générale de ladite S. I. A., à Lausanne, en septembre 1932, le professeur de géologie de l'École d'ingénieurs de Lausanne a été entraîné à écrire un livre, où il résume les résultats de sa longue expérience.

La table des matières ci-dessous et les illustrations qui accompagnent le présent article donneront à nos lecteurs une idée de cet ouvrage, que le nom seul de son auteur eût d'ailleurs suffi à « illustrer ».

Nous remercions vivement M. le professeur Lugeon d'avoir généreusement et gracieusement mis à notre disposition une si riche documentation. L'ouvrage « Barrages et Géologie » est cédé aux membres de la S. I. A. au prix de faveur de 17 fr. jusqu'au 15 octobre prochain.

Table des matières de « Barrages et géologie ».

Chapitre I. *Introduction.* — Chap. II. *Ingénieur et géologue.* — Chap. III. *Regards en arrière et regards actuels.* — Chap. IV. *Importance de l'étude géologique.* — Chap. V. *La méthode géologique dans les projets :* A. Les retenues ; B. Les barrages. — Chap. VI. *Les recherches sur les lieux du barrage avant la construction :* A. Stabilité du versant d'air ; B. Autres recherches dans le versant d'air : 1. Recherches par galeries, 2. Recherches par sondages, 3. Recherches par la prospection électrique ; C. Les recherches dans le versant d'eau : 1. Les sondages aux rails éclissés, 2. Les sondages au trépan et à la couronne, 3. La disposition et le nombre des forages, 4. Recherches par galeries sous-fluviales. — Chap. VII. *Les terrassements.* — Chap. VIII. *L'imperméabilisation :* A. Les voiles et le forage ; B. Situation et densité des forages du voile normal ; C. L'injection du voile normal ; D. L'injection du voile au large ; E. Les injections de liaison ; F. Durée des travaux de forage et d'injection ; G. Des exemples ; H. Représentation graphique des essais d'eau et des injections. — Chap. IX. *L'avenir des retenues :* A. L'alluvionnement ; B. Les pertes. — Chap. X. *L'avenir des barrages.* — Chap. XI. *Postface.*

Introduction.

Monsieur le Président, Mesdames et Messieurs,

Bien souvent on m'a demandé d'écrire un ouvrage traitant du rôle de la géologie dans la construction des barrages et dans la vie des bassins de retenue.

J'ai, pour plusieurs raisons, décliné ce désir qui me venait aussi bien du côté des ingénieurs que de celui des géologues. Bien que depuis environ un quart de siècle, je collabore aux projets de construction, à la construction, et même à la réparation de barrages grands et petits, dans bien des pays, aux Etats-Unis, dans l'Amérique du Sud, en Afrique du nord, en Portugal, en Espagne, en France, en Italie, en Autriche et en Belgique, sans oublier la Suisse, il m'a toujours semblé que je n'avais pas encore assez d'expérience pour parler. Ce sont toujours des cas particuliers qui se présentent et il est bien difficile de tirer des conclusions générales lorsqu'on ne possède qu'un nombre limité d'exemples construits.

A force de côtoyer des ingénieurs, j'ai beaucoup appris de leur science et de leurs méthodes et peut-être aurais-je pu aussi faire comme eux, mais je m'en suis toujours gardé et c'est pourquoi, voulant bien dire ce qu'a été mon rôle et ce que doit être celui de tout géologue, j'ai intitulé cette conférence : *Barrages et géologie.*

C'est donc uniquement de géologie que je vais vous parler, mais vous allez voir que cette géologie est un peu différente de celle que l'on enseigne habituellement. Peu à peu les financiers, les constructeurs, ont, en quelque sorte, obligé des hommes élevés pour ne faire que de la science pure, à sortir de leur tour d'ivoire en basant

sur eux, comme point d'appui pour le départ, pour le saut en avant, une confiance qui se traduit par de grandes responsabilités.

Ingénieur et géologue.

L'art du géologue dans la construction des barrages, car il n'y a pas que science, est bien différent de celui de l'ingénieur. Celui-ci, si je simplifie son rôle, fait tout d'abord œuvre de calculateur. A côté de la question du coût, qui devra être toujours présente devant ses yeux, et qui est parfois trop présente, car elle peut l'inciter à des économies dangereuses, mais qui inversement l'amènera peut-être à des propositions hardies et nouvelles, il applique des raisonnements d'ordre mathématique. Il calcule les efforts, les sujétions, compressions et tensions auxquelles sera soumise la maçonnerie ou les parties métalliques de son œuvre future. Il détermine d'avance une forme de l'ouvrage, en connaissant la résistance des matériaux. Il choisit ces matériaux, dont il connaît, à l'avance aussi, les qualités et cela souvent après de longs essais, et sous ce rapport d'énormes progrès ont été faits ces dernières années et il me plaît de dire que le Laboratoire d'essai de matériaux de Lausanne a rendu jusqu'à ce jour des services précieux. L'ingénieur applique des connaissances scientifiques dans lesquelles le génie joue un rôle, mais où toutefois le sentiment n'apparaît ou ne doit pas apparaître.

A part la diversité des profils rocheux qui fait que l'ingénieur choisira un type déterminé de forme, on pourrait croire qu'il sera possible sans tarder de codifier la construction d'un barrage et de fait il y a des règlements publiés par des Commissions officielles dans plusieurs Etats.

Vous voyez que je m'exprime au conditionnel, car, dans ma vie de géologue de barrages, j'ai déjà vu passer comme des modes de construire ou de calculer et, si on faisait l'histoire des idées dans l'édification de ces hauts murs, on écrirait bien des pages curieuses. Tel type de forme semblait un moment prédominer dans la collectivité des esprits ; de même pour le choix des matériaux et sans aller trop en arrière, il y eut, par exemple, l'époque des bétons coulés très liquides, puis des bétons cyclopéens, puis les bétons plastiques et il me semble que l'on reparle ces temps-ci de la maçonnerie exécutée à la main.

C'est dire que toute codification serait pernicieuse et risquerait d'arrêter l'esprit d'invention, c'est dire que la construction des barrages procède de la science expérimentale rattachée immédiatement à la science pure, celle des laboratoires, et de la science abstraite du calcul, où l'hypothèse joue également parfois son rôle.

Elever un barrage c'est faire une expérience !

Mais encore doit-on être certain que l'expérience ne se terminera pas par deux désastres, le désastre financier, celui-là n'est pas mortel, mais il y a cette terrible possibilité de voir le grand rempart s'écrouler. Aussi,

dans de nombreux pays, il y a des règlements sévères. Celui qui construit est étroitement surveillé par celui qui contrôle au nom de la collectivité. Tant que les règlements de contrôle ont été rédigés par des hommes ayant bâti eux-mêmes et dont les cerveaux ne sont pas pétrifiés par la satisfaction de leurs œuvres, qu'ils croient insurpassables, et tant que ceux plus tard, qui n'auront pas construit appliqueront les règlements comme des œuvres humaines, c'est-à-dire toujours perfectibles, tout ira bien. Mais si le contrôle est rigide, tout progrès est arrêté dans le pays où peut exister une telle commission ou tel homme chargé d'appliquer le règlement à la lettre. Je dois dire que dans tous les pays où existent des Comités gouvernementaux où j'ai travaillé, j'ai vu en général un bon accord entre les deux groupes d'ingénieurs, bien que parfois cela grince un peu. Mais l'existence de telles commissions de surveillance n'a pas empêché des barrages de se rompre. Aussi n'a-t-on pas jugé utile d'instituer une telle commission en Suisse, et je crois que l'on a bien fait.

En revanche, la Conférence mondiale de l'énergie a estimé qu'il serait bon que les constructeurs du monde entier donnassent les résultats de leurs expériences. Il a été créé des commissions nationales qui sont en plein travail. Une telle commission fonctionne en Suisse.

Assez parlé de l'ingénieur. Voyons le géologue.

Où est la limite entre le travail de l'ingénieur et celui du géologue, où sont les frontières communes ?

C'est, en définition, très simple. Tout ce qui est à l'intérieur des surfaces d'appui appartient à l'ingénieur, tout ce qui est au delà des surfaces d'appui serait du domaine du géologue.

Il y a donc une frontière commune, c'est la surface de fondation, la surface sur laquelle va s'élever le mur.

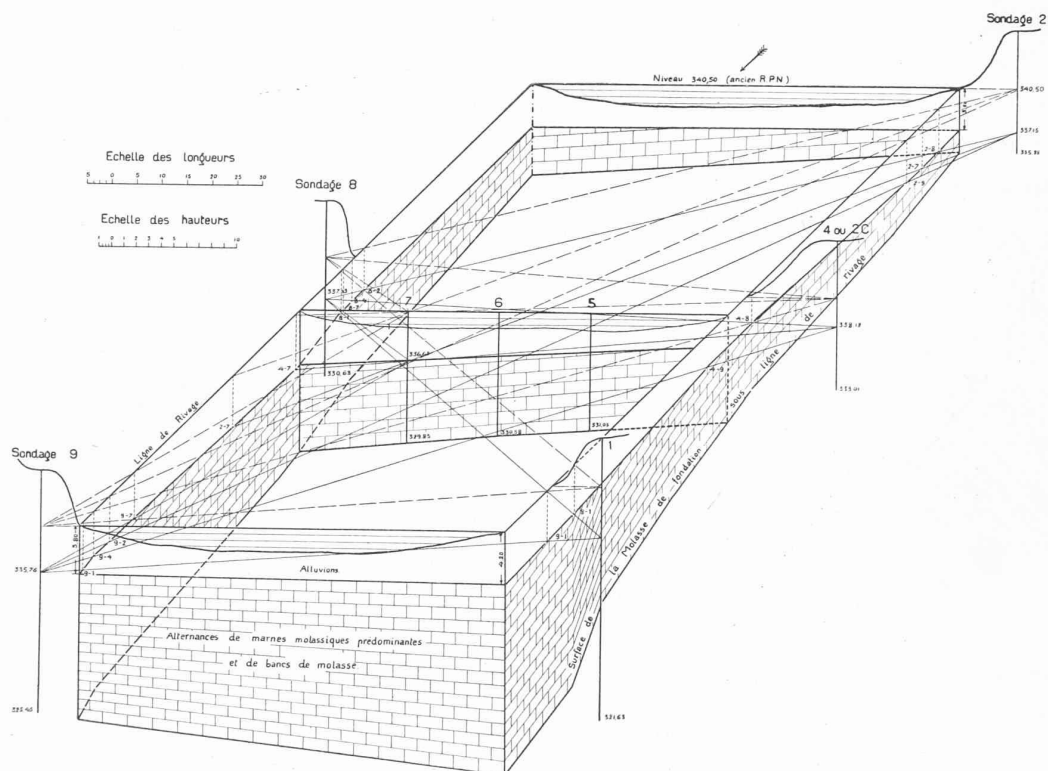
Or, l'histoire de la vie des barrages montre que ceux qui se sont écroulés et dont il est résulté parfois d'horribles catastrophes, ne sont pas, en majorité, tombés par faute de calcul, par faute du matériau choisi, mais par insuffisance de fondation sur de mauvais sols, plus ou moins gorgés d'eau exerçant une sous-pression pernicieuse, pour avoir méconnu la constitution géologique et hydrologique du sol de fondation.

En plus, de vastes réservoirs, limités par des barrages superbes et fiers, n'ont pu retenir l'eau que l'on espérait y accumuler. Faute géologique encore. Et enfin, il y a un grand nombre d'organes, conduite d'amenée, cheminée d'équilibre où le géologue doit dire son mot.

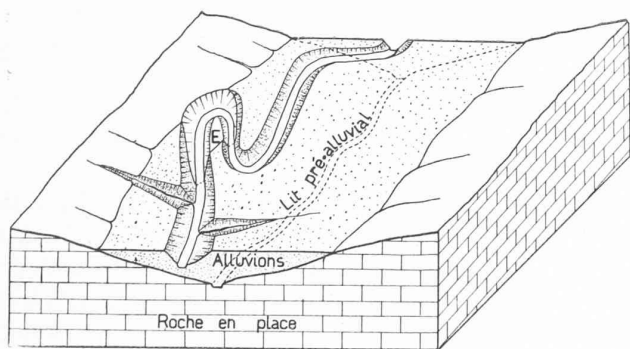
Et cela fait comprendre la responsabilité du géologue, du moins pour autant que, dans les exemples catastrophiques connus, des géologues qualifiés soient intervenus, car souvent ils furent ignorés.

Voyons donc, avant d'aller plus loin, ce que doivent être la mentalité et l'instruction d'un géologue, plus tard, dans le cours de cette conférence, vous comprendrez son rôle objectif.

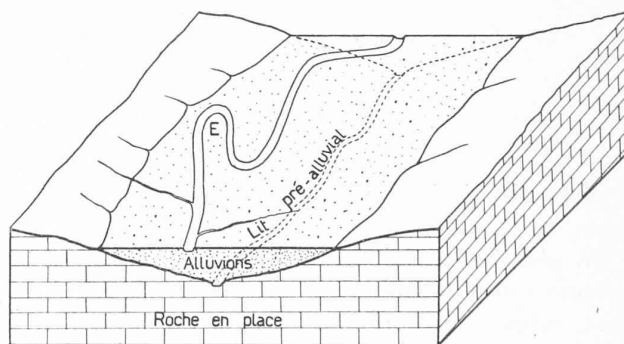
Un géologue qui collabore avec des ingénieurs doit toujours rester naturaliste. Il ne doit se servir que des



Barrage de Pougny-Chancy, sur le Rhône. Epure pour la détermination des excavations en alluvion et en rocher sous tout l'ensemble des ouvrages en rivière du projet exécuté.



Encaissement du lit fluvial; en s'enfonçant sur lui-même, le cours d'eau rencontre en E la roche en place (tronçon épigénétique).



Disposition d'une ancienne vallée alluvionnée.

Clichés extraits de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.

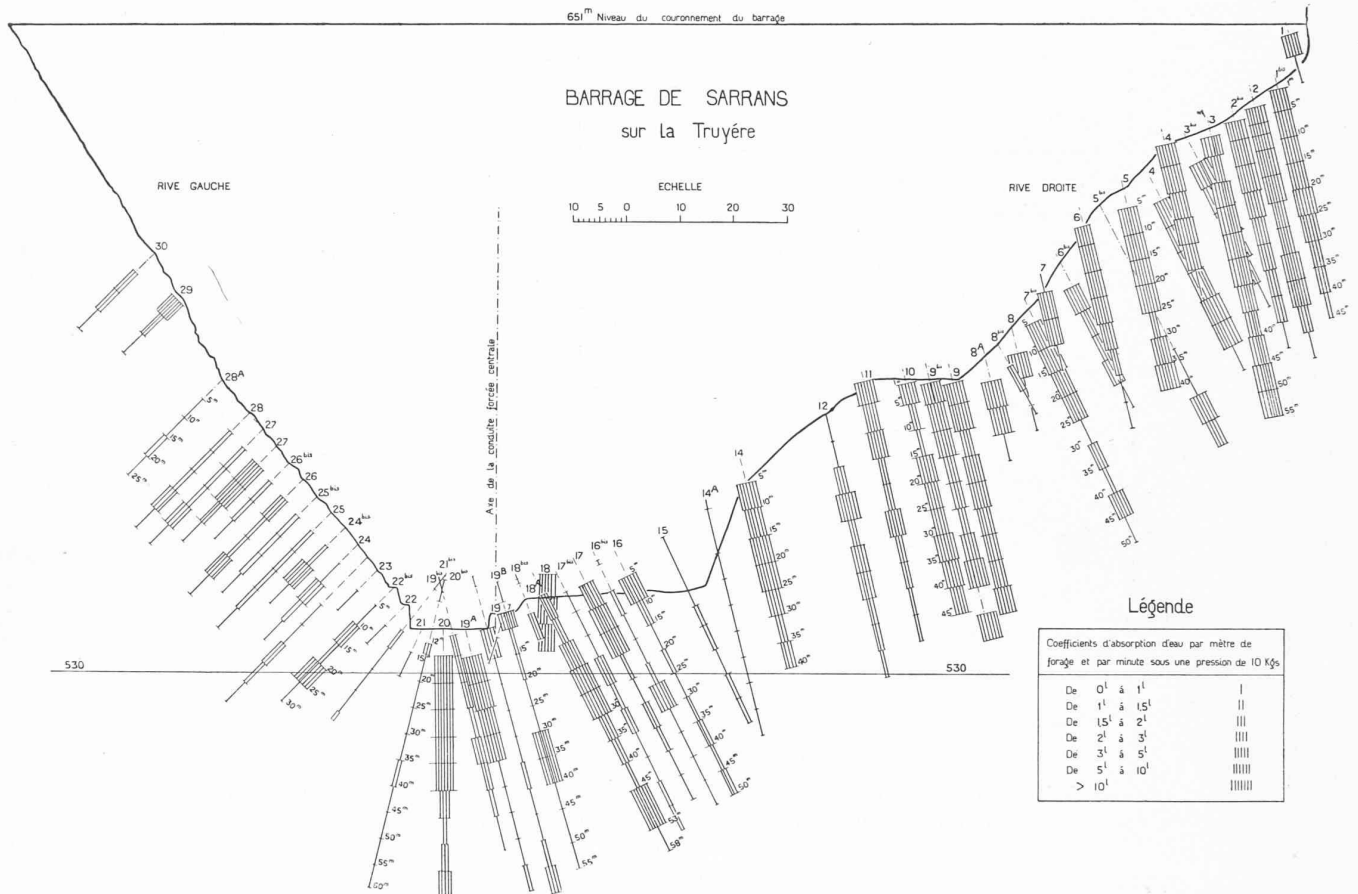
méthodes des sciences naturelles et ne pas en sortir, et cela non seulement parce qu'il empiéterait sur le rôle de l'ingénieur, d'où naissance de conflits possible, mais surtout parce que les géologues sont créés dans les écoles de naturalistes.

Toutefois, il y a dans la géologie deux divisions importantes, celle de l'histoire et celle du dynamisme. Le géologue qui n'aura étudié que l'histoire de la terre, que les êtres qui se sont succédé, ne pourra être utilisé par l'ingénieur. Il restera le savant pur, celui qui aura cette éternelle joie de faire de la science qui en apparence, mais en apparence seulement, ne sert à rien. Mais si cet homme ainsi élevé s'est également préoccupé du

mécanisme de formation des terres et des mers, s'il a cherché à connaître les agents créateurs et destructeurs de l'écorce, celui-là sera de ceux que les hommes d'application feront sortir de son cadre et utiliseront.

Ce n'est que peu à peu que l'on a compris que les naturalistes-géologues pouvaient être désignés comme collaborateurs des constructeurs et ce sont les hommes de ma génération qui ont ainsi, sinon créé, du moins fort élargi ce rôle nouveau du géologue dans le Génie civil.

Je suis sur le déclin de ma vie et je puis donc vous parler du géologue comme si je vous parlais, outre-tombe, de moi-même, et alors voici ce que doit avoir dans le ventre, si



Barrage de Sarrans sur la Truyère (France). Représentation du coefficient de perméabilité par phases de cinq mètres. Travail en cours d'exécution.

(D'après le dessin original de la « Société générale d'entreprises », à Paris.)

Cliché extrait de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.

je puis parler ainsi, ce collaborateur des grands constructeurs.

Un géologue ne doit pas avoir crainte de se charger d'énormes responsabilités. Il doit savoir affirmer nettement, même si c'est par intuition, par sentiment, qu'il a acquis une certitude. En revanche, il ne doit pas avoir une fausse honte à déclarer qu'il ne peut répondre aux questions posées sans des travaux de recherche. Souvent il devra savoir tempérer les espérances des ingénieurs qui, parfois, sans s'en douter, font de la géologie, mais de la mauvaise géologie. Le géologue, plus que tout autre, doit se méfier des prédictions et, par boutade, j'ai souvent dit qu'il n'y avait rien de plus dangereux qu'un géologue et que j'étais le premier à me méfier d'eux.

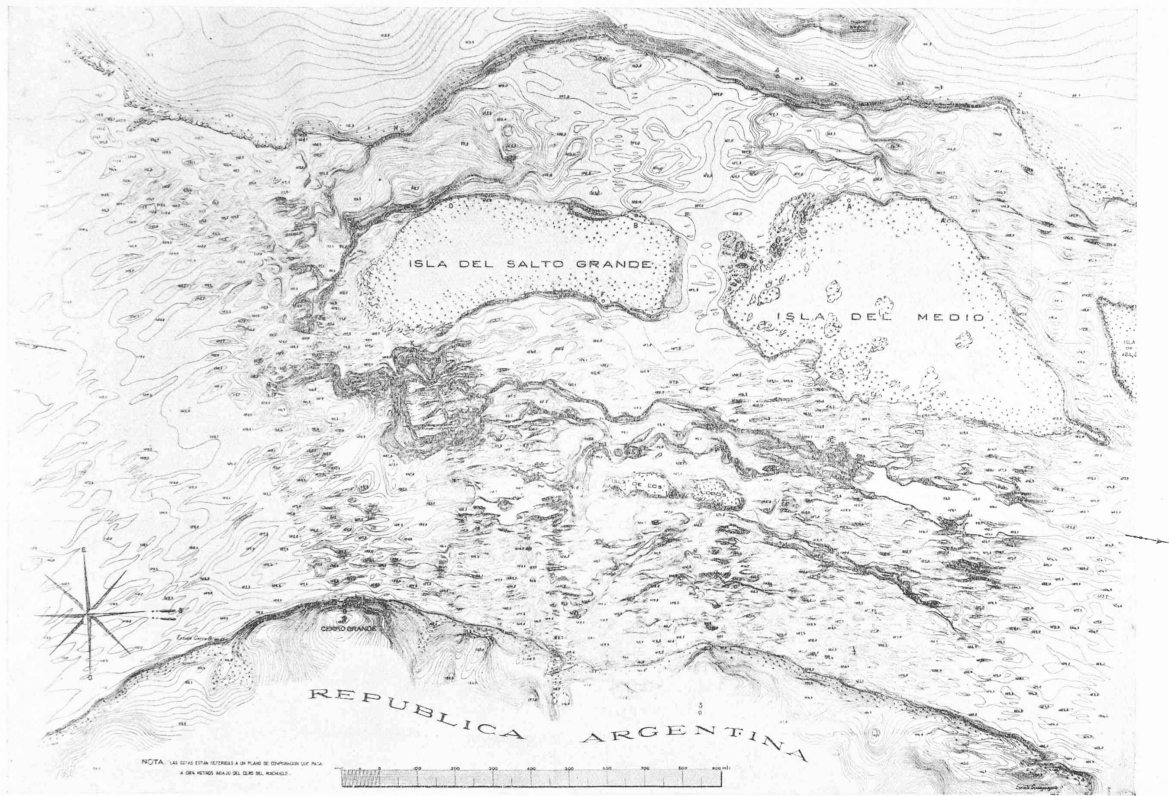
Un géologue qui parle au conditionnel, qui cherche à se couvrir, ne saurait que faire dans un milieu aussi positif que celui des ingénieurs. Sa meilleure couverture sera de dire qu'il ne peut se prononcer et que, en collaboration avec l'ingénieur, il tentera tous les moyens pour avoir une preuve péremptoire.

Et c'est alors que le géologue indiquera quels sont les procédés pour éclairer le problème. C'est alors lui qui dirigera les travaux de recherches d'abord et, plus tard, les travaux de terrassements. J'entends, par ce

mot diriger, qu'il donnera les ordres aux ingénieurs et il est nécessaire qu'il sache se faire obéir. Cela, je dois l'avouer, n'est pas toujours dans les cordes de ces savants. S'il n'a pas cet ascendant sur l'ingénieur, alors qu'il retourne à ses fossiles ou à ses minéraux ! On ne saurait que faire de lui.

Au cours de la construction, alors qu'il se présente souvent des difficultés graves, le géologue doit avoir appris comment il faut s'y prendre pour atténuer ou arrêter le danger.

Parfois aussi, ce casseur de pierres devra, car il est la plupart du temps le conseil des compagnies, ne pas craindre de prendre le parti de l'entrepreneur si celui-ci lui paraît avoir raison. Autrement dit, il doit garder toujours une indépendance totale. Il peut lui arriver d'avoir contre lui tout le monde, compagnie, ingénieurs de contrôle, entrepreneurs, tant pis, il doit faire son possible, mais sans entêtement, pour faire prévaloir sa manière de voir. S'il est battu, il doit être bon joueur et reconnaître franchement que son idée ne valait pas deux sous. C'est dire que son tempérament doit être celui d'un optimiste, et du reste, avec des pessimistes dans tous les domaines, on resterait sur place. Le métier est dur, il est dur pour tous, mais combien n'est-il pas allégé s'il règne une bonne entente

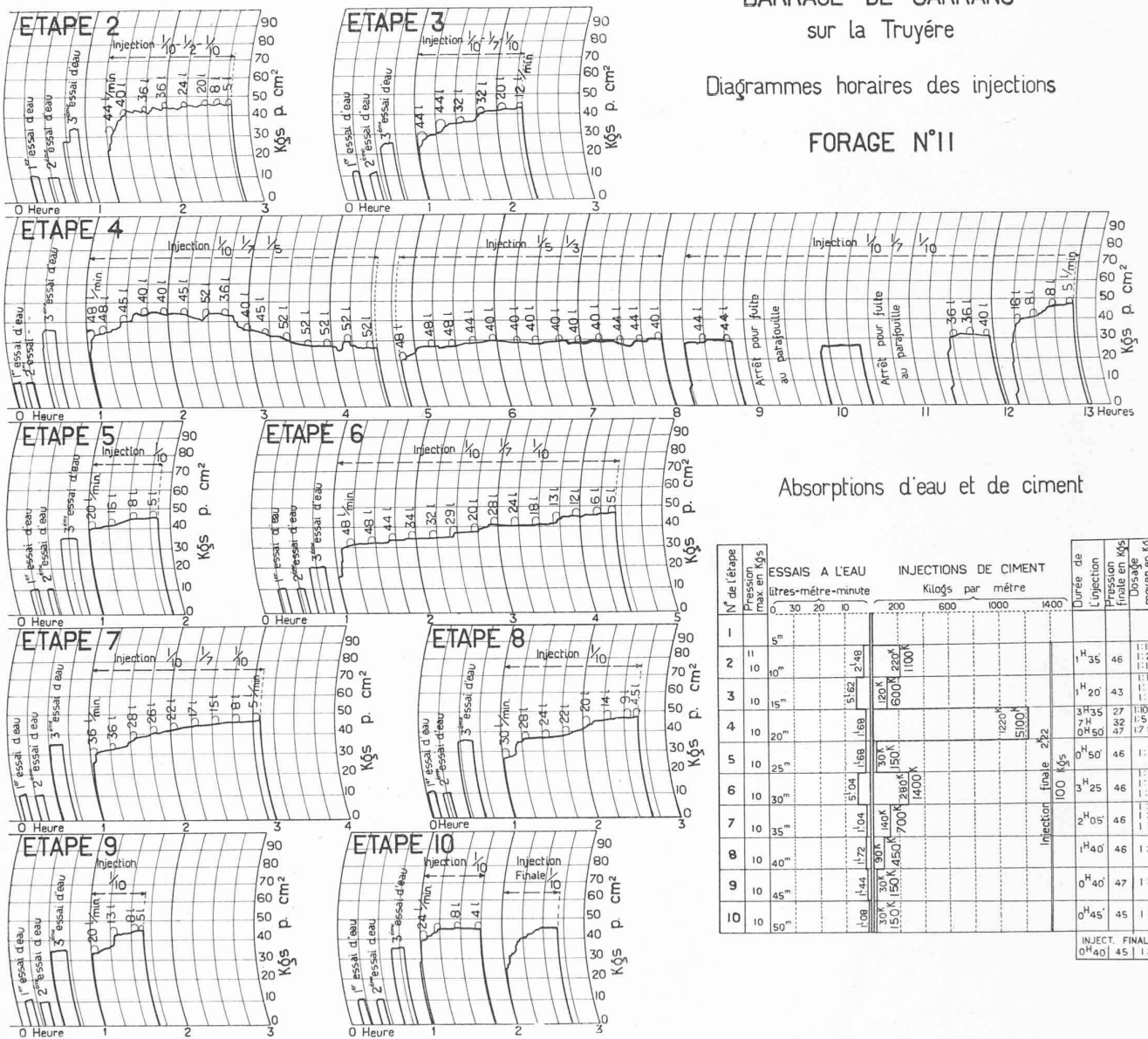


Les grands rapides (Salto Grande) du Rio Uruguay, en amont de Concordia Salto. Exemple de lit mineur et surcreusements.
 Les cotes sont rapportées à un plan de comparaison qui passe à 100 m au-dessus du zéro de Riachuelo (Buenos-Ayres).
 Reproduction d'après un plan au 1 : 2000 de la Direction générale des travaux hydrauliques du Ministère des travaux publics de la République Argentine.
 Cliché extrait de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.

BARRAGE DE SARRANS
sur la Truyère

Diagrammes horaires des injections

FORAGE N°II



Absorptions d'eau et de ciment

N° de l'étape	Pression max en Kgs	ESSAIS A L'EAU					INJECTIONS DE CIMENT				Durée de l'injection	Pression finale en Kgs	Dose moyenne en Kgs
		litres-mètre-minute					Kiloqs par mètre						
		0	30	20	10		200	600	1000	1400			
1													
2	5 ^m											1 ^H 36	46
3	10 ^m					5:52	2:48					1 ^H 20	43
4	10 ^m					1:20	1:20	600	220	1100		3 ^H 35	27
5	10 ^m					3:0	3:0	150	150	700		7 ^H 00	32
6	10 ^m					5:04	5:04	1400				0 ^H 50	46
7	10 ^m					1:09	1:09					3 ^H 25	46
8	10 ^m					1:44	1:44					2 ^H 05	46
9	10 ^m					1:44	1:44					1 ^H 40	46
10	10 ^m					1:08	1:08					0 ^H 45	45
												0 ^H 40	45

Barrage de Sarrans. Diagramme horaire des injections et graphiques des absorptions d'eau et de ciment.

(D'après les graphiques originaux des forages de l'Entreprise P. Bachy et dessin de la « Société générale d'entreprises, à Paris. »)

Cliché extrait de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.

et une bonne humeur. Je crois que la gaité naturelle de presque tous les géologues contribue pour beaucoup à leur succès et à leur influence. Voilà ce que je puis vous dire, courtement, de la mentalité et de l'instruction d'un géologue de barrage.

Je me souviens d'une conversation avec un homme charmant que je puis nommer, c'était Loucheur, ce grand ingénieur et ce grand homme d'Etat. C'était à l'époque où nous cherchions le sol rocheux à Génissiat. Il me disait, en badinant, qu'il n'était pas bien difficile d'être géologue puisqu'il constatait que je faisais toujours faire des trous, des tranchées ou des forages avant de donner mon opinion. A quoi je lui répondis qu'il avait parfaitement raison, mais qu'il fallait toutefois savoir interpréter ce que mon-

traient ces recherches. Et à son tour il me répondit que c'était mon métier et qu'il était d'accord avec moi.

Enfin, bien que le géologue doit être un peu au courant des prix des travaux, cette contingence des dépenses doit lui être inconnue, et vous en comprenez les raisons.

J'ai, dans ma vie de géologie appliquée, étudié plus de cent cinquante projets de barrages. J'ai dû m'occuper d'environ quarante ouvrages construits, en construction ou en réparation. Il pourrait paraître que je dois être à même de codifier, en quelque sorte, l'art du géologue de barrages. Je m'en garderai bien, par crainte que l'on suive à la lettre ce que je pourrais écrire et parce que le rôle de géologue, vous l'avez sans doute compris, est très personnel.

Je vais toutefois essayer, dans le cours de cette conférence, de vous faire comprendre ce rôle en classant les services que l'on demande au naturaliste dans la cons-

truction des grands barrages. Faute de temps, je ne traiterai pas des questions géologiques concernant les ouvrages annexes tels que tunnels d'aménée, tunnels de dérivation, situation des centrales, fondations de batardeaux, évacuateurs des crues, cheminées d'équilibre, etc.

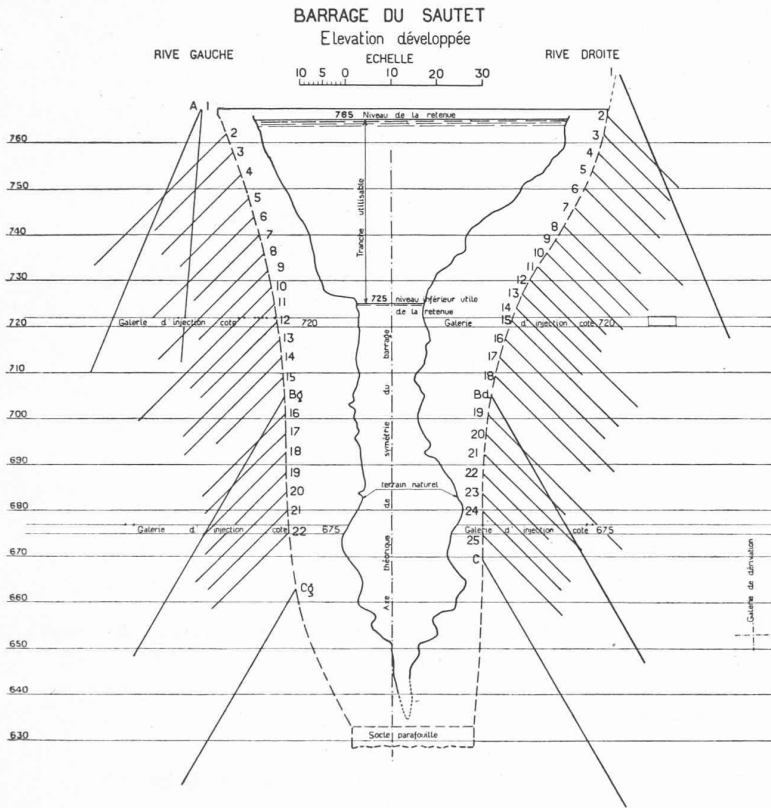
Pourtant le géologue qui s'occupe d'aménagements hydrauliques doit avoir un coup d'œil d'ensemble sur le projet. Il y a des aménagements qui ne peuvent se faire, malgré la position favorable du sol sur lequel on désire élever un barrage, parce que, par exemple, il n'y aura pas possibilité de situer sans danger une cheminée d'équilibre, ou bien certains terrains s'opposent au tracé d'un tunnel forcé, etc. Le géologue enfin, doit avoir des notions d'hydraulique.

Regards en arrière et regards actuels.

Les lacs artificiels ont été imaginés par les hommes pour répondre à de multiples besoins.

Ce furent, tout d'abord, les cultivateurs qui eurent l'idée d'accumuler de l'eau pour s'en servir, pendant les périodes de sécheresse; aussi n'est-il pas étonnant que ce soit dans les contrées arides que furent élevées les premières digues.

Ainsi dans les Indes et dans la seule province de Madras, on compte plus de 40 000 bassins, il est vrai de petite capacité. En Europe, c'est en Italie et en Espagne que,

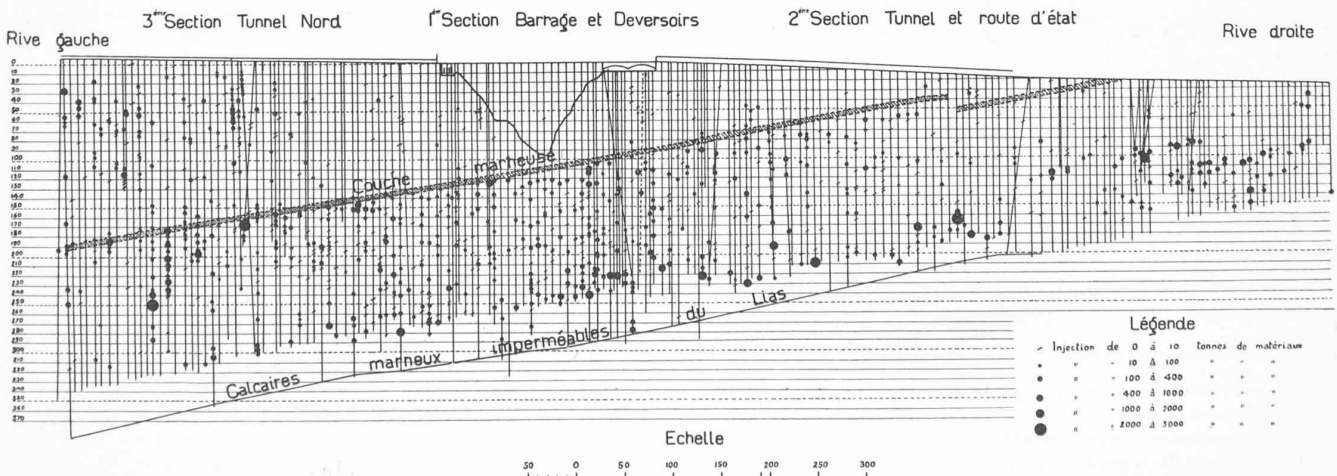


Barrage du Sautet sur le Drac. Le voile normal, actuellement en exécution. Par la « Société Sondages-Etanchement-Consolidation (Procédés Rodio) ».

(D'après le dessin original de la « Société Bonne et Drac », à Grenoble.)

Clichés extraits de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.

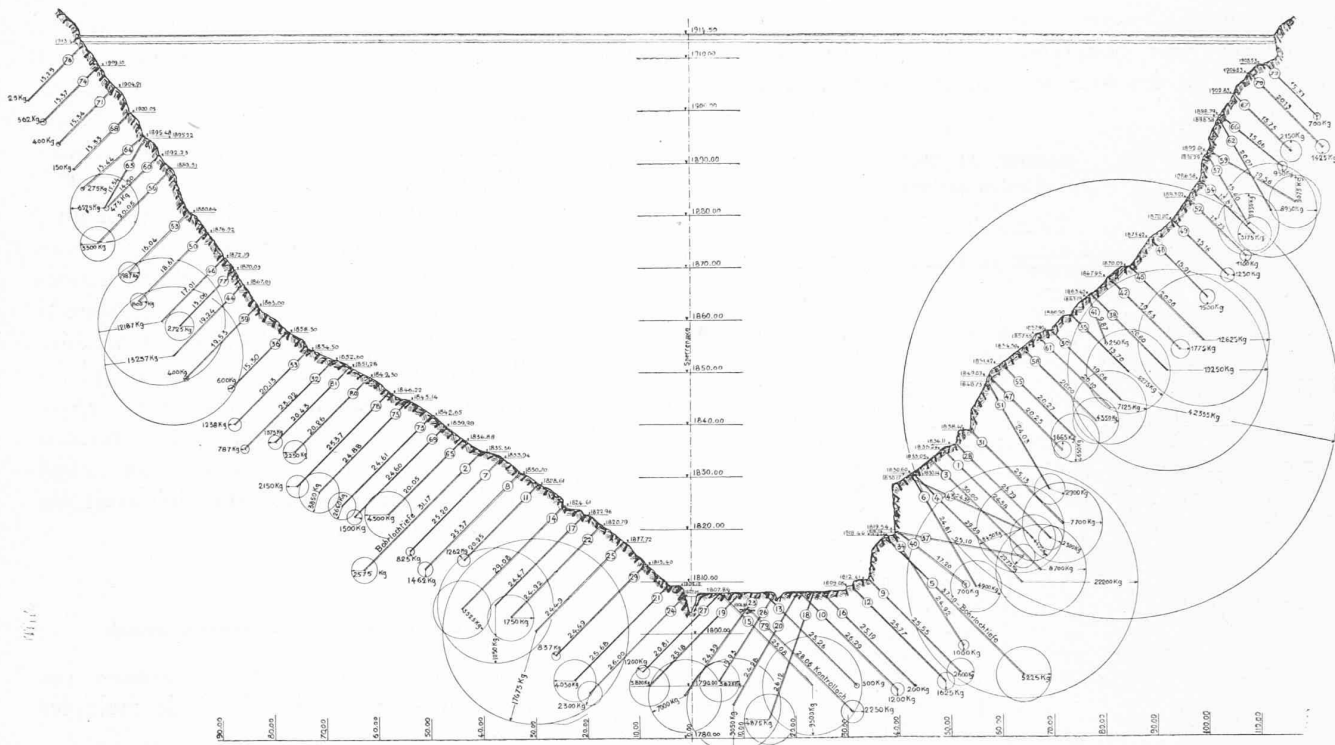
PROFIL EN LONG DANS L'AXE DES TROUS D'INJECTIONS FORÉS DEPUIS LA CRETE DU BARRAGE ET SA PROLONGATION DANS LES TUNNELS ET LA ROUTE D'ETAT MONTRANT LES QUANTITES DE MATERIAUX ABSORBES



Barrage de Camarasa

Barrage de Camarasa (Catalogne). Travaux de sondages et d'injections exécutés pour l'étanchement des pertes.

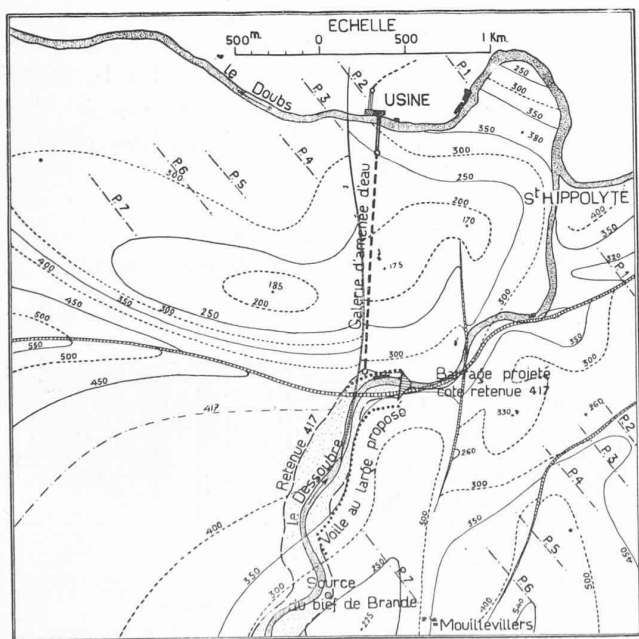
(D'après un dessin de « Riegos y Fuerza del Ebro S. A. »)



Barrage de la Spittalamm, Grimsel. Profil en long du voile normal et représentation schématique par cercles de la quantité de ciment absorbé par chaque forage. Entreprise « Svenska Diamantborrings Aktiebolaget ».

(Dessin original de la Kraftwerke Oberhasli A. G.)

Clichés extraits de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.



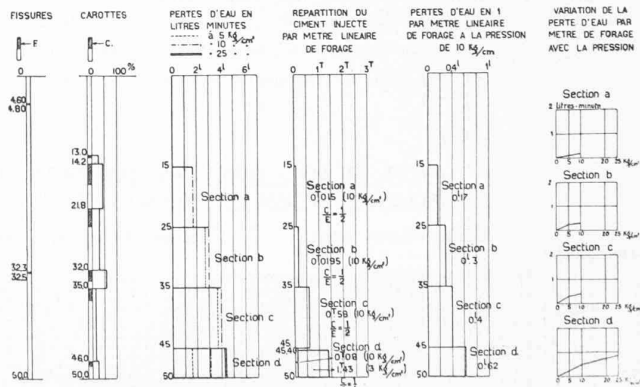
Surface hypsométrique de la marne liasique imperméable construite au moyen de sept coupes géologiques, elles-mêmes exécutées d'après une carte géologique levée spécialement au 1 : 20 000.

Détermination de la position du voile au large pour l'étanchement éventuel de la retenue.

de tout temps, on s'est préoccupé d'emmagasiner de l'eau pour l'irrigation. Je me contente de rappeler l'effort accompli par les ingénieurs du temps de Trajan dans les rete-

BARRAGE DE CASTILLON SUR LE VERDON

GRAPHIQUES D'UN FORAGE

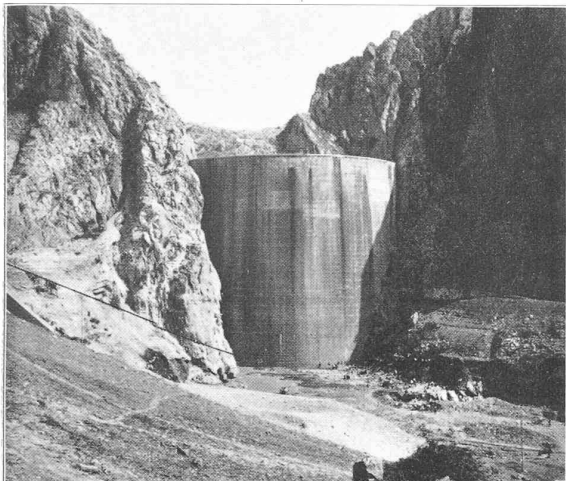


Barrage de Castillon. Graphique d'un forage exécuté par G. Rodio & C^{ie}.

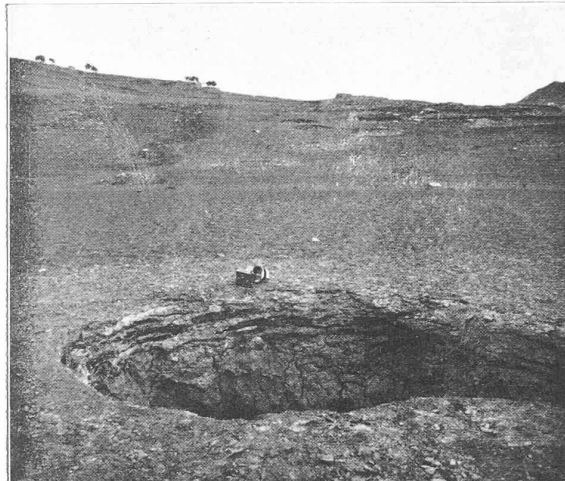
(D'après un dessin de la « Société hydro électrique du Verdon »).

nues de Mérida en Espagne, celle de Proserpine de 10 hectomètres cubes, soutenue par un barrage de 16 m de hauteur, construit en béton revêtu de granite, puis celle de Cornalvo, avec un mur de 18 m de hauteur et de 222 m de longueur, pour une retenue de 9 Hm³.

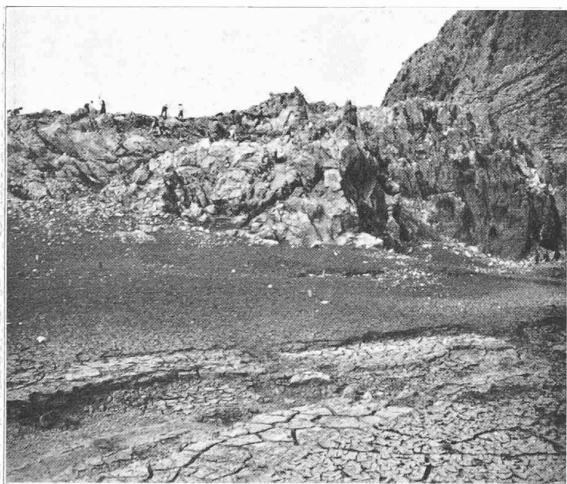
Puis, plus tard, les Arabes espagnols, avec leurs admirables barrages. Celui de Tibi, près d'Alicante, par exemple, construit de 1579 à 1634 sur le Rio Monegre, de la hauteur stupéfiante pour l'époque, de 42 m, hauteur qui ne fut surpassée qu'au XIX^e siècle, à Furens, en France.



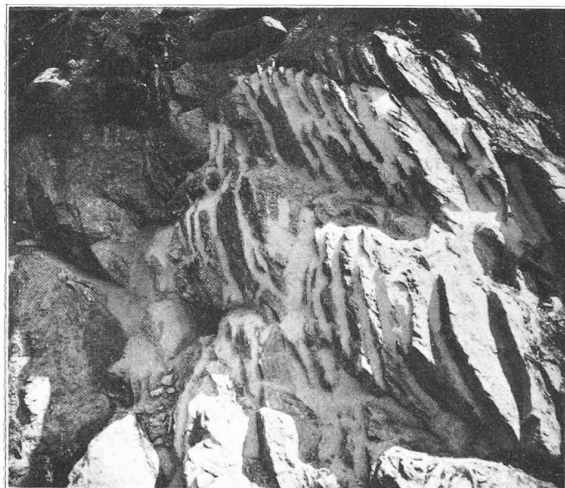
Barrage-voûte de Monte-Jaque. (Andalousie). Pas d'eau dans la retenue. A droite parois de calcaires jurassiques absorbants. (Cliché M. Lugeon.)



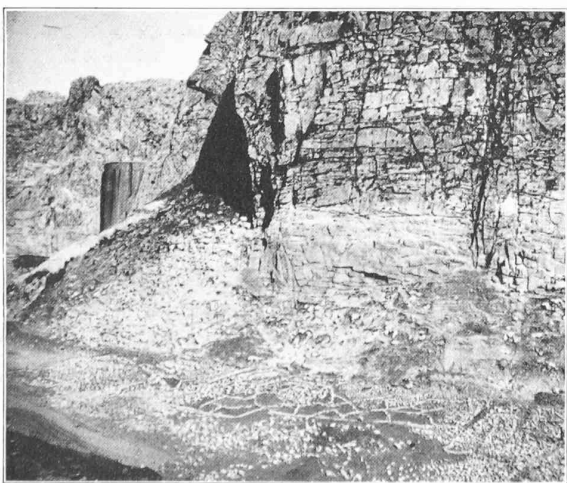
Retenue de Monte-Jaque. Ouverture soudaine sur le fond de la retenue après quelques jours de remplissage. La perte s'est fait jour à travers de l'argile recouvrant directement le calcaire fissuré. (Cliché M. Lugeon)



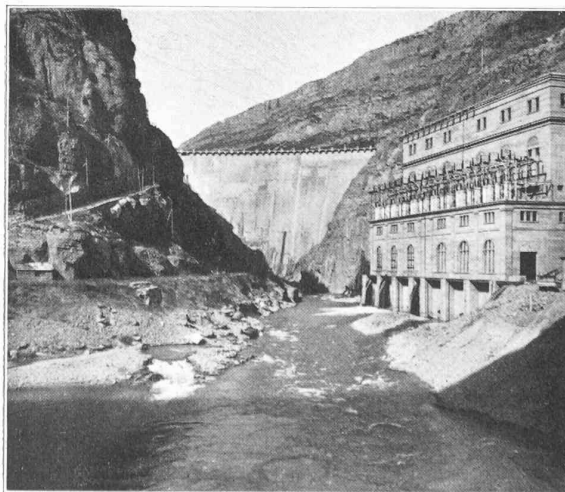
Retenue de Monte-Jaque. Calcaires jurassiques absorbants. Ouvriers occupés à obturer les fissures. (Cliché M. Lugeon.)



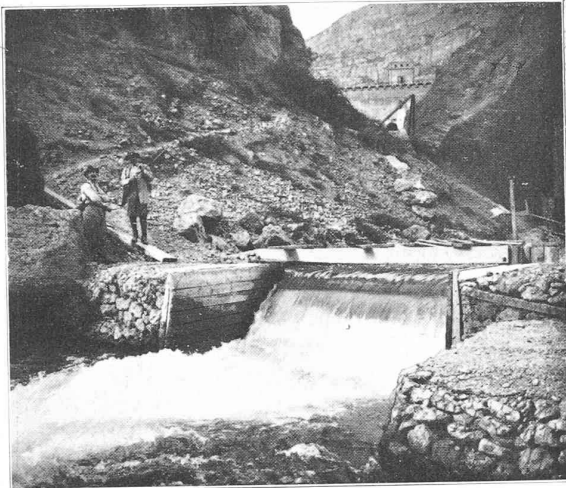
Retenue de Monte-Jaque. Jointoyage au mortier de fissures du calcaire. (Cliché M. Lugeon.)



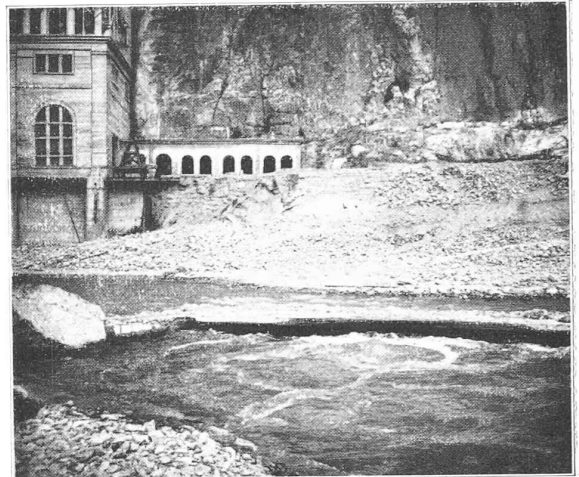
Retenue de Monte-Jaque. Corroyage du fond de la cuvette, décapage des parois pour le jointoyage au mortier des fissures. Au fond le barrage. (Cliché M. Lugeon.)



Barrage de Camarasa (Catalogne). A gauche entre des graviers, la grosse perte 2 A. (Cliché M. Lugeon.)



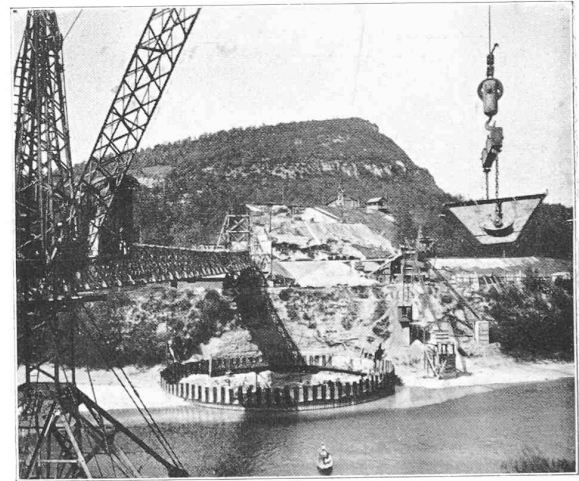
Barrage de Camarasa. La grosse perte 2 A. Au fond la crête du barrage. (Cliché M. Lugeon, 1927.)



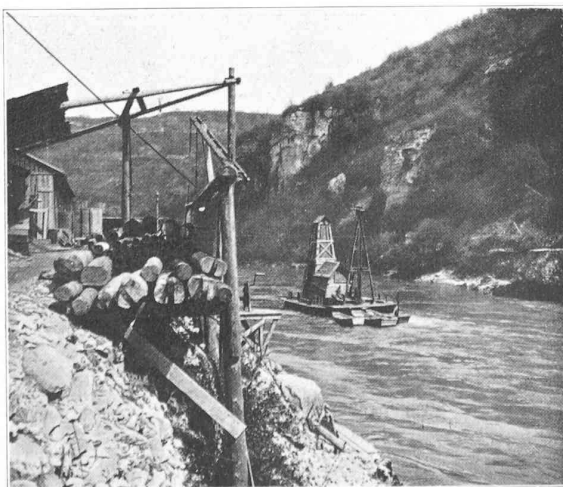
Barrage de Camarasa. En avant, encadrée, la grosse perte 2 A qui surgit en bouillonnant. A gauche, la centrale. (Cliché M. Lugeon, 1927.)



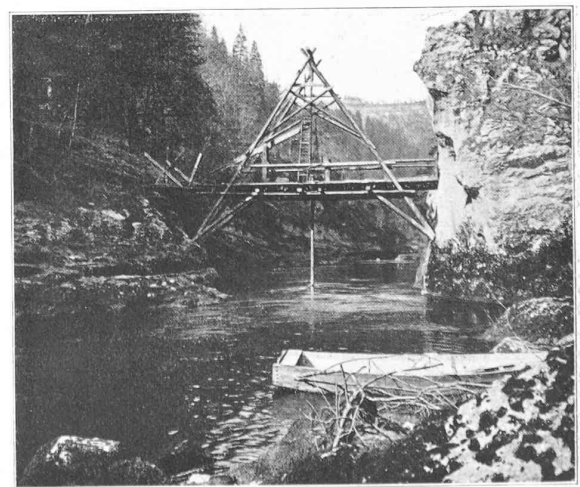
Barrage de Barberine. La cuvette de la future retenue. Au fond, au-dessus de l'alluvion, parois calcaires qui ont été noyées sans fuite. (Cliché M. Lugeon.)



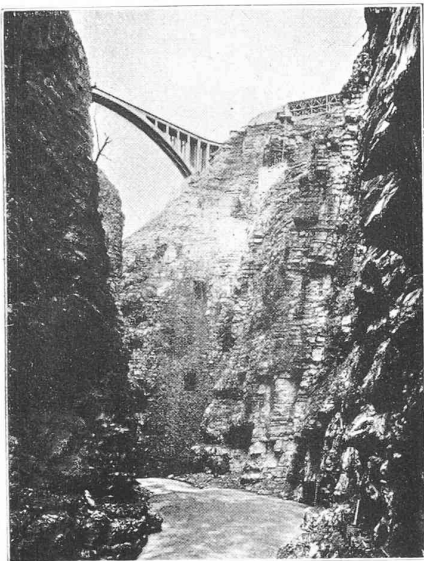
Barrage de Cize-Bolozon sur l'Ain (France). Enceinte circulaire de palplanches. La rive droite constituée par des graviers. (Cliché M. Lugeon.)



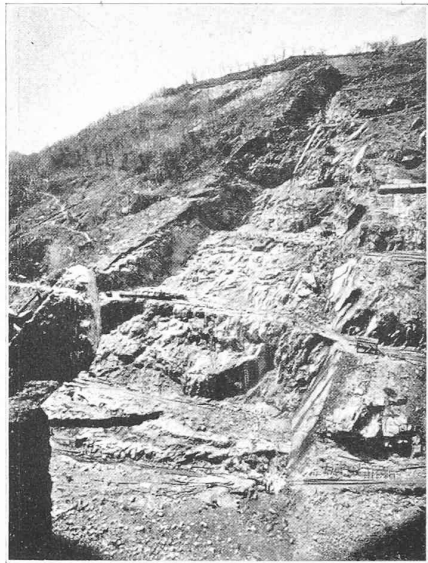
Barrage de Génissiat sur le Rhône. Installation pour les sondages aux rails en 1920. A gauche barragement pour le fonçage du puits et la galerie sous le Rhône. (Cliché M. Lugeon.)



Barrage de Chatclot sur le Doubs. Recherche par forage dans la rivière. (Cliché M. Lugeon.)



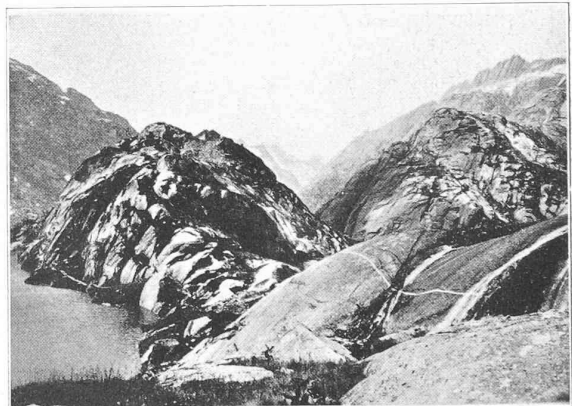
A gauche.
Barrage du Sautet, sur le Drac. La gorge qui sera barrée et le pont-route. A peu près en dessous de la culée du pont, deux carrés noirs. Ce sont, le long de l'appui, les plateformes pour les appareils de forage et d'injections exécutées par G. Rodio & C^{ie}. (Cliché de la «C^{ie} Bonne et Drac», à Grenoble.)



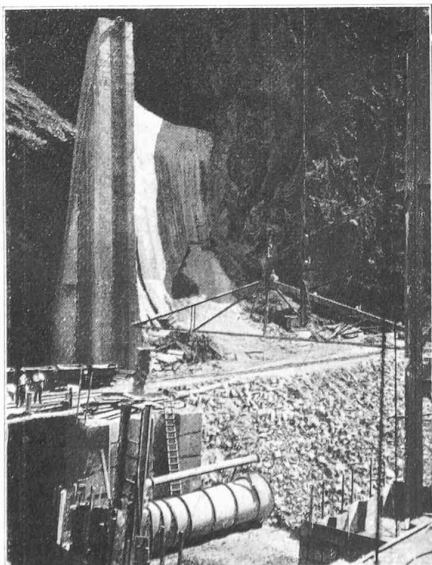
A droite.
Barrage de Sarrans (Truyère). Terrassements rive droite. Cassure très visible coupant la fouille, du fond à gauche vers la droite. Il s'agit d'une zone broyée fréquente dans les vieux granites. (Cliché «Société générale d'entreprises».)



Barrage de Pinet sur le Tarn. Les sas des caissons pendant une crue de 800 m³, le 21 décembre 1927. (Cliché «Energie électrique du Rouergue S. A.».)



Barrage de Seeuferegg (Oberhasli, Suisse). Verrou de granite sur lequel s'élèvera le barrage. Au milieu à gauche, la butte de la Nolle, au delà de laquelle est situé le barrage de la Spitalamm. (Cliché M. Lugeon.)



A gauche.
Barrage en voûte sur la Bromme (France). Joints dans le granite d'appui. L'étanchement par injection a été absolu. (Cliché «Société générale d'entreprises».)



A droite.
Barrage en voûtes multiples de Butgenbach (Belgique). Fouilles dans les phylades (schistes) dévoniennes, pour les contreforts et le parafouille. Auteur du travail : Ingénieur A. Omodeo à Milan. (Cliché «Sofina», Bruxelles.)

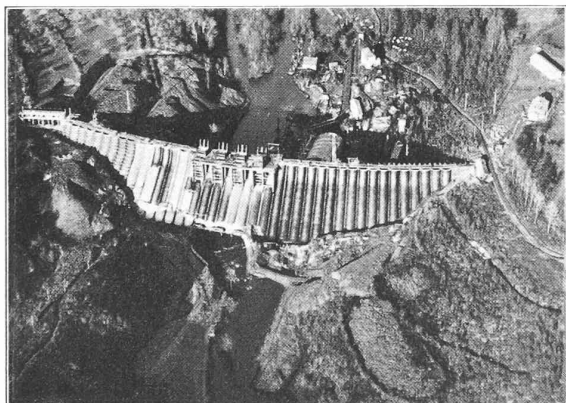
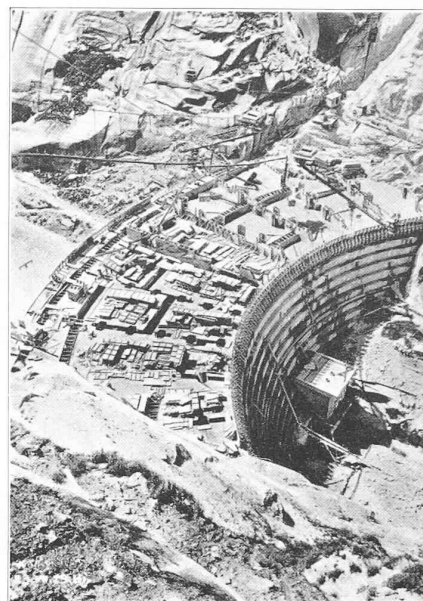


A droite.

Barrage de la Spittalamm (Grimsel), actuellement terminé (1932). Etat du chantier le 23 juillet 1929. (Cliché « Kraftwerke Oberhasli A. G. ».)

A gauche.

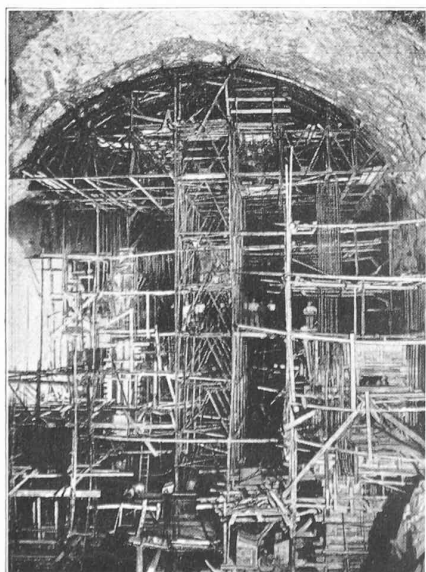
Barrage de la Spittalamm (Grimsel). Le parafouille et les tubes des injections de liaison. (Cliché « Kraftwerke Oberhasli A. G. ».)



Barrage en voûtes multiples en béton armé, à Vezins, sur la Sélune (Normandie). Société Pelnard-Considère & Caquot. Vue amont. (Cliché de la « Compagnie aérienne française » Société des forces motrices de la Sélune à Avranches.)



Les deux barrages de la Grimsel (Suisse). Pays de granite alpin. (Cliché « Kraftwerke Oberhasli A. G. ».)

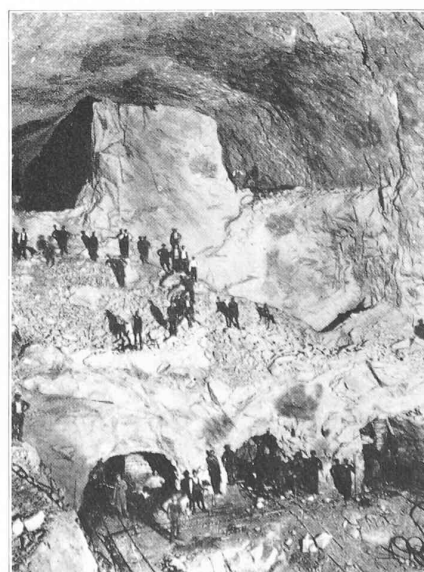


A gauche.

Aménagement de la Truyère (France). La centrale souterraine de Brommat, terminée en 1932. L'échafaudage pour le revêtement de la voûte et des planchers des alternateurs et des turbines. (Cliché « Société générale d'entreprises ».)

A droite.

Aménagement de la Truyère (France). La centrale souterraine de Brommat en excavation. La chambre rocheuse a une hauteur de 31,40 m, une largeur de 21,80 m et une longueur de 75,50 m. Malgré la belle tenue du granite on a préféré revêtir la voûte par une maçonnerie non armée de 0,80 au minimum soutenue par des piliers. (Cliché « Société générale d'entreprises ».)



Dans les temps actuels combien sont légions ces grands ouvrages construits pour les besoins de l'irrigation. Ainsi les barrages égyptiens d'Assouan et d'Esneh, celui du Tirso, en Sardaigne, œuvre de hardiesse, haut de 61 m, en voûtes multiples soutenant un lac de 378 hectomètres cubes qui peut arroser 30 000 hectares.

En Amérique du Nord, qui ne connaît pas les grandes ouvrages élevés par le « Reclamation Service », une cinquantaine de barrages dont plusieurs avoisinent, atteignent ou dépassent 100 mètres de hauteur.

Pour l'alimentation en eau potable, les hommes ont dressé dans les airs de magnifiques monuments.

En Belgique, le barrage de la Gileppe, si impressionnant par ses caractères massifs, construit de 1869 à 1878, haut de 47 m. En France, celui de Furens de 50 m de hauteur, bâti de 1861 à 1866, de Ternay, du Pas de Biot, etc. En Allemagne, ceux de Soligen, de Mauer, de l'Urft. En Angleterre, celui de Warnwy, bâti de 1881 à 1888, de 25 m de hauteur. Aux Etats-Unis, je me contenterai de rappeler les barrages de New-Crotton de 72 m de hauteur et enfin de Kensico haut de 94,5 m bâti pour l'alimentation de la grande capitale commerciale.

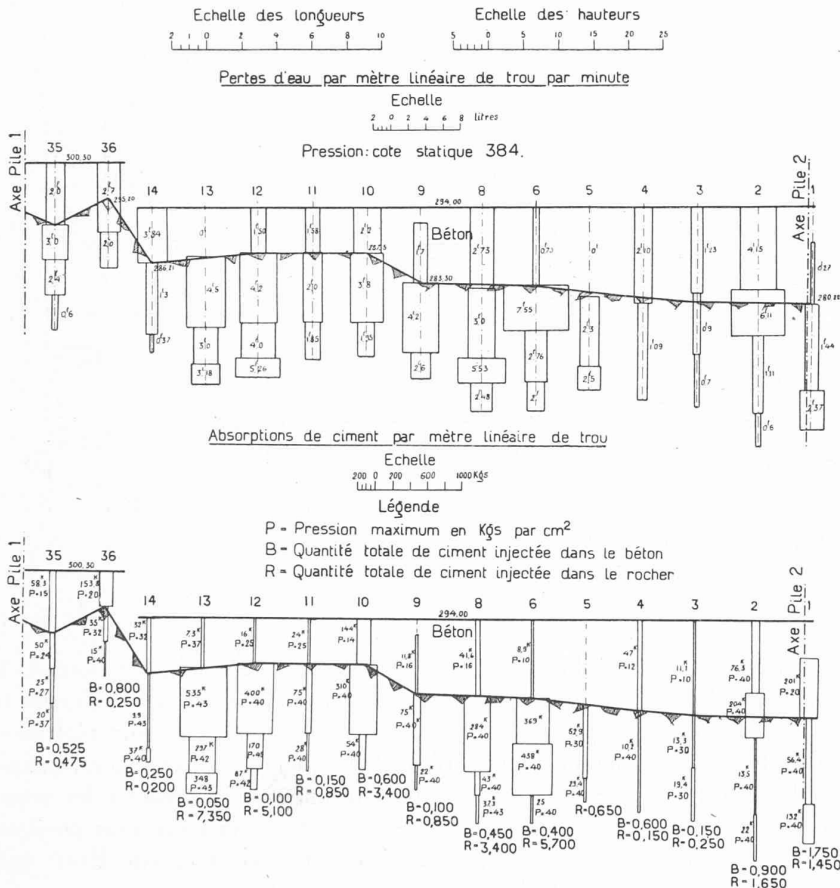
D'autres ouvrages furent élevés pour protéger des cités contre les inondations.

Pour la création de barrages pour la régularisation de canaux de navigation, c'est en France qu'il faut chercher les meilleurs exemples. Le plus ancien, en maçonnerie, celui de Lamy, bâti de 1777 à 1780 avec une hauteur d'eau de 16 m pour alimenter le canal du Midi, dû au génie de l'immortel Riquet, puis les barrages de Grosbois, du Setton, dans le Morvan, si hardi par ses fruits amont et aval.

Plus tard, vinrent de nouveaux besoins, vers la fin du XIX^e siècle; on commence alors à construire des barrages pour la création de lacs dont les eaux ne doivent être utilisées que pour la production de l'énergie électrique, et ces barrages-là deviennent aussi nombreux que les premiers.

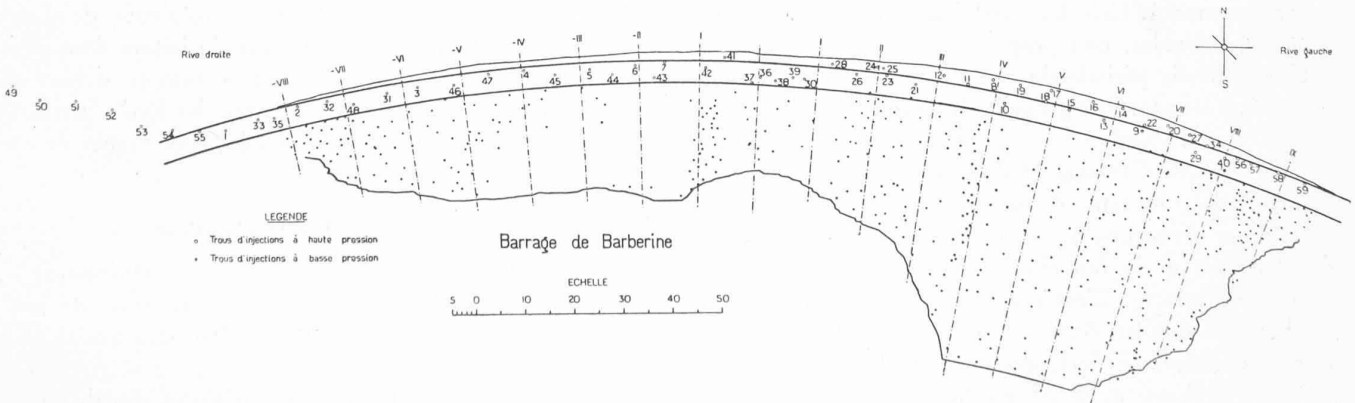
Barrage de Pinet

PROFIL EN LONG DANS L'AXE DES INJECTIONS



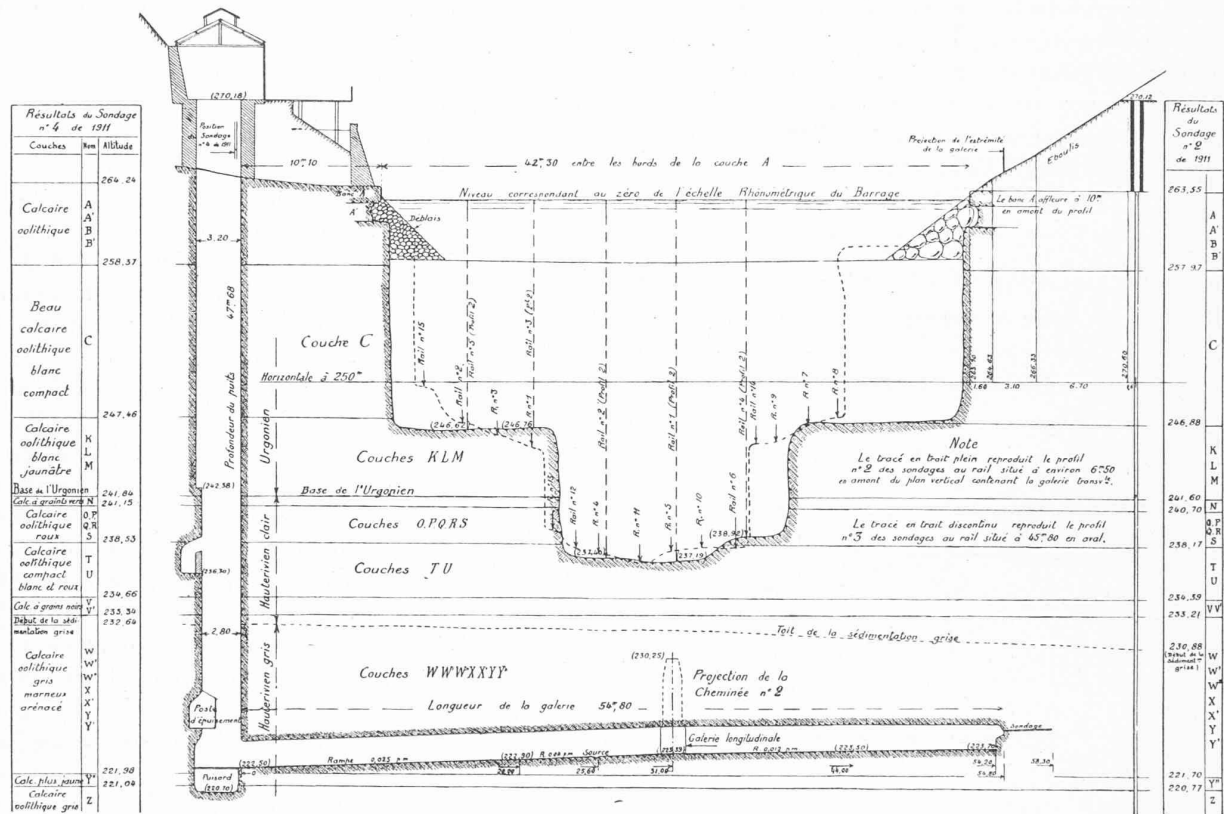
Barrage de Pinet, sur le Tarn. Représentation des pertes d'eau par forages et absorption par mètre linéaire de ciment.

(D'après le dessin original de « L'Energie électrique du Rouergue S. A. »)
Clichés extraits de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.



Barrage de Barberine. Plan des injections du voile normal et des injections de liaison.

(D'après le dessin original des Chemins de fer fédéraux.)



Barrage de Génissiat, sur le Rhône. Travaux d'exploration, puits et galeries transversales.

Cliché extrait de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.

Partout, sur toute la terre on bâtit et on continuera longtemps à bâtir encore de ces gigantesques murailles avec une hardiesse croissante. En France, au Sautet, s'élève actuellement un barrage de 135 m de hauteur, et j'ai vu défiler devant moi, ces temps derniers, des projets parfaitement exécutables de murs qui atteindraient 140 à 160 m. Un tel mur, élevé à Ouchy, cacherait la vue à la terrasse de la cathédrale de Lausanne.

On ne sait comment les anciens calculaient leurs ouvrages. Ils semblent s'être surtout préoccupés de ne pas trop surcharger le sol de fondation, afin d'éviter toute crainte de voir le bas du fruit aval servir de charnière au renversement. Cela les conduisit à des sections souvent considérables, non proportionnées aux efforts.

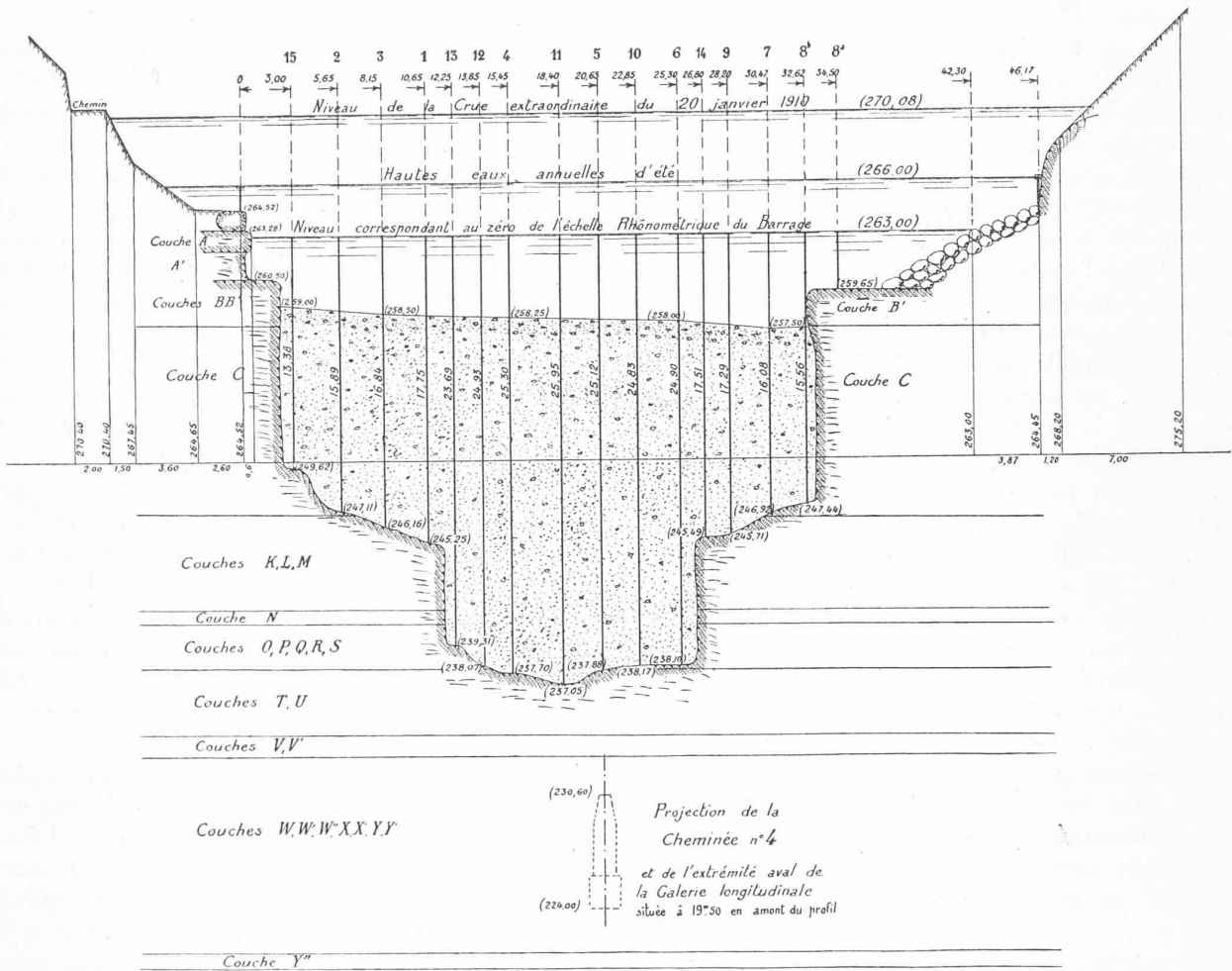
Une nouvelle période de construction débuta en 1855 et devait s'étendre jusqu'à celle du béton coulé. C'est en France tout d'abord, à la suite de tendance à la rupture des barrages de Grosbois et de Chazilly, construits pour l'alimentation du canal de Bourgogne, en 1830 et 1838, que l'on se préoccupe de formuler une théorie rationnelle des barrages et je rappellerai les noms des ingénieurs Sazilly et Delocre. C'est sur les principes formulés par ces hommes que fut élevé, de 1861 à 1866, le barrage de Furens (gouffre d'Enfer) près de Saint-Etienne, ouvrage qui, par sa hauteur de 55 m, fut longtemps considéré comme un exemple de hardiesse et servit de modèle aux ingénieurs américains.

Plus tard, à la suite de la catastrophe de Bouzey, le célèbre Académicien Maurice Lévy, sous le coup de ce désastre survenu en 1895, fit introduire une réglementation d'une sévérité telle qu'aujourd'hui encore, malgré l'emploi de matériaux inconnus alors, malgré les possibilités que l'on a de combattre la fameuse sous-pression, on reste un peu sous son influence. Puis vint Résal, également théoricien et je m'arrête car je ne puis pas ici vous faire cet historique de la théorie des barrages. Mais qu'il me soit permis de citer deux noms et de saluer ici deux hommes qui ont fait, ces tout derniers temps, accomplir de grands progrès qui honorent la science de notre pays, qui honorent cette Ecole d'ingénieurs de Lausanne. Ce sont : Bolomey, l'homme du béton, dont j'entends prononcer à chaque instant le nom en dehors de nos frontières, puis Stucky, l'homme des hauts barrages, dont les appels flatteurs, très au loin, sont dignes de son haut savoir.

Importance de l'étude géologique.

Malgré tous les savants calculs des mathématiciens, malgré tous les soins que l'on aime à croire avoir été pris, combien est-elle longue la liste des barrages qui se sont écroulés !

J'ai collationné cette série de malheurs afin de savoir d'où venait la faute et mon ami l'ingénieur-géologue A. Marin, mon collaborateur espagnol, membre de l'Aca-



Barrage de Génissiat, sur le Rhône. Sondages aux rails avec projection de la cheminée N° 4 de la galerie sous-fluviale.
Clichés extraits de « Barrages et Géologie », par M. Lugeon.

démie des sciences de Madrid, a tout dernièrement¹ fait la même recherche, avec grand détail, de sorte que c'est à lui que j'emprunte les renseignements.

Sur 23 barrages écroulés, 19 sont tombés à cause des fondations mauvaises, donc par faute géologique, et quatre seulement par défaut de calcul ou de construction. Et ces ruptures ont parfois causé des catastrophes effroyables.

Voici quelques exemples :

En mai 1889, le barrage de Johnstown, haut de 23 m, s'écroule : il était fondé sur du sable et gravier.

En 1888 et en 1889, le barrage de Bouzey, en France, construit en 1884, donne des signes de fatigue. On cherche à l'améliorer, mais des efforts d'extension dans le parement aval continuent à subsister auxquels il faut ajouter d'autres défauts de construction. En 1895, eut lieu la catastrophe, 86 morts et une ligne de chemin de fer détruite. La cause de la rupture a été longuement discutée, mais il paraît bien que ce sont les fondations qu'il

¹ Discurso leído en el acto su recepción por D. Agustin Marin y Bertran de Lis (y contestación del excmo. Señor D. Pedro de Novo y Fernandez-Chicarro, el Día 18 de noviembre de 1931). — Madrid, Academia de ciencias exactas, físicas y naturales.

COUPES A TRAVERS LA VALLEE DU DESSOUBRE

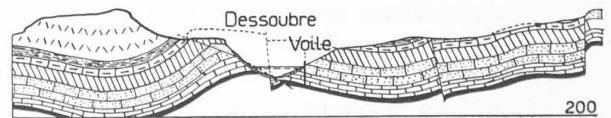
Echelle 500 0 500 1000m.

LEGENDE

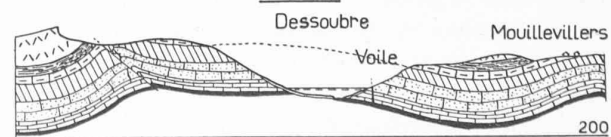
- Eboulis
- Astartien
- Rauracien
- Oxfordien
- Callovien
- Bathonien
- Vesulien
- Bajocien

■ Lias

COUPE 6



COUPE 7



Coups géologiques à travers la vallée du Dessoubre.

faut accuser. Deux catastrophes récentes ont impressionné l'humanité et chacun s'en souvient. Dans la nuit du 12 au 13 mars 1928, s'écroule le barrage de Saint-Francis,

en Californie. C'était un barrage-poids, admirablement construit. Il s'appuyait à gauche sur des mica-schistes argileux et à droite, sur des tufs volcaniques et des micaschistes. Entre ces deux terrains, il existait une faille bien marquée par un remplissage argileux. Tuf et argile se délitèrent, la sous-pressure devint croissante et telle fut la cause de l'effroyable vidange presque instantanée de 47 millions de m³ déterminant un courant de 30 km à l'heure. Il y eut 400 victimes.

On est certain que si les terrassements avaient été soigneusement exécutés rien ne serait survenu.

L'autre catastrophe est celle du Gleno, non loin de nous. C'était un barrage en voûtes multiples, d'une hauteur de 26 m. Le 1^{er} décembre 1923, il s'écroule. La retenue de 6 millions de m³ se vide en 16 minutes, ce qui donne un débit de 6000 m³-seconde, soit à peu près 20 000 m³ de débit initial. Certes, la construction était défectueuse, mais le manque d'adhérence au rocher glissant est pour beaucoup dans cette catastrophe qui coûta la vie à 600 habitants.

Dans des cas, sols perméables, dans d'autres insuffisance d'adhérence au rocher, mais il y a une troisième cause d'accident : glissement des roches d'appui sur elle-mêmes. Telle est la cause de l'effondrement d'un barrage sur l'Ohio, près de Gallipolis, le 8 août 1912. En 1926, dans le pays de Gall, le petit barrage de Dolgarrog se renverse. La cause est à rechercher dans des efforts non prévus dans le sol argileux déterminant un glissement. Soixante personnes furent noyées.

Une quatrième cause de destruction existe encore. Elle est due à la submersion d'ouvrages insuffisamment bâtis pour résister aux attaques des eaux des crues exceptionnelles. Le 6 octobre 1911, les barrages de Dells et de Hatfield dans le Wisconsin s'effondrent presque en même temps. Les parties détruites par les eaux étaient formées par les digues en terre prolongements du corps en maçonnerie. Vint la crue, les déversoirs se montrent insuffisants, les digues sont emportées alors que restent debout les sections en maçonnerie. Cet accident célèbre doit attirer l'attention sur la nécessité d'études très détaillées et calculs approfondis sur ces digues en terre, afin que leurs organes de défense soient bien en harmonie avec la nature du sol et le régime fluvial.

Un grand nombre de ces catastrophes ont eu comme théâtre l'Amérique du Nord. N'est-ce pas Degove¹ qui signale, dans la seule année de 1912, année trop pluvieuse, la rupture de 10 barrages ? Sept d'entre eux se sont rompus par suite d'affouillement ou de glissement et un par l'effet de la poussée des glaces, mais j'ai hâte d'ajouter qu'il s'agissait de très bas ouvrages dont la maçonnerie du plus haut ne dépassait pas 9,30 m.

En effet, par rapport à leur grand nombre, la rupture des hauts barrages, et je comprends dans leur nombre

¹ Degove. — Les grands barrages en maçonnerie aux États-Unis, Paris, 1922, Léon Eyrolles, Ed.

ceux qui dépassent 20 m de hauteur, est extrêmement rare. C'est que leurs constructeurs, devant la responsabilité qu'ils endossent, devant le souci que leur cause l'idée seule d'une rupture possible, prennent toutes les précautions.

Malgré cela, je connais un certain nombre de hauts barrages qui sont malades, soit par faute géologique, soit par vice dans le choix du matériau de construction. J'ai été appelé à m'occuper de quelques-uns d'entre eux et j'ai hâte de dire que les mesures ont été prises assez à temps pour prévenir tout dommage, car je ne voudrais pas, en rappelant ces méfaits, laisser dans l'esprit de ceux qui m'écoutent et qui ne sont pas spécialisés dans ce genre d'édifices, qu'il y a des dangers à courir en aval de ces hauts murs qui barrent les vallées.

Ce n'est pas parce qu'un pont s'écroule de temps en temps que vous n'osez plus passer sur un pont, ce n'est pas parce que de temps en temps un déraillement se produit que vous ne prenez plus de billet de chemin de fer. De même est-il pour les barrages et c'est justement en parlant des possibilités de catastrophes, en rappelant les désastres, que la technique prendra des précautions croissantes et croyez bien qu'elles sont prises, au plus près de la conscience des bâtisseurs.

Ces questions de sécurité préoccupent toujours le monde des ingénieurs et nous en voyons la preuve dans le programme de la Conférence mondiale de l'Énergie. Celle-ci a institué une Commission internationale des grands barrages qui se subdivise en commissions nationales. Parmi les questions qui doivent être traitées et qui doivent être soumises au congrès de 1933, nous lisons, en ce qui concerne les barrages-poids : Détérioration par vieillissement du béton de ces barrages puis questions relatives aux influences de la température interne et aux déformations.

En ce qui concerne les barrages en terre, il est mis à l'ordre du jour la question du choix du matériau et celle des lois physiques commandant l'infiltration de l'eau à travers le barrage et le sol sous-jacent.

Il est heureux que de telles questions soient mises à l'étude sur toute la surface de la terre, car les réponses doivent être données « quoiqu'il puisse coûter à l'amour-propre national ou à l'amour-propre individuel des constructeurs ».

Espérons que des documents qui seront fournis avec franchise il découlera un progrès dans l'art de construire ; cela ne me paraît pas douteux.

La méthode géologique dans les projets.

A. Les retenues.

Lorsqu'un projet de barrage est soumis à un géologue, il est évident qu'il doit se transporter sur place et il doit s'arranger pour avoir devant lui un temps indéterminé. Une fois les lieux examinés sommairement avec les ingénieurs, il est bon que le géologue seul, ou accompagné par un confrère, ce qui est toujours excellent, mais

en tout cas par un nombre aussi limité que possible de personnes, demeure sur place.

Si une carte géologique détaillée du territoire existe, l'enquête est souvent assez rapide et à ce propos on ne saurait assez rappeler le rôle pratique croissant que prennent les cartes géologiques pour celui qui sait les lire.

A défaut de carte géologique, le géologue doit alors dresser cette carte ou du moins parcourir le territoire en détail. S'il possède une carte topographique détaillée, le travail est également simplifié. Mais si, dans un pays neuf, rien n'existe comme documentation topographique et géologique, alors le travail peut parfois demander des semaines. Il me souvient d'avoir passé plusieurs semaines, aux Etats-Unis, pour la fixation de l'emplacement d'un grand barrage et pour l'étude de l'étanchéité de la retenue ; bien des semaines également dans l'Amérique du Sud, lors d'une étude de l'aménagement du Parana et du Rio Uruguay.

C'est que deux questions sont dominantes dès le début : étanchéité de la retenue et choix judicieux d'un emplacement pour le mur.

La question concernant l'étanchéité de la retenue est réglée assez rapidement. Si le futur réservoir doit s'étendre en entier sur les terrains granitiques, sur les terrains cristallins et sur tout terrain métamorphique, l'imperméabilité est assurée, et je ne connais pas d'exemple qui fasse exception.

Les seules roches redoutables, à travers lesquelles puissent se faire des fuites importantes dépassant même le débit d'alimentation du réservoir, sont les calcaires, les grès et les conglomérats ou sables plus ou moins cimentés, et parfois le gypse.

Voici quelques exemples :

Il existe près de Castillon-de-la-Plana, en Espagne, un superbe barrage admirablement bâti, haut d'une trentaine de mètres. C'est le fameux barrage de Maria-Cristina. Je l'ai vu bien souvent.

Sa vaste retenue, qui devait contenir 28 000 000 m³, n'a, je crois, été remplie qu'une seule fois, durant quelques heures. D'habitude, on ne constate qu'une hauteur d'eau d'une dizaine de mètres derrière l'ouvrage, soit environ 4 millions de m³.

Il est vrai que l'alimentation du réservoir paraît faire défaut mais, serait-elle normale, le lac ne saurait être rempli dans son état actuel.

C'est que sur le versant gauche de la retenue existe, à travers des calcaires crétacés, des fissures très absorbantes que l'on a déjà cherché à aveugler. Il y en a d'autres sous le barrage lui-même. Il m'a été dit, qu'au moment de hautes eaux, des sources très lointaines augmentaient de débit. Je n'ai jamais pu vérifier le fait, mais il n'y a là rien d'impossible.

En Espagne encore, en Andalousie, s'élève un fier et magnifique barrage en voûtes qui est, je crois, avec ses 72 m le plus haut de ce type en Europe. C'est le barrage de Monte-Jacque, construit par H. E. Gruner. Jamais la retenue n'a pu être remplie et presque toujours on peut

marcher à sec dans le bassin jusqu'au pied de la grande muraille. Il est juste de dire que l'ingénieur-conseil n'a aucune responsabilité ; seuls des géologues furent fautifs.

Ici encore, les pertes se font à travers du calcaire jurassique qui s'étend sur plusieurs centaines de mètres sur la rive droite, dès le barrage, en amont et de même en aval. Les eaux fuient en profondeur vers une vallée plus basse que celle de la retenue.

En France, le petit barrage de Saint-Guilhem-le-Désert, sur l'Hérault, bâti sur un seuil de calcaire jurassique encore, ne retient pas une goutte d'eau. Tout passe sous l'ouvrage.

En Italie, non loin de Domodossola, j'ai examiné la retenue de l'Alpe de Cavalli, barrée par un bel ouvrage en enrochement. A travers des bancs de cipollin, sorte de marbre, intercalé dans des schistes cristallins, se font des pertes considérables qui viennent ruisseler très en aval du barrage. Les eaux de ces pertes sont repompées dans la retenue.

En Espagne, existe le célèbre barrage de Camarasa, haut de cent mètres et qui fut pendant plusieurs années le barrage-poids le plus haut d'Europe. En l'élevant, des sources situées en aval grossirent, puis de nouvelles apparurent, de sorte que lorsque le lac fut plein, il en sortait, par des pertes, le débit impressionnant de 11 m³-seconde environ. Là encore il faut accuser un calcaire caverneux et fissuré appartenant au Jurassique moyen qui s'étend sur plus de quatre kilomètres dès le barrage. C'est cette roche qui est coupable et je reviendrai, tout à l'heure sur cet exemple typique.

En Espagne encore, existe, en Catalogne, non loin du précédent ouvrage, un barrage bâti sur le grès. C'est le barrage-gravité de Tremp. Lors de la mise en eau, de grosses résurgences débitant plus de 2 m³-seconde, apparurent au pied ou dans le voisinage du mur.

Voilà quelques exemples qui montrent combien il faut se méfier du calcaire et éventuellement de certains grès.

Ce qui fait que le calcaire est une roche redoutable vient de ce qu'il est souvent sillonné de cassures plus ou moins béantes, soit des failles ou des diaclases. L'eau qui a d'abord pénétré timidement dans ces fissures les a élargies par dissolution et il peut se former tout un réseau de grottes, par lequel toute l'eau de surface peut s'enfuir.

Nous nous sommes jadis livrés, avec la collaboration d'un de mes élèves¹, à une étude des surfaces des Alpes suisses qui ne possèdent que des écoulements souterrains, c'est-à-dire des surfaces dont l'eau du bassin versant se rend dans une région déprimée du sol et y disparaît parfois par l'intermédiaire d'un petit lac.

Presque sans exception ces bassins fermés grands ou petits se vidangent à travers du calcaire.

En totalité, pour les Alpes suisses, en nous basant sur l'atlas topographique seul, il y a une surface de 444 km² à

¹ Maurice Lugeon et Elisabeth Jérémine. — Les bassins fermés des Alpes suisses (Bull. Lab. de géologie, Université de Lausanne, N° 17, 1911).

Id. — La carte des Bassins fermés des Alpes suisses (N° 19, 1913).

écoulement souterrain donnant lieu à 272 bassins fermés. Bon nombre d'entre eux constituent de charmants lacs à haute altitude qui sembleraient pouvoir servir de bassins d'accumulation. Mais bien téméraire serait, pour presque tous les cas, l'exécution de pareils projets.

Est-ce à dire que la présence du calcaire doit rendre prohibitive toute idée d'établir une retenue où existe cette roche? Non, il ne faut pas généraliser.

Voici quelques exceptions possibles.

Si des bandes calcaires en couches plus ou moins redressées traversent la retenue future et sont encadrées par des terrains imperméables (roches marneuses ou autres) et le tout s'éloignant indéfiniment dans des régions d'altitude supérieure à celle de la retenue, sans existence de vallée proche ou lointaine, il n'y a pas de danger. Il n'y en a pas non plus *si des vallées voisines ont un thalweg d'altitude supérieure à celui de la retenue.*

L'eau qui pourra pénétrer dans les réseaux de fissures, même de grottes, y restera emprisonnée. Du reste, dans ce cas, les grottes se vidangent toutes dans la direction de la future retenue. Ainsi pour la retenue de Camarasa en Espagne, qui est côtoyée par de vastes territoires calcaires, il semble bien que lorsque se fait la baisse de niveau par l'exploitation, il se rend au lac une quantité d'eau légèrement supérieure à celle de l'affluent. Ce serait la vidange des grottes.

Ce n'est donc que lorsque le calcaire possède une possibilité de se vidanger au large de la retenue, ou en aval d'elle, dans sa propre vallée, par continuité des couches dans ces deux directions, qu'il peut y avoir péril. Un géologue qui connaîtra à fond la région, même jusqu'à des distances lointaines, pourra donc se prononcer. Mais, s'il y a doute, il devra, ou conseiller l'abandon du projet ou exiger des travaux de recherches et des expériences qui démontreront l'imperméabilité.

* * *

J'ai étudié un projet d'aménagement du Dessoubre, affluent du Doubs, dans le Jura français. Toute la région est calcaire, mais sous ces roches redoutables existe un niveau absolument imperméable constitué par des marnes liasiques.

Il a été exécuté une série de sondages au diamant au voisinage de l'ouvrage projeté, montrant que les roches d'appui présentaient une perméabilité, mais non excessive. Il était alors nécessaire de connaître les cotes du niveau rocheux imperméable et examiner si on ne pourrait pas aveugler les pertes éventuelles, à travers le calcaire, par un voile d'injection au ciment.

Avec l'aide d'un de mes adjoints, M. A. Bersier, nous avons levé une carte géologique détaillée et exécuté des coupes géologiques en série qui déterminaient, sur leur tracé, les cotes du Lias imperméable en profondeur. Avec ces points ainsi obtenus, il a été exécuté une carte hypsométrique de la surface liasique.

Une fois cette carte construite, elle permet de voir immédiatement quelles sont les directions possibles des fuites, lesquelles pourront se faire partout où le Lias imperméable est au-dessous du niveau de la retenue projetée.

Dans le cas particulier l'existence d'une grosse source sur rive droite montre jusqu'où peut aller, le long de ce versant, la zone éventuellement perméable. Il y a donc à prévoir un voile imperméable par injections d'une longueur maximale de 1000 m, voile qui serait exécuté en se plaçant le long du versant, sur une ligne de niveau un peu supérieure au niveau de la retenue. Les forages et les injections descendraient jusque sur la surface du Lias.

Sur rive gauche, le voile serait beaucoup plus court, car la carte hypsométrique montre une rapide remontée des marnes liasiques.

Tout ce travail, barrage compris, revient à exécuter une sorte de caisse étanche dont le fond est le Lias, alors que le voile d'injection et le barrage forment les parois.

La retenue de la Barberine noie des calcaires dans sa région supérieure. L'étude géologique détaillée avait montré que l'eau qui pourrait y pénétrer, et il en pénètre fort probablement, ne pouvait, par emprisonnement ou perte de charge, se vidanger vers le nord ou vers l'est où cependant existent des territoires d'altitude inférieure à la retenue. De fait le lac est rigoureusement étanche.

Il ne faut donc pas généraliser pour les calcaires et il en sera de même pour les grès siliceux, de même pour les conglomérats très cimentés, qui souvent sont parcourus par des diaclases béantes par le fait que leur élasticité est de l'ordre de celle du calcaire massif; il peuvent se rompre comme ces derniers sous les sollicitations des forces orogéniques.

La présence de gypse dans l'intérieur de la retenue, à une assez grande distance du barrage, ne saurait soulever de craintes car à faible profondeur le gypse se transforme en anhydrite rigoureusement étanche. Il y aura peut-être légère absorption d'eau, mais sans intérêt pour le débit affluent.

Ainsi dans les mines de Bex, dans les Alpes vaudoises, dont les galeries traversent de l'anhydrite sur des kilomètres de longueur, sous un pays de gypse, on ne rencontre aucune source dans l'anhydrite elle-même.

En ce qui concerne les sables, ou les grès à peine cimentés, de même pour les graviers faiblement consistants, les pertes possibles ne sont pas dépendantes des fissures plus ou moins baillantes, mais des interstices. L'élévation d'une retenue qui noiera de tels matériaux peut toujours donner lieu à des pertes. On connaît l'exemple de la retenue de Montsalvens dans le canton de Fribourg. Des pertes importantes se produisirent lorsque la retenue atteignit des graviers du haut du versant de la rive gauche. Il fut porté heureusement remède par la construction d'un corroyage mais cet exemple ne doit pas être oublié.

Ici se présente la question des vallées épigénétiques.

J'ai jadis attiré l'attention sur leur fréquence dans les Alpes¹, et on l'a vu plus tard dans tous les pays ayant subi des invasions glaciaires et de grands alluvionnements, d'anciennes vallées plus ou moins voisines, plus ou moins parallèles aux actuelles, entièrement comblées par cet alluvionnement.

Le cours d'eau surélevé sur lui-même a cherché un nouveau chemin. Il coule alors dans ce que nous appelons une vallée épigénétique. Si l'ancien thalweg est rempli par des matériaux imperméables, tout se passe comme si le vase était absolument étanche mais si le remplissage est fait par des matériaux perméables, alors il peut y avoir danger. A Montsalvens (Jogne) justement l'eau trouva un chemin sur le tracé d'un antique thalweg latéral.

Mais, en général, la perte de charge de l'eau qui circule à travers des graviers ou des sables est si grande qu'il n'y a rien à craindre, surtout si la pression statique est faible. Il y aura cheminement de l'eau dans ces matériaux poreux, mais avec une telle lenteur, celle bien connue des nappes aquifères, qu'il n'y aura aucun danger. Ainsi, par exemple, les retenues de Pougny-Chancy sur le Rhône, de Cize-Bolozon, sur l'Ain, en France, d'Oltengösgen et d'autres le long du Rhin s'appuient, sur des centaines de mètres, sur des graviers et des sables. Il n'y eut aucune perte.

Les cours d'eau peuvent avoir été également déplacés de leur tracé originel par des écroulements d'un des versants, ce qui amène en général une grande modification dans le profil longitudinal fortement surélevé à la traversée de la masse écroulée. En amont, par colmatage, s'est souvent formée une plaine, ou même subsiste-t-il un petit lac. Seuil surélevé, petite plaine ou lac, cela attire l'ingénieur qui pense à surélever le seuil et établir une retenue. Mais la masse écroulée qui domine le thalweg n'est pas colmatée et il est alors inutile de songer à une retenue dont toute l'eau s'infiltrerait à travers la masse poreuse de l'écroulement. Je citerai à ce propos la petite plaine de Schlappinboden près de Klosters (Grisons). Au lieu d'un bassin saisonnier que l'on espérait y créer par un barrage haut de 30 à 40 m, on a dû se contenter d'un bassin journalier.

Il y a encore la question des confluences qu'il ne faut jamais négliger. Autant que possible, un barrage doit être éloigné de l'amont d'une confluence. Une fois la retenue remplie, si l'angle rocheux de la confluence est trop étroit, et d'une imperméabilité douteuse, il peut y avoir des fuites qui apparaîtront dans la vallée affluente. Ainsi le célèbre barrage de Camarasa en Catalogne, à côté du danger qu'offrirait la roche d'appui de la retenue, dans la région aval, ainsi qu'il en sera parlé plus loin, est certainement trop rapproché du confluent de la vallée de la Noguera d'avec celle du Segré.

De semblables craintes peuvent exister si on barre une boucle d'un méandre.

Voilà ce qui concerne les retenues.

B. Les barrages.

Mais ces roches pernicieuses sont particulièrement à examiner au voisinage même du barrage.

Et ici encore il ne faut pas généraliser. On possède des barrages assis sur le calcaire et épaulés par cette roche et au voisinage aucune perte ; en tout cas aucune d'intérêt pratique n'existe.

Nous avons deux bons exemples en Suisse, soit le barrage de la Jogne qui s'appuie sur du calcaire jurassique, soit le barrage de Schräh, dans le Wägital, qui est épaulé par des calcaires crétaciques. En France, le petit barrage du moulin Bertrand, sur l'Hérault, ne laisse passer qu'une fuite insignifiante. Il s'appuie sur du calcaire jurassique pourtant vacuolaire.

En France, on construit actuellement trois hauts barrages sur du calcaire, celui du Sautet sur le Drac, haut de 137 m, puis ceux de Castillon et de la Chaudanne, sur le Verdon, tous trois du type voûte. Les expertises géologiques ont été favorables mais nous verrons plus loin les précautions qui sont actuellement prises pour aveugler les pertes possibles.

De ce que je connais, on peut dire que les barrages peuvent être épaulés par le calcaire avec assurance si la roche se présente avec une stratification verticale, transversale à la vallée, ou fortement plongeante vers l'amont. Cette stratification doit être bien régulière, sans trace de cassure, sans indication d'une mylonitisation.

Par contre, pour tout barrage qui repose et s'appuie sur du calcaire horizontal ou incliné vers l'aval, ou sur des calcaires plissés, ce qui amène toujours des cassures, on doit compter sur des pertes plus ou moins importantes sous l'ouvrage ou dans les épaulements rocheux. Ici des travaux d'étanchement devront être pratiqués avec grand soin et nous verrons plus loin les précautions à prendre.

Il doit en être de même pour les grès massifs fortement cimentés.

En ce qui concerne les barrages qui sont épaulés par des graviers ou des sables plus ou moins cimentés, on ne saurait tolérer que des ouvrages bas, n'excèdent pas une vingtaine de mètres de hauteur d'eau en arrière d'eux. La filtration à travers les masses d'appui devra être arrêtée par une augmentation de la perte de charge. C'est-à-dire que l'on devra forcer l'eau qui cherche à contourner l'ouvrage à parcourir un chemin plus ou moins long selon la perméabilité des graviers.

On possède à ce propos une série d'expériences et de formules, mais lorsque l'on peut les appliquer en pleine nature, les hésitations commencent et je crois que seules les expériences vécues, à la vraie échelle, doivent servir d'exemples.

Voici deux cas :

¹ Maurice Lugeon. — Sur la fréquence dans les Alpes des gorges épigénétiques et sur l'existence de barres calcaires de quelques vallées suisses (Bull. Lab. de géologie, Université de Lausanne, N° 2, 1901).

Les barrages de Pougny-Chancy sur le Rhône et de Cize-Bolozon sur l'Ain retiennent une hauteur d'eau de 10 m et 18 m.

Les graviers d'appui sont fluvio-glaciaires, sans ciment, à peine un peu argileux par place. On y voit des traces de passage d'eau qui rubéfient localement la masse.

Les ingénieurs et moi-même avons estimé que les

pertes de charge devaient être de $\frac{1}{8}$. On a en conséquence construit pour l'un un diaphragme, pénétrant dans le versant, en béton, s'appuyant sur la molasse, dont la longueur était proportionnée à cette perte de charge. A Cize on a préféré un mur de masque le long du rivage, ce qui revient au même. A la mise en eau aucune trace de suintement ne fut remarquée à l'aval de ces barrages.

CHRONIQUE

Association amicale des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne.

Au Saint-Barthélemy et aux usines de Roche.

C'est une bien belle course que firent, le samedi 3 septembre, de très nombreux membres de l'A³. E.² I. L. — septante-cinq — aux chantiers du Saint-Barthélemy d'abord, aux usines de Roche ensuite.

Un temps admirable, toutes les splendeurs de l'été avec déjà, un peu du charme de l'automne, un programme solide où la part de la technique ne faisait point oublier celle de la balade touristique, des hôtes aimables, des soifs ardentes... et de quoi lutter contre elles avec discrétion certes, mais avec une savoureuse efficacité...

L'express qui quitte Lausanne à 7 h. 15 s'arrêta spécialement pour nous à Saint-Maurice où des autocars nous attendaient. Une demi-heure suffit pour grimper jusqu'à Mex, en utilisant la nouvelle route, fort pittoresque, récemment construite pour les besoins des travaux du Saint-Barthélemy, infime filet d'eau aux terribles colères. L'entreprise — MM. Couchepin, Dubuis & C^{ie} — avait préparé d'audacieux petits trains qui transportèrent les visiteurs sur place. Là, M. Victor Amaudruz, ingénieur en chef du 1^{er} arrondissement des C. F. F., donna de succinctes et claires explications que compléta M. Schaltegger, ingénieur des C. F. F., surveillant des travaux¹.

MM. W. Ruttimann, un des constructeurs de Barberine, spécialiste des travaux en montagne, qui collabore à la direction de ceux du Saint-Barthélemy, ainsi que M. Jambé, chef du bureau d'étude du 1^{er} arrondissement des C. F. F., renseignèrent aussi, d'intéressante façon, leurs nombreux collègues.

Des huit barrages prévus dans le projet primitif — total des devis : 4 millions — l'un, le 3, est entièrement terminé. Il est long de 115 m et sa plus grande hauteur est de 28 m. Il est fondé sur une nervure de granite descendant des Aiguilles Rouges. Il a 14 200 m³. On a évité la poussée horizontale, due à l'eau, par un drainage et des barbacanes.

A 175 m en amont du barrage 3 se construit actuellement le barrage 5, dont la fondation, la différence de cote étant de 16 m environ, sera protégée par le couronnement du barrage 3. Il est fondé sur une moraine de qualité très diverse. Afin d'égaliser les charges, on a dû prévoir une vaste dalle en béton. Celui-ci est fabriqué par une installation en gradins, comprenant gros concasseur, chemise de triage, moulin à sable, silos et bétonneuse, érigée à l'abri des avalanches. On sait que ces dernières ont causé parfois de sérieux dégâts sur les chantiers, à cause de

leur marche imprévue. Le grès utilisé, non gélif et très dur, fort analogue à celui de Massongex, forme un matériau excellent. Les résultats granulométriques sont bons.

On espère que les deux barrages permettront de mater sinon complètement, du moins très sérieusement, le turbulent et dangereux torrent. Pour l'instant, étant donné la crise et le manque de crédit, on s'en tiendra là. On attendra le cours des événements, avant d'aller (peut-être), plus loin. Souhaitons que les économies qu'on compte ainsi réaliser en seront de véritables.

Pour compléter ces indications rapides, soulignons que les installations exécutées sont placées de telle manière qu'on puisse, le cas échéant, construire grâce à elles les six autres barrages primitivement prévus. Sage prudence !

Les dépenses sont supportées pour la plus grande partie par les C. F. F. et par la Confédération. L'Etat du Valais, moyennant certaines conditions qui ont été consenties — construction de la route de Mex notamment — subventionne les travaux pour le 6 %. Les parts de l'Etat de Vaud et de la Commune de Lausanne sont respectivement de 2 et de 4 %.

Après un apéritif pris sur place à Montesano, et admirablement préparé par les soins de l'entreprise, on dîna en plein air, à Mex, sur l'esplanade de l'hôtel Bellevue. Pour supporter la blancheur des nappes, des lunettes à neige n'eussent pas été superflues.

Les ingénieurs — c'est une justice à leur rendre — ne prononcèrent guère de discours. Cependant, au dessert, pour accompagner le vin d'honneur offert par le consortium directeur des travaux, M. Robert Wild, président de l'A³, remercia les constructeurs et les entrepreneurs pour leur aimable accueil, puis M. Couchepin souhaita à chacun une cordiale bienvenue.

Par autocars, on redescendit dans la plaine et l'on gagna Roche sans encombre.

Sous la conduite aimable et compétente de M. Wiswald, directeur, on visita les nouvelles et très modernes installations de la Société des chaux et ciments de la Suisse romande, la carrière exploitée à merveille, les téléphériques, les fours, l'atelier d'ensachage, etc.¹

A la fin de l'après-midi, grâce aux camions de l'usine, on se rendit à Villeneuve où, au bord d'un lac de vacances et de rêves, on fit le plus grand honneur à une collation solide, liquide et substantielle, offerte par la direction des usines de Roche.

Et tout au long du jour, outre la joie d'apprendre et celle de se balader des Alpes à la plaine et de la plaine au lac, on savoura le plaisir doucement humain de se retrouver entre collègues et camarades...

JEAN PEITREQUIN

¹ Voir *Bulletin technique* du 4 et du 18 mai 1929, la description du Saint-Barthélemy, de ses coulées et du projet de correction adopté par les C. F. F. — *Réd.*

¹ Une description de cette usine a paru dans le *Bulletin technique* du 25 août 1915. — *Réd.*