L’aménagement hydro-électrique de la Gougra: le barrage de Moiry

Autor(en): **Stucky, J.-P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **80 (1962)**

Heft 20

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-66155

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P.

L'aménagement hydro-électrique de la Gougra

DK 627.825.7

Les barrages de Moiry et de Tourtemagne — A. Le barrage de Moiry

Suite de la page 296

par **J.-P. Stucky**, Ingénieur-Conseil, collaborateur au Bureau d'Ingénieurs A. Stucky, Lausanne

I. Description générale du barrage et des ouvrages annexes

Le barrage-voûte de Moiry, sur la Gougra, permet de créer un lac d'une capacité de 77 millions de m³. La construction et le montage des installations de chantier ont commencé au printemps 1954, les travaux d'excavation en automne 1954. Le bétonnage s'est fait en deux campagnes principales, celles de 1956 (265 000 m³) et de 1957 (536 000 m³). Les trois derniers mètres, ainsi que la dalle du couronnement, ont été mis en place au printemps 1958. Le volume total du béton est de 814 500 m³.

Le barrage. Le barrage de Moiry se trouve environ 5 km en amont et au sud de Grimentz. Il repose sur un ensemble de roches métamorphiques, plongeant vers l'amont, que l'on désigne sous l'expression collective de schistes de Casanna. Il est du type voûte; un mur d'aile, au profil de barrage-poids, le prolonge sur l'éperon rocheux de la rive droite. La longueur du couronnement (voûte et mur d'aile) atteint 600 m (Fig. 1). Le niveau maximum de la retenue, correspondant à un volume utile du lac de 77 millions de m³, est 2249,0, le niveau minimum utile est 2150,0. Une revanche de 1,0 m étant prévue, le barrage est arasé au niveau 2250,0. Le niveau le plus bas du rocher excavé est 2102,0, de sorte que la hauteur maximum du barrage est de 148,0 m sur fondations (Fig. 2).

La voûte proprement dite, d'environ 400 m de longueur développée au sommet, est d'épaisseur et de rayon variables en fonction de la hauteur. A la clé, l'épaisseur est de 5,5 m au couronnement, de 7,0 m au niveau 2247 et de 15 m à une profondeur de 23 m sous le niveau de la retenue; elle atteint 34 m au niveau des fondations. Les courbes de niveau du parement amont sont des paraboles dont les axes sont dans le plan axial du barrage. Dans la partie centrale, les courbes de niveau du parement aval sont également des paraboles dont les axes et les centres de courbure aux sommets sont confondues avec ceux du parement amont. Cette disposition en paraboles a été choisie pour que la forme des arcs horizontaux s'adapte le mieux possible aux funiculaires des poussées effectives dues à la pression hydrostatique et résultant de l'ajustement des déformations des murs et des arcs. Au voisinage des naissances des arcs, le barrage est épaissi à l'aval, de manière à augmenter les surfaces d'appui sur le rocher et diminuer ainsi les contraintes de contact. Le mur d'aile, d'une longueur de 200 m, est disposé dans le prolongement de la voûte, pour en assurer la butée, dans la mesure où la poussée des arcs ne plonge pas directement dans l'épaulement de la rive droite.

Pour que le retrait consécutif à la prise du ciment et au refroidissement du béton puisse se produire librement, le barrage a été découpé en plots jointifs de 16 m de largeur moyenne. Les joints, plans dans leurs parties inférieure et supérieure, sont gauches dans leur partie centrale. Ils ont été injectés de ciment, après réfrigération du béton par circulation d'eau dans des canalisations noyées dans la masse. Au-dessus de la cote 2220,0, l'épaisseur plus faible du barrage a permis un refroidissement naturel suffisant du béton, de sorte que l'on a pu renoncer à la réfrigération artificielle. Un puits vertical a été prévu au droit de chaque joint, pour y loger les conduites d'alimentation du système de réfrigéra-

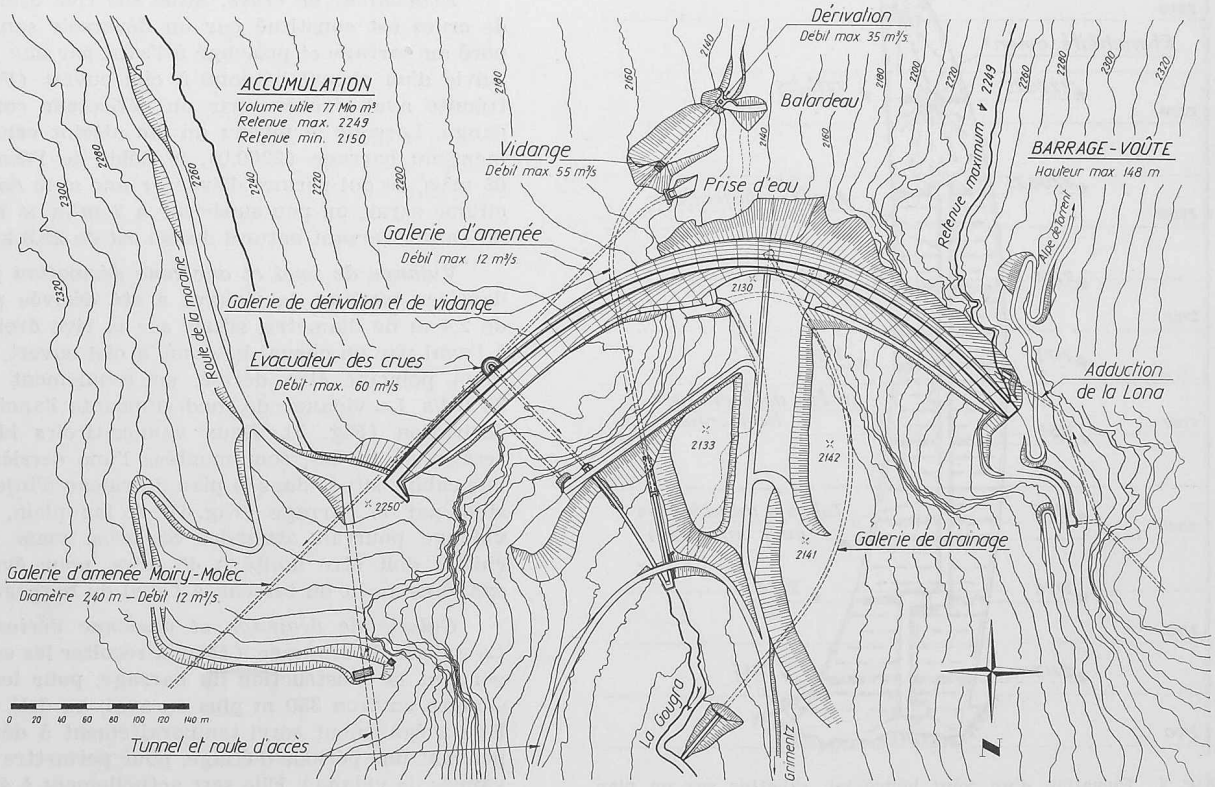


Fig. 1. Plan d'ensemble du barrage de Moiry et des ouvrages annexes; échelle 1:6000

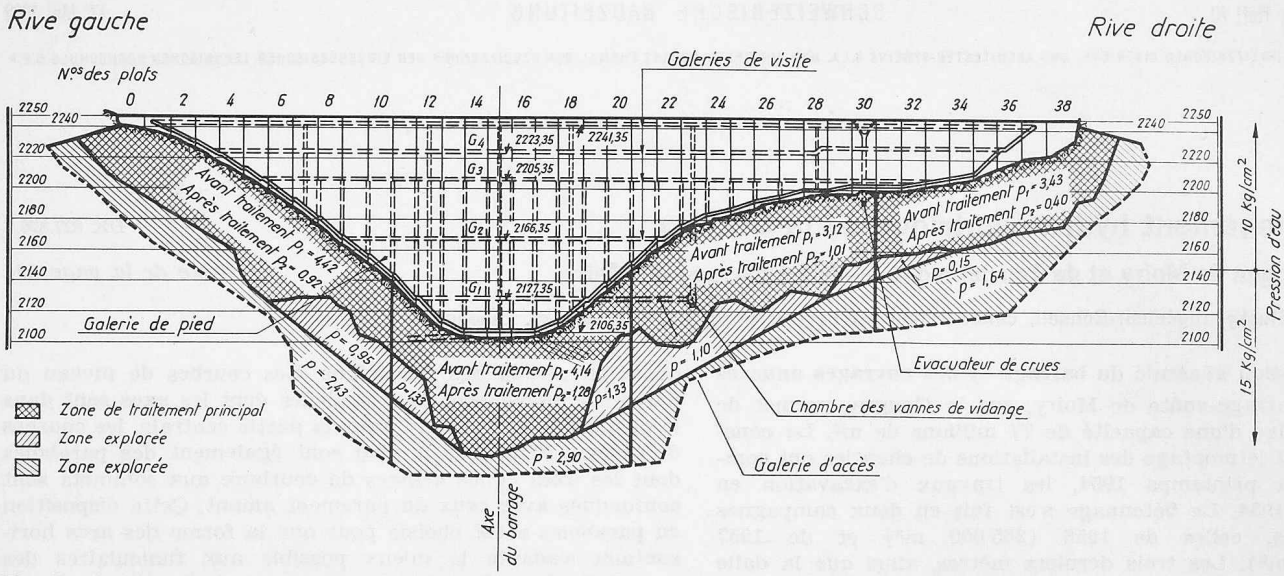


Fig. 2. Coupe verticale développée du barrage, avec rideau d'injections; échelle 1:5000. — Appréciation de l'étanchéité du rocher: *a) Zone de traitement principal:* les coefficients de perméabilité p «avant traitement» ont été obtenus par une première série de forages; ceux «après traitement» ont été obtenus par une troisième série, dite de «contrôle». *b) Zones explorées:* les coefficients de perméablilité p indiqués ont été obtenus par l'ensemble des forages, dits «d'exploration». Dans les deux cas, les forages de «contrôle» et «d'exploration» ont aussi été injectés de ciment, de sorte qu'ils ont, à leur tour, contribué à améliorer l'étanchéité du rocher caractérisée par les coefficients de perméabilité p indiqués sur ce dessin. (Le coefficient de perméabilité exprime la quantité d'eau absorbée par minute et par mètre de forage au cours de l'essai de perméabilité, qui est effectué sous une pression de 10 kg/cm² à l'entrée du trou, au-dessus de la cote 2150, et de 15 kg/cm² au-dessous de cette cote.)

tion et les tuyaux d'injection des joints. Dans la partie supérieure du barrage, l'injection des joints a été exécutée à partir de deux galeries horizontales (Fig. 3). Les puits verticaux communiquent entre eux par des galeries de visite horizontales, accessibles par l'aval. Une galerie de drainage et d'injection du rocher suit la fondation du barrage à l'amont. Au-dessous de la cote 2130, niveau de la décharge principale des matériaux d'excavation, une seconde galerie suit la fondation du pied aval du barrage. Des puits verticaux spéciaux ont été prévus pour l'installation de pendules

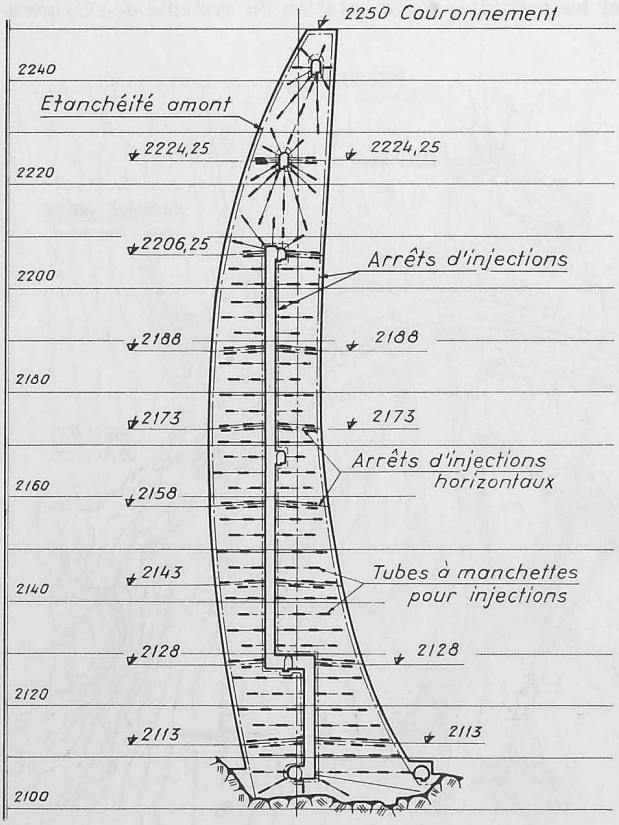


Fig. 3. Elévation d'un joint hélicoïdal, rabattue sur un plan vertical. Echelle 1:1500

destinés à mesurer les déformations du barrage et contrôler en tout temps la bonne tenue de l'ouvrage. Ces puits, combinés avec les galeries horizontales, permettent en outre le contrôle des déformations du barrage, par des mesures géodésiques. Pour parfaire l'étanchéité du bassin, le barrage est prolongé, dans le rocher de fondation, par un rideau d'injections.

Voies d'accès. Au printemps, en été et en automne, le barrage est accessible par route, depuis Grimentz. En hiver, le trafic routier doit être interrompu par suite du danger d'avalanches, mais l'expérience a montré que l'on peut accéder sans difficultés au barrage par hélicoptère, par avion de tourisme ou à skis.

Evacuateur de crues. Situé sur rive droite, l'évacuateur de crues est constitué par un déversoir sans vanne, incorporé au barrage et prolongé à l'aval par une galerie inclinée, suivie d'un chenal bétonné à ciel ouvert (Fig. 4). Son extrémité aval s'achève par un déflecteur commun à la vidange. Lorsque le niveau du lac atteint celui du couronnement du barrage (2250,0), le débit de l'évacuateur est de 63 m³/s, ce qui permet d'évacuer une crue dont le débit spécifique serait un peu supérieur à 2 m³/s × km² (la surface du bassin versant naturel du lac est de 29,3 km²).

Vidange de fond et ancienne dérivation provisoire. Pendant les travaux, la Gougra a été dérivée par une galerie de 2,4 m de diamètre, située sur la rive droite et prolongée à l'aval par un chenal bétonné, à ciel ouvert. Le débit maximum pouvant être dérivé, en écoulement libre, était de 35 m³/s. La vidange de fond emprunte l'ancienne galerie de dérivation (Fig. 5). Deux vannes-tiroirs identiques, d'une section de 1,2 m², sont montées l'une derrière l'autre, dans une cabine située dans le plan du rideau d'injections et accessible par le barrage (Fig. 6). A lac plein, le débit de la vidange pourrait atteindre 55 m³/s, mais en pratique ce chiffre doit être limité à 45 m³/s, pour éviter des dégâts exagérés au lit du torrent, à l'aval du barrage.

Galerie de drainage et ancienne dérivation auxiliaire. La galerie de drainage a servi à récolter les eaux de la fouille pendant la construction du barrage, pour les restituer à la Gougra environ 350 m plus en aval, au delà de la décharge. Elle a également servi temporairement à dériver la Gougra pendant une période d'étiage, pour permettre le montage des vannes de vidange. Elle sert actuellement à évacuer les eaux d'infiltration récoltées par les puits et galeries du barrage.

Bassin de décantation à la moraine. L'exploitation des graviers de la moraine de Moiry, pour la fabrication du béton du barrage, a créé une dépression au pied du glacier. La construction d'une petite digue en graviers tout-venant a permis d'utiliser cette dépression pour y créer un bassin de décantation, dont le niveau maximum est 2351,15 et le volume 140 000 m³.

Appareils de mesure. Une série d'appareils de mesure ont été installés dans le barrage pour contrôler son comportement pendant la première mise en eau, puis au cours de son exploitation.

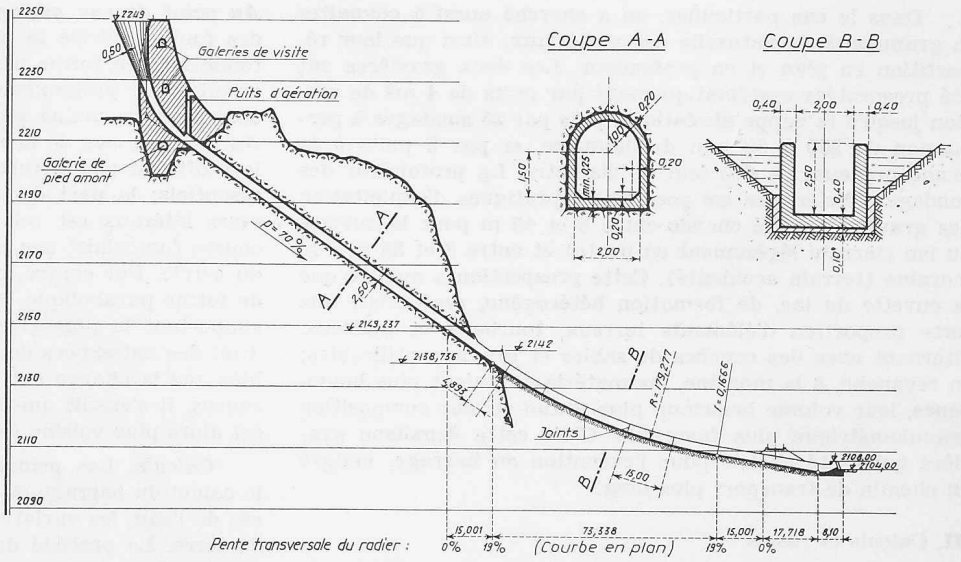


Fig. 4. Evacuateur de crues. Profil en long 1:2500 et coupes 1:250

II. Travaux de prospection

Géologie. Le verrou de Châteaupré, sur lequel s'appuie le barrage, est taillé dans un complexe de roches métamorphiques appartenant à la série des schistes de Casanna. Il s'agit de deux éperons cristallins, formés de paragneiss d'origine sédimentaire, riches en quartz et en micas de diverses sortes, séricite, chlorite ou biotite, mais généralement pauvres en éléments feldspathiques. La partie supérieure des fondations du barrage est nettement sériciteuse, tandis que la partie inférieure se charge en éléments chloriteux, de plus en plus abondants. Sur ce complexe d'excellente qualité reposent des couches de Trias, en particulier des quartzites, qui affleurent sur les deux rives. L'aile droite du barrage pénètre en partie dans les quartzites, qui se sont révélés friables, et qui ont été enlevés sous les fondations.

Des travaux de reconnaissance importants ont été exécutés à l'emplacement du barrage, soit 15 forages totalisant 640 mètres, dont 460 en rocher, ainsi que 4 galeries et une tranchée totalisant 80 mètres. Sur les rives, le rocher était affleurant mais altéré en surface par les actions thermiques, tandis que le thalweg était remblayé sur 30 mètres de hauteur par d'importants amas détritiques, tels que blocs, éboulis, matériaux morainiques et même alluvionnaires; ce remblai avait protégé le rocher, dont l'altération superficielle était insignifiante. La présence d'une nappe d'eau souterraine dans le remblai imposa la construction, au début des travaux, d'une galerie de drainage récoltant les eaux au niveau le plus bas de la fouille rocheuse, pour les restituer au lit du torrent, plus en aval.

Essais préliminaires de béton. Choix d'une gravière. Les problèmes technologiques du béton sont traités en détail plus loin, mais voici quelques commentaires sur le choix de la gravière. Il s'agissait de choisir entre la «cuvette du lac» (moraine, éboulis, alluvions) et la «moraine» située au pied du glacier de Moiry, à 4 km du chantier. L'analyse minéralogique des divers échantillons de sables et graviers donnait en moyenne les proportions, exprimées en nombre de grains, qui sont indiquées au tableau 1.

L'examen pétrographique a donc montré que les matériaux de la moraine paraissaient un peu plus favorables que ceux de la cuvette; de nombreux essais de béton ont ensuite confirmé cette première appréciation, en montrant que les résistances mécaniques étaient meilleures pour les matériaux de la moraine.

Tableau 1. Analyse des sables et graviers

Nature pétrographique	*Cuvette du lac*	*Moraine de Moiry*
Grains friables: éléments phylliteux et altérés	15—35 %	15—30 %
Grains résistants à teinte foncée: serpentine et prasinite	10—50 %	15—35 %
Grains résistants à teinte claire: gneiss, quartz, feldspath	30—65 %	45—75 %

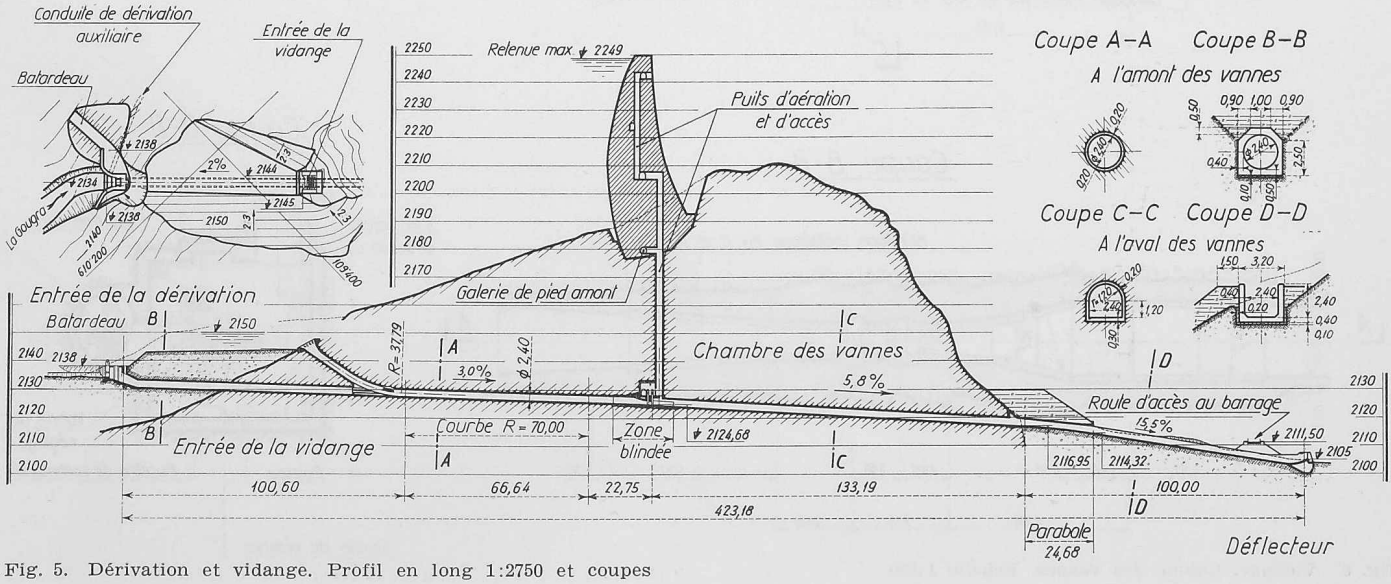


Fig. 5. Dérivation et vidange. Profil en long 1:2750 et coupes

Dans le cas particulier, on a cherché aussi à connaître la granulométrie naturelle des matériaux, ainsi que leur répartition en plan et en profondeur. Les deux gravières ont été prospectées systématiquement par puits de 4 m² de section jusqu'à la nappe phréatique, puis par 25 sondages à percussion de 250 à 55 mm de diamètre, et par 5 puits à la benne preneuse de 600 mm de diamètre. La profondeur des sondages, dictée par les possibilités pratiques d'exploitation des gravières, a été choisie entre 8 et 15 m pour la cuvette du lac (terrain légèrement en pente) et entre 8 et 35 m à la moraine (terrain accidenté). Cette prospection a montré que la cuvette du lac, de formation hétérogène, renfermait une forte proportion d'éléments terreux, tourbeux et glaiseux, alternant avec des couches de sables et graviers utilisables; en revanche, à la moraine, les matériaux étaient plus homogènes, leur volume beaucoup plus grand et leur composition granulométrique plus favorable. C'est cette deuxième gravière qui a été choisie pour l'exécution du barrage, malgré un chemin de transport plus long.

III. Calculs et essais

Généralités. Comme on l'a vu, le barrage de Moiry est constitué par une voûte dissymétrique à arcs horizontaux paraboliques, forme qui a été imposée par le profil de la vallée à l'emplacement de l'ouvrage. Relevons ici le triple intérêt des arcs paraboliques pour un tel ouvrage:

Au point de vue topographique: tandis que pour certains barrages, également implantés dans des profils de vallées dissymétriques, on crée artificiellement la symétrie de la voûte au moyen d'une culée nettement distincte de la voûte, au barrage de Moiry le mur d'aile de la rive droite prolonge la voûte d'une manière continue: les rayons de courbure des arcs varient d'une façon progressive et régulière, ce que des arcs circulaires n'auraient pas permis de réaliser aussi facilement.

Au point de vue géologique: dans l'éventualité où l'examen des fouilles révèle la nécessité d'approfondir localement les fondations, la forme parabolique permet mieux que la forme circulaire le prolongement des arcs, car la direction d'appui change alors moins pour la première que pour la seconde.

Au point de vue de la résistance: dans une vallée en V dont le profil est peu ouvert, les arcs sont les éléments porteurs essentiels; la part de la poussée de l'eau supportée par les murs latéraux est relativement faible, ce qui confère à la courbe funiculaire des poussées sur les arcs une forme proche du cercle. Par contre, pour les profils très ouverts, en U ou de forme parabolique (ce qui était le cas à Moiry), les murs supportent la plus grande partie de la poussée de l'eau au droit des naissances des arcs supérieurs. En prévoyant d'emblée que la charge sur les arcs décroîtra de la clé aux naissances, il s'ensuit que la courbe funiculaire de cette charge est alors plus voisine de la parabole que du cercle.

Calculs. Les principaux *cas de charge* envisagés pour le calcul du barrage de Moiry sont: le poids propre, la poussée de l'eau, les variations de température, les tremblements de terre. Le procédé de calcul adopté est celui qui consiste à admettre la voûte découpée en un certain nombre de tranches horizontales, les arcs, et de tranches verticales, les murs.

Le barrage étant construit par voussoirs jointifs et indépendants jusqu'à l'injection des joints, on a admis que le *poids propre* était supporté uniquement par les murs; le poids spécifique du béton a été choisi de 2,5 t/m³, conformément aux résultats des essais préliminaires, et supposé uniforme dans l'ouvrage entier.

La *poussée hydrostatique* a été répartie entre les arcs et les murs dans différentes hypothèses, qui seront examinées plus loin.

Les *variations de température* ont été appliquées aux arcs seuls, comme s'ils étaient indépendants les uns des

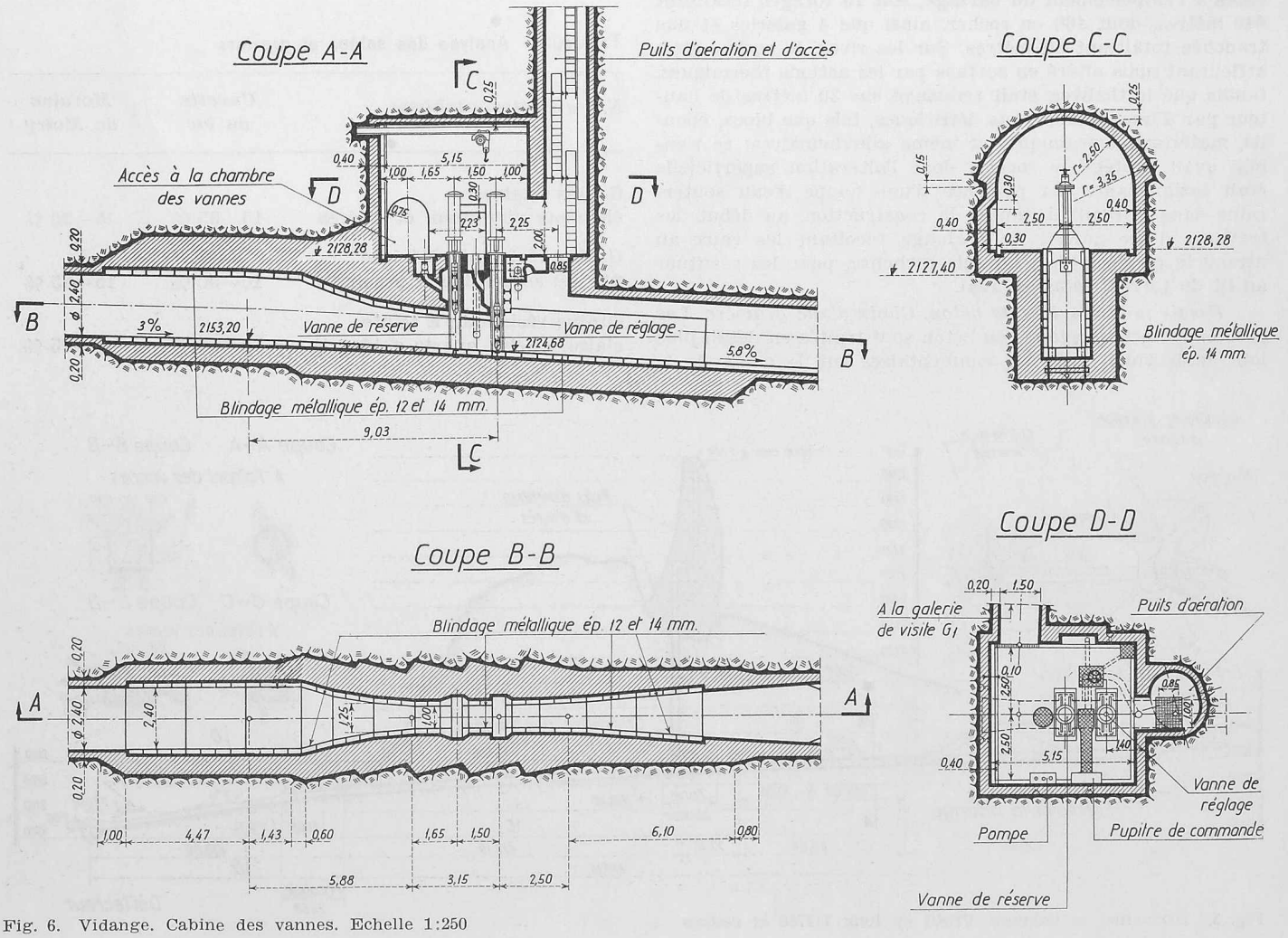


Fig. 6. Vidange. Cabine des vannes. Echelle 1:250

autres, l'effet favorable de solidarité des arcs entre eux étant négligé. Sur le parement aval, les températures extrêmes de l'air (moyennes mensuelles) ont été admises de + 10° C en été et de — 8° C en hiver; l'insolation est nulle, ce parement étant exposé au nord. Sur le parement amont, exposé au midi, il a été tenu compte en outre d'une insolation de + 2° C en été (maximum résultant + 12° C) et de + 5° C en hiver (minimum résultant — 3° C), ainsi que de la température de l'eau de la retenue; l'effet de l'eau se traduit par une diminution de l'amplitude entre les températures extrêmes d'été et d'hiver, variant linéairement avec la profondeur: ainsi, de + 12° — (— 3°) = + 15° C au niveau du couronnement, cette amplitude est nulle au niveau 2150 (minimum de la retenue), la température y étant supposée uniforme de + 4° C toute l'année et constante également au-dessous de ce niveau.

L'effet d'un *tremblement de terre* sur le barrage peut être assimilé à une surpression qui s'ajoute à la pression hydrostatique exercée sur le parement amont (ou s'en retranche suivant le sens de la secousse), et consécutive à l'onde hydrosismique et à l'inertie du massif de béton. Cette surpression a été répartie entre les arcs et les murs au moyen de l'ajustement de cinq déformations radiales au droit du mur central. La valeur de cette surpression a été déterminée en admettant une intensité de tremblement de terre correspondant au 9e degré de l'échelle Mercalli, c'est-à-dire engendrant une accélération égale au dixième de celle de la pesanteur (secousses les plus violentes ressenties en Europe centrale).

La nécessité d'obtenir dans des délais très courts les formes générales du barrage, sans avoir immédiatement recours à un calcul détaillé (calcul rendu ardu et long à l'époque des études du barrage de Moiry, en raison de l'absence d'une calculatrice électronique à disposition), a conduit à vérifier la résistance de l'ouvrage en *trois étapes successives,* sur la base de conditions s'approchant de plus en plus des conditions réelles:

Un *premier calcul* a eu pour but de déterminer l'ordre de grandeur des efforts et des contraintes dans la partie centrale et à l'encastrement de la voûte, considérée comme symétrique, c'est-à-dire entièrement encastrée dans le rocher de la rive gauche tandis que, sur la rive droite, la voûte était supposée encastrée dans le rocher à sa partie inférieure et dans le mur d'aile à sa partie supérieure. La poussée de l'eau sur cette voûte symétrique a été répartie entre les arcs horizontaux et les murs verticaux, de manière à obtenir la *concordance des déformations radiales aux points de croisement de cinq arcs et du mur central.* La stabilité du mur en aile de la rive droite, sous l'effet de son poids propre, de la poussée de l'eau sur son parement amont et des réactions latérales exercées par la voûte symétrique, a été vérifiée séparément.

Dans un *second calcul,* on a envisagé le barrage entier comme une voûte dissymétrique monolithique, sur laquelle la poussée de l'eau a été répartie entre éléments horizontaux et verticaux à partir de l'*ajustement des déformations radiales aux intersections de six arcs et de huit murs,* ce qui représentait 37 points de croisement, soit 37 équations linéaires à résoudre.

Le *calcul définitif* a également été effectué en considérant la voûte entière comme un monolithe dissymétrique, mais la poussée de l'eau étant alors répartie entre les deux systèmes d'éléments porteurs au moyen d'un *ajustement des déformations radiales, tangentielles et angulaires aux intersections de cinq arcs et de huit murs,* ce qui correspondait à 29 points de croisement et, à raison de trois déformations à ajuster en chaque point, à un système de 87 équations linéaires. Plutôt que de résoudre un tel système sans calculatrice électronique, on a préféré, dans le cas particulier, déterminer la répartition des charges entre arcs et murs par approximations successives. Les nombreux coefficients de déformations intervenant dans ce calcul n'ont pas pu être déterminés par la «Trial load method» américaine (applicable aux arcs circulaires), mais ils ont été l'objet de calculs préalables spéciaux.

Les trois calculs précédents ont été effectués en admettant:

le premier, un *encastrement élastique* de la voûte dans le rocher, le module d'élasticité de ce dernier étant choisi uniformément égal à celui du béton;

le second et le troisième, une *fondation rocheuse indéformable,* ce qui s'est traduit par des efforts d'encastrement un peu plus élevés qu'en réalité, la déformation effective des appuis rocheux ayant tendance à atténuer ces efforts.

Essais sur modèle. Les calculs ont été complétés par des *essais sur modèle réduit,* moyen d'investigation considéré aujourd'hui indispensable à l'étude intégrale d'un barrage-voûte, puisqu'il permet de contrôler de manière indépendante les résultats des calculs. Le modèle du barrage de Moiry a été exécuté à l'échelle 1:167 en *caoutchouc naturel,* matériau choisi parce qu'il permettait d'observer des déformations encore facilement mesurables pour une charge expérimentale constituée par une simple poussée d'eau. Le caoutchouc présentant un certain fluage, des précautions expérimentales spéciales ont dû être prises: en particulier, comme ce fluage est sensiblement proportionnel à la contrainte qui le produit, on a introduit un module d'élasticité différent du module d'élasticité instantané pour interpréter les résultats des mesures. De plus, le coefficient de Poisson du caoutchouc étant relativement élevé (0,44), il joue un rôle plus important que pour d'autres matériaux, ce qui exige également une attention particulière dans les mesures et leur interprétation.

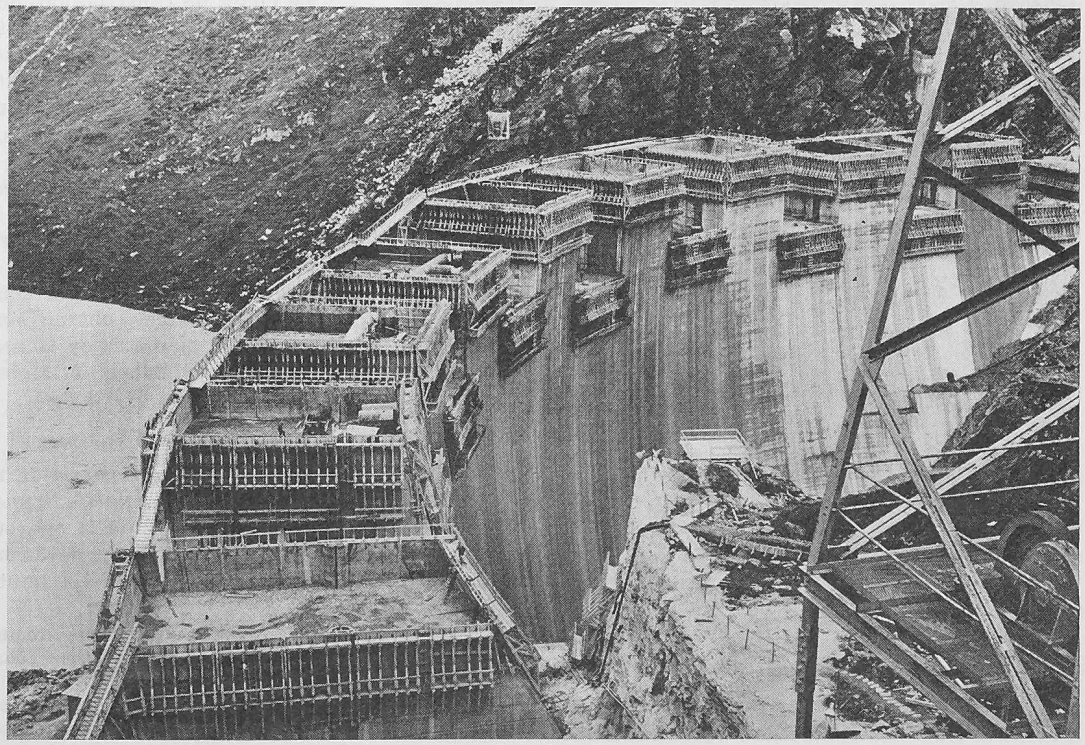


Fig. 7. Le barrage en cours d'exécution. (Photo E. Brügger, Zurich)

L'auscultation du modèle a comporté deux types de mesures:
des mesures de *déformation d'ensemble,* c'est-à-dire des déplacements radiaux et tangentiels de repères scellés sur le parement aval du modèle, au moyen de fleximètres;
des mesures de *déformations spécifiques* en un certain nombre de points des parements amont et aval, au moyen d'un capteur de contraintes.

Les grandeurs mesurées, transformées à l'échelle de la réalité d'après les règles de la similitude, ont permis d'évaluer les contraintes dans l'ouvrage. Les modules de déformation longitudinale (module d'Young) et de déformation transversale (coefficient de Poisson) du caoutchouc ont été déterminés par des essais spéciaux, en tenant compte des rythmes d'application des charges.

Conclusions générales. Les essais, comme le calcul définitif, ont montré que *l'implantation et les formes du barrage étaient satisfaisantes,* en particulier que:
les déformations radiales de la partie centrale en voûte étaient très symétriques par rapport au plan axial de la voûte symétrique considérée dans le premier calcul, ce qui justifiait a posteriori les bases de ce calcul; la concordance est encore meilleure avec le calcul complet, 5 arcs et 8 murs (Fig. 9);
l'orientation du mur de l'aile droite avait été correctement choisie pour absorber la poussée de la voûte;
les contraintes en tous les points de l'ouvrage avaient des valeurs admissibles;
les réactions du barrage sur le rocher de fondation avaient une orientation correcte et engendraient des pressions régulièrement distribuées.

D'une façon générale, il est toutefois apparu que les essais sur modèle conduisaient à des déformations et des contraintes dans l'ouvrage légèrement inférieures à celles données par le calcul, ce qui permettait de considérer les résultats de ce dernier comme un peu défavorables et, par conséquent, affectés d'une certaine marge de sécurité.

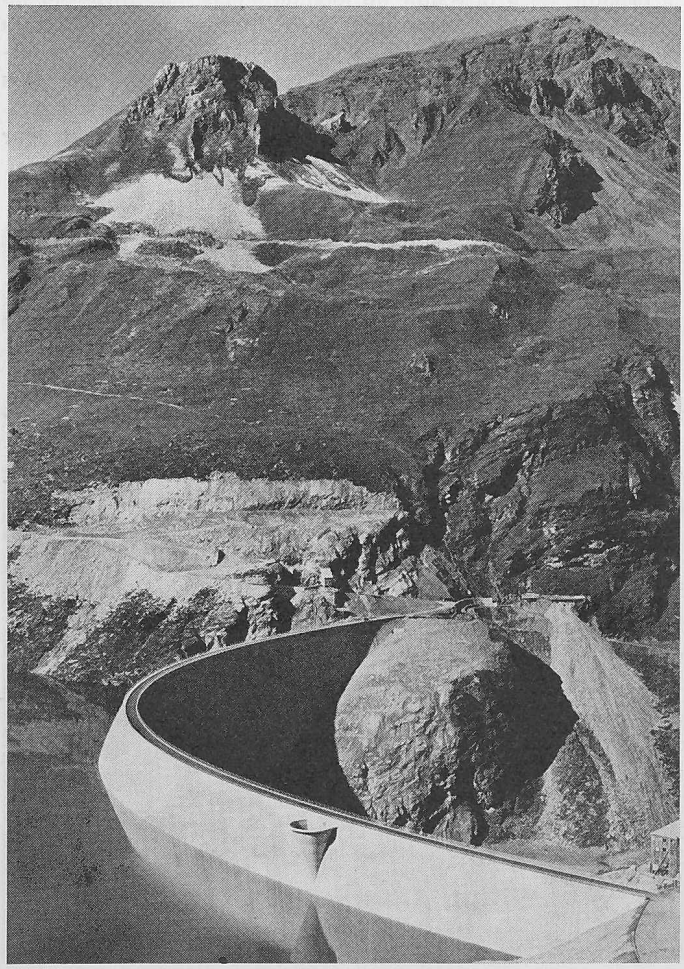


Fig. 8. Le barrage achevé (avant la remise en état des lieux)

Conséquences pratiques. L'étude détaillée de l'état de contrainte, effectuée par le calcul et par l'essai sur modèle, a permis d'établir un *plan rationnel de dosage du béton.* On sait que le béton des barrages sis à haute altitude doit non seulement résister aux contraintes mécaniques, mais aussi aux sollicitations par le gel, du moins jusqu'à une certaine profondeur. On a choisi pour le béton des parements du barrage de Moiry un dosage de 250 kg CP/m³, avec entraîneur d'air, qui remplissait ces deux conditions; son épaisseur minimum a été fixée à 3,50 m. A l'intérieur du barrage, les contraintes mécaniques, et par conséquent les dosages sont plus faibles; le dosage du béton y a été déterminé de la façon suivante: En de nombreuses sections du barrage, on a construit les diagrammes des contraintes correspondant aux divers cas de charge possibles [1]), obtenues à la fois par le calcul et l'essai sur modèle. Pour les deux points extrêmes de chaque section, situés en parement, on a choisi la contrainte principale donnant la plus grande compression; si l'autre contrainte principale était une traction, on majorait la valeur de la compression de 1,4 fois la valeur de cette traction (contrainte «pénalisée»), cette majoration ayant le même signe que la compression. Le polygone-enveloppe des diagrammes ainsi obtenus en chaque section, a permis de trouver la plus grande contrainte possible en tous les points de la section, d'un parement à l'autre.

Au point de vue de l'exécution, on a préféré ne pas multiplier le nombre des bétons à dosages différents sur une même couche de bétonnage; c'est pourquoi on s'est limité à un béton de parement et un béton de masse. Il en est résulté une nouvelle enveloppe, circonscrite à la première et dont les trois paliers horizontaux ont déterminé les *contraintes admises pour fixer les résistances exigées* des trois bétons: parement amont, masse, parement aval (Fig. 10).

Les valeurs maxima des «contraintes admises» ainsi trouvées ont été les suivantes: béton du parement amont: 75 kg/cm²; béton de masse: 65 kg/cm²; béton du parement aval: 75 kg/cm².

A partir des «contraintes admises», les dosages ont été déterminés effectivement: pour la 1ère campagne de bétonnage, sur la base des résultats des essais préliminaires de béton; pour la campagne principale de 1957, sur la base des résultats des essais des bétons fabriqués au cours de la campagne de 1956.

En cours de construction, on a constamment vérifié que les «résistances exigées» du béton étaient bien respectées: cela revenait à *fixer la contrainte admissible* (chiffre de résistance divisé par un coefficient de sécurité) correspondant à un type de béton, et à s'assurer que les contraintes dans l'ouvrage lui étaient inférieures, dans la zone où ce béton avait été utilisé. Le coefficient de sécurité adopté tenait compte, non seulement de la résistance moyenne du béton, mais aussi de la dispersion des résultats des essais de contrôle, c'est-à-dire du risque d'obtenir une fois ou l'autre un très mauvais résultat (ce risque augmente avec la dispersion des résistances des essais de contrôle). Rappelons ici que le chiffre de résistance, obtenu sur cylindres de hauteur plus grande que le diamètre de la base, est inférieur à celui que l'on obtient sur cubes; à Moiry, le rapport de ces deux chiffres a varié de 0,80 à 0,85.

IV. Dispositions constructives

Pour éviter les fissures de retrait, le barrage a été *découpé en voussoirs jointifs,* d'une largeur moyenne de 16 m. L'épaisseur minimum à la clé est de 5,5 m au couronnement, et l'épaisseur maximum de 34 m au niveau des fondations, sans joint longitudinal. La hauteur des levées est de 3 m.

[1]) L'effet exceptionnel des tremblements de terre n'a cependant pas été pris en considération pour cette détermination, car les contraintes qu'ils engendrent dans le barrage cumulées à celles résultant de l'application des charges normales (poids propre, eau, température), permettent une réduction du coefficient de sécurité telle que les «résistances exigées» du béton sont alors inférieures aux «résistances exigées» résultant des seules charges normales.

La face des joints transversaux est lisse, sans repiquage ni redans, pour faciliter leur remplissage ultérieur par un coulis de ciment. Leur forme est hélicoïdale, afin de créer un emboîtement des différents éléments du barrage. Le pas de l'hélice, variable, est choisi de manière que partout la résultante des forces se rapproche le plus possible de la normale à la face du joint; il ne dépasse toutefois pas un demi-grade par mètre. Pour le coffrage des parements et des joints, on a utilisé des panneaux rectangulaires de bois, revêtus de bois dur, ancrés dans la levée précédente par l'intermédiaire de montants rigides extérieurs, que l'on fait glisser d'une levée à l'autre. On a ainsi pu réaliser sans difficulté des surplombs jusqu'à 25 %. L'espace entre deux panneaux, variable de 0 à 25 cm environ du fait de la variation des largeurs d'une levée à l'autre,a été bouché par l'aile d'un profilé en métal léger, qui n'a pratiquement pas laissé de traces sur la surface décoffrée du béton.

Les formes très variables des plots sont définies par des équations de courbes relativement simples: paraboles, droites. *L'implantation des coffrages* se fait par coordonnées polaires, dont l'origine est un axe vertical situé à proximité des joints, à peu près à michemin entre le parement amont et le parement aval. Ces coordonnées sont complétées par l'indication des rayons de courbure.

Pour les besoins de la construction (canalisations d'air, d'eau de réfrigération, système d'injection des joints à l'abri du gel) et pour le contrôle ultérieur, le barrage contient une série de *puits* et de *galeries*. La galerie de pied amont, qui suit plus ou moins le tracé des fondations, sert à récolter d'éventuelles infiltrations ou à renforcer, cas échéant, le voile d'injection principal. Dans la partie inférieure du

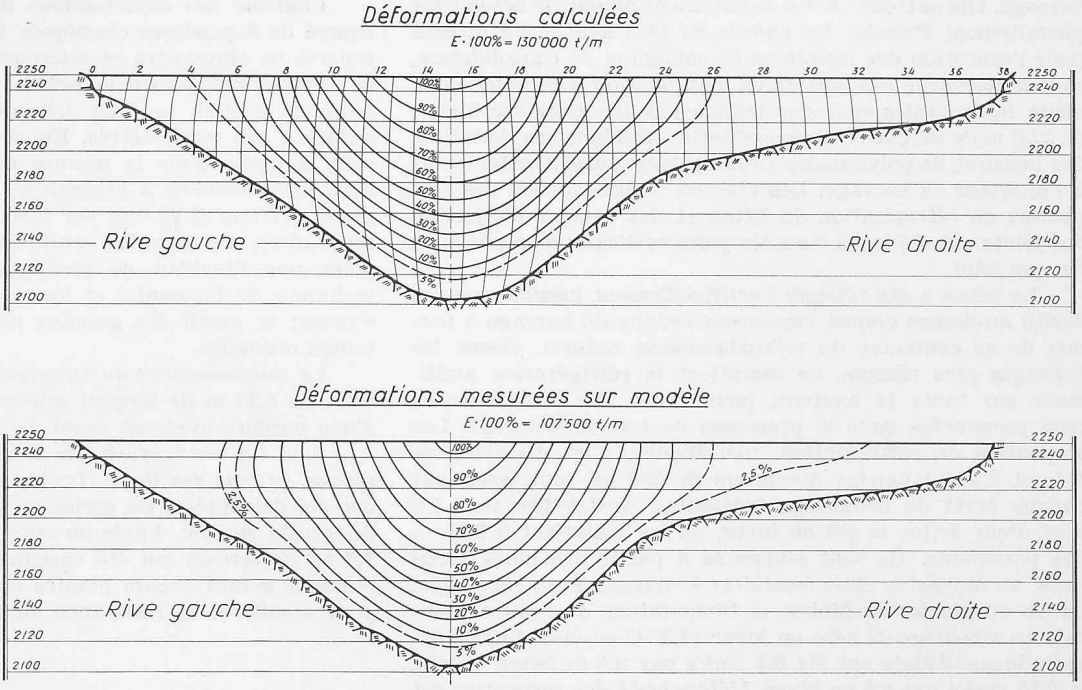


Fig. 9. Comparaison entre calculs et essais. Déformations calculées et mesurées. Calcul: ajustement complet, 5 arcs, 8 murs. Modèle: en caoutchouc, avec charge d'eau.

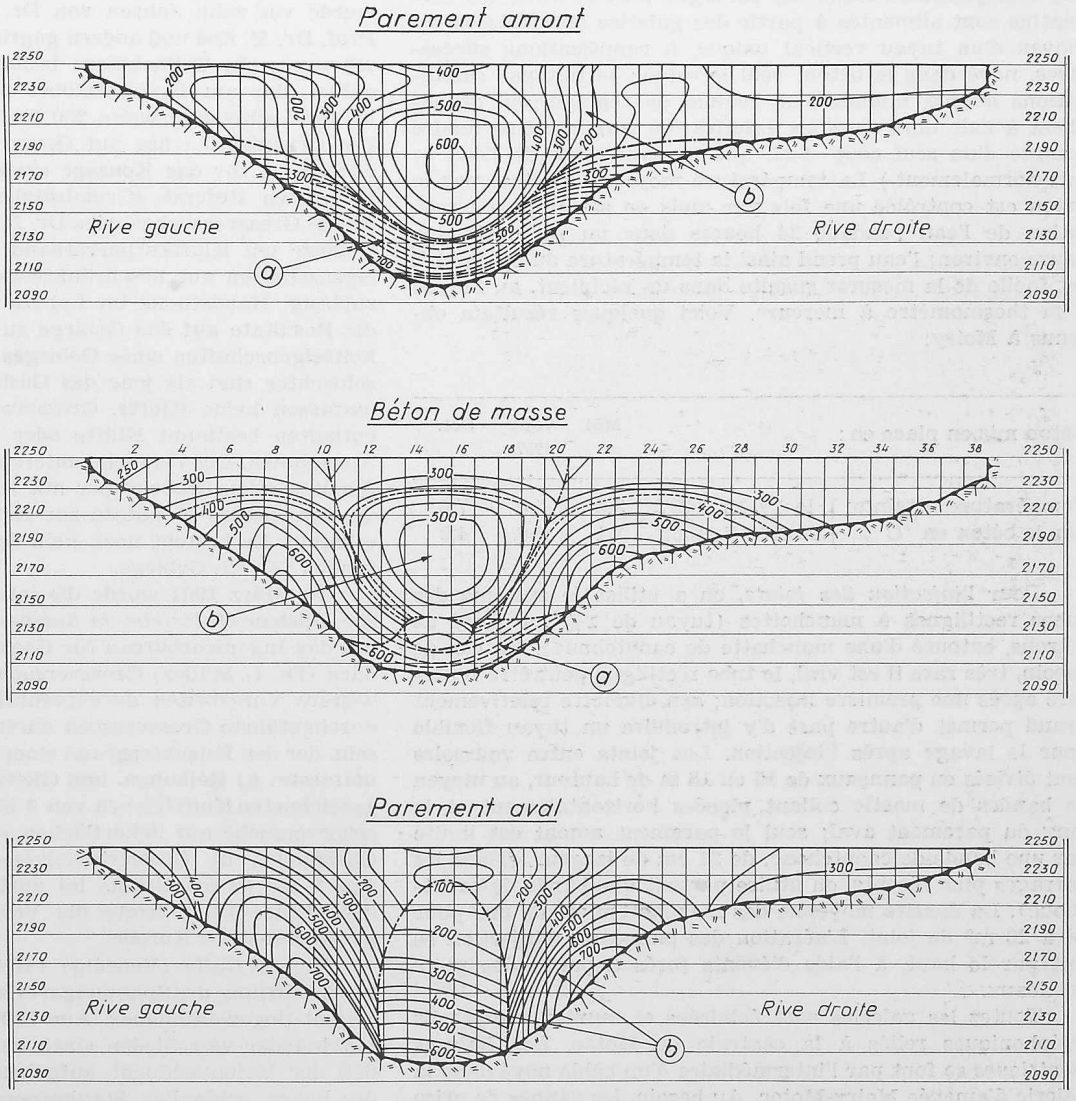


Fig. 10. Contraintes admises, en t/m², pour fixer la résistance exigée du béton. a) Effet du poids propre seul. b) Effets cumulés du poids propre, de la poussée de l'eau et de la température

barrage, elle se trouve à 8 m du parement amont; le béton y est parfaitement étanche. La galerie de pied aval a été utilisée pour l'exécution des injections de collage et de consolidation, sous la décharge des matériaux d'excavation. Les galeries de visite horizontales sont construites par tronçons rectilignes de 22,0 m de longueur, pour permettre, pendant l'exploitation, des mesures de polygonales (angles, longueurs, nivellements) à l'intérieur du barrage. Les réseaux d'alimentation des serpentins de réfrigération du béton et des rampes d'injection des joints ont été logés dans les puits verticaux disposés dans chaque joint.

Le béton a été *réfrigéré artificiellement* jusqu'au niveau 2220,0 au-dessus duquel l'épaisseur réduite du barrage a permis de se contenter du refroidissement naturel. (Dans les barrages plus récents, on maintient la réfrigération artificielle sur toute la hauteur, pour éviter des discontinuités trop prononcées dans le processus de refroidissement). Les serpentins de réfrigération, métalliques, d'un diamètre de ¾", et d'une longueur maximum de 200 m, sont posés sur chaque arrêt de bétonnage horizontal, c'est-à-dire tous les 3 m. Pour éviter le gel en hiver, on les maintient à 2,50 m des parements. Ils sont alimentés à partir des puits verticaux, au moyen de deux conduites à courant d'eau réversible. Grâce au glacier de Moiry, la température de l'eau descendait au voisinage de zéro en hiver (3,5° C en été). Les débits spécifiques utilisés ont été 0,5 cm³/s par m³ de béton en été, et 0,15 cm³/s par m³ en hiver. L'étanchéité des serpentins est contrôlée sous la pression de service, juste avant le bétonnage; la circulation de l'eau froide est enclenchée quelques heures plus tard, une fois que le béton commence sa prise. (L'expérience a montré que le renversement du courant n'est pas indispensable. Dans les barrages plus récents, les serpentins sont alimentés à partir des galeries horizontales, au moyen d'un tuyau vertical unique, à ramifications successives, noyé dans le béton; seul le retour se fait par canalisations isolées, munies d'un robinet de réglage, qui débouchent à l'air libre dans les galeries: on peut ainsi se rendre compte d'un seul coup d'œil que la circulation de l'eau se fait normalement.) La température moyenne atteinte par le béton est contrôlée une fois par mois en arrêtant la circulation de l'eau pendant 24 heures dans un serpentin sur douze environ; l'eau prend ainsi la température du béton et il est facile de la mesurer ensuite dans un récipient, au moyen d'un thermomètre à mercure. Voici quelques résultats obtenus à Moiry:

Béton mis en place en :		Mai	Août 1957	Oct.
Température atteinte par le béton en °C	le 19. 12. 1957	3,5	5,0	7,0
	le 28. 2. 1958	1,1	3,0	4,9

Pour l'*injection des joints,* on a utilisé le système des tubes rectilignes à manchettes (tuyau de 1½", perforé de 8 trous, entouré d'une manchette de caoutchouc). En cas de besoin, très rare il est vrai, le tube rectiligne peut être reperforé après une première injection; son diamètre relativement grand permet d'autre part d'y introduire un tuyau flexible pour le lavage après l'injection. Les joints entre voussoirs sont divisés en panneaux de 15 ou 18 m de hauteur, au moyen de bandes de mastic collant placées horizontalement et le long du parement aval; seul le parement amont est limité par une bande de caoutchouc, de 21 cm de largeur. (Dans les barrages plus récents, on utilise partout une bande de caoutchouc). La densité moyenne des manchettes est de une pour 16 à 20 m² de joint. L'aération des panneaux d'injection se fait par le haut, à l'aide d'évents forés à partir des puits verticaux.

Toutes les galeries sont éclairées et munies d'appareils téléphoniques reliés à la centrale de Motec. Les *liaisons électriques* se font par l'intermédiaire d'un câble noyé dans la galerie d'amenée Moiry-Motec. Au besoin, les vannes de prise d'eau et de vidange peuvent être manœuvrées à distance, de Motec.

Contrôle des déformations du barrage. Le barrage est équipé de 5 pendules classiques à contrepoids, de nombreux repères de clinomètre et micromètre, ainsi que de 26 prises de pression placées sur le rocher avant le bétonnage ou forées après à travers le joint béton-rocher de la fondation et reliées à des manomètres. En outre, 3 galeries horizontales sont équipées pour la mesure de polygonales de précision avec rattachement à l'extérieur, par fenêtres de visée. Les mesures d'angles se font par théodolite de précision suspendu au plafond des galeries, conformément au système mis au point par l'Institut de photogrammétrie de l'Ecole polytechnique de Lausanne, et les mesures de longueurs par fils d'invar; le profil des galeries n'est ainsi pas encombré en temps ordinaire.

Le *couronnement du barrage,* formé d'une chaussée centrale de 4,25 m de largeur minimum, d'un trottoir amont et d'une bordure aval, est muni de barrières en métal-léger.

A la fin des travaux, un soin particulier a été voué à la *remise en état des lieux.* Toutes les installations de chantier ont été démontées, les socles de béton démolis et recouverts de terrain meuble. Après un essai fructueux effectué en 1960, 7,5 ha de terrain ont été ensemencés en 1961; de nombreux buissons seront encore plantés en 1962, à l'aval du barrage, pour améliorer la résistance du terrain à l'érosion.

A suivre

Probleme der Geomechanik

DK 624.131

Bemerkungen zu einem diesbezüglichen Kolloquium in Salzburg

Die *Internationale Arbeitsgemeinschaft für Geomechanik* wurde vor zehn Jahren von Dr. *Leopold Müller,* Salzburg, Prof. Dr. *M. Roš* und andern gegründet. Das erste Kolloquium sei von sechs Teilnehmern besucht worden. Am 12. Kolloquium, das am 19./20. Oktober 1961 in Salzburg stattfand, nahmen schätzungsweise 250 Fachleute aus 14 Ländern teil. Die Organisation hat auf Grund ihrer bisherigen Tätigkeit Richtsätze für das Konzept einer Felsmechanik aufgestellt. Im ersten Referat «Grundsätzliches über gebirgstechnologische Grossversuche» wies Dr. *L. Müller* darauf hin, dass ein Gebirge ein Kluftkörperverband ist, bei dem die Gesteinseigenschaften nur beschränkte Bedeutung haben. Es ist unzulässig, Handstücke im Laboratorium zu untersuchen und die Resultate auf das Gebirge zu übertragen, da die Festigkeitseigenschaften eines Gebirges im allgemeinen wesentlich schlechter sind als jene des Gesteins. Kleinere Probekörper umfassen keine Klüfte. Grössere Probekörper des Gesteins enthalten bestimmt Klüfte oder Lassen, doch gibt es auch Ausnahmen. Die Versuche unterstehen statistischen Gesetzen. Somit werden Probekörper mit 100 bis 200 Klüften benötigt, um brauchbare Resultate zur Erfassung der Streuungen zu erhalten. Es besteht noch kein System technologischer Prüfungen für ein Gebirge.

Im März 1961 wurde die internationale Versuchsanstalt für Felsbau *«Interfels» in Salzburg* gegründet. Schon vorher hat das Ingenieurbureau für Geologie und Bauwesen in Salzburg (Dr. L. Müller) Grossversuche an Gebirgsbaustellen und weitere Vorarbeiten durchgeführt. Der bedeutendste bisher durchgeführte Grossversuch dürfte jener in Kurobe (Japan) sein, der den Felsuntergrund einer Staumauer untersuchte. Er umfasste: a) Reibungs- und Gleitversuche an geologisch vorgezeichneten Kluftflächen von 3 bis 10 m² Ausmass. b) Grossscherversuche auf Scherflächen von 6 bis 15 m² natürlicher Oberfläche. c) Grosstriaxialversuche an Versuchskörpern von 2 bis 10 m³ Grösse im anstehenden Gebirge. Ein eindrücklicher Film zeigte die Verhältnisse in der hochgelegenen Baustelle Kurobe.

Ing. *E. Gallo* (Venedig) referierte über Modellversuche für Ermittlung des Spannungsverlaufes im Felsuntergrund der Vajont-Bogenstaumauer. Aus 3200 Bauklötzen aus Gips, die miteinander verschieden stark verklebt wurden, ist ein Modell der Vajontschlucht aufgebaut worden. Ein Gipsmodell des hohen, schlanken Staukörpers wurde darin eingebunden und eingestaut, wobei Flüssigkeiten von 1,0, 1,38 und 1,50 t/m³ spez. Gewicht verwendet wurden. — *Link,* Frankfurt,