

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 82 (1956)
Heft: 13

Artikel: L'aménagement hydro-électrique du Rio Anchicaya (Colombie)
Autor: Gallico, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-62067>

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: 04.05.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

Abonnements:

Suisse: 1 an, 26 francs
Etranger: 30 francs
Pour sociétaires:
Suisse: 1 an, 22 francs
Etranger: 27 francs
Prix du numéro: Fr. 1.60
Ch. post. « Bulletin technique de la Suisse romande »
N° II. 57 75, à Lausanne.

Adresser toutes communications concernant abonnements, changements d'adresse, expédition à
Imprimerie La Concorde,
Terreaux 31, Lausanne

Rédaction

et éditions de la S. A. du
Bulletin technique (tirés à
part), Case Chauderon 475
Administration de la S. A.
du Bulletin Technique
Ch. de Rosneck 6 Lausanne

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

Comité de patronage — Président: R. Neeser, ingénieur, à Genève; Vice-président: G. Epitoux, architecte, à Lausanne; Secrétaire: J. Calame, ingénieur, à Genève — Membres, Fribourg: MM. H. Gicot, ingénieur; M. Waeber, architecte — Vaud: MM. A. Gardel, ingénieur; A. Chevalley, ingénieur; E. d'Okolski, architecte; Ch. Thévenaz, architecte — Genève: MM. Cl. Groscurin, architecte; E. Martin, architecte — Neuchâtel: MM. J. Béguin, architecte; R. Guye, ingénieur — Valais: MM. G. de Kalbermatten, ingénieur; D. Burgener, architecte.

Rédaction: D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration

de la Société anonyme du Bulletin technique: A. Stucky, ingénieur, président; M. Bridel; G. Epitoux, architecte; R. Neeser, ingénieur.

Tarif des annonces

1/1 page	Fr. 264.—
1/2 »	» 134.40
1/4 »	» 67.20
1/8 »	» 33.60

Annonces Suisses S. A.
(ASSA)



Place Bel-Air 2. Tél. 22 33 26
Lausanne et succursales

SOMMAIRE: *L'aménagement hydro-électrique du rio Anchicaya (Colombie)*, par A. GALLICO, ingénieur EPUL, Entreprises Campenon-Bernard. — **BIBLIOGRAPHIE.** — **SERVICE DE PLACEMENT.** — **DOCUMENTATION GÉNÉRALE.** — **DOCUMENTATION DU BATIMENT.** — **INFORMATIONS DIVERSES.**

L'AMÉNAGEMENT HYDRO-ÉLECTRIQUE DU RIO ANCHICAYA (COLOMBIE)

par A. GALLICO, ingénieur EPUL — Entreprises Campenon-Bernard

I. Généralités

La Cordillère des Andes traverse la Colombie du nord au sud par trois chaînes distinctes, dont les sommets atteignent 5500 à 5800 mètres, appelées couramment Cordillères centrale, orientale et occidentale. Le rio Anchicaya fait partie du versant du Pacifique de la Cordillère occidentale, et coule très sensiblement d'est à ouest; son embouchure dans l'Océan se trouve au sud du port de Buenaventura, à 4° de latitude nord environ.

L'aménagement hydro-électrique est situé près de la route reliant la ville de Cali à la mer, à 90 km de Cali et à 54 km de Buenaventura.

Cet aménagement appartient à la Central Hidroeléctrica del rio Anchicaya, Ltda., entité semi-officielle, dont les propriétaires se répartissent comme suit: Gouvernement colombien, 51 %; Département del Valle del Cauca, 23 %; Municipalité de Cali, 26 %.

Le but de cet aménagement est de fournir l'énergie électrique à la ville de Cali, capitale du département. En effet, la population de cette ville a triplé en quinze ans, et est actuellement de 300 000 habitants environ. Les industries se sont développées aussi; elles sont

cependant très gênées par le manque d'énergie disponible: par exemple, afin de freiner la consommation, le kWh est vendu à un prix unitaire croissant proportionnellement à la demande d'énergie. Les disponibilités actuelles consistent en 23 000 kW de puissance, et par la construction de l'aménagement du rio Anchicaya, elles vont être augmentées de 24 000 kW en première étape, et de 64 000 kW en deuxième étape.

L'énergie électrique disponible par tête d'habitant est actuellement, en Colombie, de 90 kWh par an, avec une production totale annuelle pour tout le pays de 1000 millions de kWh, en chiffres ronds. La mise en service de l'aménagement du rio Anchicaya produira annuellement 100 millions de kWh au début, et 300 millions en deuxième étape; la puissance minimum permanente étant de 16 000 kW environ.

Cet aménagement constitue donc une étape importante dans l'industrialisation de la Colombie.

Le projet d'aménager le rio Anchicaya date de 1944. De 1944 à 1948, les équipements électriques et mécaniques principaux du barrage et de l'usine ont été étudiés et commandés. Pendant cette période, les travaux du

génie civil ont été commencés. Il s'agissait surtout d'aménagement de routes d'accès dans une région très difficilement accessible, d'excavations dans la zone du barrage et du percement des tunnels. De 1948 à 1951, les travaux ont été arrêtés et le projet initial profondément remanié.

De 1951 à 1953 les travaux ont repris, concernant surtout l'aménagement des installations de concassage et bétonnage, la déviation du rio, la suite des fouilles du barrage, le percement de la galerie d'amenée, les excavations et l'exécution de l'usine, le tracé et l'exécution de la ligne haute tension Anchicayá-Cali.

En juillet 1953, les Entreprises Campenon Bernard ont été chargées de l'exécution des travaux jusqu'à l'achèvement complet de l'aménagement. A cette date, il s'agissait d'exécuter les travaux suivants : le bétonnage du barrage, le revêtement de la galerie d'amenée, la construction de la chambre d'équilibre, la construction de l'usine, les montages mécaniques et électriques et la mise en eau.

L'ensemble de ces travaux a été couronné de succès et la mise en service du premier groupe hydro-électrique a eu lieu en juin 1955.

II. Caractéristiques et dimensions principales des ouvrages

Surface du bassin versant : 750 km².

Débits : m³/sec

Moyen annuel	90
Minimum minimorum (24 septembre 1946)	30
Minimum journalier	35
Maximum mesuré (12 novembre 1944)	1600

La figure 6 indique les débits mensuels moyens, basés sur des mesures s'étendant sur une période de treize ans. On voit que l'année hydrologique du rio Anchicayá se décompose de la manière suivante :

- 3 mois d'étiage : Janvier, février, mars.
- 3 mois de crues : Avril, mai, juin.
- 3 mois d'étiage : Juillet, août, septembre.
- 3 mois de crues : Octobre, novembre, décembre.

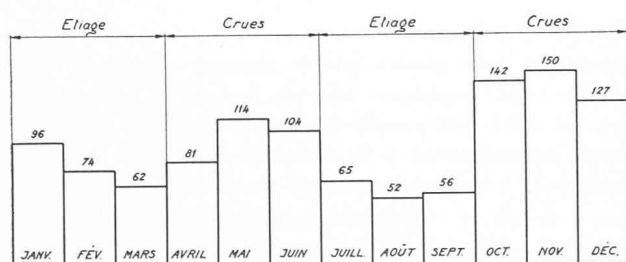


Fig. 6. — Débits moyens mensuels du Rio Anchicayá, en m³/sec.

Retenue

Niveau de la crête déversante	194,4 m
Volume du lac à ce niveau	5 100 000 m ³
Superficie du lac à ce niveau	0,36 km ²
Niveau minimum utile	185,0 m
Tranche utile du lac entre 185,0 et 194,4	2 300 000 m ³

Barrage

Barrage-poids arqué en béton non armé, du type déversoir.
Niveau du couronnement : 201,0 m.
Hauteur maximum entre la fondation et le couronnement : 59,6 m.
Hauteur maximum entre la fondation et la crête déversante : 53 m.

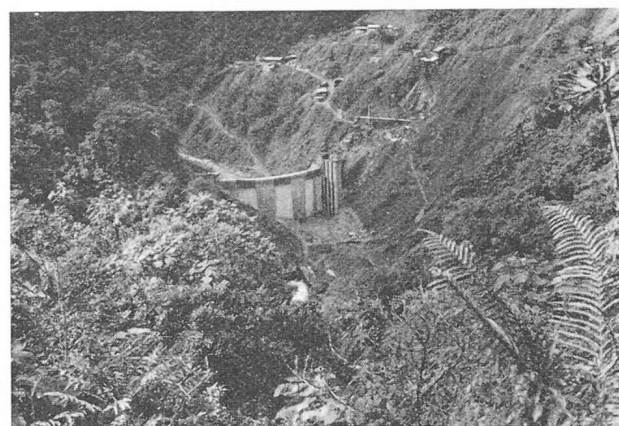


Fig. 1. — Vue générale de l'emplacement du barrage (janvier 1955).

Largeur maximum à la base : 42 m.

Longueur totale du couronnement : 205 m.

Volume de béton : 105 000 m³.

Ces données montrent que l'aménagement du rio Anchicayá doit être plutôt classé comme un aménagement au fil de l'eau haute chute, la retenue utile étant trop faible pour contribuer à régulariser d'une manière efficace les débits naturels du rio.

Evacuateur de crues

Longueur totale de la crête déversante : 141 m.

Cette longueur se partage de la façon suivante :

- Déversoir central, crête 194,40, départ du saut de ski : 163,50, longueur 111 m.
- Déversoirs latéraux, crête 195,20, départ du saut de ski : 175,40, longueur 30 m.

La crête du déversoir est profilée pour donner le débit maximum avec une charge égale à 6,60 m (profil Creager). Des essais sur modèle ont montré que le débit maximum évacuable sera de 5700 m³/sec. En appliquant la formule Dubuat :

$$Q = mB \sqrt{2g} H^{3/2}$$

on trouve $m = 0,56$, qui constitue une valeur très élevée.

Vidanges

Deux tunnels provisoires de vidange de 3 m × 3 m radiers aux niveaux 151 et 152 (à boucher définitivement avant la mise en eau).

Deux tunnels définitifs de vidange de 1,83 m × 1,52 m, radiers au niveau 154,0 m.

Batardeau amont

Hauteur : 10 m. — Cote de la crête : 163,0 m.

Tunnel de dérivation

Niveau du radier à l'amont : 149,0.

Niveau du radier à l'aval : 146,0.

Longueur : 190 m. — Pente : 1,5 %.

Le tunnel n'est pas revêtu ; ses dimensions sont :

Largeur : 7,5 m.

Hauteur : 8,0 m, avec plafond en arc de cercle.

Ce tunnel a été prévu d'une capacité de 470 m³/sec.

La capacité actuelle d'évacuation est de 350 m³/sec.

Il existe un dispositif d'alerte placé à 3 km à l'amont du barrage, qui se déclenche lorsque le débit de la rivière atteint 300 m³/sec.

Tour de prise d'eau

L'ouvrage de la prise d'eau est conçu dans un double but : sa partie inférieure constitue l'entrée des deux tunnels de vidange du lac ; sa partie supérieure constitue l'ouvrage d'entrée proprement dit de la prise d'eau. Cette disposition permet d'éviter un dépôt très important de matériaux solides aux environs de la prise d'eau.

Les grilles inférieures, dont les barreaux sont espacés de 18 cm, entre les niveaux 154,5 et 165,0, dominent l'entrée des deux tunnels définitifs de vidange.

Les grilles supérieures, dont les barreaux sont espacés de 6 cm, entre les niveaux 169,0 et 184,0, dominent l'entrée de la galerie d'amenée.

L'entrée au tunnel est constituée par une doucine de 35,0 m de longueur et 5,0 m de hauteur.

Elle est équipée d'une vanne-wagon et d'un dégrilleur. Dans le cas peu probable de réparation de cette vanne et de nécessité d'isoler le tunnel simultanément, il est prévu d'abaisser le niveau du lac par les tunnels de vidange jusqu'à la cote du seuil d'entrée de la prise d'eau : ceci ne peut se faire qu'en étiage.

Galerie d'amenée

Diamètre fini : 6,3 m.

Epaisseur minimum du revêtement : 0,25 m (béton non armé), 0,35 m (béton armé).

Cette galerie est excavée dans de la diorite très saine à l'amont. Cette roche est de plus en plus dégradée en allant vers l'aval, et est constituée d'un schiste finement stratifié, très fracturé et décomposé à l'extrémité aval du tunnel.

Le revêtement du tunnel est en béton non armé sur sa

plus grande longueur ; il est armé aux endroits où la couverture du rocher est faible et à sa partie aval.

Niveau du seuil d'entrée au droit de la prise d'eau : 170,0.

Niveau du radier du tunnel à son extrémité amont (après la doucine) : 165,0 m.

Niveau du radier du tunnel au droit de la chambre d'équilibre : 159,10.

Longueur totale du tunnel : 1363 m.

Pente : variable entre 0 et 2,5 %.

Chambre d'équilibre

Les problèmes posés par cet ouvrage seront exposés plus en détail dans le chapitre n° IV.

Les dimensions principales de l'ouvrage adopté en définitive sont les suivantes :

Il s'agit d'une chambre d'équilibre différentielle en béton armé, exécutée en souterrain, placée à une distance horizontale de 106 m de l'axe de turbine.

Le puits de 6 m de Ø et la grande chambre de 16 m de Ø, ont des axes verticaux espacés de 32 m.

Le puits déverse dans la grande chambre par un déversoir

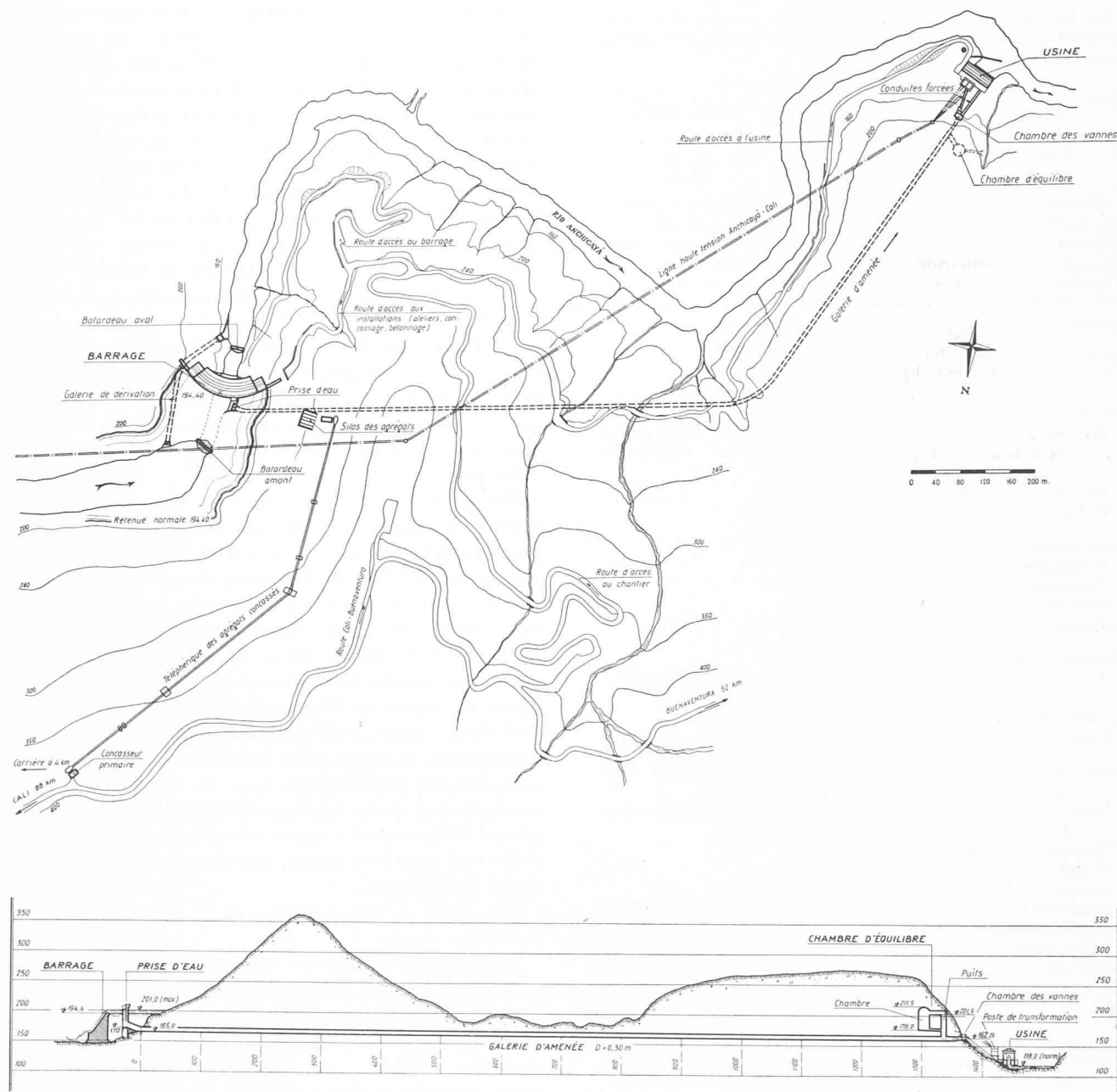


Fig. 2. — Plan général et profil en long de l'aménagement du Rio Anchicayá.

avec crête au niveau 203,50, et par une galerie supérieure, située à la cote 202. Un by-pass, constitué par une galerie de profil en fer à cheval de 2,60 m, est situé au niveau 175. La grande chambre possède aussi une galerie de décharge, située à la cote 204 m.

Chambre des vannes et conduites forcées

La chambre des vannes en béton armé est située après la culotte à trois branches qui constitue l'extrémité aval du tunnel et en tête des conduites forcées. Elle abrite trois vannes-papillons de 120" de Ø à fermeture automatique. En première étape, la branche gauche seulement est prolongée jusqu'à l'usine par une conduite forcée de 3 m de Ø.

Usine

Il s'agit d'un bâtiment en béton armé « non flottant », c'est-à-dire ne pouvant pas résister à des sous-pressions exagérées, et destiné donc à être inondé dans sa partie inférieure, lorsque le niveau aval dépasse la cote 132,0 m, correspondant à une crue de 2500 m³/sec.

Le « bloc-usine » pour un groupe a les dimensions suivantes :

Largeur	18 m
Hauteur	30 m
Longueur	9 m

Le bâtiment complet, avec les quatre groupes et la salle de montage, mesure 55 m de longueur : il est desservi par un pont roulant de 60 tonnes.

Chutes

Niveau de restitution prévu . . .	118 m
Chute nette maximum estimée . .	76 m
Chute nette minimum estimée . .	64 m
Chute nette moyenne estimée . .	72 m

Observation : Il est à remarquer que les déblais de l'usine ont surélevé notablement le lit du rio à l'aval ; il est à craindre que le niveau moyen de restitution se trouve plutôt à la cote 122,0, au voisinage des diffuseurs. Pour cette raison, le maître de l'œuvre prévoit de draguer le lit du rio à l'aval de l'usine pendant plusieurs mois, afin de récupérer quelques mètres de chute.

Équipement électro-mécanique

Nombre de groupes : 2 en première étape.

Turbines

Morgan Smith, type Francis à axe vertical, débit maximum : 21 m³/sec par groupe, puissance : 17 100 CV avec 72 m de chute nette.

Vitesse : 257 tours/minute.

Rotation : sens d'aiguille d'une montre.

Générateurs

Westinghouse.

Puissance : 15 000 KVA.

Facteur de puissance : 0,8.

Tension : 6900 volts ; 60 cycles, 3 phases.

Transformateurs

A l'air libre, à immersion d'huile et auto-réfrigération, 3 phases.

Puissance : 11 250/ 15 000 KVA.

Tension : 6 600/115 000 volts.

Ligne de transmission haute tension Anchicayá-Cali et sous-stations

Type : ligne unique à double circuit sur pylônes en charpente métallique triangulée.

Tension : 115 000 volts.

Nombre de pylônes : 98.

Longueur de la ligne : 52,5 km.

Sous-stations de transformation : la ligne haute tension atteint les environs de Cali, où le circuit droit est connecté à la sous-station de San Antonio, et le circuit gauche à la sous-station de Chipichape. Ces deux sous-stations sont connectées au réseau existant de 13 200 volts de la ville de Cali.

Agrandissement futur de l'usine électrique d'Anchicayá

Deux groupes de 20 000 KW chacun, soit 50 000 KVA, avec facteur de puissance 0,8. — Débit maximum : 40 m³/sec par groupe. La puissance totale de l'usine électrique d'Anchicayá sera portée de :

$$2 \times 12\,000 \text{ KW} = 24\,000 \text{ KW (en première étape)} \text{ à}$$

$$2 \times 12\,000 + 2 \times 20\,000 = 64\,000 \text{ KW (étape finale).}$$

Le calcul des durées des puissances montre les valeurs particulières suivantes :

Durée 100 %	16 000 KW
94 %	24 000 KW
46 %	64 000 KW

III. Description détaillée du barrage

La région où se trouve le barrage est encaissée entre de hautes montagnes couvertes d'une végétation très dense, où cependant les éboulements sont fréquents. Les pluies annuelles dépassent 6 m de hauteur, et l'humidité de l'air est presque continuellement de 100 %. Eboulements et humidité ont été la cause fréquente de grosses difficultés et de retards importants dans l'exécution des travaux.

a) Formes et dimensions

Le premier projet du barrage d'Anchicayá consistait en un barrage-voûte et, suivant ce projet, un massif de 10 000 m³ de béton fut exécuté sur la rive droite. Une étude ultérieure plus approfondie des zones des culées montra que la rive droite ne pouvait pas admettre des poussées d'arc trop fortes ; pour cette raison, on abandonna le projet du barrage-voûte. Mais pour utiliser le béton déjà exécuté, on donna au nouveau projet une forme arquée. D'autre part, l'évacuation de crues, dépassant 5000 m³/sec, a posé un problème important. Une première variante consistait en un barrage-déversoir ordinaire, renvoyant l'eau directement au pied aval, et utilisant un bassin amortisseur ; ce projet ne donna pas satisfaction lors d'essais sur modèle, en tenant compte de la topographie encaissée de l'aval du barrage. La solution consistant en un barrage avec déversoir en saut de ski, rejetant l'eau loin du pied du barrage, se montra plus satisfaisante.

Le barrage d'Anchicayá est donc un barrage poids-voûte, en béton non armé, du type déversoir. Le profil type du barrage est de forme triangulaire, avec parement amont vertical et parement aval avec fruit de 0,7. Le niveau inférieur de fondation dans le lit du rio est à la cote 141,40 ; le niveau de la crête déversante générale, 194,40 ; le niveau du couronnement au droit des deux culées extrêmes, 201,0. En plan, le barrage présente une courbe très prononcée, le parement amont ayant un rayon de 86,0 m dans la partie déversante. Les deux culées latérales sont rectilignes, de profil triangulaire, avec parement amont vertical, et parement aval avec un fruit de deux tiers ; la largeur de la crête est égale à 4 m. Le barrage est divisé en 16 plots : les plots I et II forment la culée rive gauche ; les plots XIII à XVI la culée rive droite. Les plots III à XII constituent le déversoir.

Les plots ont une longueur de 15 m, mesurée sur le parement amont.

Le plot IX comporte les tunnels définitifs de vidange et la prise d'eau lui est accolée sur son parement amont.

Les plots III et XII ont des formes en saut de ski particulières ; leurs joints avec les plots adjacents sont parallèles au lieu de converger vers le centre du barrage. Leur crête est au niveau 195,20, soit 0,80 m au-dessus de la crête normale du barrage déversoir 194,4.

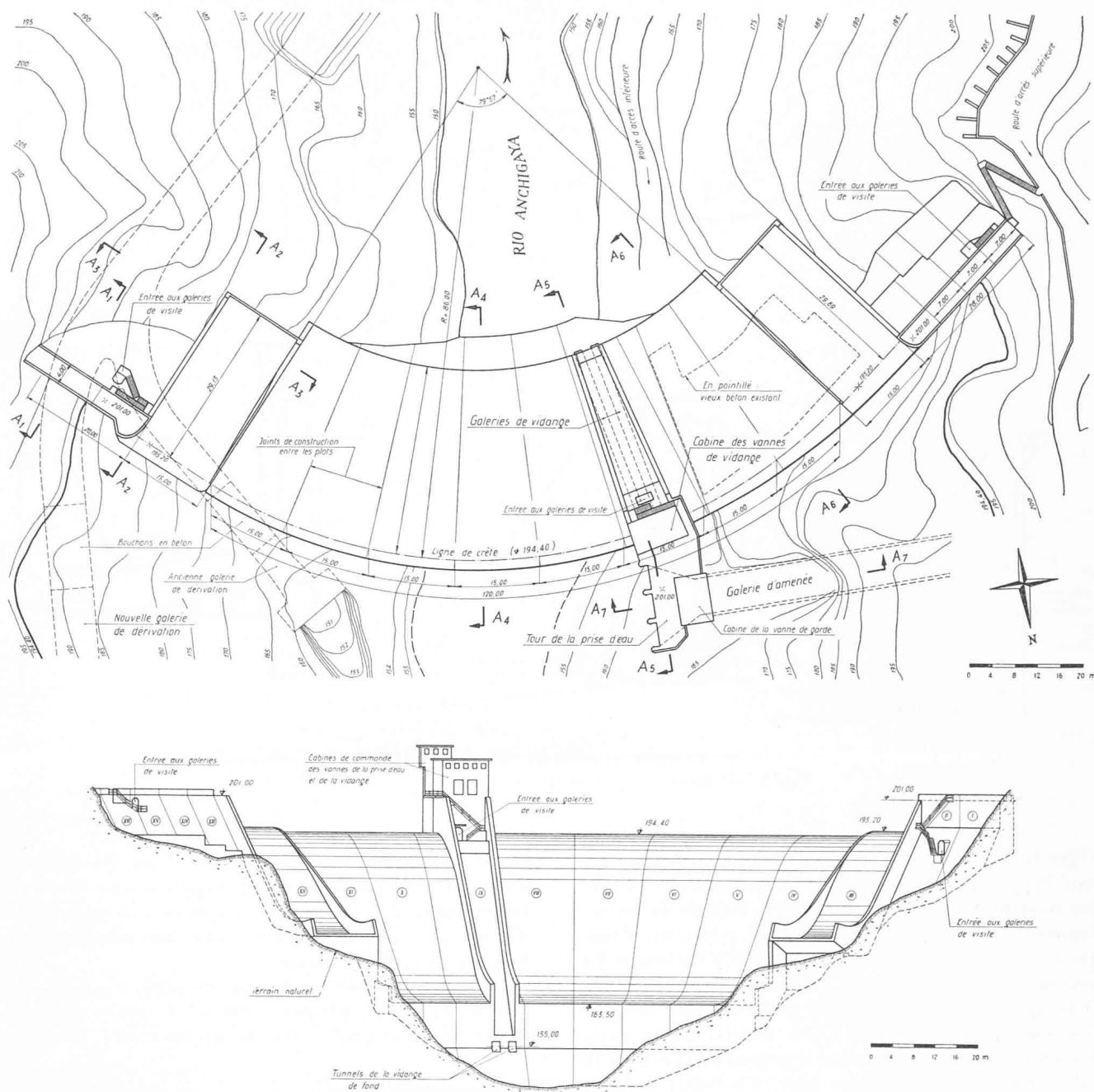


Fig. 3. — Barrage. Plan et élévation aval.

Les joints de construction entre les plots possèdent des feuilles de cuivre pour l'étanchéité, et des redents de 15 cm de profondeur et 80 cm de longueur. Ces joints sont destinés à être injectés en vue de créer un bloc monolithique de l'ensemble de tous les plots.

Le volume du barrage est de 105 000 m³ de béton, non compris le vieux béton existant du massif rive droite.

b) Fondations

La roche sur laquelle est fondé le barrage est uniquement de la diorite. Cette roche a la caractéristique des roches volcaniques et présente trois directions de fissuration : par ces fissures, l'eau chargée de gaz car-

bonique a pénétré et décomposé la roche, en lui donnant un aspect sphérique, avec des diamètres variant de quelques décimètres à 3 et 4 m. Ces formes sphériques sont séparées par des couches très minces de roche décomposée, réduite à l'état de sable.

Pour les fondations du barrage, toutes les couches décomposées ont été entièrement enlevées. En particulier dans le lit du rio, une fois enlevée la couche alluvionale de 9 m d'épaisseur, on a rencontré une roche parfaitement saine avec quelques marmites peu profondes (maximum 3 m) favorables à l'ancrage du barrage ; dans cette zone, le déroctage a été négligeable, s'agissant surtout d'enlever quelques rochers en surplomb trop prononcé.

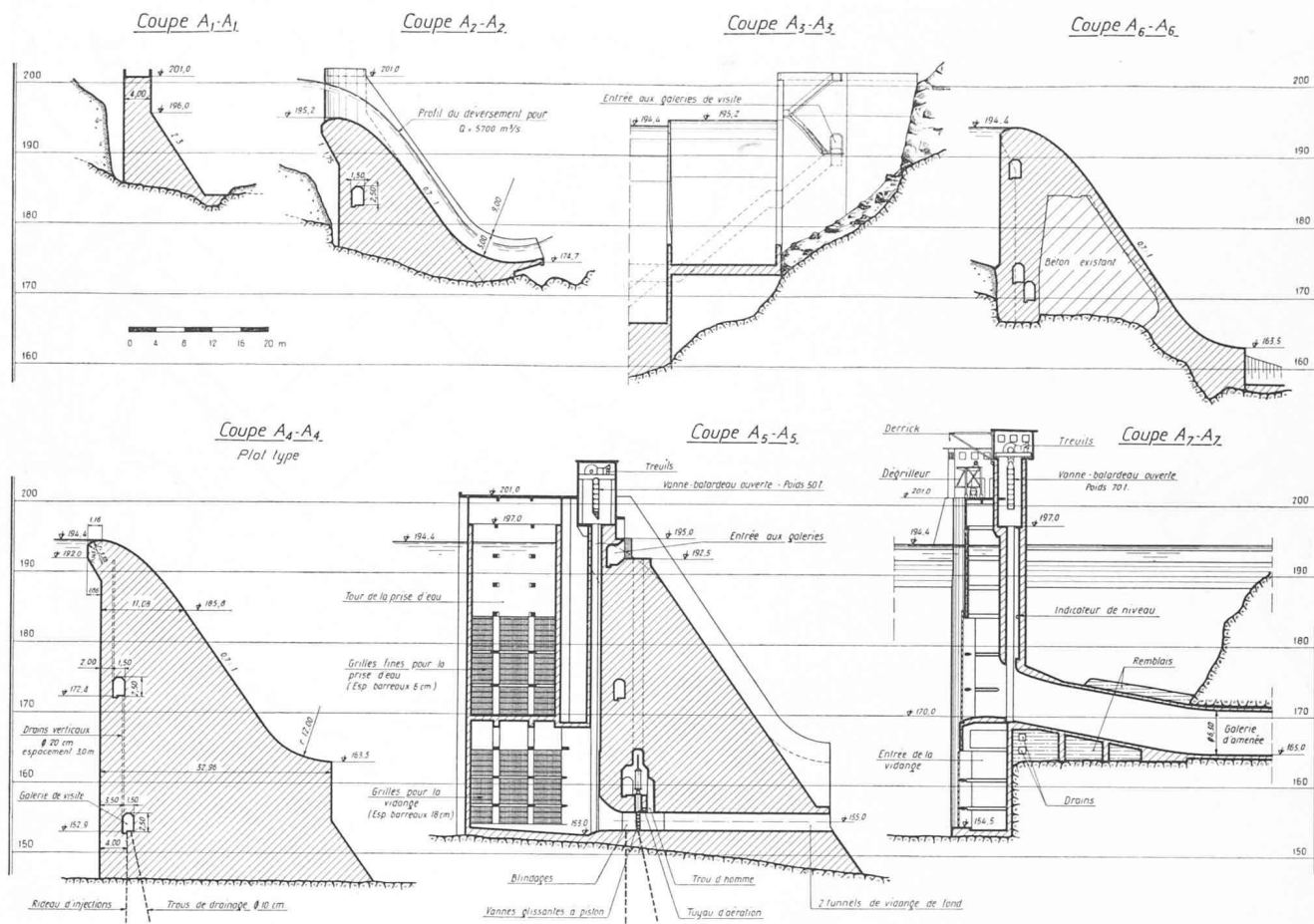


Fig. 4. — Barrage et prise d'eau. — Coupes verticales.

Sur la rive droite, où se trouve le bloc de béton exécuté entre 1944 et 1948 suivant le tout premier projet, des sondages ont été effectués, deux tunnels de reconnaissance ont été percés sous le massif, et il a été décidé que le vieux béton pouvait être englobé à l'intérieur du nouveau. Mais pour assurer une meilleure stabilité de l'ouvrage, le vieux massif étant fondé sur une roche de très mauvaise qualité, il a été décidé, d'une part, d'avancer de 4 m vers l'amont le parement amont de la culée rive droite et, d'autre part, d'exécuter le joint entre le plot IX (nouveau béton) et le plot X (vieux béton) exactement au droit du joint actuel du massif existant, et non en direction du centre du barrage, de manière que la partie déversante comportant du vieux béton, plot X et plot XI, se trouve coincée entre deux blocs plus importants, le plot IX et le plot XII.

La liaison entre l'ancien béton et le nouveau est assurée : par le blocage des deux tunnels de reconnaissance, qui constituent un robuste ancrage entre l'aval et l'amont du barrage ; par des fers d'ancrage de 1" (à raison d'un fer par m²), reliant l'ancien et le nouveau béton ; par un réseau très dense de redents, d'injections de collage et des trous de drainage sur toutes les surfaces de contact.

c) Ouvrages annexes

Dans le chapitre précédent, les ouvrages de dérivation du rio et de la prise d'eau ont déjà été décrits. Il est

intéressant de remarquer que, étant donné les dangers d'éboulements qui risqueraient d'endommager et d'enterrer rapidement la partie inférieure de la tour de prise d'eau, cet ouvrage a été placé le plus loin possible de la berge, vers le milieu du lac.

La hauteur totale de la tour de prise d'eau est de 56,0 m, et pour l'exécuter, 4500 m³ de béton armé et 400 tonnes d'armatures ont été mis en œuvre. Le tron-

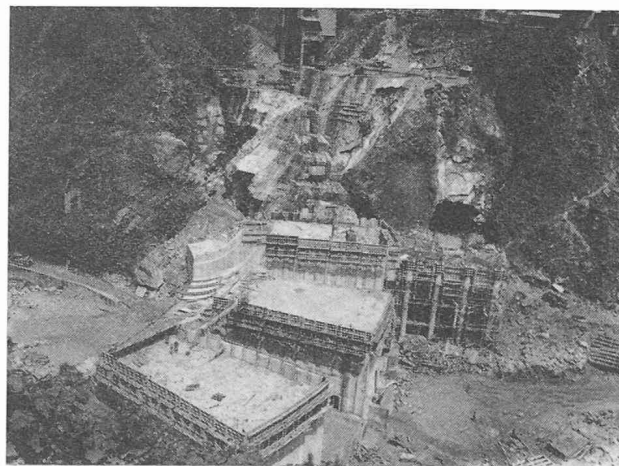


Fig. 5. — Vue générale de la rive droite.
A droite : partie inférieure de la prise d'eau et entrée de la galerie d'amenée. (Avril 1954).

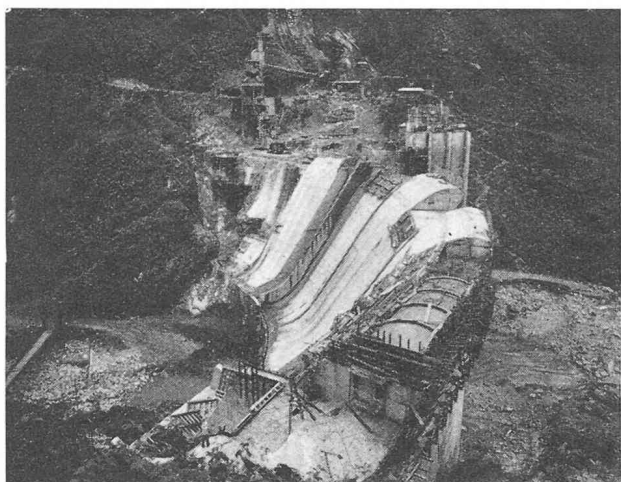


Fig. 7. — Barrage en cours de bétonnage (deux plots terminés). Novembre 1954.

gon de raccordement de la galerie d'amenée, entre la tour de prise d'eau et le souterrain, a été exécuté comme une poutre continue, sur des murs d'appui espacés de 7 m ; les efforts de sous-pression, le tunnel étant vide et le lac plein, sont absorbés par de gros ancrages profonds au droit des murs d'appui. Ce tronçon « à l'air libre » a été soigneusement remblayé, pour le protéger contre la chute, même amortie dans l'eau, de gros blocs de rocher.

Le barrage possède deux tunnels définitifs de vidange dans le plot IX, de section rectangulaire égale à $1,83 \text{ m} \times 1,52 \text{ m}$, l'axe des tunnels étant à la cote 155,0. Chaque tunnel est fermé par une vanne à tiroir coulissante, manœuvrée dans une cabine aménagée à l'intérieur du barrage, et pouvant être actionnée en eaux vives ; un batardeau du type vanne-wagon peut être mis en place depuis la tour de prise d'eau, en fermant simultanément les deux tunnels de vidange. La capacité des deux vidanges est de $130 \text{ m}^3/\text{sec}$ à pleine charge.

Le batardeau amont du barrage étant soumis à des submersions pendant les travaux, on a aménagé deux tunnels de vidange provisoires de $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ chacun, pour évacuer les crues et les infiltrations de l'amont à l'aval, un tunnel dans le plot VII avec le radier à la cote 151,0, l'autre dans le plot VIII avec le radier à la cote 152,0. Ces deux galeries sont fermées définitivement au moment de la mise en eau, par deux vannes en béton que l'on fait tomber brusquement de 4,0 m de hauteur dans le courant d'eau.

Deux galeries de visite de 2,50 m de hauteur pour 1,50 m de largeur, avec accès par les culées, sont prévues dans la partie amont du barrage, la galerie inférieure suivant les fouilles à environ 4,0 m au-dessus des fondations, la galerie supérieure à la cote 172.

Le drainage du corps du barrage, le long du parement amont, est réalisé par des drains de 20 cm de diamètre, espacés de 3 m : ces drains sont prolongés, après l'exécution du voile d'injections, par des forages de 3" de diamètre, espacés de 3 m, dans la roche de fondation. Les eaux de drainage et d'infiltration sont recueillies par l'intermédiaire des galeries dans un seul puisard, et

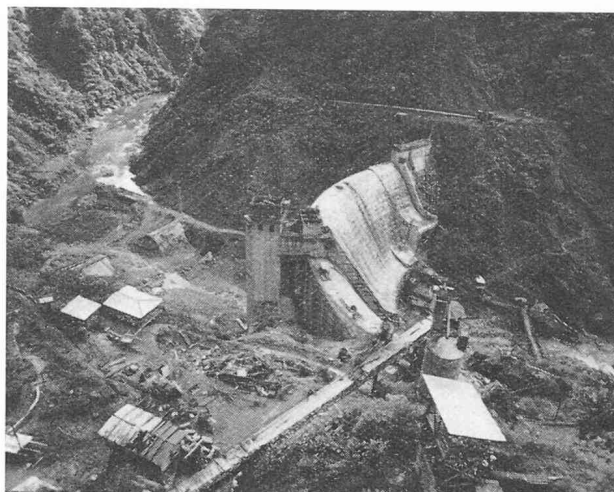


Fig. 9. — Vue générale du chantier du barrage. (Février 1955.)

A gauche : batardeau amont ouvert pour la mise en eau.

amenées à l'aval par un tuyau de 12" à la cote 153. En cas de montée du niveau de l'eau à l'aval du barrage, les eaux sont forcées par une pompe.

d) Injections

Trois réseaux d'injections ont été exécutés :

1. Un voile d'étanchéité sous le parafoille amont du barrage, sur une profondeur de 24 m, avec un trou tous les 3 m en moyenne.
2. Des injections de consolidation et de collage dans le rocher de fondation des culées rive gauche et rive droite, et dans les fissures locales rencontrées pendant les fouilles.
3. Les injections des joints verticaux des plots du barrage, chaque joint étant divisé en deux ou trois étages d'injection, suivant la hauteur du barrage, par des lames de cuivre : dans les joints verticaux entre les plots du barrage, la pression d'injection a été de 7 à 8 kg/cm², maintenue pendant cinq minutes au moins : l'absorption moyenne de ciment a été de 500 kg C.P. pour des surfaces de joints de 400 m².

e) Bases du calcul du barrage et dosage des bétons

Pour le calcul de la stabilité du barrage, renversement et glissement, on a considéré les forces suivantes :

1. Poids propre du barrage P .
Poids spécifique du béton : 2,4 t/m³.
2. Poussée de l'eau E , niveau du lac à la cote maximum 201,0.
3. Sous-pression S .
Hypothèses : S totale au droit du parement amont.
40 % de S totale au droit des drains.
0 au droit du parement aval.

Pour la sous-pression, on se base sur un niveau du lac à la cote moyenne 198,0 m et non à la cote maximum 201,0, en considérant que les variations de la sous-pression sont lentes en comparaison des variations du niveau de l'eau.

4. Poussée D des dépôts solides dans le lac. — Les données concernant les apports solides du bassin du río Anchicayá sont fragmentaires et sujettes à caution. —

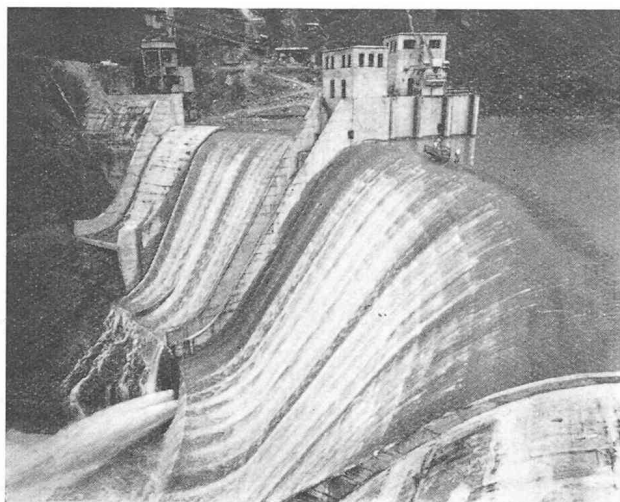


Fig. 11. — Barrage terminé déversant.
Les vidanges de fond sont ouvertes. (Mai 1955).

Par ces quelques données et par la comparaison avec des bassins semblables de Colombie, on peut s'attendre à un apport solide au moins égal à 200 000 m³ par an. Admis $D = 0,7 Y \text{ t/m}^2$ avec

Y = profondeur au-dessous de la cote 170,0 m.

5. Tremblements de terre. — Dans cette région occidentale de Colombie on n'a, jusqu'à présent, enregistré aucun tremblement de terre grave, bien que de légères secousses sismiques soient fréquentes, dues à l'activité de volcans.

On a tenu compte de forces horizontales égales à 10 % des forces verticales.

Pour la poussée de l'eau, on admet une surpression :

$$E' = 0,083 \sqrt{hy}$$

h = hauteur maximum du barrage.

y = profondeur sous le niveau du lac, 198,0 m.

Les dosages en ciment des bétons du barrage sont les suivants :

220 kg C.P. par m³ : corps du barrage.

290 kg C.P. par m³ : parements amont et aval.

350 kg C.P. par m³ : béton armé.

IV. Chambre d'équilibre

La chambre d'équilibre est du type différentiel. La première difficulté rencontrée a été celle relative à son emplacement, qui ne pouvait pas varier beaucoup : comme nous l'avons dit précédemment, l'extrémité aval de la galerie d'amenée se trouve dans un éperon très escarpé, surplombant la chambre des vannes et l'usine, constitué par un schiste finement stratifié et fissuré, d'une stabilité générale douteuse ; de plus, une grosse faille presque verticale traverse perpendiculairement la galerie d'amenée à une trentaine de mètres à l'amont de la chambre des vannes. Dans les galeries et les puits d'avancement, la roche décomposée montrait une tendance très nette à une désintégration rapide. Au cours du percement de l'extrémité aval de la galerie d'amenée, un effondrement en forme de pyramide s'est produit au voisinage du puits de la chambre, et il a fallu le bloquer immédiatement en injectant plus de 1000 m³ de béton.

De ce qui précède, on a déduit qu'il fallait exécuter la chambre d'équilibre comme un ouvrage stable pour lui-même, en essayant de réduire au minimum les dimensions des souterrains à exécuter.

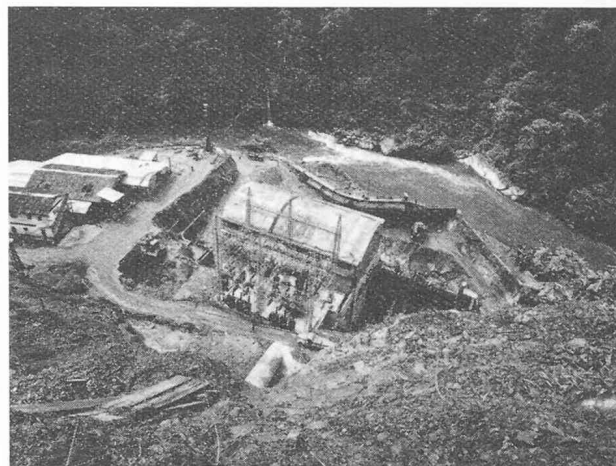


Fig. 8. — Usine et poste de transformation.
(Janvier 1955).

Le premier projet prévoyait une chambre d'équilibre différentielle de 15 m de Ø seulement, avec un puits concentrique de 6 m. Cette solution, étudiée uniquement au point de vue « coup de bélier », ne donnait pas satisfaction au point de vue de la stabilité de réglage.

Un deuxième projet, étudié en tenant compte de tous les aspects du problème, à savoir : grandes manœuvres instantanées et stabilité de réglage, courbe de rendement de groupes électro-mécaniques, variations de la chute, montra qu'il fallait une chambre d'équilibre différentielle, avec cuve de 22 m de Ø et puits de 6 m, concentriques.

Ce projet, satisfaisant au point de vue hydraulique, était pratiquement inexécutable dans la roche de mauvaise qualité décrite plus haut.

Une solution très intéressante eût été de construire une galerie inclinée de 6 m de Ø ; l'inclinaison étant choisie de manière que la section horizontale soit la même que celle de la chambre de 22 m de Ø. Malheureusement, l'exécution de cette galerie inclinée d'une longueur d'environ 300 m aurait prolongé les délais d'exécution et aurait nécessité une étude sur modèles réduits. Ces deux faits amenèrent l'administration à écarter cette troisième solution et à proposer la réalisation de la chambre d'équilibre en deux étapes, chaque étape consistant en un puits vertical de 15 m de Ø environ, comme l'indique le schéma de la figure 10.

Un seul puits de 15 m de Ø ne pouvant pas donner en toute sécurité la stabilité de réglage à charge maximum, le maître de l'œuvre, en proposant cette solution, acceptait de limiter la production d'énergie en limitant au besoin les charges en première étape.

On put estimer l'ordre de grandeur de ces limitations de charge :

7 000 à 8 000 kW par groupe en marche isolée

10 000 à 11 000 kW par groupe marchant en parallèle avec une puissance disponible à Cali de 4000 à 5000 kW au minimum (usine thermique).

Par ailleurs, toutes dispositions constructives étaient prises pour que l'on puisse exécuter, sans arrêt d'exploitation, si la nécessité s'en faisait sentir, une deuxième

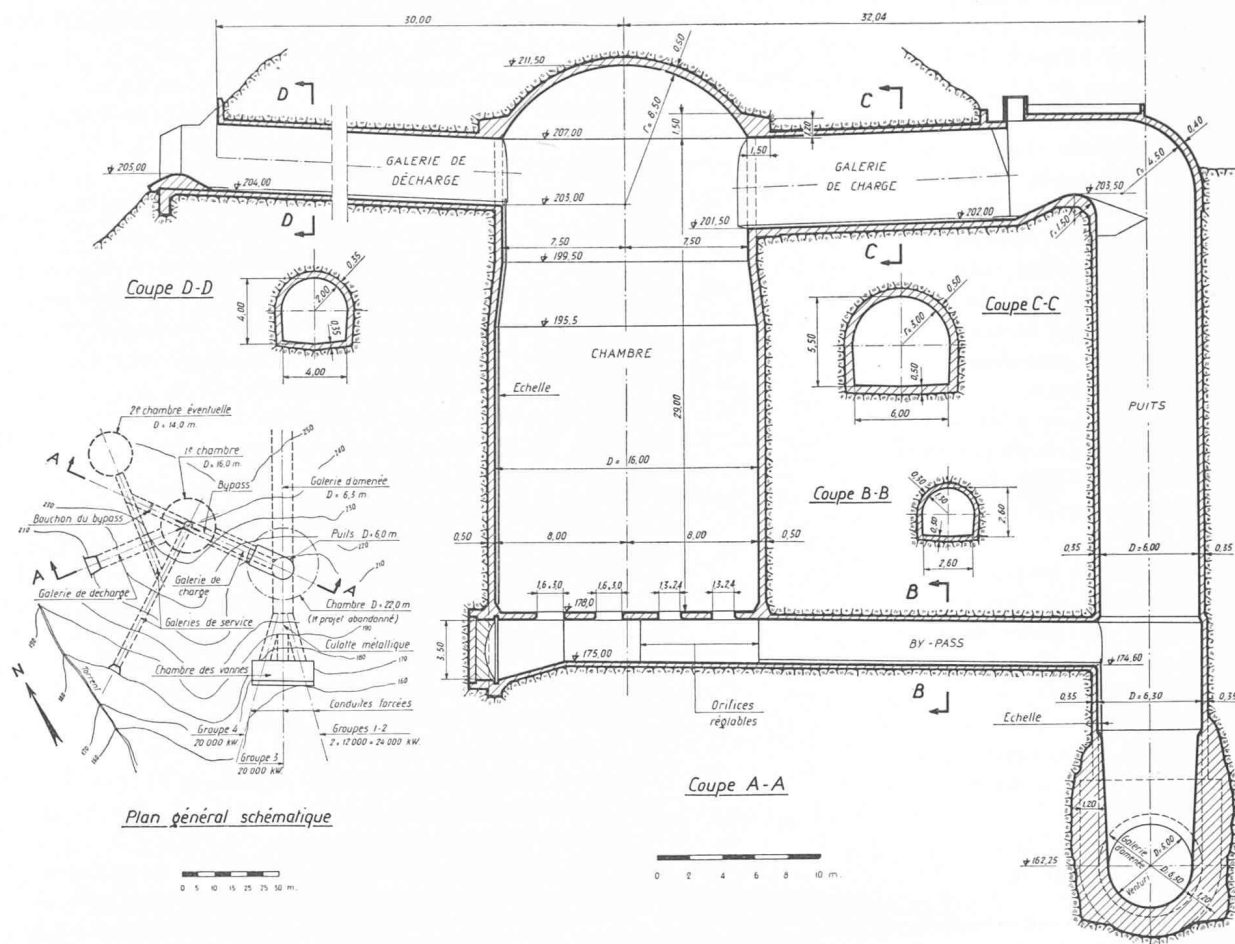


Fig. 10. — Chambre d'équilibre.

cuve verticale de 15 m de diamètre, connectée à la première chambre, de manière à ce que les deux surfaces horizontales s'ajoutent sans « déphasage » des oscillations du plan d'eau.

Les dispositions constructives du projet d'exécution sont indiquées dans la figure 10.

Un Venturi, réduisant de 6,3 m à 5,0 m le diamètre de la galerie d'amenée et du puits à leur intersection, permet d'améliorer la stabilité du réglage.

L'axe vertical de la grande chambre est à 32 m de l'axe du puits et la chambre est placée vers l'intérieur de la montagne, dans la zone du terrain la moins mauvaise; elle a 33,5 m de hauteur et son diamètre est de 16,0 m sur la plus grande partie et réduit à 15,0 m dans la partie supérieure.

Le niveau du déversoir du barrage étant à la cote 194,4 m, le plan d'eau sera presque toujours dans la zone de diamètre 16,0 m.

D'autre part, la topographie du terrain a permis d'exécuter une galerie en fer à cheval de 4,0 m, longueur 22,0 m, radier à la cote 203,0, utilisée comme galerie de service pendant les travaux, et comme décharge lors des grandes manœuvres au cours de la future exploitation.

Les manœuvres extrêmes prévues pour le calcul des oscillations maxima compte tenu des pertes de charge, sont :

Montée maximum

Statique maximum : 199,0.

Fermeture totale instantanée de quatre groupes, soit $\Delta Q = 121 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Niveau maximum dans la chambre : 208,0.
(La galerie de décharge entre en action.)

Descente maximum

Statique minimum : 185,0.

Ouverture instantanée d'un groupe de la deuxième étape, les quatre étant en marche, soit $Q_0 = 121 \text{ m}^3/\text{sec}$; $\Delta Q = 40 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Niveau minimum dans la chambre : 179,5.

V. Conclusion

En guise de conclusion, nous exposerons succinctement quelques aspects particuliers relatifs à l'exécution des travaux de cet aménagement.

a) Béton du barrage

Les essais de résistance, exécutés suivant les normes américaines, en écrasant des cylindres de 12 pouces de hauteur et 6 pouces de diamètre, ont donné des résultats défavorables pendant toute la période des travaux, avec des résistances à 28 et 90 jours d'environ 30 à 40 % inférieures à celles requises normalement. Rappelons que dans presque tous les cahiers des charges américains, ce ne sont pas les dosages de béton qui sont imposés, mais les résistances minima à obtenir.

Une petite amélioration a été obtenue en réduisant au maximum le sable fin de rivière et en le remplaçant

par du sable concassé d'une part, et d'autre part par un produit entraîneur d'air. D'ailleurs, l'emploi de l'entraîneur d'air « Darex AEA », avec un pourcentage vérifié d'air occlus de 4 %, s'est avéré très intéressant à deux autres points de vue : la mise en place du béton, qui était très difficile étant donné la forme lenticulaire des agrégats concassés, et l'étanchéité du béton fini.

Toutes les études possibles ayant été effectuées et les moyens normaux d'amélioration appliqués, la raison principale de la qualité médiocre des résistances du béton a été trouvée dans la qualité du ciment et en particulier dans deux facteurs déterminants :

- moutures grossières ;
- âge insuffisant.

Ces deux facteurs ne pouvant pas être corrigés, étant donné l'obligation d'employer du ciment de production locale, il a été nécessaire de vérifier *a posteriori* que le béton du barrage présentait un degré de sécurité suffisant.

C'est ainsi que, au moyen d'une sondeuse à diamants, plusieurs centaines de carottes de béton « durci dans l'ouvrage » ont été prises dans différents endroits du barrage. Les dimensions de ces carottes étaient :

Diamètre : $d = 4''$.

Longueur variable entre d et $3d$.

L'écrasement de ces carottes, dont l'âge variait entre deux et quinze mois, a donné des résultats tout à fait satisfaisants.

b) Mise en eau

Pour la mise en eau du barrage, les opérations prévues étaient les suivantes :

- Ouverture du batardeau amont.
- Création d'un éboulement à l'entrée de la galerie de dérivation.
- Bétonnage d'un bouchon à l'aval de cet éboulement (les quatre tunnels de vidange, deux définitifs et deux provisoires, ménagés dans le corps du barrage, restant ouverts).
- Fermeture des vidanges provisoires par deux vannes en béton que l'on fait tomber dans le courant d'eau.
- Montée du niveau du lac réglée par les deux vannes définitives de vidange.

Toutes ces opérations devant durer deux mois environ, la période prévue pour la mise en eau avait été choisie correspondant à un trimestre d'étiage.

Or, au cours des injections de la clé du bouchon de la galerie de dérivation, une crue de 1000 m³/sec., exceptionnelle par son intensité et par sa durée, remplit complètement le lac en trois heures (42 mètres de hauteur, mais 5 millions de m³ seulement). Si d'un côté le bouchon de la dérivation, à peine exécuté mais travaillant par sa masse, a tenu, l'une après l'autre les deux vannes en béton des vidanges provisoires ont été arrachées de leur dispositif de suspension, par la grande

dépression due à la vitesse de l'eau dans les galeries accompagnée d'efforts de vibrations exagérées.

Les deux vannes en béton remplirent cependant leur rôle et par leur chute obturèrent presque parfaitement les entrées des vidanges : les infiltrations rémanentes ont été arrêtées en faisant descendre quelques bennes de béton sous l'eau et en les ouvrant exactement à l'amont des portes en béton. Des bouchons de soutènement ont été aussi exécutés à l'aval de ces portes.

Deux observations ont été faites à cette occasion :

- La montée de l'eau de 40 m en trois heures n'a provoqué aucune déformation instantanée mesurable de la crête du barrage ; par contre, vingt-quatre heures après, un déplacement de 0,6 mm vers l'aval de la clé du barrage a été mesuré, qui par la suite n'a subi aucun changement.
- Les infiltrations sous pression autour des portes en béton ont usé en quelques heures le béton des portes elles-mêmes et des rainures voisines, sur 3 à 4 cm de profondeur, à savoir jusqu'aux armatures.

c) Exécution de la chambre d'équilibre

Nous avons mentionné au chapitre IV que cet ouvrage se trouvait situé dans une zone de rochers de stabilité douteuse. Pour cette raison, tous les travaux souterrains ont été exécutés par petites sections, en commençant systématiquement par les voûtes et les coupoles.

En particulier, la chambre de 16,0 m de diamètre a été exécutée en commençant par la coupole : une fois bétonnée toute la ceinture, la coupole elle-même a été construite « par secteurs opposés ». La chambre cylindrique a été exécutée par tronçons descendants, de 2 à 4 m de hauteur au maximum, avec pattes d'éléphant à chaque reprise, le stross n'étant abattu qu'une fois les anneaux complètement bétonnés.

Malgré toutes les précautions, au commencement des fouilles du puits de 6,0 m de diamètre, dont la plate-forme supérieure débouchait à l'air libre, et de la galerie de charge, un éboulement de 20 000 m³ de roches pourries modifia complètement à cet endroit l'aspect de la montagne : il s'ensuivit la nécessité d'adopter une nouvelle méthode d'exécution. Le grand coude vertical, constitué par la galerie de décharge et par la partie supérieure du puits, a été alors construit en partant de la grande chambre vers l'extérieur, comme un souterrain stable pour lui-même, en l'exécutant sous le cône d'éboulement et armé en conséquence. Une fois ce coude exécuté, le puits de 16,0 m a aussi été construit par anneaux descendants, jusqu'au niveau de la galerie d'amenée.

BIBLIOGRAPHIE

Cours de cinématique. — Tome I : Cinématique du point et du solide. Composition des mouvements, par René Garnier, membre de l'Institut, professeur à la Faculté des sciences de Paris. 3^e édition. Paris, Gauthier-Villars, 1954. — Un volume 16×25 cm, ix + 244 pages, 96 figures. Prix : broché, 4000 fr. français.

Cet ouvrage reproduit des leçons données à la Faculté des sciences de Paris. Son cadre est exclusivement théo-

rique ; il est délimité par les notions fondamentales de vitesse, d'accélération, etc., envisagées pour le point isolé, ou pour le solide, et par leurs applications géométriques.

L'auteur renouvelle complètement l'enseignement de la Cinématique ; il expose un nombre considérable de résultats, dont la plupart n'avaient fait l'objet d'aucune présentation didactique ; ces résultats sont d'ailleurs établis par une méthode très simple et à la portée de tout lecteur ayant suivi le premier cycle de l'enseignement supérieur.