Le Barrage de la Girotte

La Girotte dam

PAR E. JAULIN

English synopsis, p. 527.

Le barrage de la Girotte, bien qu'en service depuis 1947 et arasé au niveau maximum de la retenue le 15 août 1948, a été inauguré officiellement le 20 octobre 1949. D'un type nouveau, il possède des particularités nombreuses et remarquables; il est donc intéressant de préciser son rôle, les caractéristiques principales de sa conception et les raisons qui y ont conduit, ses innovations techniques et l'essentiel de l'histoire de sa construction.

Examinons d'abord, très brièvement, sa raison d'être. Reportons-nous pour cela à la carte (fig. 1) et au schéma (fig. 2). On y voit essentiellement deux vallées, celle du Dorinet, affluent de celle du Doron de Beaufort, situées dans le Beaufortin, des Alpes françaises.

A la fin de la première guerre mondiale, la Société d'Electro-Chimie, d'Electro-Métallurgie et des Aciéries Electriques d'Ugine décidait, pour la desserte de ses usines métallurgiques et le service de ses clients, ville de Lyon, ville de Chambéry, Compagnie P.-L.-M., de réaliser l'équipement hydro-électrique total des vallées du Beaufortin.

Grâce à la présence, en tête de la vallée du Dorinet, du lac de la Girotte, réservoir naturel de 29 millions de m³, l'énergie produite par la vallée pouvait être régularisée, du moins en partie, en fournissant en période de basses eaux, par vidange du réservoir, l'énergie d'appoint nécessaire au maintien en activité des usines d'Ugine et du Service des distributions publiques.

Au cours des années 1921 à 1932, la Société d'Electro-Chimie complétait l'équipement de la vallée, déjà réalisé par les trois chutes aval, et obtenait un ensemble de chutes toutes en cascades et sans hiatus le long du torrent. Ce sont :

*Puissance
installée :*

BELLEVILLE, à la cote 1213..	22.000 kW
HAUTELUCE, — 1028..	7.900 kW
BEAUFORT, — 756..	22.000 kW
VILLARD, — 638..	8.500 kW
QUEIGE, — ..	8.800 kW
ROENGERS, — 459..	5.700 kW
VENTHON, — 355..	7.700 kW

L'usine de Belleville, fonctionnant comme régulateur du réseau, se trouve directement branchée sur le lac de la Girotte qu'elle utilise sur une chute de 507 m maximum.

La prise sous-lacustre, réalisée par percement en 1923, permet de descendre le niveau du lac jusqu'à la cote 1642, utilisant ainsi une tranche d'eau de 80 m d'épaisseur et représentant un cube de 29 millions de m³.

Mais le lac de la Girotte n'a qu'un tout petit bassin versant (4,34 km²), bien insuffisant pour le remplir. Or, il a la forme d'un tas de sable renversé, d'une hauteur de 100 m, dont la grande base a environ, à la cote 1723, 1.200 m sur 400, ce qui lui donne, comme nous l'avons vu, un volume d'environ 29.000.000 de m³ utiles.

Pour que ce lac joue son rôle de réservoir saisonnier alimentant et régularisant les sept usines successives, il fallait donc lui assurer à lui-même une alimentation suffisante, puis augmenter sa capacité.

Voici la suite des divers travaux qui ont été réalisés pour atteindre ce but :

1° En 1923 :

a) Percement sur le flanc de la montagne de Belleville, à la cote 1642, d'une galerie d'en-

viron 300 m de longueur qui prend les eaux du lac à environ 20 m au-dessus du fond et les conduit par des conduites forcées, posées sur le flanc de la montagne, à l'usine de Belleville, au pied de la montagne du lac, à la cote 1213.

b) Construction du déservoir du lac à la cote 1723, au bord du ravin qui descend le long de la montagne jusqu'au Dorinet.

A ce moment, la capacité utilisable du lac, des

cotes 1642 à 1723 est de 31.650.000 m³; mais son remplissage est bien insuffisant car il consiste :

— Dans son bassin versant (4,34 km²) et le ruisseau de Colombes (2,82 km²) dont les eaux

FIG. 1. — BARRAGE DE LA GIROTTE. Plan de situation.

qui ont été captées se perdent en partie dans les terrains perméables de son lit; à eux deux, ils fournissent chaque année — et assez irrégulièrement — environ 8 millions de m³;

— Dans le pompage, par une importante installation réalisée à l'usine de Belleville, de l'eau du Dorinet pendant ses crues, et son refoulement à 500 m de hauteur dans le lac; ce pompage fournit annuellement environ 10 millions de m³, qui coûtent chacun 2 kWh, alors que leur restitution aux usines d'aval rapporte 2,7 kWh par m³. En outre, les kWh employés au refoulement pendant les crues sont excédentaires, tandis que ceux restitués en hiver pendant la période de production insuffisante ont une valeur très grande.

2° En 1932 :

Captation des eaux du Bon-Nant à la cote 1910, à l'est du lac, par une galerie souterraine à faible pente de 4,7 km de long.

A ce moment, tous les moyens de remplissage totalisent environ 35 millions de m³ par an, qui sont encore bien insuffisants et très irréguliers, car ils dépendent uniquement des précipitations et de la fonte des neiges, essentiellement variables, comme on le voit à l'examen de la figure 3 qui donne les courbes extrêmes des niveaux atteints par l'eau du lac à cette époque.

Les deux dernières étapes ont été menées en même temps et ont eu pour but d'augmenter, d'une part, les apports d'eau, d'autre part, la capacité du lac.

L'augmentation des apports d'eau fut réalisée par l'adduction des eaux de l'émissaire du Glacier de Tré-la-Tête (18 km² de bassin versant), à l'extrémité sud-ouest du Massif du Mont-Blanc, par le moyen d'une prise d'eau sous-glaciaire réalisée à la cote 1.934 environ et raccordée par une galerie de 5,3 km à la prise d'eau du Bon-Nant (voir les *Annales des Ponts et Chaussées*, juillet-août 1945, et l'*Annuaire Hydrologique de la France*, année 1943). Nous ne pouvons nous laisser entraîner, quel qu'en soit l'intérêt, dans la description détaillée de ce remarquable ouvrage auquel restera attaché le nom de M. WAEBER, Ingénieur en Chef des Services Hydro-Electriques de la Société d'Electro-Chimie, qui l'avait étudié et construit et qui y trouva une mort tragique en été 1949, alors que faisant dans la prise d'eau sous-glaciaire une conférence à un groupe de visiteurs, il tomba accidentellement dans le torrent où son cadavre ne fut retrouvé que plusieurs centaines de mètres plus loin.

Cet ouvrage devait être commencé en 1939, mais à cause de la guerre, il ne le fut qu'en

Fig. 2. — AMÉNAGEMENT DU BON-NANT, DE L'ARLY ET DU DORON DE BEAUFORT.
Profil en long synoptique.

1941, fut mis en eau provisoirement en 1943 et définitivement en 1944.

« Grâce à son origine essentiellement glaciaire, ce torrent présente un caractère complémentaire

et ce fut l'objet du barrage de la Girotte — commencé en août 1942, mis en eau partiellement en 1947, complètement en 1948, et entièrement terminé en 1949.

FIG. 3. — COURBES ENVELOPPES EXTRÊMES DU REMPLISSAGE DU LAC AVANT L'ADDUCTION DES EAUX DU GLACIER DE TRÉ-LA-TÊTE.

de celui des autres affluents du lac : fusion accrue en années chaudes et, partant, généralement sèches (1). »

Cet ouvrage terminé, l'approvisionnement annuel d'eau au lac doit atteindre — assez régulièrement — au moins 70 millions de m³.

Restait donc à augmenter la capacité du lac —

LE BARRAGE

Nous avons vu que, sur trois de ses côtés, le lac est bordé de montagnes qui prolongent ses talus jusqu'à des altitudes de 1.900 à 2.000 m, mais que le quatrième côté, d'environ 500 m de longueur, est une crête qui déverse à 1.723. C'était donc cette crête qu'il fallait relever. La figure 4 donne la courbe des capacités utiles du lac au-dessus de la prise d'eau.

(1) M. WAEBER. — *Annales des Ponts et Chaussées*, juillet-août 1945.

La plus grande capacité possible était désirable; il n'y avait d'autre limite que celle imposée par les possibilités du site et par le montant des dépenses dont le maximum était fixé par les

du projet et son exécution, des conditions particulièrement délicates.

L'emplacement du barrage était une crête étroite et très irrégulière dont les talus de part

FIG. 4. — COURBES DE REMPLISSAGE DU LAC DE LA GIROTTE. Capacités au-dessus de la prise.

résultats que le barrage permettrait d'obtenir. Ces résultats s'expriment par une production annuelle portée au minimum à 200 millions de kWh au lieu de 100 maximum, et la régularisation du fonctionnement des sept usines d'aval.

La nature et surtout la forme des terrains à l'emplacement du barrage, et sa position au sommet d'une crête, créaient, pour l'établissement

et d'autre étaient inclinés à environ 40°; sa longueur était d'environ 500 m et son altitude variait, d'ouest en est, de 1.720 à 1.744, sa forme en plan n'était pas rectiligne, la concavité, d'ailleurs légère, étant tournée vers la retenue.

Il ne pouvait être question d'un barrage-voûte à cause de la trop grande distance entre les appuis latéraux possibles.

Il ne pouvait être question non plus d'un barrage en remblais rocheux qui, en bien des points, aurait coiffé la crête et dont les talus, dans les parties basses de la crête, seraient descendus jusqu'à la vallée, 500 m plus bas.

Le premier projet fut donc un barrage-poids du type Maurice Lévy. Plusieurs variantes en furent étudiées pour une arase dont le maximum possible était à 1.750. Cette dernière donnait, pour la retenue à 1.749, une capacité utilisable de 46.000.000 de m³ pour un cube de béton qui eût été d'au moins 185.000 m³ et un cube de fouilles de 90.000 m³ (ces cubes sont estimés actuellement compte tenu de la connaissance acquise du terrain sous-jacent), soit une augmentation de la retenue de 78 m³ par m³ de béton. C'était une conception dangereuse, car, ainsi que le montrent les schémas de stabilité ci-après (1), son équilibre était à la merci des sous-pressions causées par des infiltrations. Or, les terrains sur lesquels il devait être construit étaient hétérogènes : généralement constitués par des couches du trias, irrégulièrement superposées au lias, ils comportaient des bancs ou des poches de formes variables de « cargneules » argileuses, de schistes dont certaines très feuilletées, surmontant une assise de rocher sain (quartzites ou « calcaires métamorphiques silicifiés »). L'éten-

due et les formes de ces couches ou poches dangereuses (glissantes ou perméables) ne pouvaient évidemment être exactement délimitées; elles étaient décelables surtout sur une longueur d'environ 200 m vers la rive droite où se trouvait en outre un dangereux à-pic ébouléux de la montagne, au voisinage de l'ancrage. Il semblait donc bien imprudent de confier aux injections et aux drainages seuls de ce terrain la sécurité d'un tel ouvrage ainsi perché. En outre, la nécessité d'atteindre le rocher sain sur toute la vaste surface d'appui du barrage-poids conduisait à des terrassements très importants.

M. CAQUOT suggéra la solution « voûtes multiples » qui a permis, avec 118.000 m³ de béton, et 34.000 m³ de fouilles, de porter la retenue à la cote 1.753,50, assurant, avec une très large sécurité, une capacité de 50.000.000 de m³, soit 156 m³ supplémentaires par m³ de béton, capacité minimum indispensable pour que le lac puisse jouer son rôle d'accumulation régulatrice.

Mais les barrages à voûtes multiples qui avaient été construits à cette date (juillet 1942) étaient tous en béton armé. Ils différaient très sensiblement de la conception qui a été réalisée à la Girotte. En outre, à cette époque, non seulement le ciment était très rare, mais l'acier l'était plus encore. Il ne pouvait donc être question de construire un ouvrage en béton armé qui aurait nécessité au moins une dizaine de milliers de

(1) Cf. la « Notule hydraulique » à la page 580.

FIG. 5. — BARRAGE DE LA GIROTTE. Plan général.

tonnes d'acier d'armatures. Il ne restait donc aucune solution possible parmi les solutions connues.

Enfin, et pour compléter les conditions que devait remplir le barrage de la Girotte, il devait être fait d'un béton ne se détériorant pas par le froid, la température y atteignant en hiver, et

dessus de zéro (86 à 104 F) et que le parement amont du barrage est face au sud; ainsi, ce béton devait pouvoir supporter sans se détériorer, pendant des périodes continues de plusieurs mois, en outre du gel, des écarts de température journaliers pouvant atteindre environ 60 degrés centigrades (108° F). Naturellement, ceci n'est rigoureusement vrai que pour la partie supérieure qui reste toujours découverte, mais cette condition n'en existait pas moins pour tout le béton du barrage, car on devait prévoir le cas où la retenue resterait basse pendant tout un hiver, et d'autre part, tout le parement aval restait exposé aux grands froids.

La solution que conçut M. CAQUOT — qui fut calculée et dessinée sous la direction et son contrôle par les bureaux d'études des Entreprises Métropolitaines et Coloniales et construite par cette entreprise — fut donc celle d'un barrage à contreforts autostables et voûtes multiples en béton plein sans armature. Son tracé en plan peut être indifféremment rectiligne, convexe, concave ou sinueux; il peut donc bien docilement s'adapter au terrain, toute sinuosité n'apportant que quelques complications supplémentaires d'études. Ses principes essentiels sont les suivants :

1° Indépendance de tous ses éléments;

2° Le parement incliné est le parement amont, de sorte que la poussée hydrostatique concourt à la stabilité de l'ouvrage;

3° Ses éléments sont :

- a) des piles indépendantes et individuellement stables à tous moments de leur construction et après leur construction, que la retenue soit pleine ou vide,
- b) des voûtes indépendantes qui s'appuient librement sur leur soubassement, d'une part, et d'autre part sur les sommiers que leur offrent les piles;

4° Tous ces éléments, piles ou voûtes, ont des épaisseurs relativement faibles;

5° Les piles sont régulièrement espacées et leur écartement, qui fixe la portée des voûtes, est déterminé en fonction de la hauteur du barrage.

A la Girotte, les piles sont écartées de 24 m d'axe en axe et ont une épaisseur de 7,60 m au soubassement, et de 6,40 m en élévation;

6° Les voûtes sont à double courbure, étant limitées par des surfaces d'intrados et d'extrados constitués en bas par des sphères, au milieu par des cylindres, en haut par des tores, ce qui redresse heureusement à leurs extrémités les efforts auxquels elles sont soumises, et augmente leur résistance, particulièrement aux chocs.

FIG. 6. — DÉTAIL DES OUVRAGES.

FIG. 7. — DÉTAIL DES OUVRAGES.

pendant quatre mois consécutifs, moins 20 à moins 30° C (— 4 à — 22 F), alors que, pendant cette même période, l'ensoleillement et la réverbération élèvent cette température pendant quelques heures de très nombreuses belles journées de neige, jusqu'à 35 à 40 degrés centigrades au-

PHOTO N° 1. — LE BARRAGE TERMINÉ VU D'AMONT.

A la Girotte, leur épaisseur est de 2 m en soubassement et 1,70 m en élévation, ce qui est d'ailleurs surabondant.

On voit que ce type de barrage n'a de commun avec le type à voûtes multiples en béton armé que l'inclinaison du parement amont qui fait concourir la poussée hydrostatique à la stabilité de l'ensemble; ce dernier type pouvait, à la rigueur, se concevoir à la Girotte, mais il a été écarté à priori, nous l'avons dit, en raison du manque d'acier.

Les différences principales entre ces deux types de barrages à voûtes multiples sont :

1° Les éléments, piles et voûtes ont, dans le type Girotte, une masse beaucoup plus grande que dans le type béton armé, et cette masse concourt à la stabilité;

2° Dans le type Girotte, tous les éléments, piles et voûtes, sont indépendants les uns des autres, les soubassements seuls formant monolithe; il n'y a donc aucun effort antagoniste, aux appuis des voûtes, susceptible de s'opposer aux

déformations élastiques que les voûtes peuvent subir du fait des changements de poussées ou de température. Etant libres, elles jouent le rôle d'un clapet, d'autant plus fortement appuyé sur son siège que la poussée qu'il supporte est plus forte. Et quand la retenue est vide, leur poids les applique sur leur siège. Des joints élastiques bitumineux d'étanchéité, très simples, disposés à l'amont, le long des joints voûtes-piles, permettent ces mouvements, d'amplitude d'ailleurs très faible (2 à 3 mm au maximum) tout en s'opposant aux infiltrations. L'expérience a vérifié pleinement cette conception.

Au contraire, dans le type en béton armé, tous les éléments sont solidaires les uns des autres, et cette solidarité est obligatoirement renforcée par de nombreuses pièces d'entretoisement. ce qui conduit, en définitive, à un ouvrage très compliqué où le béton est en plus petite quantité mais coûte beaucoup plus cher. Même sans la pénurie d'acier, ce type était d'autre part peu indiqué à la Girotte en raison des grands froids susceptibles de détériorer davantage des parois

PHOTO N° 2. — LE BARRAGE TERMINÉ VU D'AVAL.

minces que des murs épais. Le béton de haute qualité qui a été fait à la Girotte résisterait sans doute en parois minces, mais à l'origine, son problème n'était que posé mais non encore résolu, et il n'eût pas été sage d'ajouter encore cette difficulté à celles qui existaient déjà.

Enfin, dans le barrage à voûtes multiples en béton armé, la masse étant moindre, le moment résistant au renversement dû à cette masse doit être obtenu par augmentation du bras de levier, c'est-à-dire de l'empattement des piles, et pour cela, à la Girotte, la place manquait.

Nous avons vu que les éléments qui ont été réalisés avaient des épaisseurs relativement faibles (1,70 m pour les voûtes, 6,40 m pour les piles), suffisantes pour permettre l'emploi de gros béton (150 mm) et suffisamment faibles pour éliminer complètement les sous-pressions. Si l'on admet, en effet, qu'une fissure accidentelle se produise dans une voûte (ce qui n'est d'ailleurs pas, pratiquement, réalisable), il ne peut d'abord rien se passer parce que la condition de Maurice LÉVY est réalisée en tous points du parement amont (la contrainte de compression dans le béton est supérieure à la poussée hydrostatique), mais si l'on admet cependant que, par cette fissure, l'eau pénètre : ou bien, la fissure étant peu profonde et la condition de Maurice LÉVY étant réalisée, la fissure ne s'approfondira pas et il ne se passera rien puisque les épaisseurs de voûtes sont surabondantes, ou bien la fissure traversera la voûte sur toute son épaisseur de 1,70 m, mais alors l'eau s'écoulera par le parement aval, ne sera plus en pression, et il n'y aura pas de sous-pression, ou, plus exactement, la sous-pression se sera exercée pendant l'ouverture de la fissure et aura disparu aussitôt après; il en sera résulté seulement une légère

FIG. 8. — PERSPECTIVE DU BARRAGE, vue d'aval.

fuite à travers la fissure, aisément réparable, nullement dangereuse; et encore cette hypothèse ne correspond-elle qu'à une « vue de l'esprit » volontairement pessimiste et n'ayant aucune probabilité. Quant aux piles, elles ne sont pas en contact avec l'eau, sauf le long d'une petite partie de leur parement amont entre les appuis des voûtes pour laquelle le même raisonnement que ci-dessus est applicable. Si l'on admet enfin que des infiltrations se produisent dans le terrain et amènent l'eau sous les fondations des piles, cette eau n'a que la moitié, au maximum, de l'épaisseur de la pile, soit 3,80 m à parcourir pour s'échapper dans le terrain libre entre deux piles et y apparaître; ainsi, non seulement elle

PHOTO N° 3. — LE BARRAGE EN COURS DE CONSTRUCTION.

ne peut exercer de sous-pression sous les piles, mais encore elle émerge très rapidement dans des parties facilement visibles du terrain, ce qui permet de localiser l'infiltration et d'y remédier aisément et vite.

Ainsi, l'on voit que les faibles épaisseurs des éléments et l'écartement des piles suppriment d'une façon absolue tout danger de sous-pression, même en cas de déficience des injections, lesquelles ne sont pas supprimées pour autant mais peuvent être considérablement réduites et, en tout cas, ne jouent plus qu'un rôle de sécurité complémentaire et non plus le rôle principal et essentiel de sécurité qu'elles ont dans le barrage poids où elles doivent être réalisées non seulement sous toute l'immense surface d'appui du barrage, mais encore étendues généralement vers l'amont particulièrement lorsque le terrain est failloux ou perméable, poussées partout à re-

fus et accompagnées d'un vaste réseau de drainage.

Ce type de barrage supprime également tous les travaux ci-après indispensables dans un barrage-poids :

- drainage du parement amont pour remplacer la condition de Maurice LÉVY irréalisable dans le barrage poids;
- drainage dans la masse du béton;
- joints de dilatation avec leurs injections, leurs drainages et leurs feuilles de cuivre;
- refroidissement du béton pendant sa prise et son durcissement, inutile dans le barrage à voûtes multiples en raison des faibles épaisseurs de béton en œuvre.

D'autre part, il est bien moins dangereux de faire, pour les piles, des fouilles isolées et largement espacées les unes des autres, que de déchausser, comme dans le barrage-poids, une énorme masse de terrain; en outre, les empattements étant sensiblement les mêmes dans les deux cas, le cube total des fouilles se trouve automatiquement réduit de la quantité correspondant aux vides entre les piles du barrage à voûtes multiples. Enfin, la pression totale sur le terrain qui, en définitive, est sensiblement la même dans les deux cas, est supportée, dans le cas du barrage à voûtes multiples, par une surface beaucoup plus petite que dans le cas du barrage-poids. Il en résulte que la pression par cm^2 sur le terrain est beaucoup plus grande, bien qu'elle reste toujours inférieure — et avec un coefficient de sécurité au moins égal à 6 — à celle que le terrain peut supporter : cette pression unitaire élevée améliore la stabilité et s'oppose aux sous-pressions; cela est si vrai qu'à la Girotte on a renoncé à poursuivre les injections de collage béton-rocher parce qu'au cours de plusieurs tentatives on a constaté qu'elles ne pénétraient pas, ce qui pouvait être dû, à la fois, au fait que le bétonnage des fonds de fouilles était réalisé correctement, et aussi à la forte pression exercée par les piles sur leur surface d'appui du rocher.

Enfin, il est arrivé qu'en certains endroits la crête était trop étroite pour que l'empattement nécessaire de la pile correspondante puisse être trouvé; cette difficulté eût été difficilement résolue avec un barrage poids et l'a été aisément par le report d'une partie des efforts sur les piles voisines et quelques armatures judicieusement disposées.

On voit que la solution conçue par M. CAQUOT, qui a été réalisée, et qui est née de la réunion des solutions apportées à toutes les exigences du problème, a, non seulement permis de le ré-

soudre au-delà de ce qu'aurait permis la meilleure des solutions connues, mais encore, avec une sécurité beaucoup plus grande. Nous en rappelons ci-après les caractéristiques essentielles :

Cote du couronnement.....	1.754
Niveau le plus bas des fondations.....	1.703
Longueur totale en crête.....	560 m
Murs d'ancrage aux extrémités..	2
Nombre de piles.....	17
Nombre de voûtes.....	18
Cube total de béton.....	118.000 m ³

FIG. 9. — VUE EN COUPE DE LA PILE N° 7.

Mais le barrage de la Girotte présente encore une autre particularité remarquable : il est prévu pour pouvoir être rehaussé ultérieurement de façon à porter son couronnement à la cote 1.763. On a prévu pour cela d'utiliser le procédé imaginé et mis au point par M. l'Inspecteur Général COYNE et qui consiste à ancrer l'ouvrage au terrain par des faisceaux de câbles descendus dans des puits dont les dimensions sont calculées en fonction des charges appliquées aux câbles et de la nature du terrain; ces puits sont ensuite remplis de béton qui enrobe les câbles, lesquels, après avoir été tendus, ont leur partie supérieure noyée dans le béton coulé dans une chambre d'ancrage ménagée à cet effet dans l'ouvrage. Toutes les piles du barrage de la Girotte possèdent leurs « puits Coyne » et leur chambre d'ancrage qui permettront, quand on le voudra, de porter le couronnement à la cote 1.763 et le volume de la retenue à 59.000.000 de m³.

Enfin, il est prévu d'utiliser sur place la différence de niveau qui existe entre le niveau du lac et l'arrivée de la galerie de Tré-la-Tête qui débouche sur la rive droite du lac et près de son extrémité opposée au barrage, à la cote 1.888,60; cette différence de niveau varie suivant la hauteur du lac entre 140 et 180 m. Pour cela, une conduite forcée partant de l'orifice de la galerie alimentera deux turbines de 7.400 kW chacune, placées dans une usine aménagée entre les piles n°s 1 et 2 du barrage. Ces turbines, alimentées à la cote 1.716 restitueront l'eau au lac à la cote 1.712 et fonctionneront donc normalement quand le niveau du lac sera plus bas que cette cote et en contre-pression quand il sera plus haut. La production supplémentaire annuelle escomptée de cette nouvelle usine est de 18 millions de kWh. Cette solution est rendue réalisable à peu de frais parce qu'une telle usine trouve aisément sa place entre deux piles consécutives et sous la voûte qui les réunit.

EXÉCUTION DES TRAVAUX

L'exécution des travaux a été subordonnée aux conditions particulières suivantes :

1° L'EPOQUE. — Le contrat des travaux a été signé le 16 juillet 1942 pour un commencement immédiat d'exécution. On était en période d'occupation, c'est-à-dire de pénurie, rationnement, comités d'organisation, monnaie-matières rarement honorées, formalités, surveillances, contrôles, ligne de démarcation, etc.; presque pas de matières premières, de machines, de matériel, de transport.

PHOTO N° 4. — L'HIVER AU LAC DE GIROTTE.

2° LE CLIMAT. — L'enneigement du chantier dure environ quatre à cinq mois, entre novembre et mai. Il est variable suivant les années, mais pendant les années d'occupation, qui ont été très froides, la neige au lac de la Girotte a été très abondante : pendant l'hiver 1944-1945, qui fut le plus neigeux, il y est tombé 18 mètres de neige fraîche dont il restait encore 3,50 m de neige tassée au début de mai 1945. Pendant ces périodes, les routes sont aussi enneigées et, ce qui est pire, verglassées.

Ainsi, pendant ces quatre à cinq mois, les travaux principaux étaient arrêtés et les équipes aussi réduites que possible. On faisait surtout des travaux intérieurs d'entretien de matériel, de préparation de la saison prochaine, et pour les travaux extérieurs, malgré tout indispensables, on enlevait la neige au fur et à mesure qu'elle tombait.

3° LE SITE. — Le hameau de Belleville, au pied de la montagne qui porte le lac, est à la cote 1.200, à l'extrémité d'une route de 35 km

PHOTO N° 5. — LE SITE DU LAC DE GIROTTE.

de long, qui vient d'Albertville à la cote 350, comporte 350 virages et ne va pas plus loin. Le lac, et par conséquent le chantier, sont au sommet de cette montagne à la cote 1.700 et ne sont desservis par aucune route. Quant au hameau de Belleville, il ne comportait, outre l'usine hydro-électrique, que quelques chalets isolés dans la montagne; le plus proche village, Hauteluce, un bien petit village, en était éloigné de 6 km, et Beaufort-sur-Doron, plus important, de 12 km. Matières et matériel ont été acheminés depuis la gare d'Albertville par cette route jusqu'à Belleville et de là montés au chantier par deux téléphériques : l'un, à va-et-vient, pouvant porter une charge de 7.500 kg, l'autre, continu, réservé au ciment, d'un débit de 15 t/h. Le premier servait en même temps au transport du personnel non logé au chantier.

Quand les travaux commencèrent, le téléphérique à va-et-vient existait déjà, fort heureusement, ayant été construit par la Société d'Electro-Chimie pour ses précédents travaux au lac. Il n'y eut qu'à le transformer et le renforcer et à construire le continu. Il existait aussi au lac un confortable chalet qui rendit de grands services tout au début, et deux gros compresseurs totalisant 250 ch, tout installés, qui avaient seulement besoin d'être remis en état. Enfin, élément des plus précieux, on pouvait disposer, pour chauffage, éclairage et force motrice, de courant électrique à peu près à discrétion, à condition, naturellement, d'en installer la transformation et la distribution.

Ces éléments de démarrage, relativement très importants, étaient cependant bien peu de chose par rapport à ce qui était nécessaire, d'autant plus que la route d'Albertville à Belleville, en état médiocre et de profil dur, était particulièrement sévère pour les véhicules à gazogène du temps de guerre.

L'isolement de ce chantier où travaillèrent, pendant sept ans, de 400 à 700 personnes, créait l'obligation de le rendre complètement autonome. Le climat et les travaux également rudes faisaient une seconde obligation d'assurer au personnel une nourriture saine et abondante. Aussi, parmi les installations de chantier et sans pour cela retarder les techniciens, on ne s'attacha pas seulement au problème du logement, mais on apporta un soin tout particulier à celui de la nourriture, à la fois de première importance et spécialement difficile à l'époque des rutabagas!...

Pour cela, on construisit cuisines, réfectoires, salles à manger, mais aussi caves à vins, à légumes, à pommes de terre, salles d'abattoir, chambre froide pour conserver la viande, porcherie, fabrication de charcuterie, salle de fumage (grosse consommation de jambons et saucissons nés au lac), etc... Ces installations n'étaient pas super-

flues, elles étaient indispensables; elles n'étaient pas coûteuses, mais économiques, car elles ont permis de distribuer quelque deux millions de repas copieux et sains à des prix toujours inférieurs d'au moins 30 % à ceux de chantiers analogues, et elles ont permis surtout de nourrir très bien le personnel... pendant les dures années 1942 à 45 et même 46 où bien peu de Français peuvent se vanter d'avoir mangé à leur faim.

Nous décrirons brièvement les installations dont la plupart des éléments sont maintenant bien connus. Elles comportaient trois groupes :

1° A ALBERTVILLE :

- a) En gare : déchargement par pompe Fuller mobile de 20 t/h du ciment en vrac, et son stockage dans 6 silos de 50 tonnes chacun, munis de tous leurs accessoires et permettant le chargement rapide des camions sous les silos;
- b) Déchargement du matériel;
- c) Bureaux et magasins de transit et garage.

2° A BELLEVILLE :

- Chalets pour logements de cadres mariés.
- Magasins.
- Fosse à ciment pour 300 t, avec pompe Fuller fixe de 20 t/h pour chargement des trémies d'alimentation du téléphérique continu à ciment.
- Stations de départ du téléphérique va-et-vient de 7.500 kg et du téléphérique continu à ciment.
- Garage.
- Cantine.

3° AU LAC :

- Village ouvrier, sur la pente douce rive droite, à la cote 1.860 environ, réuni au chantier par un plan incliné.
- Logements de maîtrise sur la rive gauche, à la cote 1.760 environ.
- Cuisines, réfectoires, salles à manger, dépendances.
- Bureaux d'entreprise.
- Bureaux du maître de l'œuvre,
- Laboratoire.
- La carrière, sur la montagne voisine du chantier, à l'aval, côté rive droite, avec le concasseur primaire faisant des produits tout-venant 0-150, et sa grue pivotante d'alimentation de 16 tonnes, à benne preneuse, permettant un stockage des produits de carrière.

Installation de lavage des produits tout-venant du primaire par un gros trommel-laveur, rampes à eau de 200 m³/h d'eau à 3 kg, crible rinceur et pompe à déblais pour refouler dans le lac l'eau boueuse du lavage. Les pompes sont placées à la cote 1.640 à la sortie de la galerie de prise et aspirent dans la partie de conduite

— Installation de concassage et bétonnage pour le gros béton, comprenant :
— Usine de concassage pouvant débiter 100 t à l'heure de produits classés, de 0 à 150 mm, suivant les proportions définies par la courbe de granulométrie adoptée, avec installations de dépoussiérage.

FIG. 10. — BARRAGE DU LAC DE LA GIROTTE. Equipement du chantier.

1. Dortoir.	15. Réfectoire.	29. Convoyeur.
2. Infirmerie.	16. Laboratoire.	30. Concasseur primaire.
3. Dortoir.	17. Transformateurs.	31. Grue de 16 tonnes.
4. W.-C.	18. Contrôle E.D.F.	32. Carrière.
5. Dortoir.	19. Téléferique.	33. Atelier de réparation.
6. —	20. Bureaux E.M.C.	34. Bâtiment de la maîtrise.
7. —	21. Menuiserie.	35. Bâtiment petite maîtrise.
8. —	22. Parc à blocs.	36. Chalet du lac.
9. —	23. Plateforme bétonnière.	37. Compresseurs et câble.
10. —	24. Skip collecteur.	38. Soute à ciment.
11. Transformateur.	25. Skips doseurs.	39. Concasseur n° 5.
12. Buanderie, douches, W.-C.	26. Stockage.	40. Bâtiment granulateurs.
13. Dortoir.	28. Stock tout venant du concasseur primaire.	41. Plateforme bétonnière.
14. Magasins.		42. Baraque à ciment.

forcée située dans cette galerie; elles refoulent dans le trommel laveur à la cote 1.740.

— Convoyeur à courroie de 70 m de long, transportant le tout-venant du primaire, lavé, au tas de stockage alimentant l'usine de concassage.

— Installation de dosage automatique, système Hobbs, conduisant aux trémies des bétonnières, gâchée par gâchée, les produits classés suivant les quantités prescrites.

— Installation de bétonnage, pouvant produire 50 m³/h de béton de 150 mm

PHOTO N° 6. — LE CHANTIER DE LA GIROTTE AU DÉBUT DES TRAVAUX.

et comportant deux malaxeurs Richier TB 2500 faisant chacun des gâchées de 1.500 litres de béton en place, à la cadence possible de 16 gâchées à l'heure chacun (cette cadence correspond à un malaxage très poussé d'environ 3 minutes par gâchée).

- Installation de concassage et bétonnage pour mortier et béton de 35 mm pour mortier de reprises, béton armé, blocs de parement, comprenant :
- Usine de concassage, pouvant débiter 20 t/h de produits classés 0-40 mm prélevés sur les 15-50 de l'usine principale, avec dépoussiérage.
- Installation de bétonnage, comprenant 2 bétonnières Richier 75 ch et pouvant produire 10 m³/h de béton ou mortier, avec doseurs automatiques.
- Fosse à ciment de 300 t recevant le ciment du téléphérique continu et le distribuant, par pompe Fuller fixe et tuyauteries, aux silos des usines de bétonnage.

- Voie de roulement des grues de mise en place du béton et des coffrages
- Voies de roulement des tracteurs, porteurs des bennes de béton.
- Station de pompage à la cote 1.640, à la sortie de la galerie d'amenée, avec aspiration dans les conduites forcées.
- Distributions d'eau.
- Salle des compresseurs (320 ch.).
- Distribution d'air comprimé.
- Ateliers d'entretien (mécanique, soudure, etc.).
- Ateliers de charpente bois.
- Ateliers d'entretien et d'installations électriques.
- Installations de fabrication, stockage et manutention des blocs de parement.
- Transformateurs et réseaux de distribution haute et basse tensions, etc.

En outre, un important matériel de chantier comprenant principalement :

PHOTO N° 7. — LA CONSTRUCTION DU BARRAGE.

- Coffrages métalliques pour les voûtes sphériques, cylindriques et toriques;
- Tracteurs Fenwick électriques à accumulateurs, avec trois postes de charge;
- 10 grues Weitz-Loebb P 45, de 1.500 k à 30 m de portée et 30 m de hauteur;
- Lorries plats, spéciaux pour transport des bennes à béton;
- Bennes à béton, de 750 litres, en place, spéciales pour dépoter du béton sec, etc.

La préoccupation principale, à l'origine, était de réaliser avec certitude le béton qui devait résister aux conditions de gel que nous avons indiquées. En 1942, on avait bien peu de données en France sur cette question et aucune liaison avec l'étranger n'était possible. On décida donc d'étudier le problème sur place. Pour cela, un laboratoire important et très complet fut installé sur le chantier même, et, en outre d'un agencement très développé pour l'étude des bétons, il fut muni de tout ce qui était nécessaire pour faire des essais de gel sur du béton réel si possible (150 mm) ou, au moins, sur le béton

le plus gros possible afin de réduire les erreurs dues aux effets de parois des moules et d'éviter des extrapolations bien peu recommandables en cette matière.

L'équipement du laboratoire permettait la confection d'éprouvettes prismatiques jusqu'à $28 \times 28 \times 112$ cm, cubiques jusqu'à 30 cm, cylindriques jusqu'à 50 cm de diamètre et 30 cm de hauteur.

L'épreuve de gel consiste, en enfermant les éprouvettes dans un mouleau étanche en tôle, à plonger le tout dans une cuve contenant une solution de chlorure de calcium incongelable à -25° , température à laquelle on opère, qui est refroidie par un serpentin contenant de l'ammoniac comprimé et dont la température est égalisée par un agitateur hélicoïdal. La température des éprouvettes était indiquée par un thermomètre enregistreur combiné avec un ohmmètre qui, recevant les résistances électriques d'un fil de cuivre provenant d'une sonde noyée dans le béton de l'une des éprouvettes, les transformait en degrés de température en les enregistrant.

Pour chaque cycle d'expérience, les éprouvettes restent douze heures dans la cuve de gel; elles sont alors plongées, démunies de leur mouleau, dans une cuve de dégel contenant de l'eau réchauffée par des résistances électriques où elles restent douze heures et où elles s'imprègnent d'eau. Retirées de la cuve de dégel, elles peuvent être remises dans leur mouleau pour recommencer un nouveau cycle.

Les épreuves de gel ont comporté au début 50 cycles, puis 100, et même jusqu'à 250. On conçoit que de telles épreuves sont efficaces : elles sont plus sévères que celles qui seront imposées par la nature au barrage, parce qu'elles comportent une vitesse de refroidissement et de réchauffement bien supérieure, parce que les éprouvettes sont soumises au gel après complète imbibition d'eau, ce qui ne sera jamais le cas du béton du barrage, même en cas de baisse rapide du plan d'eau de la retenue, à cause de l'excellente compacité et de la très faible porosité de ce béton.

Elles ont en outre une réelle valeur comparative et ont fourni des indications précieuses qui ont permis de réaliser le béton cherché plusieurs années avant que ce problème n'ait été étudié et approfondi dans les laboratoires modernes, depuis la Libération.

Plus de 200 bétons différents furent essayés en trois ans, ce qui n'empêcha pas le laboratoire de continuer ses travaux lorsque la composition optima fut obtenue et mise en œuvre. Sur tous ces bétons, de très nombreux essais furent faits sur éprouvettes soumises au gel et sur

éprouvettes témoins (conservées dans l'eau à la même température que celle de la cuve de dégel pour que les résultats soient comparables).

Nous ne pouvons entrer dans le détail de leur exposé qui déborderait trop le cadre de cet article. Nous ne pouvons que citer les principales recherches :

- Etude des ciments et choix du meilleur et du plus régulier.
- Analyses granulométriques des agrégats et études de nombreuses compositions, continues, discontinues, semi-discontinues.
- Compacités.
- Etude des vides des agrégats, du rôle de la pâte liante, calculs des quantités de pâte liante, vérifications expérimentales.
- Bétons à ossature (M. VILLEY).
- Essais de flexion, compression, perméabilité, percussion.
- Etude de l'influence des éléments inertes très fins.
- Vérifications nombreuses du rôle capital de

$$\frac{C}{E} \cdot$$

- Plasticité, maniabilité.

PHOTO N° 9. — CONSTRUCTION DES VOUTES.

- Vérifications de l'effet de paroi.
- Etude de la vibration.
- Conditions pour qu'un béton résiste au gel, etc.

Toutes ces recherches ont été faites avec une absolue rigueur scientifique, chaque question à étudier étant soigneusement isolée en ayant soin de ne faire varier que la variable à étudier et de maintenir les autres constantes, et en étudiant à fond, par la théorie et par de nombreuses vérifications expérimentales, tous les phénomènes à éclaircir.

Cette sèche et très incomplète énumération montre ce que peut être la fécondité d'un laboratoire bien aménagé et bien dirigé quand il est installé sur le chantier même. Mais cette présence est nécessaire également quand on doit produire des bétons de hautes qualités, non seulement pour le contrôle permanent de sa production industrielle, mais aussi pour la détermination précise de sa composition en vue du but à atteindre, en raison du nombre considérable

PHOTO N° 8. — LA VIBRATION DU BÉTON.

de variables dont certaines sont locales et non déterminées d'avance, concernant le ciment, les agrégats, l'eau de gâchage, les modes de production et de mise en place, la température, etc., nombre considérable qui interdit de fixer à priori des normes complètes et invariables. Nous rappelons seulement les résultats obtenus par les études du laboratoire et sa collaboration avec le chantier pour l'exécution d'un béton résistant au gel :

Granulométrie :

1° Suppression aussi complète que possible des éléments très fins ($< 0,3 \text{ mm}$) des agrégats, obtenue par soufflage et aspiration à travers les jets d'agrégats sortant des différentes goulottes des installations de concassage; installation mise en service en 1945.

2° Granulométrie des agrégats suivant une courbe semi-discontinue assurant une compacité des agrégats seuls, égale à 0,77. Cette composition tout en assurant, comme on le voit, une

compacité satisfaisante, permet un béton suffisamment maniable bien qu'il soit très sec.

Rapport Ciment-Eau :

Le rôle prépondérant du rapport $\frac{C}{E}$ (ou $\frac{E}{C}$) du poids de l'eau de gâchage au poids de ciment, dégagé depuis longtemps par FERET, a été confirmé pour la résistance du béton au gel. Par le soin apporté aux dispositions du matériel de fabrication du béton, de son transport, de sa mise en place, de sa vibration, on a toujours fait à la Girotte un béton ayant un $\frac{C}{E}$ égal, au minimum, à 1,8, alors que, jusque-là, ce rapport atteignait rarement, sur les meilleurs chantiers, 1,4.

COFFRAGES

On craignait, à l'origine, que les formes des voûtes ne conduisent à des difficultés insurmontables de coffrages. En fait, ces formes ont, en

PHOTO N° 10. — COFFRAGES.

effet, nécessité des études spéciales et importantes, mais qui ont abouti à des solutions pratiques en coffrages métalliques, pas beaucoup plus coûteuses que celles des surfaces planes habituelles. Cette légère augmentation de dépense de coffrages est bien inférieure à l'économie résultant de la diminution du cube de béton, et largement justifiée par les avantages que procurent, au point de vue de la résistance, les courbures multiples des voûtes.

PHOTO N° 11. — MISE EN PLACE DES BLOCS DE REVÊTEMENT.

Les surfaces planes ont reçu à la Girotte une solution nouvelle appliquée aux parements des piles. Cette solution (brevet L.-J. DUBOIS) consiste à fabriquer à l'avance des blocs ayant une face coffrante qui deviendra parement et une queue qui maintient le bloc en place dans la masse de béton coulée derrière lui. Ceux de la Girotte avaient une face de $1,40 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, et

comportant $0,600 \text{ m}^3$ de béton, pesaient un peu moins de 1.500 kg . Ils pouvaient donc aisément être mis en place à la grue. On les place en rangées superposées derrière lesquelles on verse et vibre le béton. Il n'y a donc plus de coffrages, les blocs en ont tenu lieu. Mais ils sont restés en place et leur face rectangulaire constitue le parement de l'ouvrage fini. Ils sont fabriqués en béton fin, à dosage riche, dans des moules posés par leur face rectangulaire sur une table vibrante, par l'intermédiaire d'un fond de moule en tôle d'acier. Ainsi, leur face de parement est parfaitement lisse et, par conséquent, d'un très bel aspect, mais, de plus, elle est étanche, et cela permet en outre d'opposer aux grands froids un béton de parement meilleur encore que le gros béton, déjà satisfaisant, de la masse du barrage. Cette solution originale a donc réalisé le but qu'on a partout cherché à atteindre à la Girotte, par une technique soigneusement étudiée, de l'économie et de la qualité.

CONCLUSION

Le barrage de la Girotte est d'un type nouveau conçu pour répondre à des conditions spéciales, mais qui, par ses avantages, est susceptible de nombreuses applications. Ses caractéristiques essentielles sont la sécurité, l'économie et l'adaptabilité à beaucoup de cas où les autres solutions sont ou impossibles, ou dangereuses, ou trop coûteuses.

Sa situation et l'époque de sa construction ont accumulé les difficultés. Leurs solutions heureuses ont apporté des progrès substantiels dans la technique des bétons et dans celle de la construction des barrages. Le fait d'avoir triomphé de toutes ces difficultés est dû à une ardeur collective, un esprit de collaboration intime, qui ont animé tous ceux qui y ont participé, des plus grands aux plus humbles, des cerveaux aux bras, des maîtres de l'œuvre à l'entreprise, et qui a été symbolisé glorieusement par la « Compagnie du Lac », rattachée au bataillon BULLE, ayant pour officiers les cadres du chantier, pour soldats les ouvriers et le personnel du chantier, organisée dès le printemps 1944, constituée en juillet, et qui, pendant trois mois, a combattu dans la montagne et libéré le Beaufortin, perdant vingt tués, dont quatre officiers.