LA HOUILLE BLANCHE

ÉDITIONS B. ARTHAUD, Succ^r de J. REY, GRENOBLE

Abonnement pour une Année { France..... 40 francs } Le Numéro : 7 francs
Étranger 50 francs }

Compte Chèques Postaux LYON 5-84

SOMMAIRE

HYDRAULIQUE. — La construction du barrage de Cignana (suite), par Félice CONTESSINI, ingénieur. — Sur une représentation graphique facilitant la recherche d'aménagements hydro-électriques rationnels.

ELECTRICITÉ. — Etude sur la commutation, par Pierre COMBE, ingénieur à la Société Alsthom. — Les avantages et l'intérêt de la traction à courant continu haute tension.

LÉGISLATION. — Force motrice supprimée et rivières asséchées par la dérivation des sources. — Principes du Code civil. — Droits de l'expropriant. — Considérations diverses, par Paul BOUGAULT, avocat à la cour d'appel de Lyon.

DOCUMENTATION.

INFORMATIONS.

BIBLIOGRAPHIE.

HYDRAULIQUE

La construction du barrage de "Cignana"

par Félice CONTESSINI, Ingénieur

(Direction des Constructions Hydrauliques du Groupe S. I. P.)

(SUITE)

Les essais faits pendant les trois années de travail ont permis de tracer le graphique de la figure 41, où on évalue la résistance et son accroissement avec le vieillissement du béton. Il est intéressant d'observer les résultats après vingt-huit jours, pour les comparer avec ceux prévus au laboratoire, et c'est pour cela qu'a été érigé le tableau suivant :

par rapport aux valeurs moyennes enregistrées, ainsi la marge donnée par le laboratoire est utile et de prudence justifiée.

Le poids spécifique du béton de notre barrage déduit de la pesée des cubes échantillons, s'élève à 2,35 tonnes/m³, tandis que, par le calcul statique, on l'avait envisagé égal à 2,3.

Année	Type de ciment	Numéros des cubes d'essais	Rapport c/a	Résistance au chantier R_c Kg./cm ²	Résistance au laboratoire R_e Kg./cm ²	$R_c - R_e$	$\frac{R_c - R_e}{R_e}$
1926	Supérieur	49	250/210 = 1,19	112,0	(1,19 — 0,5) 130 = 89,7	22,3	0,25
1927	»	14	230/210 = 1,09	99,6	(1,09 — 0,5) 130 = 76,7	22,9	0,30
»	Artificiel Celusco	28	207/212 = 0,98	120,6	(0,98 — 0,5) 200 = 96,0	24,6	0,26
1928	»	62	200/208 = 0,96	97,5	(0,96 — 0,5) 160 = 73,6	23,9	0,32
»	Artificiel Lauriano	21	200/208 = 0,96	107,0	(0,96 — 0,5) 190 = 87,4	19,6	0,22

Dans tous les cas, les cubes échantillons prélevés pendant la coulée présentent une résistance bien plus élevée que ceux faits au laboratoire et de l'ordre de 25 % environ ; mais comme on a remarqué que les écarts de résistance des échantillons du chantier arrivent fréquemment et surpassent parfois 25 %

IV

FOUILLES DE FONDATION ET INJECTION DE CIMENT MÉTHODE DE TRAÇAGE DU BARRAGE.

Le barrage, comme on l'a déjà dit, est construit en grande

ERRATUM : Dans le n° 115-156, le cliché de la figure 34 est, en réalité, celui de la figure 61. Voir à la figure 61 le cliché de la figure 34

partie sur de la roche amphibolique et, seulement sur un petit parcours de la rive gauche, il repose sur des veines schisteuses.

lions, celle livrée par la Maison suédoise « Svenska Diamant bergborrnings Aktiebolaget » fut d'une grande utilité.

Fig. 36. — Contrôle de l'eau dans le béton.

I volumi sono riferiti a 1 mc. di calcestruzzo : Les volumes se rapportent à 1 m³. de béton. — Acqua contenuta ne campioni di calcestruzzo : Eau contenue dans les échantillons de béton. — a_s = eau ajoutée. — u_s = eau contenue dans le sable.

Les fouilles de fondation, effectuées en 1925, furent poussées à travers la roche amphibolique à une profondeur variable de 1 à 3 m., tandis que dans les veines schisteuses, on arriva jusqu'à 10 mètres de profondeur, par rapport à la surface primitive.

Une bonne prise à la base et sur les côtés fut obtenue en laissant des dents de roches très prononcées, tandis que le long du pied amont, on a taillé un encastrement de renfort visible sur la figure 42.

L'excavation totale a atteint le chiffre de 59.500 m³ ainsi répartis : 3.010 de terre franche, 21.150 de terre caillouteuse, 30.910 de terre mélangée à de la roche et 4.430 de roche pure.

Pendant les fouilles, le torrent de Cignana fut dévié dans un canal en bois, remplacé ensuite par un tube en tôle qui traversait le barrage à la cote 2.125 environ (fig. 22); pendant la construction le tube resta dans une galerie provisoire qui, plus tard, fut remplie après qu'on eut enlevé ce tube.

On eut en très petite quantité des eaux d'infiltration, dans les parties plus basses des fouilles, qu'on vida au moyen de pompes.

Le long du périmètre d'encastrement amont, on fit des injections de ciment qui furent effectuées de différentes façons; on fit des trous jusqu'à 7 et 8 mètres, au moyen de perforatrices Leiner. Quelques-uns de ces trous furent remplis avant le commencement de la coulée du béton; les autres succédèrent en fonction des épaisseurs de béton superposé à la roche et du retrait de solidification.

Parmi les différentes installations pour les injec-

Il s'agit d'un appareil schématiquement représenté par la figure 43 et comprenant une partie A pour les injections à haute pression, une pompe à eau C, et un brasseur de mortier D; un moteur électrique B et une transmission E complétant l'installation.

L'appareil A est constitué par deux cylindres verticaux à double effet, avec pistons équilibrés manœuvrés par une roue superposée; il est actionné par de l'eau sous pression envoyée par la pompe, avec laquelle on peut obtenir une pression de 150 atmosphères.

A l'appareil arrivent d'un côté la conduite de la pompe et du malaxeur, de l'autre côté se détache la tubulure pour les injections qui a différentes bifurcations pour les tubes à injecter. Il faut environ 7 CV. pour une capacité d'injection de 1 mètre cube à l'heure, sous 100 atmosphères.

Mais, à Cignana, on n'a jamais dépassé 25 atmosphères et, normalement, on travaillait à 14 atmosphères. Au mortier, on a donné une composition variable de 1/7, jusqu'à 1/3 pour le rapport entre le ciment et l'eau.

En tout, pour la fondation, on fit 530 trous de longueur variable, de 1,50 m. à 8,50 m. pour une zone de perforation de 2660 m.; en outre, on a laissé 120 groupes de tubes à injection.

Quand il arrivait qu'à travers les fissures de la roche du liquide suintait, alors qu'il se trouvait sous pression dans le tube, on faisait une analyse pour déterminer la proportion ciment-eau qui filtrait. Il en résulte que, très rarement, le mortier recueilli

Fig. 37. — Variation du volume du sable de 0 à 15 m/m. de Cignana en fonction de son humidité.

Sabbia soffice : Sable mou. — Sabbia assestata : Sable tassé. — % d'augmentation du volume du sable.

à ces fissures correspondait au mortier du malaxeur ; le plus souvent, il s'agissait d'un mélange qui contenait beaucoup d'eau, même quelquefois, on recueillait de l'eau claire.

Ce processus dépend évidemment des voies internes de communication ; si elles sont constituées par des interstices étroits, les grains s'y arrêtent, tandis que l'eau passe.

La roche de fondation, après un lavage abondant d'eau sous pression, fut enduite de « ciment-gun » avant la coulée de béton ; ceci ne fut pas fait régulièrement, car le béton rencontrait cette surface enduite solidifiée, chose qui réduisait de beaucoup l'efficacité de ce procédé.

Au-dessus de la cote 2155, la roche ne fut pas enduite, on eut seulement la précaution de laisser un peu plus fluide les premiers mélanges et de combler soigneusement la partie plus sinieuse de la roche.

Le traçage géométrique du barrage fut fait au moyen de sections radiales équidistantes de 5 mètres sur le développement de l'arc principal de repère.

Pour base de traçage, on prit la corde de l'arc, joignant les extrémités du barrage et deux parallèles à cette corde : une en amont et l'autre en aval, et en dehors des fouilles.

Pour chaque section, on a calculé :

L'angle formé par l'intersection de la section avec la corde ;

La distance de la section à l'extrémité du barrage, mesurée sur la corde et la mesure correspondante sur les parallèles amont et aval.

La distance entre les points d'intersection de la section avec la corde et avec l'arc.

Et respectivement : les distances entre les points d'intersec-

tion de la section avec la parallèle à la corde amont, avec l'arc avec la corde et avec sa parallèle aval.

Fig. 38. — Composition du béton du barrage.

Acqua d'impasto : Eau de gâchage.

Avec ces valeurs, on a un nombre suffisant d'éléments pour différencier les différentes sections, ce qui permet un contrôle sûr de toutes les données de traçage.

En pratique, la corde ne fut pas tracée sur le terrain, car elle se trouvait sur les fouilles ; la parallèle amont fut tracée complètement, tandis que celle aval, à cause de l'aspérité du terrain, ne fut tracée qu'en partie.

Les données du traçage se limitèrent à celles partant de l'alignement ; on eut toujours un contrôle par rapport aux sections voisines, de façon qu'on n'encourût jamais d'erreurs importantes pour fixer les points de la courbe.

A chaque reprise du coffrage on a fait un nouveau traçage en rapportant sur la coulée, pour chaque section, le point de l'arc de repère, ainsi, on contrôla et vérifia les parements en se basant sur les différentes cotes, au moyen de niveaux et d'éléments géométriques pris à la section type du barrage.

Comme la construction s'élevait au-dessus du sol, l'opération de traçage était difficile en partant des points de repère ordinaires, on en établit donc sur des fers encastrés dans le parement amont ou sur l'armature de la passerelle de coulée.

Le système de traçage adopté a donné des résultats satisfaisants : les minimales différences trouvées entre le profil de la construction et celui théorique sont uniquement dues aux armatures (fig. 44) qui eurent de légers déplacements sous la pression du béton.

Fig. 39. — Relation entre le liant de ciment et les vides des matériaux d'agregat.

Vuots nel materiale 0,3 à 70 % : Vides dans le matériaux 0,3 à 70 %.

Je me fais un plaisir de rappeler que j'eus, depuis le commencement de la construction, comme compagnon de travail, l'ingénieur Carlo Ferrari, auquel fut confié tout le traçage, les reliefs et l'ensemble des détails et particularités constructives, pour lesquelles, il faut avoir une vive intuition et d'évidentes qualités d'exactitude.

V

COULÉE DU BARRAGE.

Les données générales des volumes de la construction se trouvent dans le tableau suivant exprimées en mètres cubes :

Année	Maçonnerie d'après les reliefs	Vides	Maçonnerie nette	Béton	Pierres
	M	V	M-V	C	M-V-C
1926	18852,7	544,4	18308,3	17000,0	1308,3
1927	79656,5	1574,2	78082,3	74702,6	3379,7
1928	55257,7	1842,8	53414,9	52068,4	1346,5
	153766,9	3961,4	149805,5	143771,0	6034,5

Par vides, il faut considérer les galeries, puits, drains, etc.
L'allure mensuelle de la production du béton dans les dif-

Fig. 40. — Section d'un cube échantillon de béton prélevé pendant la coulée (demi-grandeur).

Fig. 41. — Résistance des cubes échantillons prélevés pendant le jet.

Calcestruzzo confezionato con cemento nat superiore : Béton fait avec le ciment naturel supérieur 1926 (B). — (En abscisse : jours de séchage.)

Fig. 12. — Encastrement de renfort du côté gauche. On peut observer les tubes pour les injections, et l'armature de la galerie qui longe la roche.

férentes périodes de travail est représentée par le graphique de la figure 45; tandis que les situations annuelles sont rapportées dans la figure 46, où on voit les particularités constructives des joints de contraction et la disposition des drains.

Il en résulte donc que le volume total de béton employé dans la construction a été de 143.771 m³ pour lequel correspond une consommation totale de 33.000 tonnes de ciment. Il s'en suit que le dosage moyen dans la construction fut de 230 kg./m³ de ciment; mais, en réalité, les dosages furent variés soit en proportion des charges de la structure, soit en proportion des hauteurs d'eau, pour une meilleure étanchéité du parement amont, suivant ce qui a été spécifié sur la figure 46.

La production maximum atteinte journellement, plusieurs

Fig. 43.— Installations et appareils pour les injections du ciment à pression élevée.

fois, fut 1.200 m³ de béton pendant dix-neuf heures de travail. Pendant les mois d'août 1927, juillet 1928, la coulée moyenne a dépassé les 800 m³/jours, tandis que la moyenne générale fut de 200 m³ environ en 1926 pendant quatre-vingt dix jours de

Fig. 44. — Parement amont et type d'armature.

travail; on produisit 600 m³ en 1927 pendant cent jours, et à peu près autant en 1928.

La production plus intense pendant ces deux dernières années provient de l'emploi de deux équipes d'ouvriers travaillant successivement, et aux améliorations de l'installation, comme on l'a déjà dit.

La quantité de pierres introduites a été limitée à 6.034 m³, équivalent à 4 % de la maçonnerie complète, il faut aussi dire que du point de vue économique, l'avantage a été moins important que ce qui était prévu; au début seulement, alors qu'autour de la construction se trouvaient les amas de pierres provenant des fouilles, pierres bien placées pour être mises dans la coulée, on eut un avantage économique sensible, mais ensuite, l'excavation des pierres se fit dans une carrière creusée spécialement, d'où on devait les transporter jusqu'à la construction. Ce transport, qui devenait de plus en plus difficile, à mesure que la construction s'élevait, réduisit énormément les avantages économiques.

Les pierres servaient surtout pour assurer le joint entre les différentes zones de béton dans les reprises de travail.

En 1926, à la partie basse du barrage, le béton était coulé dans des coffres de volume proportionné à la production journalière en formant ainsi de grands blocs liés entre eux dans le sens vertical et horizontal (fig. 47); l'année suivante, comme l'épaisseur était déjà considérablement réduite, on pouvait faire une seule coulée journalière entre deux joints principaux (fig. 48); par suite (année 1928) de la diminution de l'épaisseur du profil et du nombre toujours croissant de joints, on remplissait en un jour plusieurs caissons (fig. 49).

La surface de la coulée fut laissée ondulée pour faciliter l'écoulement de l'eau en excès et pour mieux faire corps avec la coulée suivante.

La hauteur des armatures en bois fut peu supérieure à 1 m. et très rarement atteignit 1 m. 30 à 1 m. 50.

La hauteur de chute du béton pendant la coulée était normalement de deux à quatre mètres et quelquefois supérieure; ceci produisait un brassage énergétique de la masse et servait aussi

à éliminer l'eau en excès dans la coulée; par suite, un léger excès d'eau sur la quantité prévue au laboratoire n'était pas gênante.

On vérifia que la quantité d'eau nécessaire pour pouvoir faire la coulée, en plus des conditions d'humidité des matériaux, dépendait aussi des conditions météorologiques, d'une façon non négligeable: par un temps chaud, sec ou avec du vent, on avait besoin d'une quantité d'eau supérieure à celle nécessaire par un temps humide ou pendant la nuit; l'évaporation se faisait sentir soit sur la surface de la masse fluide, soit sur les parois des canaux et des charriots de transport.

Pendant les périodes plus chaudes de légères fissures se produisaient sur la surface du béton à cause du séchage rapide, mais ce phénomène n'a jamais donné lieu à des conséquences de quelque importance; on eut cependant la précaution de maintenir humide la surface qui durcissait pour chercher à limiter le retrait.

Sous la hauteur de chute de 2 m., on avait facilement, au point de coulée, une séparation dans le béton, si bien qu'il se formait des amas distincts de cailloux et de gâchis.

De même était désavantageuse une coulée provenant d'une hauteur supérieure à 4 m ou 5 m., car la masse de béton se brisait pendant la chute et arrivait sur la surface de coulée complètement subdivisée. La hauteur la plus avantageuse déterminée par essais fut celle autour de 3 m. pour laquelle le béton arrivait en veine compacte contre la surface de coulée, déterminant un brassage de la masse assez utile, même pour les cailloux qu'on introduisaient et qui étaient ainsi bien recouverts par le liant de ciment.

Fig. 45. — Barrage de Cignana :

Production mensuelle et totale du béton. — Migliaia di metri cubi di calcestruzzo; Milliers de mètres cubes de béton.

loux qu'on introduisaient et qui étaient ainsi bien recouverts par le liant de ciment.

En ce qui concerne l'air aspiré par la chute et qui, en partie, reste dans le béton, il nous parut de proportions limitées, car,

aux fortes aspirations près du point de chute, se produisait un remous avec dégagement d'air; et, en effet, en observant des morceaux de béton pris dans la construction, on a vu que les pores, appréciables à l'œil nu, sont toujours en nombre très limité et leur dimension n'est guère supérieure à 2 mm.

Les agglomérations de pierres et les amas de gâchis sont bien plus dangereux que la présence de ces pores.

Pour éviter la perméabilité à l'eau, on a fait, comme on l'a déjà dit, un mélange plus gras entre le parement amont et le plan de drainage (fig. 46); de même sur la partie inférieure du parement jusqu'à la cote 2130, on a appliqué du « cement-gun »

ment qui permette d'y appliquer le même revêtement que celui adopté pour les joints.

En ce qui concerne le type d'installation employé pour la distribution du béton, nous dirons que la passerelle nous a rendu d'importants services, en nous permettant, soit de pouvoir changer avec une grande rapidité le lieu de coulée, soit d'atteindre les points les plus éloignés des caissons par un développement assez limité de canaux.

Mais il ne nous semble pas devoir exclure qu'on obtiendrait des avantages plus grands en portant la passerelle un peu en amont du barrage; ceci nous permettrait de pouvoir terminer

Fig. 47. — Une reprise du barrage en l'année 1926.

et ensuite on l'enduisit de « siderostene »; celui-ci sur tout le parement.

Actuellement, le lac de Cignana a atteint la cote 2152, on a donc dans la partie la plus basse, environ 35 m. d'eau.

La superficie mouillée est de 4070 m² avec un développement de la fondation de base amont de 300 m.

Dans ces conditions, les pertes d'eau mesurées sont de 0,85 litres par seconde. Une partie de cette eau suinte par quelques points de la reprise 1926-27 et ceci à notre grande surprise, non pour la perte en elle-même, qui, pratiquement, est négligeable, mais par le fait qu'on n'est pas arrivé à avoir cette reprise étanche malgré les soins qui ont été pris; cependant, il est probable qu'avec le temps, on aura une étanchéité absolue.

Il est certain qu'une reprise de travail d'une année à l'autre constitue un point assez délicat de construction et nous croyons que, pour empêcher toute infiltration, il faudrait pratiquer le long de la ligne de reprise, sur le parement amont, un encastre-

ment avec beaucoup de soins le parement et de récupérer complètement les fers; on aurait, de cette façon, au contraire, un plus grand développement de canaux et, en conséquence, la nécessité de fers d'angle des pylônes plus résistants.

La passerelle de distribution avait une longueur d'environ 400 m., correspondant au développement en crête du couronnement, cette longueur nous a paru excessive pour le transport du béton.

Déjà à la distance de 300 m. des trémies de changement, à cause des secousses continues que subissaient les charriots de transport, le béton se lassait, se comprimait et l'eau affleurait en abondance à la surface; par ce fait, on avait besoin de différents expédients pour faire sortir le béton des wagonnets, qui, naturellement, avait perdu son homogénéité initiale; mais, dans la construction, sous l'effet de la chute, la masse reprenait une fluidité uniforme.

(A suivre).

Traduit de l'*Energia Elettrica*, Décembre 1928, Janvier 1929.