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.

ÉLECTRICITÉ. — Etude sur la commutation (*Suite et fin*), par Pierre COMBE, ingénieur à la Société Alsthom. — La production et l'emploi de l'énergie en Italie en 1928.
- LÉGISLATION.** — La patente des électriciens, exploitants de réseaux ou entrepreneurs d'installations, 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)

VI

OBSERVATION SUR L'ÉTAT DU MASSIF DE MAÇONNERIE
PENDANT ET APRÈS LA COULÉE.

Températures, dilatactions et contractions.

Dans les grands amas de béton, particulièrement dans ceux qui sont coulés en un temps très court, où dans la partie centrale, la dispersion de la chaleur, développée pendant la solidification du ciment, est de beaucoup diminuée par les fortes épaisseurs, tandis que, vers les parois, l'échange de chaleur avec le milieu qui les entoure est assez rapide; on a, par ce fait, dans ces amas, une quantité de phénomènes thermiques qui échappent aux recherches théoriques; mais les déformations très visibles qui se produisent dans la construction démontrent l'importance des sollicitations internes et, par suite, la nécessité d'observations directes qu'il faut faire pour arriver à des conclusions réelles.

Pour faire des recherches dans ce sens, au barrage de Cignana on a prévu deux genres d'installations pour les essais, savoir :

Des appareils pour suivre la contraction de solidification du béton et les variations de longueur du massif (dilatation et contraction longitudinales, produites dans les conditions thermométrique du milieu extérieur).

Des thermomètres pour la mesure des températures intérieures

du barrage pendant la solidification et une fois la solidification terminée toujours par rapport aux conditions extérieures.

Pour éclaircir ce qui se rapporte à la première installation, nous rappelons (fig. 10) que le barrage est sectionné par deux rangées de joints permanents; la première rangée est constituée par ceux qui sont espacés tous les 30 m. et qui, en partant de la roche de fondation se répartissent sur toute la hauteur, les autres interposés entre les premiers n'intéressent que la partie supérieure de la construction, comprise entre les cotes 2173 du couronnement et 2155 environ. La séparation entre les surfaces en contact a été obtenue par l'interposition d'une faible épaisseur de carton goudronné et le dispositif d'étanchéité est reproduit dans la figure déjà mentionnée (fig. 46). Signalons que la tôle de cuivre n'a pas été apposée et ne le sera peut-être jamais, si le revêtement en amont se montre suffisamment étanche, comme il l'est actuellement, sous une charge de 35 m. environ d'eau.

La disposition des appareils de mesure de la contraction et des thermomètres est représentée dans la figure 50 qui se rapporte aux conditions existant à la fin de l'année 1927; d'autres encore ont été ajoutés dans le courant de l'année 1928, mais, puisque, sur ces derniers, on a très peu de résultats, nos recherches et études se limitent seulement aux premiers.

Dans le plan vertical du joint c, on a trois dispositifs (4,5 et

10), trois autres (8,9 et 12) dans le plan du joint *e* et un (7) au joint *d*.

Les dispositifs 5, 7 et 9 situés d'entre la galerie d'inspection à la cote 2144, furent placés sur la construction pendant la période de coulée. C'est donc avec eux qu'ont commencé les mesures, correspondant au commencement du retrait du béton;

moyenne d'une quinzaine, sur le graphique de la figure 51, sur lequel nous allons faire quelques remarques.

En observant les diagrammes de trois appareils placés sur le même joint, on voit facilement que les déformations des surfaces extrêmes d'un prisme comprimé entre deux joints successifs ne varient pas linéairement de bas en

Fig. 48. — Le barrage à la cote 2144 à la mi-juillet 1927.

les autres sur le parement aval furent placés environ un mois après la coulée; cependant, ceci ne nous a pas entraîné à des divergences sur les résultats obtenus, puisqu'on a pu extrapoler avec sûreté.

Les dispositifs 10 et 12 se trouvent à proximité de la partie la plus élevée et exactement à 50 cm. environ de ligne de couronnement de 1927.

Ces appareils de mesure sont très simples puisqu'il s'agit uniquement de deux tôles rectangulaires en laiton fixées de part et d'autre des joints et ayant un emplacement où l'on peut loger un calibre; dans notre cas, les lectures peuvent être faites avec une approximation de $1/50^{\text{e}}$ de millimètre.

A noter la différence des conditions ambiantes des appareils du centre et de ceux du parement; dans le centre, la température varie très peu, même en hiver, et reste à quelques degrés au-dessus de zéro; au contraire, sur le parement, on a des écarts plus importants: il suffit de rappeler que, pendant l'hiver 1927-1928, on eut des minimas atteignant 25° au-dessous de zéro.

Les lectures faites journalièrement et à la même heure, sont reproduites en prenant la

haut, mais le plan du joint se déforme suivant des surfaces courbes.

En février, par exemple, alors que les appareils 4 et 8 de même que les appareils 5, 7 et 9 marquaient une ouverture de 2,6 mm. environ, au contraire les autres (le 10 et le 12) avaient

Fig. 49. — Un des derniers caissons de coulée, septembre 1928.

une ouverture presque double ; à la fin de juin, les conditions s'étaient interverties de sorte que, pendant que le parement aval marquait une fermeture allant jusqu'à 1,8 mm., les appareils 5, 7 et 9 enregistraient des ouvertures plus grandes que celles précédentes, c'est-à-dire atteignant 3,2 et 3,8 mm.

Les mouvements des parements suivent au synchronisme les variations de température de l'air, et ceci d'une façon inversement proportionnelle à l'épaisseur du barrage ; les variations du 10 et du 12 sont, à ce sujet, très intéressantes et ce phénomène est mis en évidence très nette.

Fig. 50. — Barrage de Cignana.
Disposition des thermomètres électriques et des appareils pour mesurer les contractions
C : Appareil pour mesurer la contraction. — T : Thermomètre électrique.

Fig. 51. — Barrage de Cignana : Variation d'ouverture des joints principaux (valeurs moyennes par quinzaine).

Les variations du 10 et du 12 sont, en effet, très caractéristiques, et un examen consciencieux (fig. 52) nous permet d'observer que toutes les variations de température de l'air, même les plus petites jusqu'à 4° ou 5°, sont ressenties et reproduites avec un léger retard des ouvertures déjà signalées de ces appareils.

Le 4 et le 8 ressentent, eux aussi, assez sensiblement les variations extérieures, mais les déplacements sont moins amples, car ils sont placés dans une épaisseur plus grande du barrage.

Les données des 5, 7 et 9 nous montrent une allure régulière au retrait, qui est presque indépendant des variations extérieures, au moins jusqu'à la fin de mars, quand les ouvertures atteignent respectivement les valeurs de 3,55, 2,81 et 3,14 mm., en moyenne 3,17 mm. correspondant à 0,11 mm. par mètre linéaire de barrage et pour un séchage du béton de cent quatre-vingts jours. Mais, tout de même, on ne peut pas assurer que ce chiffre puisse représenter le retrait normal dû à la prise ; le phénomène semble accéléré par l'absorption de chaleur du milieu ambiant et cela d'une façon non négligeable.

A la fin de juin, les ouvertures étaient devenues 3,88, 3,26 et 3,44 mm. en moyenne 3,53 mm., c'est-à-dire 0,12 mm. par mètre de barrage et avec un séchage de deux cent soixante-dix jours. (1)

Il faut noter que les appareils de mesure 4 et 5, appartenant au joint c, donnent une ouverture plus grande que ceux correspondants aux autres joints ; ceci peut s'expliquer en observant que le dit joint part d'une cote plus basse et intéresse donc une section du barrage de superficie plus grande que les autres (fig. 50).

Pour s'assurer mieux de la valeur des contractions superficielles on a fait d'autres essais sur les appareils extérieurs, en

(1) Au laboratoire, le retrait fut étudié sur des prismes de dimensions suivantes 10×10×50 cm. au moyen d'un appareil

même temps que des essais thermométriques à des profondeurs variables dans le parement.

Une série de recherches, faites pendant les journées du 9 au 13 juillet 1928, est rapportée sur le graphique de la figure 53.

Fig. 52. — Barrage de Cignana : Mesures journalières des contractions et des températures maxima et minima de l'air.

Les températures intérieures étaient mesurées avec des thermomètres à mercure à longue tige qui étaient introduits, puis laissés dans des trous expressément faits pour cela sur le pare-

livré par la Maison Amsler, capable de donner des lectures avec l'approximation de 1/100^e de mm.

Nous rapportons ici quelques résultats des plus significatifs.

Valeur du retrait, en millimètres, rapporté à 1 mètre.

	28 jours	90 jours	180 jours	270 jours
Ciment pur (art. de Calusco) avec de l'eau à 30 % du poids.	1,07 1,18	1,75 1,80	2,33	
C. S. (ciment art. de Lauriano)	1,00	1,55	2,10	
Béton prélevé au barrage en 1927 (ciment artificiel Calusco)	0,31 0,40	0,61 0,56	0,63 0,60	0,61 0,64
Béton prélevé du parement en 1927 (ciment artificiel Calusco)	0,41	0,68	0,73	0,77

Le béton pour ces échantillons était pris dans le barrage pendant la coulée; l'échantillon restait 24 heures dans le moule, puis on commença les essais. Le séchage se faisait à l'air à une température de 15° à 20°.

On observe que la valeur du retrait de l'échantillon de ciment correspond environ à trois fois celle du béton et la divergence entre la valeur de ce dernier et celle relative à la construction est de 1/6 environ.

ment, les températures de l'air se mesuraient avec un thermomètre appuyé sur le parement et protégé des rayons du soleil.

La figure 53 montre le cycle régulier des ouvertures et fermetures du joint (1) correspondant à l'élévation et l'abaissement de la température de l'air, la diminution progressive pendant les jours suivants de la fermeture des joints, avec l'augmentation des températures extérieures; à noter les minima marqués par les appareils de contraction et les minima des températures de l'air et enfin la diminution des écarts des températures pour des profondeurs toujours croissantes du parement.

Une variation d'ouverture de 0,2 à 0,3 mm. est consécutive à un écart des températures extérieures de 10° environ; cet écart de température diminue à moins de la moitié à 10 cm. du parement; à 2° environ à 2 cm. et à moins d'un degré à 50 cm. de profondeur.

Il nous semble donc ainsi possible de conclure que, même les variations journalières d'ouvertures des joints ne doivent pas intéresser une épaisseur plus grande.

Nous croyons que cette conception peu s'étendre à ces lésions caractéristiques qui, souvent par suite d'une contraction rapide, se forment sur les constructions neuves et qui, parfois, causent quelques craintes parce qu'on croit qu'elles intéressent des épaisseurs importantes, alors qu'en réalité, il s'agit de manifestations superficielles qui apparaissent seulement pour des conditions déterminées du milieu extérieur.

Pour se faire une idée plus concrète des phénomènes de contraction, il nous faut rechercher les températures dans l'intérieur du massif de maçonnerie; pour cela, comme nous l'avons dit, on installe des thermomètres à résistance électrique.

Fig. 53. — Barrage de Cignana : Variation des ouvertures des joints et des températures à l'intérieur du barrage à faible profondeur du parement.

(1) Il faut remarquer qu'à l'époque de ces essais le barrage était surélevé de quelques mètres au-dessus de la cote 2156,76 et donc l'appareil 10 se trouvait dans des conditions peu différentes de celles du 4.

Ils sont constitués par une bobine de fil en nickel, placée dans un petit cylindre en porcelaine dont la partie intérieure est recouverte d'une enveloppe en plomb soudée à un petit tube qui porte les fils de connexion.

Fig. 54. — Mise en place des thermomètres électriques.

la résistance ohmique d'une bobine varie avec la température de celle-ci, et le schéma de l'appareil de mesure n'est pas autre chose qu'un pont spécial dont les trois côtés sont fixés et le côté inconnu est constitué par la bobine thermométrique.

Fig. 55. — Schéma de l'installation des thermomètres électriques installés dans le barrage.

Un tube en acier protège le thermomètre et le petit câble ensemble reste immergé dans le béton (fig. 54).

Le fonctionnement est basé sur la propriété bien connue que

Dans la figure 55, les côtés a , b , c , sont les résistances constantes qui sont contenues dans le tableau de lecture et le quatrième côté constitué par la bobine de mesure T_1 , T_2 , etc. Les connexions

D.C.I. Gruppo S.I.P.-Dis. N. 2005.

Fig. 56. — Barrage de Cignana : Températures de solidification du béton.

à trois fils permettent d'introduire sur les deux côtés du pont, deux résistances égales entre elles et correspondant à la résistance, des fils de connexions qui, en réalité, ont des longueurs très variables; avec cet artifice, l'influence des fils s'élimine automatiquement.

Si on dispose le pont de façon que, quand les bobines T_1 , T_2 , etc. sont à zéro degré, il est équilibré et donc que le galvanomètre

les 1, 2, 3, 4 et 5; pour les autres, on commença les lectures dès que l'installation fut faite: il nous fut donc possible de suivre la tenue du béton tout de suite après la coulée.

La figure 56 reproduit la température de solidification du béton, pour la plupart des thermomètres installés en 1927.

Les valeurs les plus élevées à l'intérieur du massif ont été de 34° à 36° avec les thermomètres 3 et 6 et cette température s'est maintenue constante pendant environ trois mois, tandis qu'à l'extérieur, on obtenait des températures moyennes décroissantes de 6° à 0° .

Le 8 et le 13 placés eux aussi au centre, mais dans la partie plus étroite de la construction, ont atteint 33° , qui se sont maintenus moins d'un mois; le 16 est placé dans une zone encore plus étroite, il a marqué 32° environ pendant peu de jours.

Le thermomètre 10 fut placé au contact d'une reprise saisonnière et démontre que la partie inférieure a absorbé de la chaleur à la coulée nouvelle, si bien que la température de solidification de la zone de contact n'a pas dépassé 23° .

Une conséquence de la dispersion est notée par le thermomètre 17, placé contre la partie d'un joint de contraction: en effet, il marque un abaissement constant de deux degrés par rapport au 16 qui se trouve dans la même position, mais à l'intérieur du massif.

Plus on s'approche des parements et moins prononcés sont les maxima dus à l'influence du milieu extérieur; pour cela les observations des thermomètres 7, 9, 11, etc., sont valables.

D'autres essais ont été faits à de petites profondeurs du parement aval, comme l'indique le graphique de la figure 58 qui, par lui-même est assez expressif.

Mais il faut observer que les conditions extérieures, dans ce cas, sont assez favorables pour le dégagement de chaleur de solidification, vu que la température de l'air augmente pendant les jours suivants; en d'autres cas, quand le milieu extérieur a une diminution de température, la chaleur de solidification se dégage rapidement.

A 50 cm. du parement, les variations extérieures sont peu ressenties et on a atteint 27° environ, ce qui semble parfaitement régulier; mais la constatation a un intérêt du fait que la comparaison a été faite entre un thermomètre à mercure et un à résistance électrique. On peut observer de même que le parement amont se maintient un peu plus froid que celui aval, car il est exposé au nord; en effet, les thermomètres 15 et 11 sont à la même distance des parements respectifs, comme le 9 et le 7, ceux situés en amont relèvent des températures plus basses. Pour les thermomètres 4 et 1, ce fait est plus visible, tandis que le 4 se trouve à 4 m. 20 du parement amont et le 1 à 3 m. 13 de celui aval, les températures sont à peu près les mêmes et restent ainsi jusqu'en avril, puis, le 4 marque les températures minima de l'air, tandis que le 1 les maxima.

Les figures 57 et 58 permettent d'évaluer les écarts et le déphasage graduel des températures à l'intérieur du bloc de maçonnerie.

Fig. 57. — Barrage de Cignana : Variation des températures à l'intérieur du barrage (valeurs moyennes par quinzaine).

marque zéro, avec une augmentation de température, la résistance va varier et le pont sera déséquilibré: le galvanomètre donnera une déviation qui sera pratiquement proportionnelle à l'augmentation de température.

La température pourra se lire sur une échelle graduée en degrés. Mais, il est nécessaire que la tension d'alimentation de la pile P reste constante, pour y arriver, on a placé un rhéostat réglable R; le réglage exact est effectué au moyen de la bobine d'épreuve B qui est réglée de façon à donner pour la tension exacte une déviation déterminée sur le cadran.

Pour les lectures, on a un tableau qui, dans notre cas, est muni de deux appareils indicateurs, un pour la mesure de la température de l'air, avec les indications de -25° à $+35^\circ$ et l'autre pour la température du béton avec déviation de -5 à $+55^\circ$.

Tous les appareils furent spécialement construits par la maison A. Bacchini & C^{ie}, de Milan.

Pour quelques thermomètres, on commença à faire les lectures un certain temps après leur installation, ainsi, par exemple, pour

A ce point de vue, les diagrammes des figures 59 et 60 sont très clairs. Dans la figure 60 sont tracées, les lignes isothermes pour la première quinzaine d'octobre et pour la première de février qui représentent deux périodes caractéristiques pour des conditions thermiques distinctes.

La propagation de l'onde de froid est très visible et la pénétration du haut vers le bas est particulièrement marquée, en

sur 30 m., correspondant à 0,168 mm par mètre, avec un coefficient thermique de 0,00001, ce qui correspond à un abaissement de température d'environ 17°.

En réalité, l'écart de température fut de 18°, si on tient compte des valeurs fournies par le thermomètre 7 (fig. 60), pour l'intervalle de temps susdit; le thermomètre 9 eut un écart plus grand, 20°, et le 8 encore plus, de 24°. Un essai, fait vers la

Fig. 58. — Barrage de Cignana : Température de solidification du béton à l'intérieur du barrage à faible profondeur du parement (mesures faites avec des thermomètres à mercure).

effet, tandis que le noyau central a dégagé une quantité de chaleur correspondant à un abaissement de température de 10°; la partie plus élevée du barrage a eu un écart de 25° d'après le thermomètre 8.

Ici, il est intéressant de rappeler quelques valeurs spécifiques du retrait mesurées sur les joints, pour les comparer aux variations thermiques subies par le massif.

Les deux appareils 10 et 12 montrent que pendant les premiers quatre mois d'observations, la zone terminale du barrage présente une contraction très rapide et remarquable; 5,05 mm.

fin de janvier permet d'observer qu'effectivement, le long de la partie extrême les joints présentaient un détachement très net des surfaces du béton d'un demi-centimètre environ.

Dans la zone intérieure intéressant les appareils 5, 7 et 9, on ne trouve plus de concordance entre la valeur mesurée et celle calculée; le deuxième est environ le double du premier.

En effet, tandis que les conditions de la partie la plus exposée du barrage, et probablement seulement sur une zone terminale limitée, peuvent s'assimiler à celles d'un prisme à contraction libre, le noyau central du bloc de maçonnerie présente bien d'au-

tres caractéristiques et le phénomène s'est montré plus complexe soit à cause des ancrages du massif, soit parce que la contraction qui dépend de l'absorption de chaleur de l'extérieur, se superpose pendant un certain temps au retrait de prise:

Fig. 59. — Barrage de Cignana : Variation des températures à l'intérieur du barrage.

Scarto medio di temperatura fra l'interno della diga e i paramenti : Écart moyen des températures entre l'intérieur du barrage et les parements.

D'autres relations plus expressives s'entrevoient déjà ; mais un examen complet ne sera possible que lorsqu'on possèdera le tableau d'ensemble des observations de tout le système des appareils installés, dont certains viennent de l'être seulement.

Isotherme 1-15 Ottobre 1927

Isotherme 1-15 Febbraio 1928

Fig. 60. — Barrage de Cignana : Lignes isothermiques à l'intérieur du barrage.

CONCLUSIONS

Le barrage de Cignana a été construit en trois saisons de travail, représentant en tout 300 jours, il a un volume total de 153.000 mc. de béton et une hauteur de 58 m. de la base au couronnement (cote 2173).

Il est déjà en fonctionnement et sa tenue générale a donné pleine satisfaction ; on n'a pas encore obtenu son remplissage complet, mais, sous une charge d'environ les trois quarts du maximum, les pertes d'eau sont de 1 litre-seconde seulement, et on croit qu'elles pourront être encore réduites ultérieurement.

L'œuvre est d'une certaine importance, non seulement pour sa masse (il s'agit en effet d'un des plus importants barrages italiens), mais aussi à cause des procédés adoptés pour son édification et des précautions minutieuses prises pendant sa construction.

On a pu ainsi atteindre une régularité et une intensité de travail sans précédents ; pour cela il a fallu, en plus des conditions d'excavations favorables du sable et du gravier dans le vaste dépôt d'alluvions, l'abondance et l'efficacité des moyens employés pour la fabrication et la distribution du béton et le système d'approvisionnement du ciment qui se fit au moyen d'un téléphérique indépendamment des autres transports.

On n'a pas usé de procédés complètement nouveaux, mais on y a introduit des perfectionnements assez importants par rapport à ceux qu'on emploie habituellement.

Une innovation presque complète par rapport aux habitudes de construction dans notre pays, furent les essais de laboratoire employés comme moyen pour établir systématiquement la composition rationnelle des mélanges du béton et en évaluer d'avance les caractéristiques de résistance et de compacité ; ils permirent de maintenir dans les limites minima les dosages du ciment en nous apportant ainsi à des économies non négligeables ; de plus, pendant la construction, ces essais furent une garantie de la bonne réussite de l'œuvre.

Une autre innovation consiste dans les dispositions prises pour pouvoir faire des études sur les phénomènes thermiques qui se reproduisent dans le massif pendant et après la solidification du ciment ; elles ont déjà donné un résultat important, car elles ont démontré le bien-fondé de la pratique, d'augmenter le nombre de joints de contraction dans la partie supérieure du barrage où la surface de la structure exposée à l'air est importante par rapport à l'épaisseur du mur. En effet, là, les contractions peuvent atteindre des valeurs plus élevées que celles qui se vérifient dans les plus grandes épaisseurs.

(A suivre)

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