

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 82 (1956)
Heft: 19

Artikel: Technologie et contrôle des barrages en béton
Autor: Stucky, J.-P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-62081>

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 Roseneck 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. Epitiaux, 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. Epitiaux, 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: *Technologie et contrôle des barrages en béton*, par J.-P. STUCKY, ingénieur-conseil. — *Renforcement de galeries contre avalanches en béton précontraint*, par G. DE KALBERMATTEN, et F. BURRI, ingénieurs diplômés E.P.F. - S.I.A. — *Registre suisse des ingénieurs, des architectes et des techniciens: Communiqué.* — *BIBLIOGRAPHIE.* — *Société suisse de mécanique des sols et des travaux de fondation: Assemblée générale annuelle.* — *SERVICE DE PLACEMENT.* — *DOCUMENTATION GÉNÉRALE.* — *INFORMATIONS DIVERSES.*

TECHNOLOGIE ET CONTRÔLE DES BARRAGES EN BÉTON

par J.-P. STUCKY, ingénieur-conseil

I. Introduction

Quatre barrages en béton sont actuellement en construction en Valais. Ce sont, par ordre de grandeur:

Barrage-poids de la Grande Dixence

Grande Dixence S. A.

Volume de béton: 5,8 millions de m³

Hauteur sur fondations: 284 m

Barrage-voûte de Mauvoisin

Forces Motrices du Mauvoisin S. A.

Volume de béton: 2,1 millions de m³

Hauteur sur fondations: 237 m

Barrage-voûte de Moiry

Forces Motrices de la Gougria S. A.

Volume de béton: 0,8 million de m³

Hauteur sur fondations: 145 m

Barrage-voûte de Zeuzier

Force Motrices de la Lienne S. A.

Volume de béton: 0,3 million de m³

Hauteur sur fondations: 155 m

Un calcul sommaire montre que ces quatre barrages utiliseront 1,6 à 1,8 millions de tonnes de ciment¹, ce qui correspond à une dépense de 160 à 180 millions de francs suisses². La valeur de ces chiffres montre l'importance que le constructeur de barrages doit attribuer, aujourd'hui, au choix des dosages en ciment. Alors qu'il y a une dizaine d'années encore, ce choix se faisait selon des critères plus ou moins subjectifs, il se fait aujourd'hui selon des règles bien déterminées justifiées par des méthodes analytiques et expérimentales.

Pendant l'été 1956, les chantiers de la Dixence, de Mauvoisin et de Moiry fabriqueront à eux seuls 12 000 à 15 000 mètres cubes de béton par jour; on peut donc se demander si un tel débit ne conduit pas, fatalement, à négliger la *qualité* pour la *quantité*, et si les règles dont nous venons de parler pour le choix des dosages ne sont pas illusoires. Nous chercherons à démontrer, dans cet exposé, que des installations modernes bien conçues permettent au contraire d'obtenir non seulement une meilleure qualité des bétons, mais d'en assurer avant tout la régularité. C'est ainsi que l'on peut parler,

¹ Dosage moyen admis entre 180 et 200 kgCP/m³.

² Prix du ciment admis, rendu chantier: 100 fr./t.

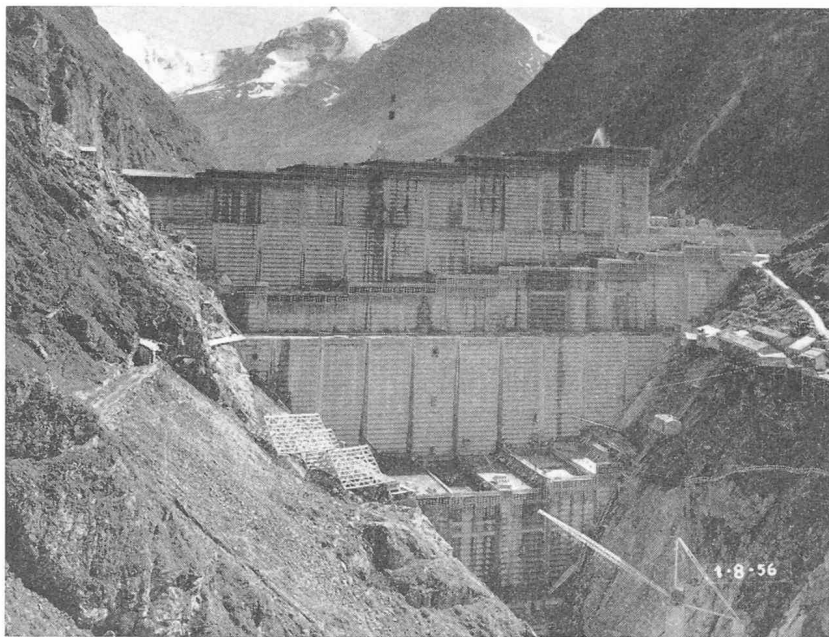


Photo Paris-Burgat, Lausanne.

Fig. 1. — Barrage de la Grande Dixence.
Hauteur sur fondations atteinte le 1.8.1956 : 175 mètres.

aujourd'hui, d'une *production industrielle du béton*, dont les méthodes de fabrication s'apparentent à celles de la métallurgie ou de l'industrie chimique. Mais qui dit production industrielle dit aussi contrôle de cette production. C'est la raison pour laquelle les chantiers valaisans ont été équipés de laboratoires remarquablement outillés qui permettent de suivre heure par heure la marche de leurs installations¹.

Si les méthodes expérimentales restent la base principale de la *science du béton*, les mathématiques appliquées permettent aujourd'hui de la compléter et de l'adapter aux conditions toujours plus sévères que pose la réalisation des barrages, dont la grandeur et la hauteur conduisent à des contraintes doubles ou triples de celles que l'on tolérât, il y a dix ans à peine. Nous voulons parler de l'introduction des grandeurs aléatoires dans l'étude et le contrôle de la résistance des bétons. Le calcul des probabilités a été appliqué tout d'abord à la théorie des jeux, puis à la technique des assurances ; il a été introduit dans la théorie des erreurs. Il prend aujourd'hui une importance de plus en plus grande dans l'économie et dans les sciences appliquées : c'est ainsi qu'on l'utilise couramment dans certaines industries, par exemple en horlogerie, pour le contrôle de la fabrication. Nous nous proposons de montrer que le béton, dont la qualité est fonction de facteurs innombrables, mais plus ou moins indéterminés, peut faire l'objet de calculs semblables à ceux des grandeurs certaines grâce à l'introduction systématique des grandeurs aléatoires. La méthode exposée au chap. IV est celle qui a été proposée en 1951 par le professeur A. Stucky pour le barrage de Mauvoisin puis pour

celui de la Grande Dixence. Elle a été complétée depuis lors sur la base des nombreux essais de contrôle qui ont été réalisés sur ces deux chantiers. Elle est utilisée également au barrage de Moiry.

II. Le contrôle des bétons

Types d'essais

Si la technologie du béton a déjà fait l'objet de nombreuses publications, on doit cependant reconnaître que beaucoup de problèmes n'ont été que posés, jusqu'à présent, ou n'ont reçu que des réponses incomplètes. Il faut regretter surtout que les méthodes d'essai varient, non seulement d'un pays à l'autre, mais souvent entre deux chantiers voisins, de sorte que les auteurs qui parlent de leurs expériences n'emploient pas toujours *le même langage*. Il est donc très important, lorsqu'on parle de béton, de dire comment on l'a étudié, faute de quoi les résultats n'ont souvent qu'une valeur relative. Il est bien connu par exemple que dans la rupture du béton, la forme et la dimension des éprouvettes jouent un rôle fondamental, de même que le type de machine utilisé. Les divergences sont peut-être encore plus grandes dans l'étude de la perméabilité ou de la gélivité. D'autre part, il faut bien reconnaître qu'un essai ne prend une certaine valeur que s'il est répété un très grand nombre de fois. Il n'est donc pas étonnant que les essais préliminaires ne donnent souvent qu'une orientation générale sur la qualité du futur béton, et que l'on doive toujours s'attendre à quelques surprises lorsqu'on commence à exploiter un chantier. C'est une raison suffisante pour contrôler ce dernier avec des méthodes qui soient à l'échelle des moyens utilisés aujourd'hui pour la construction des grands barrages.

¹ Les frais investis dans ces divers laboratoires représentent une somme de l'ordre de 0,50 fr. par m³ de béton.

Parmi les essais les plus classiques, nous citerons :

Le contrôle de la granulométrie. Un échantillon de sable et de gravier de chaque catégorie, prélevé 1 à 2 fois par jour dans la tour à béton, est séché, tamisé et pesé. Ce contrôle, qui est relativement simple, ne donne pas toujours une image réelle de la granulométrie du béton. En effet, dans les bétonnières à axe oblique, de 2 à 3 m³, utilisées couramment aujourd'hui sur les grands chantiers, la granulométrie du béton malaxé peut être sensiblement modifiée par le broyage des matériaux. C'est la raison pour laquelle il est prudent de limiter le temps de malaxage de ces bétonnières, d'autant plus qu'un excès peut conduire en outre au démélange du béton.

Le contrôle de la maniabilité. Le seul moyen de se rendre compte si un béton est maniable ou non est de l'examiner sur le chantier de bétonnage lui-même. Une fois que les ingénieurs se seront mis d'accord sur sa consistance, il s'agira de trouver un moyen objectif d'en assurer la régularité. On a proposé divers systèmes : la mesure de l'humidité des matériaux par séchage est assez lente, et lorsqu'on voudra modifier le poids de l'eau additionnelle, les conditions auront peut-être déjà changé ; le slump ne convient pas aux bétons secs, dont la maniabilité n'apparaît qu'au moment de la vibration ; la table à secousses classique donne déjà une idée plus exacte de la maniabilité. Mais le moyen le plus objectif consiste à utiliser, dans la tour à béton, un appareil vibrant du type Vebe¹. On pourra ainsi prescrire à l'agent chargé du contrôle deux limites de temps entre lesquelles le mortier du béton devra être complètement étalé dans le récipient, faute de quoi il faudra modifier la quantité d'eau de gâchage. La nécessité d'un tel contrôle sera d'autant moins fréquente que les installations du chantier pourront garantir une plus grande régularité de l'eau contenue dans les matériaux. Nous verrons au chapitre suivant qu'il est souvent difficile de remplir cette condition.

La rupture en compression. L'essai de rupture en compression est celui que l'on utilise le plus souvent comme critère de la qualité du béton. Une éprouvette sciée dans un bloc ou moulée est comprimée jusqu'à rupture entre deux plateaux d'une presse.

La rupture en traction. L'essai de traction directe n'est pas facile à réaliser pour les gros bétons. On le remplace volontiers par l'essai de flexion. Un prisme scié ou moulé est soumis jusqu'à rupture à un moment de flexion croissant, généralement sous charge concentrée. L'essai de flexion donne un chiffre de résistance plus grand que celui que l'on tire de l'essai de traction directe. En pratique, on admet qu'il est deux fois plus grand.

¹ Un volume donné de mortier, extrait du béton par tamisage à l'anneau de 30 mm, est placé dans un récipient cylindrique à fond plat par la méthode dite du slump. Le tout est vibré jusqu'à étalement complet du mortier sous un disque de verre (donc transparent) d'un diamètre égal à celui du récipient cylindrique, et posé au préalable sur le cône de mortier. On mesure la durée de vibration nécessaire pour obtenir ce résultat.

L'essai de perméabilité. Un essai de perméabilité permettant de se faire une idée exacte du comportement futur de l'ouvrage est pratiquement irréalisable, tant sont variées les causes qui peuvent influencer l'essai : colmatage des pores par des particules solides en suspension dans l'eau, ou au contraire dissolution de sels solubles si l'eau utilisée est trop pure, augmentation de la perméabilité pendant l'essai par évacuation ou dissolution de bulles d'air. On se borne en général à exposer une face de l'éprouvette, sciée ou moulée, à une pression d'eau constante ou croissante pendant un temps déterminé², et à mesurer les quantités d'eau qui apparaissent à la surface opposée, les autres faces étant rendues étanches. Les résultats de cet essai n'ont donc qu'une valeur très relative ; ils permettent en revanche de comparer entre eux des bétons différents d'un même chantier ou d'un même laboratoire. Mais en réalité, un béton à air occlus, compact et bien vibré, d'un dosage de l'ordre de 250 kgCP/m³, est suffisamment étanche pour un barrage. Les défauts d'étanchéité s'observent bien plus aux reprises de bétonnage ou sont dus à la présence de nids de graviers. En conséquence, pour obtenir un barrage étanche dans son ensemble, il ne suffit pas de fabriquer un béton irréprochable en laboratoire, mais il faut aussi et surtout se préoccuper de sa maniabilité afin de diminuer les défauts consécutifs à un manque localisé de soins dans la vibration.

L'essai de gélivité. L'essai de résistance au gel est d'une complexité évidente en raison de la difficulté qu'il y a à réaliser en laboratoire les conditions que l'on rencontre dans la pratique. Il n'existe d'ailleurs pas encore de normes dans ce domaine, et les données sur le comportement relatif du béton en plein air et en laboratoire sont rares, sinon inexistantes. L'essai le plus courant consiste à exposer un prisme de béton, scié ou moulé, à une alternance de cycles de gel à l'air (environ -20° C) et de dégel dans l'eau (+10 ou +15° C). Les critères par lesquels on essaye de caractériser sa gélivité sont en revanche des plus variés. Les essais de gélivité, tels qu'ils sont réalisés actuellement dans la plupart des laboratoires, et tels qu'ils le seront encore longtemps, probablement, puisque la copie des phénomènes naturels est presque irréalisable, sinon très onéreuse, ont avant tout une valeur comparative. Le gel tend à abaisser le module d'élasticité du béton (module mécanique ou module dynamique) ainsi que sa résistance à la traction (flexion). Mais pour abaisser la résistance à la compression, il faut en général beaucoup plus de cycles ; souvent, même, on observe au début un accroissement de la résistance à la compression. Il est donc préférable, en pratique, de se contenter de la mesure du module élastique et de la rupture en flexion. La première permet de suivre l'évolution des qualités du béton, tandis que la seconde ne peut être mesurée qu'une seule fois puisqu'elle ne peut s'obtenir que par destruction de l'éprouvette. Certains laboratoires utilisent aussi comme critère la mesure du gonflement du béton, consécutif à l'alternance du gel et du dégel.

² Pression minimum 20 à 30 atmosphères, pendant 10 jours au moins.

Parmi les moyens non destructifs de mesure, une mention spéciale revient à l'*auscultation acoustique*. Le procédé est connu : on imprime à une éprouvette de béton, par exemple à un prisme, une onde acoustique longitudinale dont on fait varier la fréquence jusqu'à ce qu'elle corresponde à la fréquence propre de l'éprouvette, qui se met alors en résonance. Si cette fréquence est n , la vitesse v de l'onde longitudinale est n fois le double de la longueur l de l'éprouvette : $v = 2 n l$. Le module d'élasticité E du béton, appelé module dynamique, est alors égal au produit de la densité apparente par le carré de la vitesse des ondes longitudinales. Lorsque le béton est altéré et fissuré, par exemple sous l'effet des alternances de gel et de dégel, le train d'ondes doit contourner les fissures, ce qui provoque un retard et, par conséquent, une diminution du module dynamique. Ce procédé est très intéressant, parce qu'il ne modifie pas la structure du béton, contrairement à la mesure du module mécanique, où le béton est comprimé, souvent jusqu'à 50 ou 100 kg/cm².

Forme et dimension des éprouvettes

La fabrication des éprouvettes doit se faire dans des conditions aussi identiques que possible à celles dans lesquelles est fabriqué le béton de chantier dont on veut contrôler la qualité. C'est le cas, en particulier, pour la dimension et la granulométrie des matériaux qui entrent dans la composition du béton. En effet, sur un grand chantier, la qualité de tous les éléments est susceptible de varier. Celle du sable peut être plus régulière que celle des gros cailloux, et inversement. Les essais doivent donc se faire *sur du béton complet*, c'est-à-dire sans élimination, par tamisage par exemple, des gros éléments ; ceci conduit nécessairement à fabriquer des éprouvettes relativement grandes, si l'on veut éviter, dans une certaine mesure du moins, l'accumulation d'un mortier plus riche en ciment vers les parois de l'éprouvette, ce qui risque de fausser les résultats.

Une question fondamentale est celle de la forme et de la dimension des échantillons éprouvés pour être certain qu'ils représentent bien le béton de l'ouvrage. Il est connu que le cube de 30 centimètres d'arête, utilisé couramment dans l'essai de rupture en compression pour les bétons à gros éléments, donne une idée fautive de la résistance réelle du béton. Des efforts de frottement apparaissent au contact du cube et des plateaux de la presse. Ces efforts sont différents suivant le mode d'apprêtage des cubes : rectification à la meule, dépôt d'un enduit dur et parfaitement plan, interposition d'une feuille de carton, etc. Or ces efforts ont pour effet d'influencer la déformation transversale du béton et par conséquent la rupture du cube. Le plateau de la presse doit être aussi plan que possible, ce qui ne l'empêche d'ailleurs pas de se déformer au moment de l'essai, et d'influencer à son tour le chiffre de résistance obtenu. La vitesse de mise en charge joue aussi un rôle. Enfin, le type de machine, la rigidité du cadre, le type d'articulation des plateaux influencent le mode de rupture de l'éprouvette. Or la plupart de ces effets s'atténuent rapidement lorsque la hauteur de l'éprouvette augmente, autrement dit lorsqu'au lieu d'un cube, on utilise un prisme de même section.

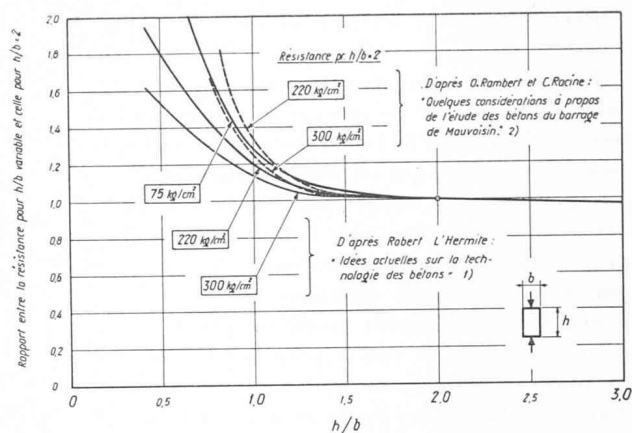


Fig. 2. — Influence du rapport h/b sur le chiffre de résistance du béton.

1. La « Documentation technique du bâtiment et des travaux publics ». 1955.
2. « Bulletin technique de la Suisse romande ». 17 mars 1956.

Divers auteurs ont montré que, pour un rapport hauteur/base croissant, la résistance de l'éprouvette diminue rapidement entre $h/b = 0,5$ et $h/b = 1,5$, puis tend vers une valeur constante au-dessus de $h/b = 2$ (fig. 2). Pour les raisons que nous venons justement d'exposer, l'allure de cette variation dépend du mode de rupture et d'apprêtage des éprouvettes ; elle varie donc d'un laboratoire à l'autre. En outre, elle dépend de la qualité même du béton. Au delà de $h/b = 2$, la résistance de l'éprouvette tend encore à baisser légèrement, mais cette diminution est assez faible pour qu'on puisse ne plus en tenir compte dans la pratique du chantier. En conclusion, il semble bien que le prisme, ou mieux le cylindre dont la hauteur égale le double du diamètre, soit la forme qui, en pratique, nous donnera le chiffre de résistance le plus voisin de la véritable résistance à la compression du béton. Le cylindre nous paraît préférable au prisme, car l'absence d'angles facilite la mise en place du béton de l'éprouvette, dont les éléments les plus gros ont des dimensions relativement grandes par rapport à celles du moule. D'autre part, la répartition des efforts est meilleure au moment de l'essai.

Reste à choisir la dimension des éprouvettes. Divers auteurs ont montré que, pour un même béton, en particulier lorsque la dimension maximum des grains reste constante, la résistance à la compression diminue avec l'accroissement de la dimension des éprouvettes. La figure 3, tirée du Concrete Manual (Bureau of Reclamation), montre qu'au-dessus des dimensions classiques admises sur nos chantiers, 20 ou 30 cm, la résistance baisse encore considérablement ; ce n'est qu'à partir de 1 mètre environ que la diminution devient négligeable. Il n'est pas question, bien entendu, d'adopter de telles dimensions pour le contrôle permanent d'un chantier¹. Pour du béton dont les plus gros éléments passent par l'anneau de 15 ou de 20 cm, il serait donc raisonnable, a priori, de confectionner des blocs de 60 × 60 cm de base au moins et de les scier ensuite

¹ Le Bureau of Reclamation utilise actuellement le cylindre de 45 cm de diamètre et de 90 cm de hauteur.

en prismes verticaux de 30×30 cm de base. Le débitage de tels blocs s'accompagne toutefois de sérieuses complications à cause du poids des éprouvettes. Pour un anneau de 10 à 12 cm, il paraît donc préférable de choisir un compromis et de se contenter d'éprouvettes moulées de 30 cm de base. Nous avons vérifié que, pour un même béton, des cylindres moulés de 30 cm de diamètre donnent une résistance et une dispersion égales à celles de prismes de 30×30 cm de base, de même hauteur, mais sciés dans des blocs de béton complet.

Dosage : 225 kg CP/m³ E/C = 0,54
Granulométrie : 0-120 mm

Résistance moyenne à la compression de 16 cylindres moulés, diamètre 30 cm, hauteur 45 cm :

A 90 jours, $R_m = 293 \text{ kg/cm}^2$

Ecart-type ou dispersion $e = 3,8 \%$

Résistance moyenne à la compression de 16 prismes sciés, $30 \times 30 \times 45$ cm :

A 90 jours, $R_m = 291 \text{ kg/cm}^2$

Ecart-type ou dispersion $e = 3,8 \%$

C'est ainsi que nous avons été amenés à mettre au point, pour les barrages de la Grande Dixence et de Moiry, un essai systématique sur *cylindres moulés de 30 cm de diamètre et de 45 cm de hauteur*. Comme on le voit, le rapport hauteur/base a été limité à 1,5 malgré les arguments que nous venons d'exposer en faveur du rapport $h/b = 2$. C'est que l'éprouvette cylindrique 30/45 pèse à elle seule 80 kg ; avec son moule métallique, qui doit être très rigide, elle pèse 120 kg, ce qui correspond à la limite pratique de manutention par deux hommes. Nous avons vu que le cylindre de hauteur supérieure à son diamètre donne un chiffre de résistance plus faible que le cube. La chute est très variable suivant les auteurs, à cause justement des erreurs qui entachent la mesure de la résistance sur cube. Mais ces divergences deviennent insignifiantes lorsque le rapport h/b est supérieur à 1,5 (fig. 2). Ce dernier fait, joint aux difficultés résultant du poids des éprouvettes, justifie suffisamment le choix du cylindre moulé 30/45 pour le contrôle régulier des grands chantiers. Avant le remplissage du moule, on le prolonge d'une hausse de même diamètre, de 20 cm de hauteur. Le tout est rempli de béton tamisé à l'anneau de 12 cm puis pervibré à l'aiguille de 10 cm (10 000

vibrations par minute). La durée de vibration nécessaire pour compacter le béton ainsi que la mesure du tassement du béton frais sont deux critères de maniabilité. On enlève ensuite la hausse pour talocher la surface supérieure du cylindre de béton. L'éprouvette est conservée pendant 24 heures dans son moule, à une température de 18 à 20° C, puis démoulée et mise en dépôt jusqu'au jour de l'essai dans un local à humidité maximum et à température de 18 à 20° C (obtenues par injections périodiques de vapeur dans le local de conservation). Douze heures avant l'essai de rupture, l'éprouvette est séchée à l'air et apprêtée selon la méthode de l'Institut technique du Bâtiment et des Travaux publics de Paris : un mélange de soufre fondu (62 %), de sable fin (36 %) et de noir de fumée (2 %) est coulé sur une plaque d'acier rectifiée, et le cylindre est posé dessus. L'enduit durcit et adhère au cylindre de béton que l'on peut immédiatement décoller de la plaque pour traiter la face opposée.

Il nous reste encore à parler de l'orientation de l'effort, au cours de l'essai de rupture, par rapport à la position qu'occupait l'éprouvette pendant sa fabrication et pendant la prise du ciment. En effet, la résistance sur lit et délit n'est généralement pas la même. Si l'éprouvette est placée sur délit, c'est-à-dire si les lits, horizontaux pendant la fabrication, sont perpendiculaires aux plateaux de la presse, la résistance est plus faible que si l'éprouvette est placée sur lit. Il existe peu de renseignements numériques sur ce point, mais il est probable que le rapport entre ces deux résistances est assez variable suivant le type de béton. Quelques essais que nous avons réalisés avec un béton de 225 kgCP/m³, à l'anneau de 12 cm, ont donné dans le cas particulier une différence de 10 % sur des cubes sciés de 30 cm d'arête. Cette *anisotropie* du béton est mise en évidence par d'autres essais, effectués pour le barrage de Moiry, où l'on a comparé des prismes sciés horizontalement (h) et des prismes sciés verticalement (v) dans le même bloc. On a trouvé, en moyenne, sur 11 bétons différents, mais de même dosage, 225 kgCP/m³ :

Pour le module dynamique à 90 jours : $E_h/E_v = 106 \%$

Pour le module dynamique à 400 jours : $E_h/E_v = 102 \%$

Pour le module dynamique après 200 cycles de gel et dégel : $E_h/E_v = 107 \%$

Pour la résistance à la flexion à 400 jours : $R_h/R_v = 110 \%$

Cette différence de comportement du béton suivant la direction des efforts devrait naturellement être prise en considération selon qu'il s'agit d'un barrage-poids (efforts plus ou moins verticaux) ou d'un barrage-voûte (efforts horizontaux, verticaux et obliques). Il semble que la cause principale de cette anisotropie est la ressuée, ou ascension capillaire de l'eau contenue dans le béton frais. Ce phénomène apparaît à la fin de la vibration et se termine une à deux heures plus tard. La ressuée est bien connue sur les grands chantiers, où l'on voit apparaître des flaques d'eau à la surface des arrêts de bétonnage.

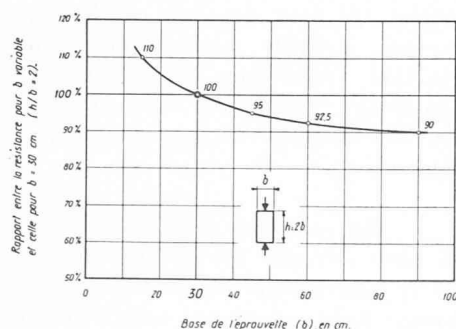


Fig. 3. — Influence de la dimension des éprouvettes sur le chiffre de résistance du béton.

Concrete Manual. Bureau of Reclamation.

Cette eau doit être enlevée du béton frais, avant de le recouvrir d'une nouvelle couche. De même, sur le béton durci, il faut enlever la pellicule de laitance consécutive à l'évaporation de l'eau ressuée.

La dimension des éprouvettes joue aussi un rôle important dans l'essai de gélivité. En effet, les prismes de $30 \times 30 \times 90$ cm résistent moins bien au gel que ceux de $20 \times 20 \times 60$ cm. L'explication est probablement la suivante : dans un essai de gélivité, on fait varier la température plusieurs fois par jour entre $+15^\circ$ et -20° . La température du centre de l'éprouvette est donc fréquemment très différente de celle de la surface. Il en résulte des tractions et des cisaillements importants qui désagrègent peu à peu le béton. Pour une fréquence donnée de gels et dégels, ces efforts augmentent avec la dimension du prisme.

Fabrication et conservation des éprouvettes de contrôle

Pour pouvoir juger des propriétés d'un béton, il est nécessaire d'éliminer dans toute la mesure du possible les causes d'erreurs dues à la fabrication et à la conservation des éprouvettes. S'il s'agit d'un contrôle de chantier, le béton prélevé à la tour à béton sera amené dans un local fermé, à température constante. Comme l'échantillon prélevé représente une faible proportion du contenu des trémies ou des bétonnières (quelques centaines de litres sur 4 à 6 m³), il est probable que sa granulométrie ne correspondra pas à la granulométrie moyenne d'une gâchée. Un moyen simple de supprimer les inconvénients de ce démélange consiste à tamiser le béton à 60 mm et à le recomposer dans ses proportions théoriques avant de l'introduire dans le moule. Cette opération, qui supprime les aléas de la fabrication des éprouvettes, donne malgré tout, contrairement à ce que l'on pourrait croire, une image correcte du béton de grande masse, où la vibration favorise la répartition du mortier et des éléments moyens parmi les cailloux. Un essai, fait au laboratoire de la Grande Dixence avec des cylindres de 30/45 cm et du béton à l'anneau de 120 mm a montré que cette *recomposition artificielle* du béton abaissait légèrement le chiffre de résistance

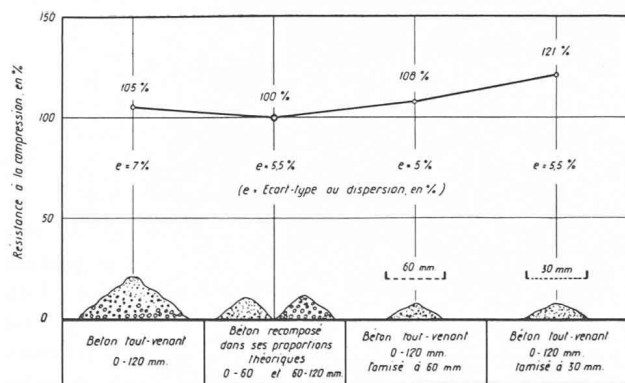


Fig. 4. — Influence du mode de prélèvement sur le chiffre de résistance du béton.

Barrage de la Grande Dixence.

Dosage 160 kgCP/m³ E/C = 0,75

Air occlus 3 à 4 %

Résistance à la compression à 90 jours.

Pour chaque essai : 12 cylindres moulés 30/45.

par rapport à la méthode classique qui consiste à remplir les moules avec le béton tel qu'il se présente. Or quelques cylindres sciés selon deux génératrices ont révélé que, dans le second cas, ils contenaient moins de gros cailloux ; en effet, l'ouvrier chargé de remplir les moules élimine plus ou moins involontairement, pour plus de commodité, les plus gros cailloux. Il en résulte donc un surdosage effectif du béton qui suit la loi exprimée par la figure 4 : le chiffre de résistance d'un béton augmente au fur et à mesure qu'on élimine davantage de gros éléments. En revanche, la dispersion des résultats reste pratiquement la même.

On croit volontiers que la température initiale du béton influence sa résistance, surtout celle à 7 jours. Il n'en est rien lorsqu'on met en place de grandes masses et lorsque la température du béton frais varie dans de faibles limites, comme c'est le cas sur nos chantiers de montagne ($+4$ à 10° C). En effet, même lorsque l'air est froid, la chaleur d'hydratation du ciment suffit à faire monter rapidement la température de la masse, de sorte que le durcissement du béton se fait dans des conditions très régulières. Il en est de même lorsqu'on fabrique et conserve des éprouvettes en laboratoire, à température constante, mais avec du béton frais dont la température est variable.

La question qui se pose est naturellement de savoir si la résistance des cylindres, tels que nous les avons décrits, fabriqués avec du béton de chantier mais conservés en laboratoire à l'air humide, correspond bien à celle de l'ouvrage. Une série d'essais, réalisés en 1955 au barrage de la Grande Dixence donne à ce sujet d'utiles renseignements. 36 cylindres, de 30 cm de diamètre, extraits du barrage par forages verticaux, ont été rompus en compression en même temps que 36 cylindres moulés, fabriqués avec le même béton mais conservés en laboratoire. Les résultats sont reportés dans la figure 5 où l'on voit que les cylindres forés ont donné un chiffre de résistance légèrement supérieur ; les dispersions sont pratiquement les mêmes dans les deux cas. Cet essai a montré d'autre part que la position des carottes dans les couches de bétonnage joue un certain rôle sur la résistance. En effet, dans la partie inférieure des couches de 3,20 m de hauteur, la résistance moyenne, dans le cas particulier, est de 12 % plus élevée que dans la partie supérieure des couches. Cette différence doit être attribuée à la ressuée du béton frais, de plus en plus intense à mesure que l'on achève la mise en place d'une couche. On peut donc en conclure que même à dosage égal, il existe non seulement une hétérogénéité suivant l'orientation du béton, mais encore une hétérogénéité particulière dans le sens vertical seulement, due au mode de construction par couches horizontales.

La résistance de l'ouvrage

Ce qui nous intéresse est naturellement de savoir quelle est la résistance la plus vraisemblable de l'ouvrage, lorsque nous connaissons celle d'une éprouvette fabriquée à titre de contrôle avec le même béton. Nous avons vu que le chiffre de résistance d'un cylindre prélevé dans l'ouvrage, de 30 cm de diamètre et de 45 cm de hauteur, était un peu supérieur à celui d'un

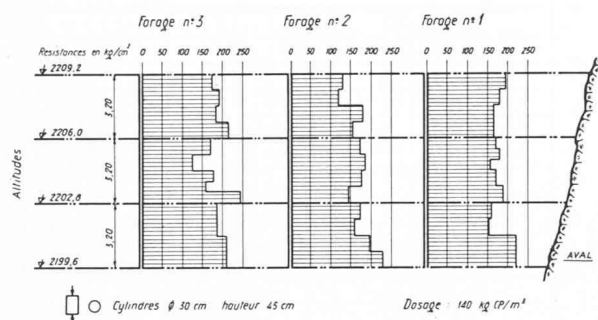


Fig. 5. — Relation entre la résistance d'un béton conservé dans l'ouvrage et celle d'un béton moulé, conservé en chambre humide à +20 degrés.

Barrage de la Grande Dixence.

Dosage : 140 kgCP/m³ Granulométrie : 0-150 mm
 Age : 130 à 161 jours Air occlus : 3 à 4 %

Résistance à la compression de 36 cylindres 30/45 extraits par forage de la masse : $R = 172 \text{ kg/cm}^2$

Ecart-type ou dispersion : $e = 14,2 \%$

Résistance à la compression de 36 cylindres 30/45 moulés : $R = 163 \text{ kg/cm}^2$

Ecart-type ou dispersion : $e = 15,4 \%$

cylindre moulé de mêmes dimensions. Nous pouvons admettre que cette petite différence compense l'imperfection de la forme de l'éprouvette, dont la hauteur devrait être au moins le double du diamètre. Il ne nous reste donc plus qu'à tenir compte de la dimension de l'éprouvette en utilisant une courbe du type de celle de la figure 3 et nous obtenons la relation qui, à un âge donné, nous paraît donner au mieux la résistance vraie de l'ouvrage :

$$\text{Résistance vraie de l'ouvrage } R_v = 0,9 R_{30/45},$$

$R_{30/45}$ étant la résistance mesurée sur l'éprouvette cylindrique moulée, décrite plus haut.

III. Les facteurs qui influencent la qualité et la régularité du béton

Le ciment

Les fabriques suisses de ciment produisent actuellement plus de 2 millions de tonnes par an, dont un cinquième environ est utilisé sur les chantiers de barrages pendant 6 à 7 mois de l'été. En 1956, les fabriques devront livrer aux chantiers valaisans jusqu'à 3 500 tonnes de ciment par jour. Il est admis, aujourd'hui, qu'un chantier de barrage peut être alimenté par 4 ou 5 fabriques différentes. En effet, la qualité des produits de ces fabriques est sensiblement la même. Il est connu que les normes suisses pour les liants sont sévères (S.I.A. 1953). Nos ciments y satisfont néanmoins très régulièrement, et même dépassent de beaucoup les valeurs exigées. Il est particulièrement remarquable qu'en 1955, année où plus que jamais les fabriques suisses ont été mises à contribution, les essais effectués au Laboratoire fédéral d'essai des matériaux sur plus de 400 échantillons, provenant de toutes les fabriques et prélevés au départ des trains destinés aux chantiers de barrages, ont tous satisfait aux normes, sans la moindre exception. Une telle constatation ne dispense toutefois pas les chantiers

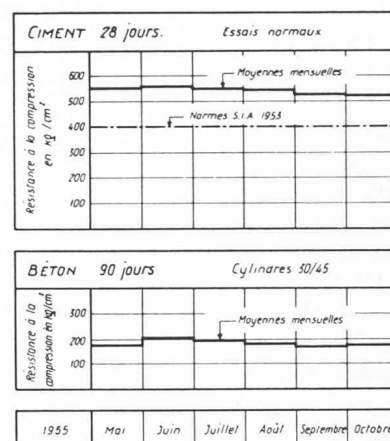


Fig. 6. — Influence de la qualité du ciment sur la résistance du béton.

Barrage de la Grande Dixence.

Ciment : prélevé aux tours à béton en même temps que le béton (144 prélèvements).

Béton : prélevé aux tours à béton. Dosage 160 kgCP/m³.

Granulométrie : 0-120 mm (144 prélèvements).

d'un contrôle régulier du ciment. La figure 6 montre par exemple que les résistances normales, quoique très supérieures aux chiffres exigés par les normes (compression : 400 kg/cm² à 28 jours) subissent quelques fluctuations au cours d'une campagne, fluctuations qui influencent la résistance du béton. Ce fait joue donc un certain rôle lorsqu'on veut juger la marche d'un chantier d'après la dispersion des essais de contrôle.

Dépoussiérage des sables

L'importance attribuée à une bonne granulométrie des sables et à leur dépoussiérage ne date pas d'aujourd'hui. La figure 7 résume bien l'importance du dépoussiérage, c'est-à-dire de l'élimination des éléments inférieurs à 0,1 mm sur la résistance mécanique et la résistance au gel du béton. En effet, l'énorme surface

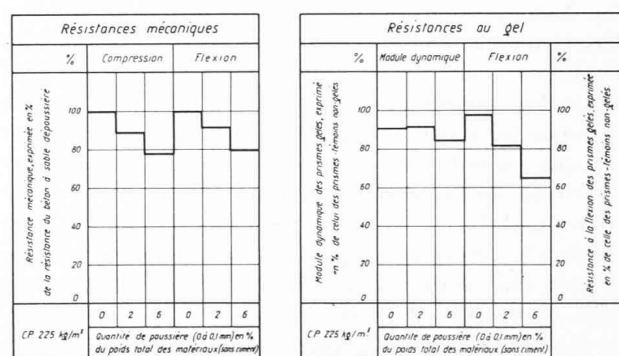


Fig. 7. — Influence du dépoussiérage sur la qualité du béton.

Barrage de la Grande Dixence.

Dosage : 225 kgCP/m³ Maniabilité constante
 Air occlus : 3-4 % Granulométrie : 0-120 mm

Résistance mécanique : Compression : cylindres moulés 30/45 cm (6 par essai). — Flexion : prismes sciés 20 × 20 × 60 cm (6 par essai).

Résistance au gel : 200 cycles. Module dynamique et résistance à la flexion : prismes sciés, 15 × 15 × 60 cm (2 prismes gelés et 2 prismes témoins par essai).

spécifique des éléments fins neutralise ou absorbe inutilement une partie du ciment et demande en outre davantage d'eau de gâchage. Mais le dépoussiérage ne suffit pas, à lui seul, à améliorer le béton : une granulométrie soignée et constante du sable joue un rôle tout aussi important. La difficulté résidait, jusqu'à présent, dans la réalisation pratique d'une telle classification, car l'emploi des tamis vibrants était limité à une dimension des mailles de 4 ou 3 mm, au-dessous de laquelle les trous étaient fréquemment bouchés et le tamisage imparfait. A notre connaissance, ce sont les Tauernkraftwerke en Autriche qui ont introduit pour la première fois en Europe le système de classification des sables par voie hydraulique. Le procédé a été introduit depuis lors sur tous les chantiers suisses de barrages. La figure 9 donne le schéma du système « Rheax » adopté au barrage de Moiry.

Granulométrie

Une des premières qualités exigées d'un béton de barrage est sa maniabilité.

En effet, si les essais préliminaires de laboratoire ont montré que le béton est satisfaisant au point de vue de sa résistance mécanique, de son étanchéité ou de sa résistance au gel, une bonne maniabilité est la meilleure garantie de retrouver ces qualités dans l'ouvrage. Il est connu, d'autre part, que les installations d'un chantier ne permettent pas de réaliser une courbe granulométrique rigoureuse, comme c'est le cas dans un laboratoire. Le chantier doit jouir d'une certaine liberté pour pouvoir s'adapter à la granulométrie naturelle des matériaux exploités. Il est donc préférable d'utiliser, pour le chantier, non pas une ou plusieurs granulométries rigides, mais un fuseau entre les limites duquel doit se situer la composition granulométrique momentanée des matériaux introduits dans la bétonnière (par exemple courbe 1 de la figure 8).

Les fuseaux choisis pour les barrages de la Grande Dixence et de Moiry, pour lesquels on exploite des sables et graviers d'origine morainique, ont l'allure du fuseau représenté à la figure 8, qui est valable pour des dosages compris entre 160 et 250 kgCP/m³. Le diamètre maximum des cailloux est de 150 mm. De nombreux essais de laboratoire nous ont montré que toutes les courbes inscrites dans ce fuseau — limites, moyenne ou courbes variant d'une limite à l'autre — ont une maniabilité et une résistance mécanique pratiquement équivalentes. En revanche, un manque de sable fin, tel qu'il est caractérisé par la courbe 2 de la figure 8, demande une plus grande durée de vibration et doit être évité sur le chantier, surtout lorsqu'on utilise des faibles dosages, de l'ordre de 160 kgCP/m³. De même, un excès de graviers de 60 à 150 mm, caractérisé par la courbe 3 de la figure 8 est aussi néfaste à la maniabilité. En effet, lors de la vidange des bennes de 6 m³, on ne peut éviter un certain démélange du béton qui augmente avec la proportion des gros cailloux.

Signalons enfin que pour les dosages de 140 kgCP/m³ tels qu'ils sont utilisés actuellement à la Grande Dixence, la courbe granulométrique ne peut plus avoir une allure quelconque à l'intérieur du fuseau ; elle doit être plus régulière. Cela revient à rétrécir de

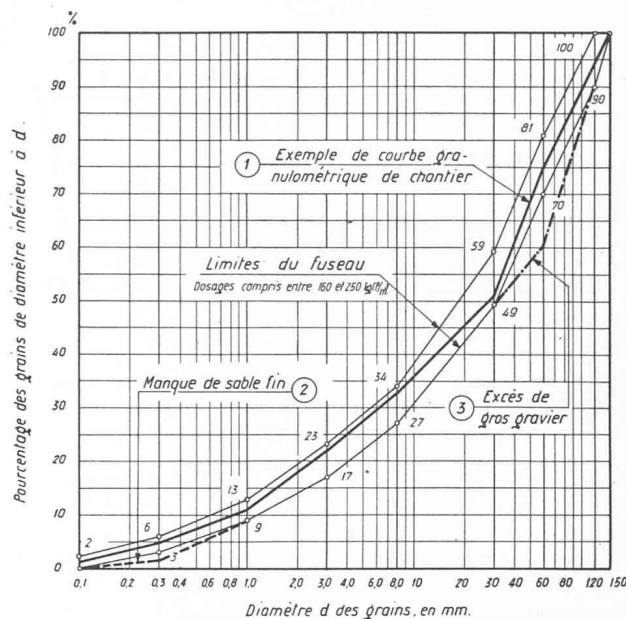


Fig. 8. — Fuseau granulométrique pour bétons à l'anneau de 150 mm.

(Ciment non compris.)

Barrages de la Grande Dixence et de Moiry.

Dosages compris entre 160 et 250 kg CP/m³.

Si l'on utilise des tamis à maille carrée C, on admet que le diamètre des grains est égal à 1,25 C.

moitié environ le fuseau de la figure 8, en direction de sa limite supérieure.

Dans la pratique, il est difficile d'abaisser la proportion de poussière (grains inférieurs à 0,1 mm) au-dessous de 1 % du poids total des matériaux. Les sables en contiennent environ $\frac{2}{3}$ et les autres matériaux $\frac{1}{3}$. Une partie de cette poussière provient du choc et de l'usure des cailloux les uns sur les autres dans les grands silos ou dans les réserves en tas : c'est la raison pour laquelle il est d'usage de relaver les cailloux à l'entrée de la tour à béton.

Dans une bétonnière de 2 à 3 m³, telle qu'on les utilise couramment aujourd'hui, les matériaux subissent des chocs violents, de sorte que la granulométrie d'une gâchée se modifie au cours du malaxage. Avec des matériaux relativement tendres, la poussière telle que nous l'avons définie ci-dessus peut atteindre une proportion de 4 à 5 % après 5 minutes de malaxage ; il est donc important d'en limiter la durée : $1\frac{3}{4}$ à 2 minutes suffisent en général.

Enfin, les limites d'un fuseau sont d'autant plus faciles à respecter que le nombre de catégories à peser est plus élevé. Les tours à béton actuelles permettent de loger sans difficulté jusqu'à 5 ou 6 balances à sables et graviers. Celle de Moiry, par exemple, dont les 4 bétonnières à axe oblique ont une capacité de 3 m³ chacune, comprend 9 balances au total, à savoir :

Ciment	
Eau	
Entraîneur d'air	
Sable	0,1 à 1 mm
Sable	1 à 3,5 mm
Gravillon	3,5 à 10 mm
Gravillon	10 à 30 mm
Gravier	30 à 70 mm
Gravier	70 à 150 mm

Le rapport des dimensions maximums d'une catégorie à celles de la catégorie inférieure est presque constant : 2,5 à 3. La figure 9 représente schématiquement les installations de concassage et de lavage-triage du barrage de Moiry.

Eau de gâchage. Essorage des sables

L'utilisation des sables et graviers peu après leur lavage pose un problème important : celui de l'égouttage, qui est d'autant plus lent que les matériaux sont plus fins. En effet, si le délai est trop court, la quantité d'eau contenue dans les matériaux risque de dépasser celle qui serait suffisante pour une gâchée, ou bien la variation rapide de l'humidité, en particulier de celle des sables, conduit à l'instabilité de la consistance du béton. Pour remédier à ce défaut, on

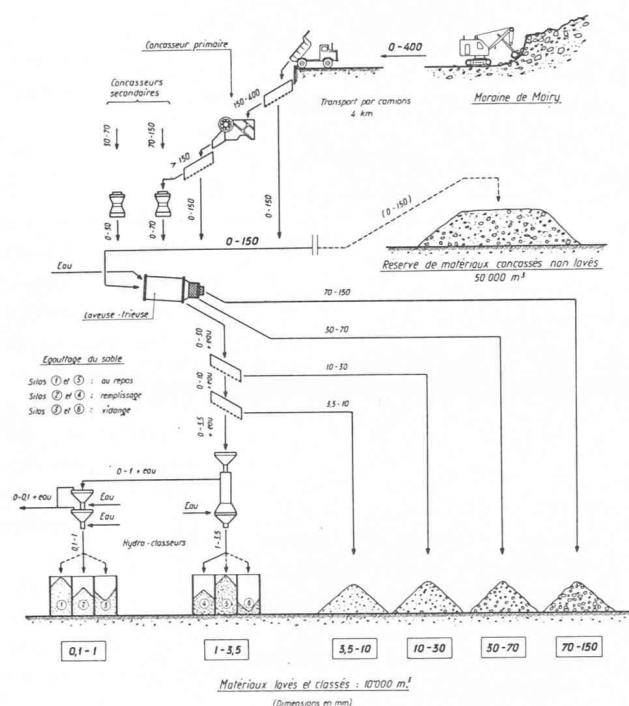


Fig. 9. — Barrage de Moiry. Schéma des installations de concassage et de lavage-triage.

est obligé de stocker pendant un certain temps les matériaux lavés et triés, de manière à en permettre l'égouttage. La méthode la plus courante consiste à créer de gros tas de graviers et à stocker le sable dans des silos. L'égouttage des graviers au-dessus de 10 mm est rapide, de sorte que leur humidité dans la tour à béton ne dépasse généralement pas 1 à 2 % en poids. Il en va tout autrement pour les sables de 0 à 5 mm, pour lesquels un repos de 10 à 20 heures est indispensable. Le procédé le plus courant consiste à remplir un silo, le laisser au repos le temps nécessaire et à ne prélever le sable qu'après un égouttage suffisant : cette méthode exige naturellement plusieurs silos, permettant une telle rotation sans interrompre le bétonnage. Elle est utilisée par exemple à la Grande Dixence, où l'on dispose de 5 silos pour l'égouttage du sable de 0,1 à 4 mm. Un repos de 20 heures permet,

dans le cas particulier, d'abaisser l'humidité à 10 % environ. Si l'on peut décomposer ce même sable en deux nouvelles catégories, l'égouttage est plus rapide et plus efficace. A Moiry, par exemple, 10 heures de repos permettent d'abaisser l'humidité à 5 % pour le sable de 1 à 3,5 mm et à 7,5 % pour celui de 0,1 à 1 mm (3 silos par catégorie).

La figure 9 représente le schéma du stockage des matériaux adopté au barrage de Moiry. Pour ce chantier, nous avons étudié l'opportunité d'intercaler, entre la station de lavage-triage et les silos, une machine à essorer le sable. Il s'agit d'une roue à godets qui tourne lentement autour d'un axe horizontal au-dessus d'un bac contenant le sable à essorer. Une partie de l'eau s'échappe tout d'abord par des fentes prévues dans les godets. Dans une seconde phase, l'eau résiduelle est retirée des godets par le vide, à travers des brosses filtrantes. L'efficacité de cette machine, fort ingénieuse d'ailleurs, dépend naturellement de la granulométrie du sable. Par exemple pour un sable rigoureusement dépoussiéré, de 0,1 à 1 mm, on peut tout au plus créer une dépression de 1 à 2 mètres. Si la proportion de poussière est au contraire celle que nous avons indiquée plus haut (1 à 2 % du poids total des matériaux), on peut atteindre jusqu'à 7 mètres de dépression. La figure 10 illustre les résultats de ces essais¹. On voit que pour le sable normalement dépoussiéré, de 0 à 1 mm, on ramène en quelques minutes l'humidité initiale (choisie de 25 % dans les essais), à 10 %; pour le sable de 1 à 3,5 mm, on passe en moins d'une minute de 15 à 5 %. Nous avons examiné ensuite le comportement dans un silo de ce sable essoré² (fig. 10).

¹ Le sable est introduit dans un cylindre métallique vertical, de 95 mm de diamètre et 185 mm de hauteur. Le fond du cylindre, légèrement conique, est recouvert d'un fin treillis et relié, en son centre, à un tube dans lequel on provoque une dépression.

² Le sable essoré est introduit immédiatement dans un tube transparent vertical, de 2 mètres de hauteur. Après un temps donné, on mesure l'humidité des différentes couches.

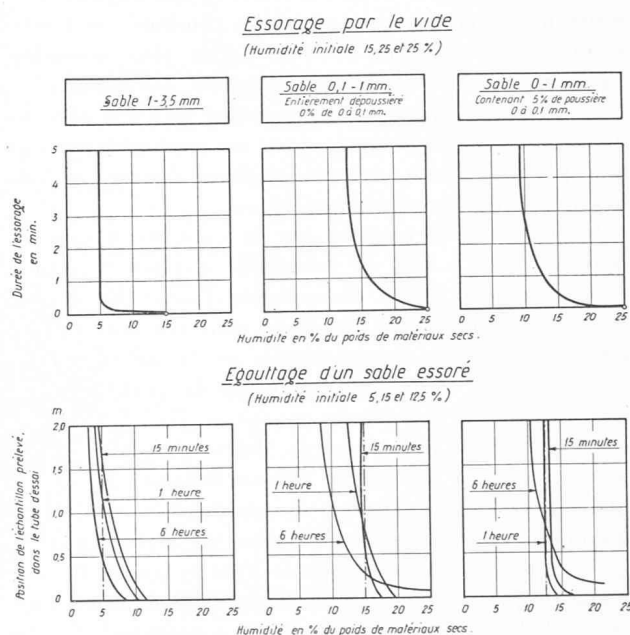


Fig. 10. — Essorage et égouttage du sable. Barrage de Moiry. Essais de laboratoire.

On voit que pour le sable normalement dépoussiéré, de 0 à 1 mm, l'égouttage recommence aussitôt et provoque dans le silo une différence d'humidité assez sensible après quelques heures. Il en est de même pour le sable de 1 à 3,5 mm. On peut donc conclure de ces essais que la machine à essorer ne peut jouer son rôle modérateur et régulateur de l'humidité que si elle est placée immédiatement avant la bétonnière et à condition que le fonctionnement des deux machines «essoreuse-bétonnière» soit régulier. Cette dernière condition est naturellement très difficile à réaliser dans une tour à béton, de sorte que l'égouttage préalable du sable, tel que décrit plus haut, nous paraît encore la meilleure solution pour le moment.

Le malaxage. Homogénéité du béton

On peut se demander si le malaxage dans les grandes bétonnières¹ de 2 à 3 m³, dont la durée est limitée à 2 minutes environ, pour des raisons d'économie d'une part (rendement de la tour à béton) et surtout pour ne pas trop broyer les matériaux, donne un béton suffisamment homogène. Cette condition devient particulièrement importante pour les faibles dosages en ciment. Plusieurs essais réalisés sur le contenu d'une trémie de 6 m³, remplie de 3 gâchées consécutives de 2 m³, ont montré que la résistance mécanique du béton prélevé en divers endroits de la trémie ne différait pas de plus ou moins 10 % de la résistance moyenne, même pour un béton dosé à 140 kgCP/m³.

L'air occlus

Depuis une dizaine d'années, l'emploi d'entraîneurs d'air ou de plastifiants est devenu une pratique courante sur les chantiers de barrages suisses.

Les entraîneurs d'air, ajoutés généralement sous forme liquide aux agrégats dans la malaxeuse, introduisent artificiellement dans le béton des bulles d'air très petites dont la propriété principale est d'augmenter la cohésion du béton frais, ce qui augmente sa résistance à la ségrégation, et de diminuer le frottement interne, ce qui rend le béton plus maniable. En outre, l'occlusion d'air supprime les canaux où l'eau peut cheminer et les remplace par des alvéoles discontinues, entre lesquels l'eau ne peut plus circuler que par capillarité, ce qui améliore l'étanchéité du béton durci et sa résistance au gel.

On admet généralement que la quantité d'air optimum est de 4 à 5 % du volume de mortier (0-30 mm) contenu dans le béton. La quantité d'air occlus dépend du dosage du produit employé, mais elle est souvent influencée par la granulométrie et la nature pétrographique des sables, ainsi que par la quantité d'eau de gâchage. La marque de ciment ne joue pas de rôle en Suisse. Pour le barrage de Moiry, par exemple, où les sables sont composés essentiellement de gneiss, quartz, feldspaths, micas et phyllites, on constate qu'un manque de sable fin (entre 0,1 et 0,4 mm) ou qu'un excès d'eau augmentent l'air entraîné. Ce fait n'aurait pas d'importance si la granulométrie des sables et leur humidité restaient constantes. Il n'en

¹ Dans ce type de bétonnières, le remplissage de l'eau, du ciment, des sables et des graviers a généralement lieu simultanément.

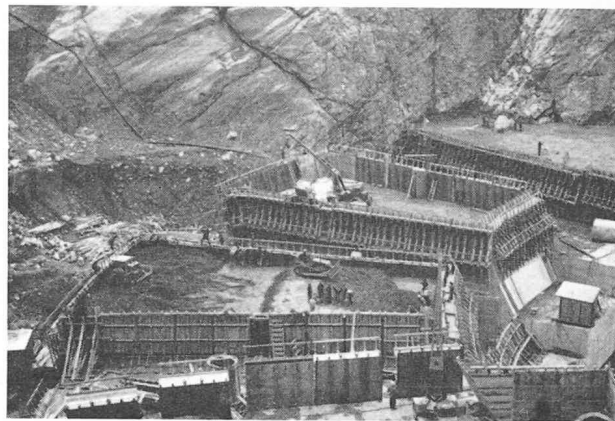


Photo J. P. Stucky.

Fig. 11. — Barrage de Moiry.

Mise en place du béton au bulldozer. Vibration systématique du béton par groupes de 3 vibrateurs.

est pas toujours ainsi en réalité, de sorte que la variation d'air occlus dans le béton peut contribuer à augmenter la dispersion des résistances.

Le transport

Le transport du béton entre la tour à béton et son lieu d'utilisation se fait actuellement (en Suisse) pour ainsi dire exclusivement au blondin de 20 tonnes. Les bennes de 6 m³ restent accrochées en permanence au chariot et on les remplit au moyen d'un silobus de même capacité qui amène au quai de chargement les 6 m³ de béton prélevés d'une trémie sous la tour à béton. Afin d'éviter des erreurs de destination, les bétons de différents dosages sont «dirigés» par des signaux lumineux commandés de la tour à béton.

Les vitesses de translation des bennes du blondin sont de l'ordre de 350 m/min. et celles d'élévation de l'ordre de 150 m/min. de sorte que pour les trajets les plus longs (Moiry : translation de 400 m et descente de 150 m) une benne peut faire 10 à 15 trajets par heure, compte tenu des temps de chargement et de déchargement.

La mise en place et la vibration

Le nombre de blondins utilisables ensemble sur une même levée dépend de sa surface. A la Dixence, par exemple, où les levées ont 3,20 m de hauteur, on utilise généralement 2 à 3 blondins pour une surface de 16 × 35 ou 16 × 40 mètres. Une levée se compose de 5 ou 6 couches intermédiaires ; une couche doit recouvrir la précédente 3 heures, au maximum 4 heures plus tard. Ce délai fait souvent l'objet de discussions : des essais de laboratoire ont montré (cylindres de 30/45 cm) qu'une attente de 4 à 5 heures ne nuisait pas à la résistance du béton même si la couche inférieure est revibrée en même temps que la couche supérieure.

On serait tenté, pour gagner du temps en libérant rapidement le blondin, de vider les bennes en une fois et d'étaler ensuite le béton au moyen des vibrateurs. Cette pratique, justifiée pour des bennes de 1 à 2 m³, est certainement fautive pour des bennes de 6 m³. En effet, la vibration prolongée du tas ainsi formé démelange le béton et concentre vers le bas les plus

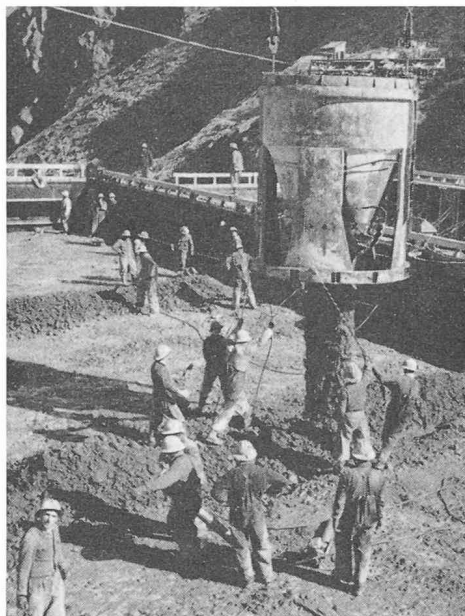


Photo Widmer, Consortium Grande Dixence.

Fig. 12. — Barrage de la Grande Dixence.
Mise en place du béton par cordons et étalement
du béton par pré vibration.

gros éléments, d'où formation de nids de gravier au contact de deux tas. On peut éviter ce défaut de deux manières différentes. Une méthode très élégante est celle dite du *bulldozer* (fig. 14), utilisée à Mauvoisin et à Moiry. La benne du blondin ayant été vidée en tas, un bulldozer étale le béton en une couche horizontale. La surface ainsi mise à disposition des équipes de vibreurs est propre et nette : elle permet un contrôle facile de la vibration, qui peut être entreprise tout à fait systématiquement. Dans la seconde méthode, dite de la *vidange en cordon*, la benne du blondin exécute pendant la vidange un mouvement continu de translation, de sorte qu'elle se vide en cordons parallèles

de 0,70 à 0,90 m de hauteur. Lorsque quelques bennes ont été vidées et que le béton forme un cordon continu, une vibration préliminaire étale le béton en surface horizontale. Lorsque la surface ainsi préparée est suffisamment grande, les équipes de vibreurs reprennent la vibration systématique d'une extrémité à l'autre du cordon (fig. 12).

Le vibreur utilisé presque partout actuellement est le Notz GF. 125 (fig. 13). L'aiguille, de 125 mm de diamètre extérieur et de 1 mètre de longueur, à mouvement hypocycloïdal, est surmontée d'un moteur électrique de 7,5 CV, à la tension de 380 volts. Elle permet d'obtenir une fréquence de vibration égale à un multiple du nombre de tours, soit en général 9000 vibrations par minute. Ce type de vibreur, très puissant et efficace, pèse malheureusement plus de 70 kg, de sorte que les deux servants se lassent bientôt de le tenir dans sa position correcte (30 degrés au maximum sur la verticale). Si l'on n'y prend pas garde, le poids du moteur fait alors basculer l'aiguille dans une position voisine de l'horizontale, ce qui empêche la vibration correcte d'une couche sur toute sa hauteur.

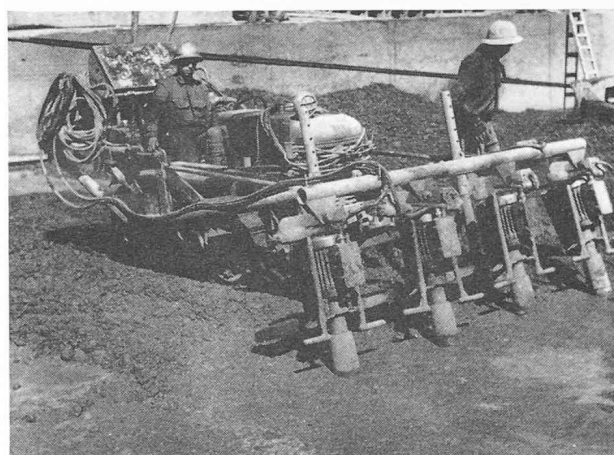


Photo AEBM.

Fig. 14. — Barrage de Mauvoisin.

Vibration « mécanique » du béton au moyen de 4 vibreurs GF. 125 montés sur bulldozer.
Puissance totale de vibration : $4 \times 7,5 = 30$ CV.
(Prototype A.E.B.M.)



Photo J. P. Stucky.

Fig. 13. — Barrage de Moiry.

3 vibreurs GF. 125 travaillant en parallèle (7,5 CV chacun).
Position correcte de l'aiguille : 30° sur la verticale.

La vibration est probablement l'opération la plus difficile à mener à bien sans défaillances. On peut s'étonner que sur des chantiers aussi mécanisés que ceux des barrages modernes, cette opération capitale dépende encore de l'état physique des ouvriers. Des expériences sont actuellement en cours au barrage de Mauvoisin pour vibrer le béton en suspendant les vibreurs aux bras d'un bulldozer spécialement équipé (fig. 14). Les résultats encourageants obtenus nous permettent d'espérer que cette nouvelle méthode pourra être introduite à brève échéance sur les autres chantiers. En attendant, on doit se contenter de systématiser l'ensemble du travail et d'exercer une surveillance permanente. La surface du béton ayant été rendue horizontale et plane, par exemple au moyen du bulldozer, les vibreurs seront réunis sur un front,

par groupes de 3 ou 4, et *balayeront* la surface d'une extrémité à l'autre, en restant parallèles à eux-mêmes. S'il reste un trou lorsqu'on retire le vibreur, il doit se refermer par l'effet de la plongée suivante. La durée de vibration et l'écartement des vibreurs seront fixés en fonction de la maniabilité du béton. L'expérience a prouvé aujourd'hui que l'on peut parfaitement bien vibrer des bétons à faible dosage (Grande Dixence : 140 kgCP/m³) si leur granulométrie est correcte et leur teneur en eau très régulière.

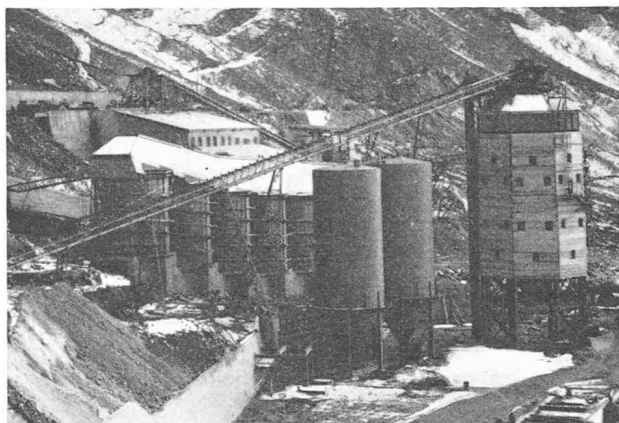


Photo O. Darbellay, Martigny.

Fig. 15. — Barrage de Moiry.

Installations générales du chantier.
Tour à béton. 2 silos à ciment métalliques.
6 silos d'égouttage du sable, en bois.
Au fond : station de concassage, lavage, triage.

IV. Le coefficient de sécurité

Exposé du problème

Différents critères peuvent être envisagés pour déterminer la résistance à la rupture d'un massif de béton sur la base d'une série d'essais.

En général, on fixe arbitrairement un coefficient de sécurité invariable par lequel on multiplie la contrainte calculée. Ce coefficient de sécurité tient compte du fait que le calcul n'indique pas nécessairement les valeurs des contraintes qui seront atteintes dans l'ouvrage, et du fait que les bétons n'auront pas partout la résistance escomptée d'après les essais préliminaires ni celle qu'indiquent les échantillons de contrôle moulés, fabriqués en nombre limité pendant la construction du barrage. Pour ces diverses raisons, il est d'usage de choisir une valeur relativement élevée du coefficient de sécurité : $n = 4$ ou 5 . Mais cette valeur tout à fait arbitraire ne tient pas compte de la *qualité des résultats* des essais de contrôle. Il se pose donc une première question : ce coefficient doit-il être appliqué à la valeur minimum ou à la valeur moyenne R_m des résistances mesurées ? Si c'est la valeur minimum qui entre en considération, le coefficient doit être fixé plus bas que si l'on considère la valeur moyenne. En outre, plus les essais sont nombreux, plus on a de chances d'obtenir une fois un mauvais résultat. Il serait donc illogique que ce résultat exceptionnel détermine le coefficient de sécurité.

Par ailleurs, en adoptant la valeur minimum, on s'expose fatalement à un conflit, car le jour où des résultats exceptionnellement bas seront constatés, on trouvera toujours des explications pour estimer que cette valeur est erronée, et on sera tenté de l'éliminer, ce qui revient à s'affranchir de toute règle. Si l'on se réfère au contraire à la valeur moyenne, la tentation d'éliminer les résultats trop bas est évidemment moins grande, mais l'expérience montre qu'elle subsiste ; on relève ainsi légèrement la moyenne. Sans se trouver dans la situation anarchique du premier cas, le fait de tolérer l'exclusion de certains essais enlève au contrôle son objectivité.

Le fait d'appliquer le coefficient de sécurité, comme c'est généralement le cas, à la résistance mesurée sur cubes moulés, ne donne pas non plus une idée réelle de la sécurité. Nous avons vu en effet, au chap. II, que la résistance sur cubes est loin d'être égale à la résistance vraie de l'ouvrage. Passer au cylindre, grâce auquel la résistance obtenue est moins sujette à caution, devrait évidemment conduire à diminuer le coefficient de sécurité, tel qu'on le définit habituellement. Nous ferons abstraction, pour le moment, de cette dernière difficulté, mais pour y revenir à la fin de notre exposé.

Méthode proposée

Considérons donc le cas habituel, où l'on applique le coefficient de sécurité à la résistance moyenne, mesurée par exemple à 90 jours sur cubes moulés de $30 \times 30 \times 30$ cm, et donnons à ce coefficient une valeur, courante également, de $n = 4,2$. Cette notion ancienne indique tout simplement qu'il y a autant de chances d'avoir des résistances inférieures que des résistances supérieures à la moyenne R_m . Mais elle ne dit rien sur la probabilité de trouver une fois ou l'autre un résultat qui soit égal à la contrainte calculée, c'est-à-dire où n serait égal à 1. Or, d'après la théorie des probabilités, plus la dispersion (ou écart quadratique moyen E) des résultats d'une grande série d'essais sera élevée, plus la probabilité sera grande de trouver des valeurs de n égales à 1 ou même inférieures à 1. Le fait d'augmenter purement et simplement la valeur du coefficient de sécurité n , sans se préoccuper de la dispersion des résultats, ne garantit donc aucune sécurité supplémentaire. En effet, soient :

σ = la contrainte obtenue par le calcul.
 R_m = la résistance moyenne à la compression sur cubes, $R_m = \frac{\sum R_i}{N}$

E = l'écart quadratique moyen affecté à cette résistance moyenne,

$$E = \sqrt{\frac{\sum (R_m - R_i)^2}{N - 1}}$$

N = le nombre de résultats R_i . En écrivant $N - 1$, on introduit une correction destinée à tenir compte du fait que les résultats R_i sont en nombre limité.

e = la dispersion ou l'écart quadratique moyen relatif, $e = \frac{E}{R_m}$

- $n_{0,5}$ = le coefficient de sécurité correspondant à la résistance moyenne R_m

$$n_{0,5} = \frac{R_m}{\sigma}$$
- $1 - P$ = la probabilité d'obtenir une résistance plus faible qu'une résistance R_p donnée.
- n_p = le coefficient de sécurité défini par le rapport $n_p = \frac{R_p}{\sigma}$
- α = un facteur donné en fonction de P par le calcul des probabilités.

Le calcul des probabilités donne :

$$R_p = R_m - \alpha E$$

d'où l'on tire le coefficient de sécurité n_p ayant la probabilité P d'être atteint ou dépassé

$$n_p = n_{0,5} (1 - \alpha e).$$

On peut établir un graphique donnant la relation entre n_p , le coefficient de sécurité défini par le rapport $R_p : \sigma$ de la résistance probable à la contrainte calculée, et la probabilité $1 - P$ qu'il soit une fois ou l'autre inférieur à cette valeur n_p . Cette relation est elle-même fonction de la dispersion e . Or la dispersion tend à augmenter lorsque la résistance diminue. On peut dire que pour des dosages en ciment compris entre 180 et 250 kgCP/m³, une dispersion de $e = 0,09$ est faible, tandis qu'une dispersion de 0,15 doit être considérée comme exagérée, et ne devrait pas se présenter sur des chantiers convenablement équipés et bien dirigés. Pour de tels dosages, la valeur de $e = 0,12$ est une moyenne normale. Si les dosages sont plus faibles, par exemple 140 kgCP/m³, la moyenne normale est 0,15. Il y a lieu, d'ailleurs, de remarquer que cette notion de dispersion n'a de sens que si le nombre d'essais est très grand, ce qui doit être le cas pour un chantier de grand barrage. La figure 16 donne la valeur de n_p pour trois dispersions, $e = 0,09$, 0,12 et 0,15, en admettant pour $n_{0,5}$ la valeur habituelle de 4,2. Pour $1 - P = 0,5$, on a $P = 0,5$; c'est le cas de la résistance moyenne. Pour $n_p = 1$ on a une probabilité $1 - P$ de trouver, sur l'ensemble des essais, un résultat isolé égal à la contrainte calculée. Cette probabilité doit naturellement être choisie très petite : on considère généralement qu'une probabilité inférieure à 10^{-7} équivaut à une impossibilité, et les risques qui subsistent sont admis comme nuls dans la vie courante. On voit ainsi, sur le graphique de la figure 16, qu'une sécurité $n = 4,2$ (selon

la définition classique), relative à la résistance moyenne, donne en réalité une probabilité voisine de 10^{-7} d'avoir un résultat inférieur à la contrainte calculée, lorsque la dispersion est de 0,15. Avec une dispersion de 0,12, cette probabilité tombe à 10^{-10} . Il est donc parfaitement logique de faire dépendre le coefficient de sécurité classique $n_{0,5}$ et en définitive le dosage en ciment, de la dispersion des résultats des essais de contrôle de chantier.

Cette notion nouvelle remplace par une véritable sécurité la sécurité plus ou moins fictive admise aujourd'hui. Elle engage aussi les ingénieurs responsables de la fabrication et de la mise en place du béton à mettre tout en œuvre pour assurer une dispersion aussi petite que possible, garante d'une plus grande sécurité.

Coefficient de sécurité proposé pour les barrages

On peut s'imposer un certain nombre de conditions qui encadreront les diverses possibilités pratiques :

- On peut s'imposer que, pour la dispersion moyenne d'un chantier caractérisée par $e = 0,12$, le coefficient de sécurité rapporté à la moyenne des résultats sur cubes de 30 cm d'arête soit égal à 4,2. C'est la valeur communément admise aujourd'hui lorsqu'on fait abstraction de la dispersion. La probabilité qu'un résultat isolé tombe au-dessous de la contrainte calculée est plus petite que 10^{-10} (courbe *a* de la figure 16).
- On peut s'imposer en outre qu'avec une dispersion exagérée, de $e = 0,15$, il soit pratiquement impossible qu'un résultat isolé tombe au-dessous de la contrainte calculée. Ce degré d'impossibilité, nous le fixons par la probabilité $1 - P = 10^{-7}$. Pour qu'une telle condition soit satisfaite, il faut que le coefficient de sécurité, par rapport à la moyenne, soit égal à $n_{0,5} = 4,65$ (courbe *b* de la figure 16).
- On peut enfin désirer que, quelle que soit la dispersion au-dessous d'une certaine limite, admise par exemple à $e = 0,0533$, le coefficient de sécurité rapporté à la moyenne ne soit jamais inférieur à 3,2 sur cubes. Pour une si faible dispersion, la probabilité qu'un résultat isolé tombe au-dessous de la contrainte calculée est extraordinairement petite (courbe *c* de la figure 16).

En s'imposant ces trois conditions, on définit en quelque sorte la relation entre le coefficient de sécurité rapporté à la moyenne et à la dispersion des résultats des essais de béton. C'est ce que l'on a représenté sur le graphique de la figure 17 (courbe *a*) qui donne le coefficient de sécurité exigible en fonction de la dispersion e . Ce graphique, utilisé à la Grande Dixence, à Mauvoisin et au barrage de Moiry, sert de base à l'établissement des dosages du béton en ciment. Il montre bien que, si la dispersion augmente, le coefficient de sécurité à exiger croît également. Au contraire, si la dispersion diminue, on peut se rapprocher du coefficient de sécurité minimum de 3,2.

Les dosages sont donc choisis de façon que les coefficients de sécurité exigibles, définis ci-dessus, soient respectés. Comme ces sécurités dépendent des

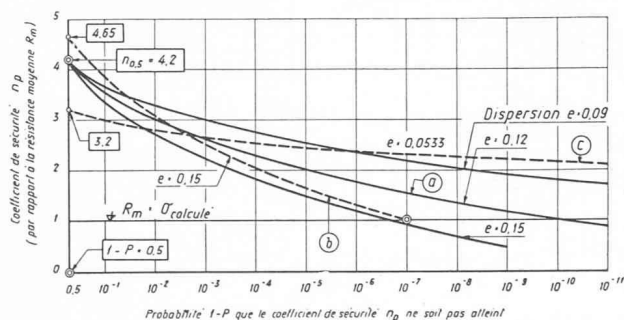


Fig. 16. — Probabilité $1 - P$ que le coefficient de sécurité n_p ne soit pas atteint.

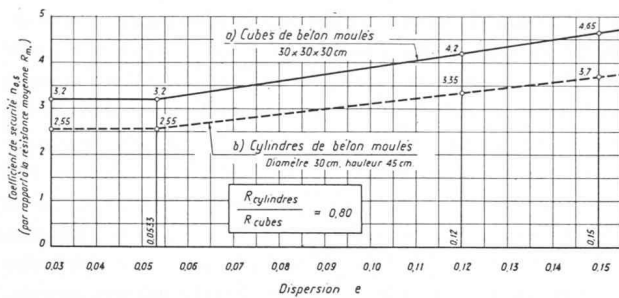


Fig. 17. — Coefficients de sécurité $n_{0,5}$ exigibles en fonction de la dispersion e .

dispersions des résultats des essais de béton du chantier, et qu'on est appelé à se déterminer avant que le chantier ait commencé, on doit donc envisager deux stades pour la détermination des dosages :

- Une détermination provisoire, sur la base des essais préliminaires de laboratoire. Ces essais devront réaliser, autant que possible, les mêmes bétons que le chantier ; on essaiera en outre d'en évaluer la dispersion. A défaut de résultats assez nombreux, on pourra admettre les valeurs de e en fonction des dosages, d'après la courbe que nous avons représentée dans la figure 18. Cette courbe enveloppe les innombrables résultats qui ont été obtenus sur quelques grands chantiers actuels du Valais.
- Dès la mise en chantier des bétonnages, on pourra procéder aux essais de contrôle qui permettront d'évaluer les dispersions et d'apporter les corrections éventuelles aux dosages.

Il y a lieu de remarquer que les résistances de base sont déterminées sur des bétons à l'âge de 90 jours. Pour éviter, au début du chantier tout au moins, d'être obligé d'attendre un tel délai pour apporter les corrections éventuelles au dosage des bétons, on pourra procéder par extrapolation sur la base des essais à 7 jours, et en évaluant, par comparaison avec les essais préliminaires, les résistances que l'on pourra atteindre à 90 jours. Les dispersions à 90 jours pourront être considérées provisoirement comme identiques aux dispersions à 7 jours. En réalité, elles baisseront d'un cinquième environ. Dans la pratique, comme il faut un grand nombre de résultats pour pouvoir tirer des conclusions valables (une centaine au moins), cela revient à attendre plusieurs mois avant de pouvoir introduire les corrections de dosages. A la Grande Dixence, par exemple, la première correction a été réalisée — dans le sens d'une diminution des dosages — après une campagne entière de bétonnage, sur la base de 800 résultats à 90 jours et autant à 7 jours. Les dispersions doivent être calculées pour chaque dosage séparément. Si l'on utilise plusieurs dosages sur le chantier, il est préférable de concentrer les contrôles sur quelques-uns d'entre eux, par exemple sur les dosages faibles et moyens. En effet, les dispersions tendent à diminuer lorsqu'on augmente le dosage.

Calcul de la sécurité véritable du béton d'un barrage

Dans l'exposé du problème, nous avons rappelé que la résistance sur cubes, prise en considération dans nos

raisonnements pour nous rattacher aux conceptions classiques, était supérieure à celle de l'ouvrage. Or, ce qui nous intéresse en définitive, c'est la sécurité véritable de l'ouvrage.

Nous admettrons, pour le rapport des résistances sur cylindres et celles sur cubes la valeur moyenne de 0,8 qui découle (approximativement) de la figure 2, mais que nous avons contrôlée sur plus de 300 éprouvettes (150 cylindres et 150 cubes) pour un type de presse donné (presse Lepetit de 500 tonnes) et avec l'appareillage des éprouvettes au soufre fondu.

Le rapport entre la résistance de l'ouvrage¹ et celle mesurée sur cubes est alors de

$$R_v = 0,8 \times 0,9 \times R_{\text{cubes } 30} = 0,72 R_{\text{cubes } 30}.$$

En d'autres termes, le coefficient de sécurité $n_{0,5}$ de l'ouvrage est égal à 0,72 fois celui admis sur cubes en fonction de la dispersion, selon le graphique 17.

La figure 18 donne un exemple de calcul de la sécurité vraie d'un béton de barrage en fonction des résistances moyennes et des dispersions mesurées sur cylindres. Nous pouvons tracer, en fonction du dosage en ciment, les courbes *a* et *b* du graphique 18 que nous choisirons continues et légèrement inférieures (pour les résistances) ou légèrement supérieures (pour les dispersions) aux valeurs mesurées. En appliquant les coefficients de sécurité de la figure 17, nous pouvons tracer la courbe des contraintes admissibles en fonction des dosages (courbe *d*).

L'équation

$$n_p = n_{0,5} (1 - \alpha e)$$

nous donne les valeurs α correspondant à chaque dosage, puis les probabilités $1 - P$ que la résistance de l'ouvrage soit inférieure à la contrainte calculée (courbe *e*). On voit que pour les faibles dosages, cette probabilité est plus grande que pour les forts. Mais l'exemple ci-dessus, calculé sur la base d'essais réels, montre

¹ Voir chapitre II.

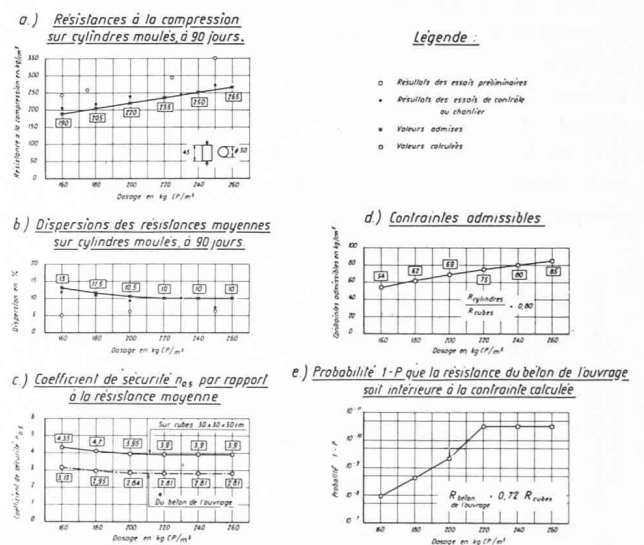


Fig. 18. — Exemple de calcul de la sécurité vraie d'un béton de barrage.

(A l'âge de 90 jours.)

bien que cette probabilité est extrêmement petite puisqu'elle reste dans le cas particulier inférieure à $1 - P = 10^{-7}$, valeur admise généralement comme une impossibilité.

Conclusion

Le présent exposé répond peut-être à la proposition faite par le rapporteur suédois, M. Sundquist, au Cinquième Congrès des grands barrages (Paris 1955), d'étudier les contraintes admissibles dans le béton en fonction de la dispersion. Comme on le voit, ce problème a préoccupé les ingénieurs suisses en 1950 déjà, lorsqu'ils ont entrepris l'étude des barrages de Mauvoisin et de la Grande Dixence. Ce n'est qu'après

plusieurs années d'expériences et de très nombreux essais de contrôle sur les chantiers qu'une méthode a pu être mise au point. La fabrication du béton est entrée aujourd'hui, au même titre que la métallurgie ou la chimie, dans une phase industrielle, où l'ingénieur ne néglige ni la sécurité ni l'économie.

Il nous reste enfin l'agréable devoir de remercier la Grande Dixence S. A., Electro-Watt et les Forces Motrices de la Gougna d'avoir bien voulu nous autoriser à publier une partie des résultats des nombreux essais entrepris par ces trois sociétés dans l'intérêt de la science et de la technique.

(Adresse de l'auteur : chemin de Rosenneck 6, Lausanne.)

624.182

RENFORCEMENT DE GALERIES CONTRE AVALANCHES EN BÉTON PRÉCONTRAIT

par G. DE KALBERMATTEN et F. BURRI, ingénieurs diplômés E.P.F. — S.I.A.

On se souvient encore des énormes avalanches qui, durant l'hiver 1954-1955, ont coupé la célèbre station de Zermatt du reste du monde. Des masses de neige considérables s'écrasèrent dans la vallée, recouvrant sur des kilomètres la voie du chemin de fer Viège-Zermatt. L'ampleur de ces avalanches n'a pas seulement eu pour conséquence de déborder les ouvrages de protection existants, mais encore de les endommager sérieusement.

On a mesuré sur ces galeries des épaisseurs de neige allant jusqu'à 15 mètres, ce qui, pour un poids spécifique de 400 kg/m^3 , créait des surcharges maximales de 6000 kg/m^2 (fig. 1). Il en est résulté des déformations sensibles surtout aux charpentes métalliques.

Cette catastrophe obligeait la Société du chemin de fer Viège-Zermatt, non seulement à réparer les dommages causés, mais encore à développer le système de sécurité, surtout par l'étude d'une protection accrue (fig. 3). Il en résultait les mesures suivantes :

- prolonger les ouvrages de protection existants ;
- déplacer à certains endroits la voie ferrée plus en amont ;
- renforcer les galeries qui avaient souffert.

Le programme de travail qui nous fut soumis était conditionné par une exécution rapide des travaux, n'entravant en aucun cas la marche des trains. En effet, ces énormes masses de neige fondant très lentement, il restait durant l'été relativement peu de temps pour exécuter ces ouvrages et assurer ainsi, l'hiver suivant, une exploitation sûre du trafic.

Les constructions existantes datent de 1932. Elles sont formées de DIN 16 écartés d'un mètre et recouverts d'une dalle en béton de 12 cm.

Un rapide calcul nous montrait que, sous l'effet des très hautes charges, les aciers devaient être sollicités jusqu'à leur limite élastique et que d'après la déformation mesurée, une partie de celle-ci devait être attribuée déjà à une déformation permanente.

De plus, les colonnes en aval et les murs de soutènement en amont prouvaient, par leurs fissures, la présence d'un effort horizontal important provenant du déplacement de l'avalanche sur la construction.

C'est pourquoi, d'emblée, il parut illusoire de renforcer la construction existante dans l'état où elle était. Il était, d'autre part, impensable de la remplacer par une nouvelle.

Il s'agissait dès lors de créer une nouvelle protection pratiquement indépendante de la couverture existante, mais qui puisse bénéficier des appuis existants qui gardaient, eux, toute leur valeur. Elle fut donnée par une dalle massive en béton précontraint coulée sur la toiture existante, celle-ci tenant lieu de coffrage.



Fig. 1.