Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 53 (1961)
Heft: 6-7

Artikel: Technologie des bétons
Autor: Frey-Bär, Otto
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-920756

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

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

Technologie des bétons

par *Otto Frey-Bär*, ingénieur en chef à Motor-Columbus S. A., Baden

CDU 624.012.3

A. Introduction

Jusqu'à l'heure actuelle, 36 barrages en béton d'une hauteur supérieure à 30 m ont été construits en Suisse et 10 ouvrages sont actuellement en chantier. Il s'agit, à peu d'exceptions près, de barrages-poids et de barrages-voûte dont le volume total de béton mis en place dépasse 12 mio m^3. Bien que l'établissement des projets d'exécution de ces ouvrages ait été confié à des bureaux d'ingénieurs différents, une technique de fabrication du béton relativement unifiée s'est développée en Suisse qui se base dans les grandes lignes sur celle employée en Europe ou en Amérique, mais qui tient compte dans une forte mesure des conditions climatologiques et géologiques spéciales de notre pays.

B. Agrégats du béton

1. Sables et graviers

Presque tous les chantiers de barrages sont situés dans les Alpes à des altitudes de 1000 à 2500 m. La roche est constituée généralement par des gneiss ou par des schistes calco-argileux et dans peu de cas seulement par des calcaires (par exemple Châtelot et Zeuzier). Généralement, les agrégats proviennent du voisinage immédiat du chantier et sont exploités dans des dépôts morainiques ou alluvionnaires. On évite dans la mesure du possible l'utilisation des gneiss dont le sable contient beaucoup trop de mica.

La préparation des sables et graviers avait lieu, jusqu'à maintenant, presque uniquement par le «procédé humide», c'est-à-dire par lavage et tamisage. Si l'on dispose de matériaux appropriés dont les éléments tendres ont été éliminés naturellement au cours d'un transport fluvial par exemple, ceux-ci sont classés habituellement selon les catégories suivantes:

— sable 0 à 3 et 3 à 8 mm
— gravier 8 à 30, 30 à 60 et 60 à 120 (150) mm

Une des principales difficultés pour obtenir une résistance mécanique suffisante du béton est la présence dans les alluvions de sables micacés et de poussières. Ces dernières années, des améliorations importantes ont été apportées aux méthodes de préparation des sables et graviers dans le but de réduire au minimum le pourcentage des particules très fines. En particulier, la composante 0 à 3 mm est séparée par voie hydraulique dans l'installation Rhéax en trois fractions supplémentaires de 0 à 0,1, 0,1 à 1 et 1 à 3 mm, dont seules les deux dernières classes entrent dans la fabrication du béton. De plus, l'expérience a montré qu'il est opportun de laver une seconde fois les composantes au-dessus de 8 mm immédiatement avant la tour à béton pour éliminer les poussières produites par le transport et la manutention. Les mesures mentionnées ci-dessus permettent d'influencer favorablement la résistance mécanique du béton, en outre le sable dépoussiéré s'égoutte beaucoup plus rapidement, ce qui facilite sa préparation. En utilisant 3 silos pour chaque fraction 0,1 à 1 mm et 1 à 3 mm, l'humidité naturelle des sables peut être maintenue pratiquement constante.

En résumé, compte tenu des améliorations précitées, les alluvions sont classées suivant les composantes ci-dessous:

— sable 0,1 à 1, 1 à 3 et 3 à 8 mm
— gravier 8 à 30, 30 à 60 et 60 à 120 (150) mm

2. Ciment

La question de savoir, s'il faut utiliser en Suisse des ciments spéciaux dans la fabrication des bétons de barrages, comme cela est pratiqué couramment dans différents pays, a été étudiée très en détail par divers organismes, mais ceci toujours pour un ouvrage déterminé. Dans ce but, le Comité National Suisse des Grands Barrages a entrepris des examens très approfondis afin de résoudre, d'une part, le problème de la quantité de chaleur dégagée par la réaction de prise et, d'autre part, celui de la sécurité au gel. Quelques résultats de ces examens sont reportés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1

	Résistance du mortier 1:3 à 365 jours		Chaleur de prise		Rapport de la résistance à la chaleur de prise		Retrait à 365 jours pour une humidité relative de 50 %	Nombres des cycles de gel et de dégel nécessaires pour produire un allongement de 0,1 mm/m
	Compression kg/cm²	Flexion kg/cm²	après 365 jours cal/g	de 90 à 365 jours cal/g	Compression	Flexion		
1 Ciment Portland C I à mouture normale[1]	822	135,6	99,8	10,4	8,2	1,35	0,83	500
2 Ciment Portland C I à mouture grossière	751	127,6	98,3	15,5	7,6	1,30	0,89	500
3 Ciment Portland C II à mouture normale	733	121,6	98,4	10,3	7,4	1,23	0,77	500
4 Ciment Portland C II à mouture grossière	678	114,9	98,9	13,0	6,9	1,16	0,79	500
5 70 % de clinker I + 30 % de laitier C	753	132,6	95,4	17,0	7,9	1,39	0,87	500
6 70 % de clinker I + 30 % de laitier V	828	144,4	102,8	17,3	8,1	1,40	0,91	480
7 70 % de clinker I + 30 % de laitier G	790	123,5	103,1	13,8	7,7	1,19	1,04	500
8 70 % de clinker I + 30 % de trass	684	116,9	93,2	19,4	7,4	1,25	0,89	150
9 70 % de clinker I + 30 % de pouzzolane	687	113,8	89,8	18,4	7,6	1,26	0,90	260
10 80 % de clinker I + 20 % de pouzzolane	734	122,3	97,3	8,6	7,6	1,26	0,89	400
11 Modified clinker III suisse (Low Heat)	802	126,3	87,6	4,6	9,1	1,44	0,71	460
12 USA Modified Type II	848	124,6	99,0	2,3	8,5	1,26	0,89	450
13 Ferrico-pozzolanico italien	713	126,2	74,3	10,3	9,6	1,70	0,85	300

[1] Les désignations C I et C II se réfèrent aux livraisons de diverses fabriques suisses.

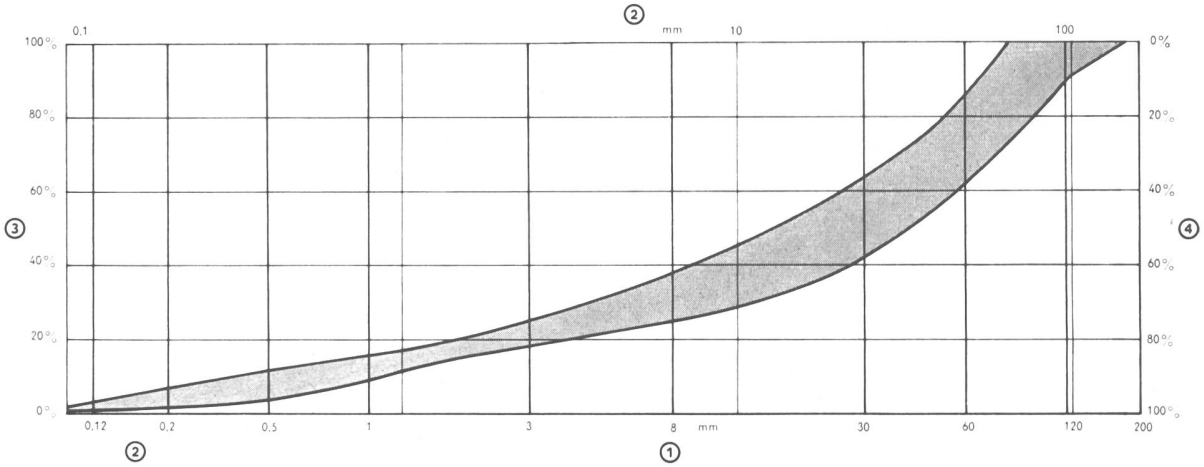
L'expérience acquise en Suisse ces 30 ou 40 dernières années dans le domaine de la construction des barrages montre qu'il faut vouer une attention toute particulière à la question de la résistance au gel. Pendant l'hiver, en montagne, la température peut rester pendant plusieurs mois au-dessous du point de congélation et, même en été, il peut arriver que le béton doive être mis en place à une température de quelques °C seulement. En examinant le tableau 1, l'on constate que les ciments Portland normaux satisfont à la condition de sécurité au gel.

Cette catégorie de liants développe cependant un peu plus de chaleur que les ciments mixtes ou améliorés. Ce désavantage n'est plus très important de nos jours, depuis l'introduction de la réfrigération artificielle.

Les examens entrepris ont montré que le but proposé peut être atteint en utilisant du ciment Portland normal avec addition d'un adjuvant. L'adjonction aux clinkers de 5 % de laitier de haut-fourneau qui a eu lieu occasionnellement pour des raisons de fabrication, n'a apporté aucune amélioration de qualité. L'emploi de ciment normal offre en revanche l'avantage pendant les mois d'été, c'est-à-dire au moment où les besoins en ciment sont les plus forts, d'une capacité de production étendue et d'une grande régularité dans la qualité. Ce sont là les raisons principales de l'emploi en Suisse de ciment Portland normal dans la construction des barrages, et il semble que cet usage sera conservé à l'avenir.

3. Adjuvants

L'influence favorable des plastifiants et des entraîneurs d'air sur la résistance au gel et sur la maniabilité des bétons est prouvée. Ces dernières années, de tels adjuvants ont été employés, après de nombreux essais, sur tous les chantiers de barrages suisses. Du fait que ces adjuvants se comportent différemment suivant la nature et la composition des agrégats et du ciment, il est nécessaire de procéder à des examens et essais préliminaires très poussés.



① Passoires à trous circulaires — Rundlochsiebe — Round hole sieves
② Tamis à mailles carrées — Maschensiebe — Square mesh sieves
③ Tamisat en % — Prozent Rückstand — Percent retained
④ Refus en % — Prozent Durchgang — Percent passing

Fig. 1
Courbes granulométriques enveloppes pour les bétons de corps de 11 barrages suisses
Umhüllende Siebkurven der Kernbetonproben von 11 schweizerischen Staumauern
Limiting gradation curves of the interior concretes of 11 Swiss dams

C. Béton

1. Préparation du béton

Pour obtenir dans la fabrication des bétons de barrage une qualité aussi constante que possible, l'usage de la tour à béton, d'origine américaine, s'est répandu très rapidement en Suisse.

La composition du béton varie suivant la nature et la provenance des agrégats. La dispersion de la courbe granulométrique est cependant relativement faible (voir fig. 1). La tendance générale étant de réduire le facteur eau/ciment (E/C) (water ratio), il faut choisir la granulométrie de façon à éviter tout démélange des éléments lors de la mise en œuvre du béton et, de ce fait, utiliser un peu plus de sable et de gravier fin qu'il serait nécessaire pour obtenir la résistance maximum. La granulométrie représentant toujours un compromis, il est possible d'apporter à la courbe granulométrique certaines modifications, suivant que l'on désire influencer la maniabilité, l'étanchéité, la résistance au gel ou la résistance mécanique. Dans tous les cas, il faut choisir la granulométrie du béton de façon à garantir la qualité requise avec une dispersion ne dépassant pas 12 à 15 %.

Dans le tableau 2 ci-après sont indiqués le dosage en ciment et le rapport E/C de quelques bétons de barrages suisses.

2. Mise en place du béton et vibration

Le transport du béton jusqu'à son lieu d'utilisation se fait par blondins, grues ou derricks ou, si les conditions topographiques l'exigent, par une combinaison de ces différents modes.

Le bétonnage au moyen de courroies transporteuses ou de pompes à béton a été abandonné, du moins pour l'exécution d'ouvrages d'une certaine importance.

Les levées journalières ont généralement une hauteur de 3 m et sont bétonnées en 6 couches intermédiaires de 50 cm d'épaisseur chacune. L'épandage du béton sur le bloc se fait couramment au moyen du bulldozer (voir fig. 2). Il faut éviter, en prenant des mesures appropriées, un passage trop brusque entre le béton de corps et celui de parement, caractérisé par un dosage en ciment plus élevé. Pour la pervibration du béton frais, il est nécessaire d'utiliser des engins très lourds à haute-fréquence, souvent peu pratiques et peu maniables. On a cherché dernièrement à remédier à cet état de chose et on utilise actuellement pour la pervibration des batteries de vibrateurs montées sur bulldozer (voir fig. 3). La rationalisation des méthodes de bétonnage a permis d'atteindre et parfois de dépasser des capacités journalières de 5000 m³ de béton mis en œuvre et même de 9000 m³ en utilisant 2 tours à béton.

Fig. 2
Epandage du béton par bulldozer — Betonausbreitung mit der Planierraupe
Spreading of the concrete by bulldozer

Tableau 2

Barrages	Béton de corps		Béton de parement			
			Parement aval		Parement amont	
	Dosage kg/m³	E/C	Dosage kg/m³	E/C	Dosage kg/m³	E/C
Albigna	140	0,82	230	0,59	250	0,56
Grande Dixence	140	0,93	200	0,65	250	0,52
Isola	190	0,72	250	0,56	250	0,56
Malvaglia	200	0,62	250	0,54	250	0,54
Mauvoisin	175	0,59	190	0,57	250	0,50
Moiry	160	0,71	180	0,63	250	0,49
Oberaar	160	0,98	280	0,53	280	0,53
Räterichsboden	180	0,89	280	0,54	280	0,54
Sambuco	170	0,67	260	0,55	260	0,55
Zervreila	200	0,69	250	0,58	280	0,56
Zeuzier	170	0,71	250	0,50	250	0,50

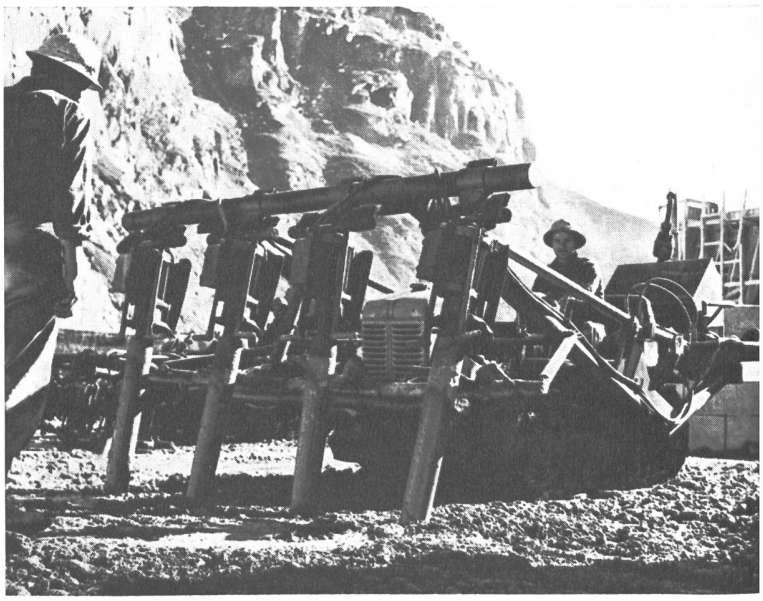
Le facteur E/C se rapporte aux agrégats secs.

La technique décrite ci-dessus et utilisée en Suisse, demande que la surface du béton frais puisse être praticable par des véhicules à chenilles, nécessitant ainsi un béton légèrement plastique. Le béton frais relativement sec tend à se démélanger à la vidange de la benne de blondin (capacité 3 à 6 m³). Une correction manuelle ultérieure n'est guère possible sur un chantier mécanisé. C'est pour cette raison que l'on choisit la granulométrie et la consistance du béton de façon à éviter toute ségrégation (voir fig. 4).

La revibration du béton, pendant que le ciment fait sa prise, permet d'obtenir une augmentation de résistance. Il semble donc opportun, lors de la pervibration d'une couche intermédiaire, de revibrer simultanément la couche sous-jacente pour créer une interpénétration satisfaisante des 2 couches. L'action physique de la revibration du béton devrait être étudiée encore en détail au moyen d'essais systématiques.

Immédiatement après l'achèvement d'un bloc journalier, il faut préparer la surface du béton pour permettre la reprise du bétonnage après 2 à 3 jours. La laitance est évacuée et le squelette mis à nu au moyen d'eau et d'air sous pression. Une couche mince de quelques centimètres de mortier est étendue avant la reprise pour assurer une bonne liaison entre l'ancien et le nouveau béton.

Fig. 3
Pervibration du béton par batterie de vibrateurs montée sur bulldozer
Betonverdichtung mittels auf einer Raupe befestigter Vibratorenbatterie
Compaction of concrete by vibrators mounted on a tractor



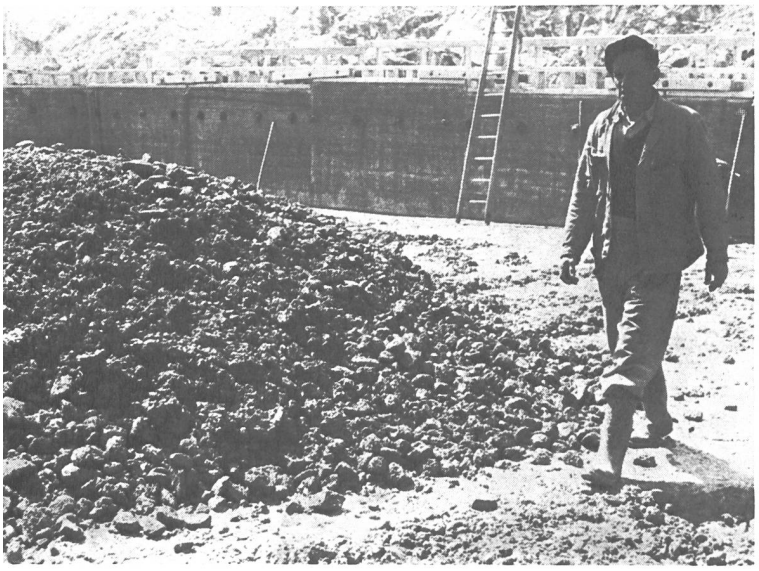


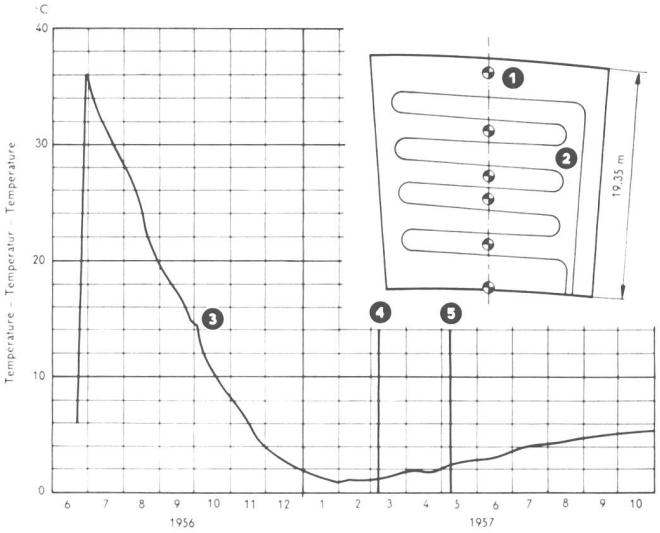
Fig. 4
Tas de béton après déchargement
Betonhaufen nach Entleerung aus dem Betonkübel
Concrete pile after discharge from the bucket

Si les travaux de reprises sont exécutés d'une façon soignée, il ne sera pas possible, à l'examen d'échantillons prélevés par forage, ni de déceler la moindre discontinuité entre 2 blocs, ni de constater une diminution de résistance au droit de la surface de reprise.

3. Traitement du béton et réfrigération

Dans les barrages, nous avons à faire à des massifs de béton de grandes dimensions dont seule une mince couche est soumise à la dessiccation pouvant provoquer des fissures de retrait généralement de peu d'importance. Ces fissures peuvent être évitées en gardant humide la surface du béton. D'autres mesures de protection n'ont, jusqu'à présent, pas été employées en Suisse à grande échelle.

L'introduction de la réfrigération artificielle, au moyen d'un système de conduites d'eau de réfrigération dans le but d'évacuer la chaleur dégagée par la réaction de prise, représente un progrès notable. La méthode développée par le US Bureau of Reclamation pour une rapide évacuation de la chaleur de prise est appliquée actuellement sur tous les chantiers de barrage en Suisse. Les serpentins de réfrigération sont posés horizontalement dans les joints de reprises espacés de 3 m (voir fig. 5). La distance entre axes de conduites peut être calculée si l'on connaît le coefficient de diffusivité du béton. Celui-ci se détermine par essais et se monte à environ 0,004 m^2/h dans le cas d'un squelette granitique. L'élément réfrigérant est l'eau dont la température estivale varie en général de 4 à 8 °C et se maintient en hiver au voisinage du point de congélation. La réfrigération artificielle doit être enclanchée déjà lors du bétonnage pour réduire la température maximum. La figure 5, par exemple, montre le comportement de la température moyenne en un point du barrage de Zervreila avec réfrigération continue. La température de 6 °C du béton frais a été atteinte à nouveau au bout de 5 mois après une augmentation rapide jusqu'à 36 °C suivi d'un lent refroidissement. En examinant des courbes typiques de températures de ce genre, l'on constate que les plus grands écarts de températures apparaissent au moment où le béton possède la plus grande déformabilité plastique. L'évacuation rapide de la chaleur de prise permet de réduire considérablement la différence de température entre les parements et le noyau du barrage, diminuant ainsi le risque de fissuration.



1 Téléthermètre — Telethermeter — Telethermeter
2 Serpentin de réfrigération — Kühlschlange — Cooling tubing
3 Température moyenne du béton — Mittlere Betontemperatur — Average concrete temperature
4 Achèvement de la réfrigération — Abschluß der Kühlung — Completion of cooling
5 Injection des joints — Fugeninjektion — Grouting of joints

Fig. 5
Allure typique de la température moyenne du béton dans un barrage réfrigéré artificiellement
Typischer Verlauf der mittleren Betontemperatur in einer künstlich gekühlten Staumauer
Typical evolution of the mean concrete temperature in an artificially cooled dam.

D. Contrôle des bétons

La construction de grands barrages demande de nombreux contrôles des bétons mis en œuvre. Pour les essais préliminaires sur des échantillons caractéristiques provenant des carrières envisagées pour l'extraction des agrégats, nous avons recours au «Laboratoire fédéral d'essais des matériaux» de l'EPF à Zurich (LFEM) qui possède une grande expérience et un outillage complet. Pour les contrôles courants en cours de travaux, chaque chantier dispose d'un laboratoire d'essais particulier.

1. Essais préliminaires

Les essais à entreprendre avant le début des travaux ont pour but principal d'étudier la possibilité d'utiliser des matériaux provenant de telle ou telle carrière pour la fabrication des bétons et, au cas où les premiers résultats sont positifs, de préparer les documents nécessaires aux entrepreneurs pour l'établissement de leur offre.

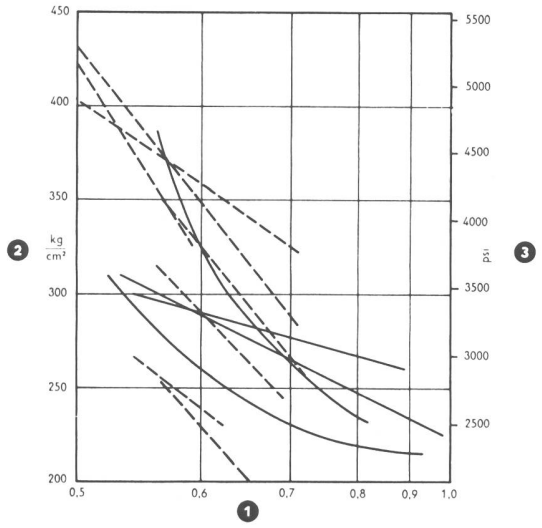
Les qualités exigées d'un béton de barrage sont légèrement différentes d'un pays à l'autre. Je me bornerai donc à ne mentionner ici que les exigences suisses.

Les sollicitations se produisant dans un barrage sont relativement faibles comparées à celles existant dans d'autres ouvrages en béton (ponts, bâtiments, etc.). La condition, demandant une sécurité à la rupture à 90 jours de 4 à 5, est facile à remplir. L'obtention d'une sécurité au gel suffisante, d'une bonne étanchéité et d'une très grande régularité dans la qualité offre, par contre, souvent de très grandes difficultés. Dans un ouvrage supposé monolithique, il est beaucoup plus important que le béton reste exempt de fissures plutôt qu'il ait une sécurité à la rupture extraordinaire. En résumé, la tendance actuelle est d'obtenir un béton maniable, ayant une résistance au gel satisfaisante, une bonne étanchéité et garantissant une résistance moyenne à 90 jours d'environ 4 à 5 fois la plus grande sollicitation calculée de l'ouvrage. La dispersion maximum des résultats d'essais de résistance ne devrait pas dépasser 12 %.

2. Contrôle sur le chantier

Chaque chantier de barrage est doté d'un laboratoire des bétons à même d'exécuter tous les contrôles courants.

Le contrôle des ciments au laboratoire de chantier se borne en général à la détermination de la résistance mécanique, de la durée de prise, de la stabilité de volume ainsi que de la finesse de mouture et, plus rarement, de la composition chimique. J'aimerais rendre le lecteur attentif à une pratique introduite en Suisse ces dernières années et qui a fait ses preuves. Tous les deux jours, un échantillon de ciment est prélevé dans les contingents prêts au départ aux gares d'expédition des fabriques de ciment. Cet échantillon est envoyé immédiatement au LFEM à Zurich qui le soumet aux essais normaux suisses. Si les résultats du contrôle ne sont pas satisfaisants, le LFEM avertit directement le commettant avant que le ciment soit arrivé sur le chantier. Pour l'exercice de ce contrôle, les maîtres d'ouvrages ont constitué une organisation commune.



1 Facteur eau/ciment (agrégats secs)
Wasser/Zement-Faktor (trockene Zuschlagstoffe)
Water/cement ratio (bone dry aggregates)

2 Résistance à la compression à 90 jours sur cubes de 30 cm
Druckfestigkeit nach 90 Tagen an Würfeln von 30 cm
Compressive strength after 90 days on cubes of 12 inches

3 Résistance à la compression à 90 jours sur cylindres de 15×30 cm
Druckfestigkeit nach 90 Tagen an Zylindern von 15×30 cm
Compressive strength after 90 days on cylinders of 6×12 inches

——— Barrages-poids — Gewichtsmauern — Gravity dams

— — — Barrages-voûte — Bogenstaumauern — Arch dams

Fig. 6
Résistances mécaniques moyennes des bétons de 11 barrages suisses en fonction du facteur eau/ciment
Mittlere Druckfestigkeiten der Betonproben von 11 schweizerischen Staumauern in Abhängigkeit des Wasser/Zement-Faktors
Average concrete strengths of 11 Swiss dams in function of the water/cement-ratio

Pour les bétons, le laboratoire procède à des contrôles concernant les points suivants:

— la granulométrie des agrégats,
— l'humidité naturelle des sables,
— la quantité d'eau de gâchage,
— la consistance et la maniabilité (slump et appareil vibrant Vebe),
— le pourcentage de vides,
— la résistance mécanique,
— la résistance au gel,
— la perméabilité.

A côté de ces contrôles systématiques, il se livre, en outre, aux quelques essais spéciaux tendant à résoudre les problèmes de technologie des bétons surgissant en cours de travaux. De toutes les propriétés des bétons de barrage, la résistance mécanique est celle qui est la plus facile à comparer. Dans la figure 6, les résistances moyennes des bétons de 11 barrages sont reportées en fonction du facteur E/C. Ces valeurs ont été obtenues à 90 jours sur cubes de 30 cm de côté. Pour les quatre barrages-poids, l'on a atteint une résistance moyenne de 236 kg/cm² pour le béton de corps et de 326 kg/cm² pour le béton de parement. Les valeurs correspondantes pour les sept barrages-voûte se montent à 292 respectivement 357 kg/cm². La moyenne générale est donc de 272 kg/cm² pour le béton de corps et de 344 kg/cm² pour le béton de parement.

La perméabilité des bétons est mesurée à 28 jours sur cubes de 20 cm de côté, selon la méthode du LFEM. Chaque jour, la pression sur l'échantillon est augmentée, en passant par les valeurs de 0,5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 25 et 30 atm. La perméabilité est déterminée par mesure de la quantité d'eau qui a traversé l'éprouvette, en tenant compte de la pression à laquelle a commencé le suintement. Un béton de parement doit être étanche pour une pression au moins égale à la pression maximum de service.

La détermination de la résistance au gel se fait sur prismes de 20 × 20 × 60 cm ou 30 × 30 × 90 cm. Après un séjour de plusieurs jours dans un local humide et dans l'eau, le prisme à examiner est soumis à l'âge de 28 jours à 1000 cycles de gel (—25 °C) et dégel (+15 °C). Pendant l'essai, le module d'élasticité du béton est mesuré plusieurs fois, soit par ultrasons, soit par un essai de charge puis comparé à celui d'un échantillon-témoin conservé dans l'eau. Lors de cette épreuve, le module d'élasticité ne devrait pas diminuer de plus de 10 % au début et rester constant ensuite ou légèrement augmenter. En général, cette condition ne peut être remplie que pour les bétons à faible facteur E/C, dosés au moins à 250 kg/m³, bien pervibrés et avec addition d'un adjuvant.

Grâce à des contrôles sévères, les barrages construits ces 20 dernières années n'ont subi aucun dégât dû au gel.