Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Remarques sur l'emploi du béton dans la construction des barrages massifs

Autor: Coyne, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2976

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: 02.10.2025

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

VI 2

Remarques sur l'emploi du béton dans la construction des barrages massifs.

Über die Verwendung von Beton beim Bau massiver Staumauern.

The Use of Concrete in the Construction of Solid Dams.

M. Coyne,
Ingénieur en Chef, Paris.

CHAPITRE Ier

L'âge du béton

Le béton, faisait remarquer Rabut dès 1910, est «une maçonnerie formée de matériaux assez petits pour réduire la main-d'oeuvre de façonnement, de bardage et d'emploi à sa plus simple expression».[1] Et comparant les anciens procédés de construction au nouveau venu, le béton et surtout le béton armé, évoquant «les solutions déconcertantes par leur simplicité qu'il fournit aux problèmes si variés de notre métier, les formes innombrables et souvent imprévues qu'il revêt pour satisfaire à de nouveaux besoins», il en concluait que sa génération assistait «à la plus importante révolution qui se soit produite dans l'art de bâtir».[1]

L'expérience des vingt-cinq dernières années a confirmé ces vues et la révolution annoncée par Rabut s'est accomplie sous nos yeux.

Le béton, invention romaine, est devenu «la forme moderne et la plus économique de la maçonnerie»[1]. N'exigeant ni matériaux rares, ni main-d'oeuvre longuement préparée à sa tâche, s'adaptant avec une souplesse merveilleuse aux exigences de la conception ou de l'exécution, et plus durable que le bois ou l'acier, il s'est imposé dans tous les domaines de la construction, aussi bien pour les constructions à terre que pour les travaux hydrauliques ou maritimes. Le «matériau démocratique» comme l'appelait encore familièrement Rabut, pour marquer sans doute que son développement était lié à l'évolution sociale du monde et à la disparition progressive des tailleurs de pierre — fortune d'un autre âge — le matériau démocratique est devenu monarque. Non pas incontesté, car l'acier lui dispute encore la suprématie, notamment pour les grands ponts. Mais dans le domaine des travaux hydrauliques, il a conquis un véritable monopole, et nous serions tous fort embarrassés, auteurs de projets ou constructeurs d'ouvrages, s'il fallait aujourd'hui nous en passer. A cet égard, notre âge est bien, sans conteste, l'âge du béton.

Pas un barrage, de nos jours, n'est fait autrement (à de très rares exceptions

[1] Rabut — Introduction au Cours de Construction en béton armé 1910—1911.

près, dont la plus remarquable est celle des barrages italiens faits en maçonnerie ordinaire, grâce à l'excellence de la main-d'oeuvre: les célèbres maçons de l'Alpe). C'est l'emploi du béton qui a permis d'atteindre les dimensions colossales de certains barrages construits de nos jours, et qui sont les plus grands ouvrages en maçonnerie jamais faits de main d'homme. Boulder dam, le grand barrage du Colorado, contient en effet à lui seul 2.500.000 mètres cubes de béton, un peu plus que la grande pyramide d'Egypte.

Bien que les conditions de son emploi évoluent constamment, même de nos jours, l'occasion nous est propice pour faire un rapide tour d'horizon et montrer tout ce que l'expérience nous a enseigné à ce sujet.

Les qualités à demander à un béton de barrage sont à première vue: la résistance à la rupture, l'étanchéité, la résistance à l'action des eaux et du climat.

CHAPITRE II

Résistances du béton à la rupture

Les ciments —

Les résistances à la rupture par compression exigées, en France, des bétons de barrages n'ont en général rien d'extraordinaire; et même, pour les barrages poids, elles pourraient descendre à des taux relativement bas, moins de 100 Kgs par cm^2 à 90 jours (8 à 10 fois les fatigues calculées qui n'ont, comme on sait, qu'un rapport très lointain avec les fatigues réelles). Pour les voûtes, elles sont en général comprises entre 200 et 250 Kgs par cm^2 à 90 jours, soit 4 fois les fatigues calculées.

Il faut remarquer que la résistance du béton à 90 jours (et à fortiori la résistance à 28 jours) est très rarement mise à l'épreuve dans un barrage. Comme il faut plusieurs années pour le construire, les bétons ont commencé à durcir longtemps avant la mise en eau. Encore faut-il observer que les plus jeunes sont en général les bétons situés en haut de l'ouvrage, et qui fatiguent le moins. Il en résulte que les ciments à durcissement rapide, dont le développement a pris un si grand essor pour satisfaire aux besoins de la construction en béton armé, n'ont aucune raison d'être pour les barrages. Leur résistance n'importe guère qu'à partir de six mois ou même d'un an. Bien au contraire, ils ont l'inconvénient de provoquer de forts échauffements dans les premières semaines qui suivent la prise, et de créer ainsi des fatigues parasites, à l'extension notamment, dont les praticiens se passeraient bien volontiers.

Aussi s'est on orienté, dans divers pays, notamment en Suède et aux Etats-Unis d'Amérique, vers la fabrication de ciments spéciaux pour barrages, à durcissement lent et à faible dégagement de chaleur, (low heat cement). Ces ciments se distinguent, en général, des autres parce qu'ils contiennent moins de silicate et aluminate tricalciques, qui sont les facteurs de la grande rapidité de durcissement et par suite des échauffements excessifs. Ils présentent l'avantage subsidiaire d'avoir moins de retrait que les ciments à durcissements rapide, et de dégager moins de chaux libre, ce qui les rend moins solubles dans l'eau. Si leurs résistances initiales sont plus faibles que celles des ciments ordinaires, à un an elles leur sont parfaitement comparables et quelquefois supérieures.

On emploie couramment en France les ciments de laitier ou les ciments métallurgiques pour les barrages poids. Les faibles résistances nécessaires dans ce dernier cas autorisent l'emploi de ces liants spéciaux, très supérieurs au ciment Portland au point de vue des échauffements intempestifs et de la résistance aux eaux pures. Ils ont seulement l'inconvénient que leur résistance est relativement peu élevée et que leur durcissement est fortement ralenti par temps froid.

Influence du $\frac{C}{E}$ —

Considérons une pâte de ciment pur contenant un poids C de ciment pour un poids d'eau E. Sa résistance est une fonction croissante du rapport $\frac{C}{E}$ (qui mesure en définitive, à peu de chose près, le rapport du ciment aux vides de la pâte pure), et l'expérience a montré qu'elle en dépend par une relation linéaire:

$$R = \alpha \left(\frac{C}{E} + \beta\right)$$

Ajoutons y du sable, en évitant d'une part de modifier le rapport $\frac{C}{E}$ caractéristique de la résistance de la pâte liante, et en prenant soin d'autre part de bien garnir de pâte tous les interstices des grains de sable sans y introduire d'air.

On soupçonne à priori que la résistance ne sera pas changée, la rupture devant se produire par la pâte pure beaucoup moins résistante, en général, que le sable.

C'est bien ce que montre l'expérience, comme en témoignent les résultats des essais ci-après:

On a exécuté:

1º) — Une pâte pure très fluide, pouvant se mélanger très facilement au sable.

2º) — Trois mortiers, obtenus en ajoutant respectivement à 5 volumes de cette pâte, 3, 6 et 9 volumes de sable. La fluidité de ces mortiers est allé évidemment en diminuant avec l'augmentation du sable incorporé, mais l'on s'est efforcé de les obtenir aussi compacts que possible. Chaque mélange a comporté l'exécution de 6 cubes de 5 cm d'arête et de 6 cubes de 7 cm, à écraser: la moitié à 7 jours et la moitié à 28 jours.

Dans le premier des deux tableaux qui suivent, on donne un résumé des caractéristiques de ces différents mortiers au moment de leur fabrication, et dans l'autre, les résistances obtenues à 7 et à 28 jours.

(On a désigné conventionnellement les mortiers par le *rapport* du volume de *sable* au volume de la *pâte pure.)*

Ajoutons maintenant des pierres à notre mortier, en prenant toujours soin de ne pas modifier la quantité d'eau incorporée à la pâte pure, et d'éliminer par une mise en moule soignée, tous les vides supplémentaires créés par l'apport des pierres. On conçoit que la résistance de notre béton puisse demeurer la même que celle de la pâte pure initiale. C'est bien aussi ce que nous avons pu vérifier en opérant comme suit:

On a exécuté, à raison de 6 cubes de 22 cm d'arête par béton ou mortier (3 pour écraser à 28 jours et 3 pour écraser à 90 jours):

Désignation	Quantités incorporées par m³				t = Vol. pâte / Vides sable	Compacité γ	C / 1−γ
	Ciment (C) (kgs)	Sable (S) (lit.)	Poids total matières sèches	Eau[1]			
Pâte pure	1365,2	0	1365,2	573,4	—	0,427	0.745
Mortier 3/5	990,5	435,7	1724,7	415,9	4,50	0,584	0,745
Mortier 6/5	775,8	682,6	1926,0	325,7	2,25	0,673	0,741
Mortier 9/5	636,7	840,3	2052,7	267,4	1.50	0.728	0,732

Le rapport $\frac{C}{E}$ est resté constamment égal à 2,38 (en poids) ou à 0,744 (en volume).

Résistances observées

	Cubes de 5 cm d'arête				Cubes de 7 cm d'arête			
	7 jours		28 jours		7 jours		28 jours	
Pâte pure	233,3 243,7 317,7	264.9	379,2 362,8 395,3	379,1	213,2 309,2 237,5	253,3	282,0 365,7 376,7	341.5
Mortier 3/5	274,5 260,1 233,3	256,0	416,0 399,6 354,6	390,1	301,5 231,1 299,3	277,3	383,3 336,9 380.0	366.7
Mortier 6/5	221,0 245,7 276,6	247,8	297,8 359,7 377,3	314,9	202,8 275,7 223,7	234,1	321,2 294,8 303.3	306,4
Mortier 9/5	247,8 233,3 233,3	238,1	366,9 338,2 325,9	343,7	218,5 292,7 2 6,1	259,1	309,2 347,9 380,8	346,0

1º) — Un *mortier M* très fluide (ou béton limite) dont la proportion d'eau a été de 19 %;

2º) — 8 bétons obtenus en ajoutant au premier mortier fabriqué respectivement 30, 60, 90, 120, 135, 150, 165 et 180 % de pierre (par rapport au poids total de matières sèches du mortier), et qui ont été mis en moules simplement à la

truelle ou avec un très léger damage.[1] (La fluidité de ces bétons est allée évidemment en diminuant au fur et à mesure que la proportion de pierre a augmenté.)

3°) — 6 bétons absolument identiques à 6 des bétons précités, mais pilonnés ou vibrés lors de la mise en moules.[2] Ces bétons contenaient respectivement 60, 120, 135, 150, 165 et 180 % de pierre par rapport aux autres matières sèches. Leur pilonnage a été d'autant plus vigoureux que la fluidité s'est trouvée plus faible.

Les résistances à 28 jours sont indiquées au tableau ci-après.

Qu'il s'agisse de pâte pure, de mortier ou de béton la résistance de nos divers échantillons est donc, aux erreurs d'expérience près, uniquement fonction de $\frac{C}{E}$ et peut donc se représenter par la formule:

$$R = \alpha\left(\frac{C}{E} + \beta\right)$$

ou α et β ne dépendent que du ciment, du mode et de la durée de durcissement, de la forme et des dimensions des éprouvettes.

La résistance d'un béton *compact*, c'est-à-dire ne comportant pas d'autres vides que ceux de la pâte pure, n'est donc pas autre chose que la résistance de cette pâte pure.

On remarquera que le dosage du ciment a varié au cours de nos essais, de

100 % (pâte pure) à 9 %

de poids des matières sèches, et la compacité de 0,427 à 0,839, sans que la résistance en soit affectée.

Au contraire, elle a tendance à croître à partir d'un certain pourcentage de pierres, du fait que la pâte pure est alors réduite à une mince pellicule occupant le peu de place disponible entre les pierres, imbriquées les unes dans les autres.

A la limite, on reconstituerait une maçonnerie de pierres sèches, douée de résistance bien qu'elle ne contienne pas la moindre trace de liant.

De sorte que la conclusion à tirer de ces essais serait, à première vue, qu'on réalise un béton d'autant plus dur qu'on y met moins de ciment, façon élégante et inattendue de concilier la sécurité et l'économie.

Considérations pratiques —

Ces conclusions paradoxales méritent d'être interprétées. Il est bien clair que les plus compacts de nos bétons, et surtout le dernier de la liste, correspondent à un rangement idéal des matériaux, les plus grosses pierres venant au contact les unes des autres, et leurs vides étant remplis au plus juste avec du mortier.

Un tel béton n'a jamais vu le jour sur aucun chantier. C'est une oeuvre d'art, semblable à une assiette cassée ou à un puzzle dont les morceaux seraient soigneusement rangés à la main par un habile exécutant, de façon à reconstituer l'assiette et à réduire au minimum les vides de la structure. Il n'y a aucune raison pour que ces morceaux introduits dans une bétonnière, et secoués

[1] Dans le tableau qui suit, ces bétons sont désignés sous le titre «normal».

[2] Il ne s'agit pas de vibration mécanique, mais de simples secousses imprimées au moule, a la main.

	Bétons exécutés	Quantités incorporées par m³ de béton								Densités des bétons frais	Fluidités mesurées à la table à secousses	$t = \frac{\text{Vol. mortier}}{\text{Vides pierre}}$	Compacités γ du béton		$\frac{C \text{ réel}}{1 - \gamma \text{ réel}}$	$\frac{\gamma \text{ réel}}{\gamma \text{ théorique}}$	$\frac{C}{E}$ (en volumes)	Résistances obtenues à 28 jours	
		Ciment C (kilogs)	Sable S		Pierre P		Poids total des matières sèches	Eau E											
			Poids (kilogs)	Volumes (litres)	Poids (kilogs)	Volumes (litres)		% du poids des matières sèches	Volumes (litres)				réelles	théoriques				sur 3 cubes de 22×22 cm par mortier ou béton	Moyennes
1	Mortier M *normal*	461,0	1362,5	856,2	—	—	1828,5	19,0	346,5	2,170	non déterminée supérieure à 2,20	—	0,654	0,654	0,416	1	0,416	225,9 — 228,8 — 188,5	207K,7
2	M + 30 % pierre *normal*	381,9	1128,6	709,8	453,2	306,6	1963,7	14,62	287,0	2,251	non déterminée supérieure à 2,20	6,14	0,713	0,713	0,416	1	0,416	187,0 — 202,5 — 208,8	199,4
3	M + 60 % pierre *normal*	325,4	961,8	604,9	772,3	522,5	2059,5	11,88	244,6	2,305	— id —	3,07	0,753	0,755	0,414	0,997	— id —	219,7 — 221,2 — 183,8	208,2
4	id *vibré*	325,9	963,3	605,9	773,5	523,2	2062,7	11,88	245,0	2,308	— id —	(1)	0,755	—	0,416	—	— id —	171,4 — 183,8 — 174,5	176,6
5	M + 90 % pierre *normal*	284,0	839,2	527,7	1011,0	684,0	2135,2	10,0	213,5	2,349	2,20	2,05	0,784	0,786	0,413	0,997	— id —	180,7 — 211,9 — 194,8	195,8
6	M + 120 % pierre *normal*	250,8	741,3	466,2	1190,6	805,5	2182,7	8,63	188,5	2,371	2,05	1,53	0,807	0,811	0,406	0,995	0,416	202,5 — 188,5 — 177,6	189,5
7	— id — *damé*	252,1	745,1	468,6	1196,5	809,5	2193,7	8,63	189,3	2,383	2,05	(1)	0,811	—	0,416	—	— id —	183,8 — 187,0 — 199,4	190,1
8	M + 135 % pierre *normal*	236,6	699,3	439,6	1263,4	854,8	2199,3	8,09	177,9	2,377	1,92	1,36	0,814	0,821	0,397	0,991	— id —	187,0 — 194,8 — 190,1	190,6
9	— id — *damé*	238,6	705,4	443,6	1274,2	862,1	2218,2	8,09	179,5	2,398	1,92	(1)	0,821	—	0,416	—	— id —	171,4 — 180,7 — 194,8	182,3
10	M + 150 % pierre *normal*	223,8	661,4	416,0	1327,8	898,4	2213,0	7,60	168,2	2,381	1,80	1,23	0,820	0,830	0,388	0,988	— id —	205,7 — 187,0 — 194,8	195,8
11	— id — *damé*	225,3	665,8	418,7	1336,7	904,3	2227,8	7,60	169,3	2,397	1,80	(1)	0,826	—	0,405	—	— id —	215,0 — 187,0 — 194,8	198,9
12	M + 165 % pierre *normal*	212,1	627,0	394,8	1384,5	936,7	2223,6	7,17	159,4	2,383	1,72	1,11	0,825	0,839	0,379	0,983	— id —	201,0 — 191,6 — 185,4	192,7
13	— id — *damé*	213,6	631,4	397,1	1394,3	943,4	2239,3	7,17	160,6	2,400	1,72	(1)	0,831	—	0,395	—	— id —	216,6 — 199,4 — 193,2	203,1
14	M + 180 % pierre *normal*	201,5	595,5	374,5	1434,6	970,6	2231,6	6,78	151,3	2,383	1,65	1,02	0,829	0,846	0,368	0,980	— id —	202,5 — 191,6 — —	197,1
15	— id — *damé*	203,9	602,6	379,0	1451,8	982,3	2258,3	6,78	153,2	2,412	1,65	(1)	0,839	—	0,395	—	— id —	202,5 — 205,7 — 218,1	208,8

(1) *Ce rapport a pu varier après damage dans les moules, et n'a pu être verifie.*

Nota I. Le volume de mortier est la somme des volumes absolus des matières sèches, plus l'eau. Il diffère d'environ 0,5 % du volume réel, par déraut.

Nota II. La compacité est le rapport du volume absolu des matières sèches au volume total. On n'a pas tenu compte par conséquent, de l'eau chimiquement fixée au ciment.

pendant aussi longtemps qu'on le voudra, retrouvent automatiquement la place qui leur avait été assignée par la main de l'artisan. A supposer qu'ils y réussissent, l'assiette a toutes les chances de se défaire en cours de route, entre la bétonnière et le lieu d'emploi, et la résistance n'est plus fonction de $\frac{C}{E}$, mais de $\frac{C}{E+V}$, V étant les vides.

Or, il est très curieux d'observer que la plupart des expérimentateurs qui ont prétendu donner les règles à suivre pour obtenir le béton le plus compact n'ont pas pris garde au fait que leurs bétons n'étaient, pas plus que notre assiette reconstituée, transportables sans risques de rupture du laboratoire sur le chantier, et que les conclusions de leurs essais de laboratoire elles mêmes dépendaient de règles de jeu subtiles et essentiellement variables, ne serait-ce qu'avec l'habileté de l'opérateur.

L'exemple qui précède suffirait à le prouver:

On considère comme de règle que la compacité maximum d'un béton s'obtient, même en laboratoire, en majorant de 30 à 35 % le volume de mortier strictement nécessaire pour combler les vides des cailloux.

Or, le plus compact de nos bétons est celui dont les pièces se touchent et le rapport t du mortier au vide des pierres y est à peine supérieur à 1, ce que laissait prévoir la théorie.

Une première conclusion s'impose donc: c'est que toutes les expériences de laboratoire, sans exception, sur la compacité des bétons sont à accepter sous toutes réserves, car elles n'on qu'un très lointain rapport avec les conditions réelles de rangement des matériaux sur le chantier.

Le cas est, à cet égard, fort différent de celui des mortiers dont la mise en oeuvre demeure comparable entre le laboratoire et le chantier.

La maniabilité —

Le meilleur béton correspondant à un emploi donné ne pourra donc être défini qu'au moment même de cet emploi, ou bien au cours d'une expérience d'échelle assez ample pour se retrouver dans les conditions exactes de la pratique. C'est Bolomey le premier qui, à notre connaissance, a donné aux praticiens des conseils vraiment utiles parce qu'ils étaient dictés par l'expérience du chantier. Il se trouve d'ailleurs que ces conseils vont précisément à l'encontre des conclusions qu'on serait tenté de tirer des essais de laboratoire, de sorte que c'est en prenant le contrepied de ces dernières qu'on est assuré de faire du bon travail.

Pour qu'un béton soit compact en oeuvre, surtout sur un barrage où le rôle de la main-d'oeuvre est, à cause des cadences rapides d'emploi, forcément très limité, il faut *avant tout qu'il soit maniable.*

C'est-à-dire qu'il comporte, par rapport au meilleur béton de laboratoire, à notre puzzle idéal pris comme terme de comparaison, un excès d'eau, un excès de sable et un excès de sable fin.

Toutes choses qui vont à l'encontre, au moins apparemment, de la résistance.

L'excès d'eau est chargée de véhiculer et de lubrifier les matériaux pour faciliter leur rangement, l'excès de sable agit dans le même sens et sert aussi à parer aux déficiences locales qui ne manqueraient pas de se produire si la

quantité de sable était juste ce qu'il faut pour remplir les vides des cailloux. Ces deux précautions ne suffiraient d'ailleurs pas à obtenir un béton compact en oeuvre, car l'eau a tendance, au cours des transports, à se séparer du béton et à entraîner avec elle une partie du ciment. Pour la fixer, il est nécessaire d'introduire dans le mélange une quantité suffisante de fine poussière, ciment ou sable fin, fixant l'eau par action capillaire et empêchant la ségrégation. On forme ainsi une pâte liante, onctueuse, sorte d'emulsion dans laquelle flottent les pierres et qui ne se rompt lentement qu'une fois le béton en place, en expulsant une partie de son excès d'eau sous l'effet de la pression exercée par les couches successives de la coulée.

Telles sont les remarques judicieuses qui ont permis à Bolomey de proposer la courbe de granulométrie qui porte son nom, et au sujet de laquelle nous ne ferons, pour notre part, que quelques réflexions de détail.

Comme il s'agit de problèmes de pratique pure auxquels il est impossible de donner une solution générale, la courbe de Bolomey ne convient à son tour que pour certaines catégories de matériaux et certains modes de mise en oeuvre. En général, pour des matériaux concassés, elle demande à être rectifiée par accroissement du sable et du sable fin, comme il est figuré ci-après (fig. 1).

Mais il arrive qu'on soit obligé de s'en écarter beaucoup pour des matériaux de forme spéciale, tels que les porphyres, les diorites et les quartzites concassés.

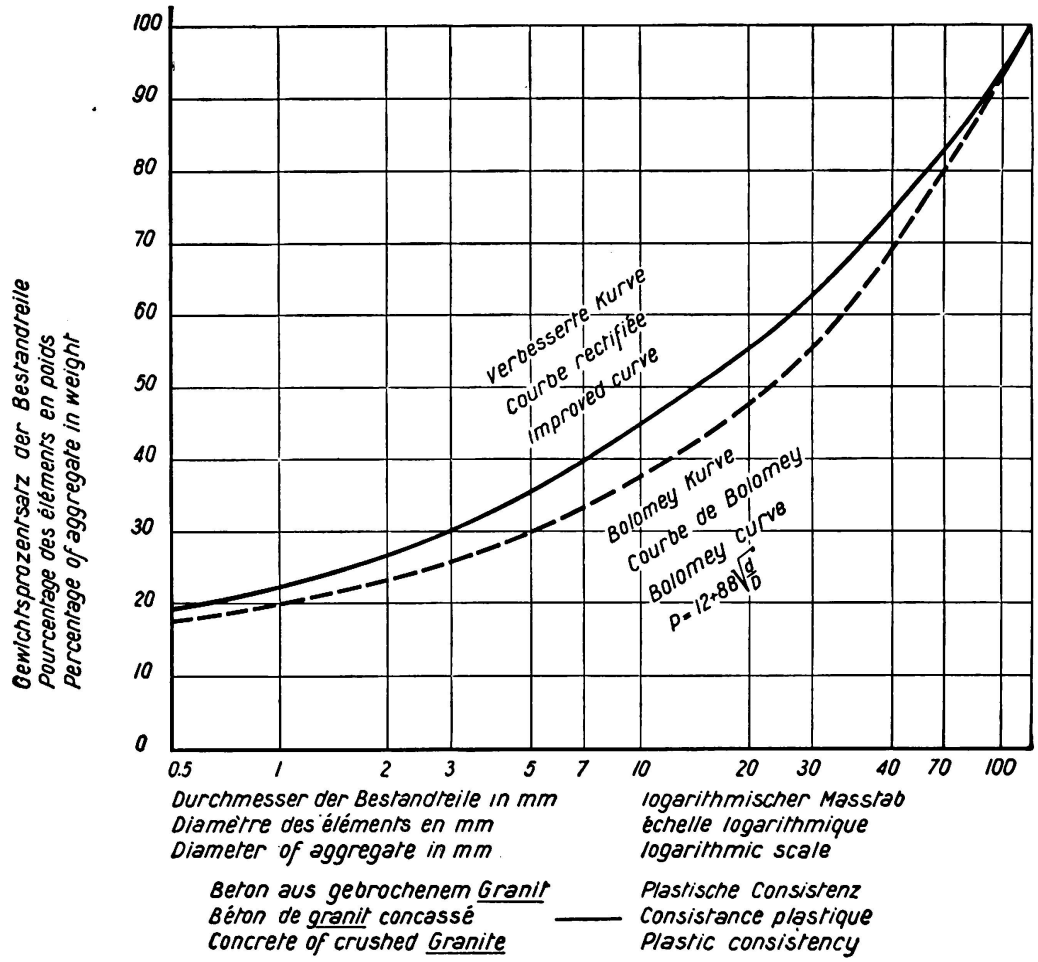

Fig. 1.

Ces pierres très «froides» se cassent en plaquettes, à tous les étages de granulation, et comportent entre elles de très grands vides qu'il est nécessaire de combler avec de forts excès de sable.

Le sable d'appoint —

L'emploi de sable d'appoint rond, de dune ou de rivière, est alors en général indispensable, parce qu'il agit par sa forme comme un lubrifiant pour permettre aux matériaux concassés de se ranger et éviter qu'ils s'arcboutent les uns contre les autres.

Il nous est arrivé d'employer des compositions granulométriques comparables à celle qui suit (fig. 2), avec des bétons riches destinés à être mis en oeuvre dans un barrage voûte mince (dosage 350 kgs de ciment par m^3 en oeuvre, diamètre maximum de la pierre 70 m/m).

L'emploi de grosses pierres (supérieures à 10—12 cm) diminue la maniabilité, et il est vraisemblable que dans ce dernier cas il faut s'écarter aussi des normes empiriques données par Bolomey.

De toutes façons, il ne faut pas perdre de vue que de larges tolérances sont nécessaires, pour parer aux écarts inévitables dans l'approvisionnement des

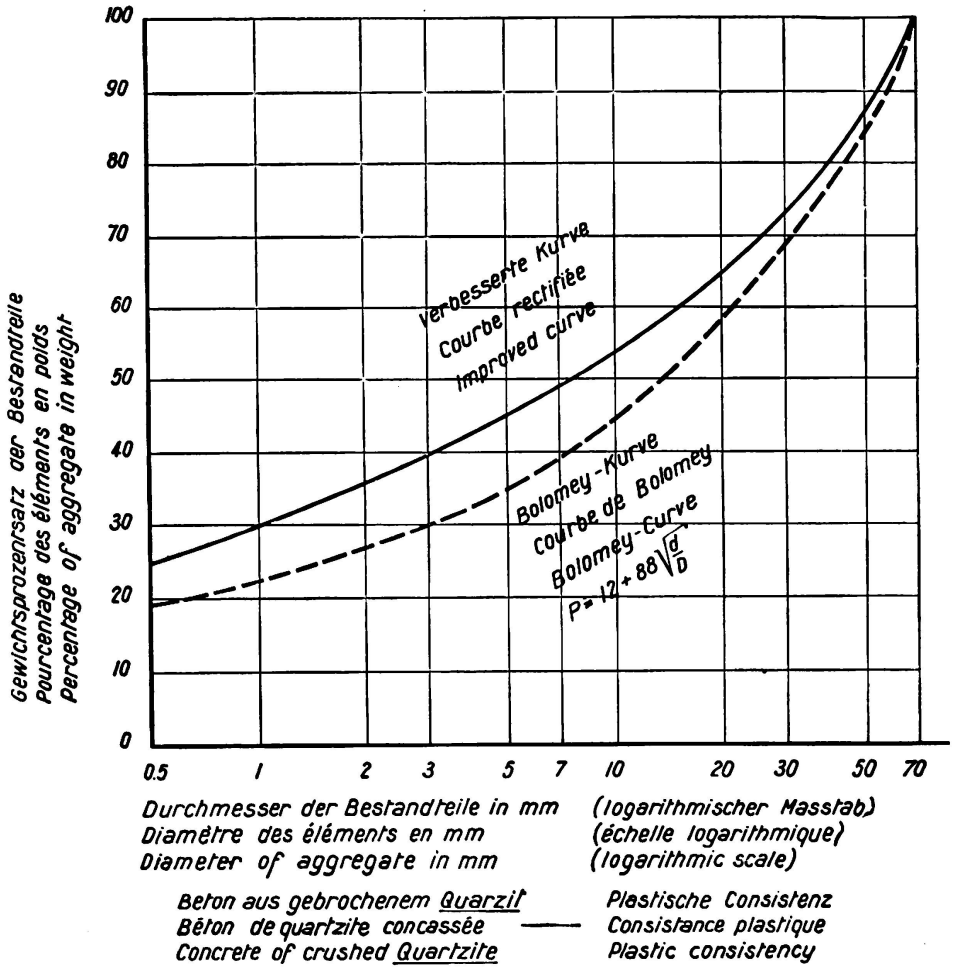

Fig. 2.

matériaux (la recherche de la perfection dans ce domaine étant rapidement prohibitive).

On voit à quel point des questions de mise en oeuvre sur un grand chantier sont délicates et dépendent de circonstances d'espèce que le maître de l'oeuvre doit s'employer à dépister.

Ce qui importe avant tout, c'est que, grâce à une fluidité et une granulométrie appropriées, le béton ait une tendance naturelle et automatique à se mettre correctement en place et à acquérir de lui-même l'homogénéité et la compacité désirables, le rôle de la main-d'oeuvre étant forcément très limité, au train dont va le chantier, et réduit à quelques corrections de détail.

Il faut pour cela qu'il n'ait pas tendance à se désunir, ce qui dépend du mode de mise en oeuvre, et que ses frottements internes soient réduits au minimum.

Le respect de cette double condition entraîne la maniabilité, qui n'est jusqu'ici l'apanage que des bétons *mous*. Certains produits l'améliorent: le Kieselguhr notamment, ou des sels métalliques incorporés à l'eau de gâchage.

Il faut noter qu'à fluidité égale, un béton maniable sera plus facile à malaxer qu'un autre. Il y a une façon très simple de s'en rendre compte, c'est de mesurer le couple moteur sur l'arbre de la bétonnière, procédé usité, croyons nous, en Amérique.

La vibration —

La vibration étant un moyen de tassement artificiel, qui a d'ailleurs tendance à se répandre, à juste titre, sur tous les chantiers, il est certain que pour les raisons données plus haut elle doit exiger un béton spécial, différent du béton mis en oeuvre par les moyens habituels. Déjà pour les pièces de faible dimension en béton ou en béton armé, on peut se rendre compte que la granulométrie optimum du béton vibré est très différente de celle du béton ordinaire. Il n'est pas impossible de réaliser de cette façon des bétons très denses, très chargés en cailloux, ressemblant à notre assiette cassée ou au puzzle idéal qui nous a servi de terme de comparaison. Les bétons secs, notamment à granulométrie discontinue et comportant un minimum de sable, donnent une fois vibrés des résistances très fortes pour un faible dosage[4].

On constate sur le tableau ci-dessus que le béton N° 4, fluide et vibré dans le moule d'essai, est moins résistant que le même béton, non vibré.

Malheureusement, les choses se passent très différemment sur un chantier de barrage.

Le tout, en effet, est de vibrer réellement le béton, et de le vibrer partout.

Or, la cadence de marche est encore ici une très grande gêne, parce que la puissance exigée par les vibrateurs est grande, leur rayon d'action relativement faible et qu'on est très vite limité par le nombre des appareils à mettre en jeu. Cette puissance est d'autant plus grande et le rayon d'action d'autant plus petit, que le béton est moins maniable.

---

[4] A l'inverse, les bétons ordinaires, et surtout le béton coulé, se désunissent sous l'action prolongée du vibrateur qui, en favorisant le tassement et la décantation du béton, fait refluer l'excès de mortier et les laitances en surface, divisant la masse en couches alternées de béton très dur et de mortier délavé.

Si, fondant sur l'efficacité des vibrateurs des espoirs exagérés, on s'avise de fabriquer un béton sec et «cru»,[2] on s'expose donc à de très graves mécomptes notamment du côté de l'étanchéité, comme l'expérience l'a révélé un peu partout.

Dans l'état actuel des choses, la vibration ne peut donc constituer sur un chantier de barrage qu'un simple appoint ayant pour effet de tasser et désaérer le béton, notamment dans la zone amont pour renforcer son étanchéité. La granulométrie du béton sera conforme, à peu de choses près, à celle qu'on emploie d'ordinaire pour du béton non vibré. On pourra néanmoins se permettre de diminuer légèrement la quantité d'eau.

Il faudra, dans ces conditions, s'abstenir de vibrer à fond, sous peine de désorganiser la masse et de faire refluer les laitances à la surface de chaque couche vibrée.

Les meilleurs vibrateurs sont les vibrateurs internes, et leur rayon d'action est d'autant plus grand qu'à puissance égale leur fréquence est plus grande. Les plus efficaces des vibrateurs existant actuellement sont ceux qui tournent à la vitesse de 8.000 tours par minute.

Il n'est pas impossible qu'on fasse prochainement des progrès dans l'emploi de la vibration pour la construction des barrages, mais, à notre avis, il sera toujours prudent de ne pas se fier exclusivement aux vibrateurs et de compter sur un certain automatisme dans la mise en oeuvre, ne serait-ce que pour parer aux défaillances du personnel.

CHAPITRE III

Contrôle technique.

Essais préliminaires —

Il résulte de ce qui précède que les essais préliminaires n'ont que la valeur d'une première approximation et qu'il faut bien se garder de s'y fier pour définir à l'avance la courbe de granulométrie applicable sur le chantier.

Contrôle au moment de l'emploi —

La maniabilité du béton en particulier, élément essentiel de la compacité, ne pourra être jugée qu'au moment de l'emploi, et en général, à vue.

Aucune machine ne remplace à cet égard, en effet, un oeil exercé.

Les appareils de mesure des quantités de matériaux de diverses catégories (en général 2 de sable et 2 ou 3 de gravier) introduites dans chaque gâchée doivent être précis et surtout fidèles. Les doseurs volumétriques à secousses, employés généralement pour le dosage des matériaux, exigent une surveillance attentive, les bascules automatiques, dont l'emploi n'est pas encore généralisé en Europe pour les gros matériaux, mais qui sont déjà employées en Amérique, sont de beaucoup préférables.

Une fois les installations bien réglées, le contrôle doit s'exercer surtout aux bétonnières où il est facile.

---

[2] C'est-à-dire peu maniable ou raide.

Pour contrôler la qualité de béton réellement obtenue, le procédé le plus pratique et le plus rapide consiste à mesurer la *densité* du béton frais, ce qui est facile à l'aide d'une caisse de volume connu et d'une simple balance Romaine en l'air. On constate en général un parallélisme quasi rigoureux entre les variations de la densité du béton frais et les variations de la résistance à la compression. Ce procédé simple permet de compléter l'observation de l'aspect du béton et de déceler immédiatement tout défaut de composition.

Essais sur mortiers —

Comme l'a noté Bolomey, il est possible de contrôler la résistance du béton par des essais sur cubes de mortier extraits de la gâchée.

On trouve en général que la résistance est de 10 à 20 % plus forte sur les mortiers (cubes de 7 cm) que sur les bétons (cubes de 30 cm). Cette particularité, qui parait en contradiction avec les conclusions du chapitre précédent, tient tout simplement au fait qu'une partie de l'eau du béton est retenue par les grosses pierres au moment de l'extraction du mortier.

Le $\frac{C}{E}$ du mortier est dans ces conditions plus élevé que celui du béton, ce qui explique le surcroît de résistance observé.

Essais sur bétons —

Ces essais sur mortier très pratiques (notamment pour contrôler la constance de qualité du ciment) et qu'on peut multiplier sans frais excessifs, ne dispensent pas de faire des essais sur le béton lui-même (compacité et résistances). La plus petite dimension linéaire des cubes ou cylindres de béton employés devra être au moins deux fois et demi celle des plus grosses pierres. Il semble que les résistances unitaires augmentent légèrement en même temps que la dimension des éprouvettes (à $\frac{C}{E}$ égal bien entendu) ce qui tient sans doute au meilleur tassement des matériaux, sous l'effet de leur poids.

Il faut veiller à mesurer non seulement la résistance de rupture à la compression du béton, mais aussi la résistance à l'extension, dont l'intérêt est primordial pour éviter les fissures. Le meilleur moyen pour faire la mesure est l'essai de flexion sous moment constant.

Les sables de concassage longtemps décriés à cause de leur peu de maniabilité donnent des résistances à l'extension supérieures à celles qu'on obtient avec les sables roulés (de 10 à 20 %). Pour peu que ces derniers soient légèrement argileux, la résistance à l'extension devient très faible, ce qui démontre l'intérêt du lavage soigné des matériaux d'alluvions.

Le rapport $\frac{\text{résistance à la compression}}{\text{résistance à l'extension}}$, qui mesure la fragilité, varie de 8 à 12 suivant l'âge et la dureté du béton, il est d'autant plus fort que le béton est plus vieux et plus dur.

Contrôle en oeuvre —

On se gardera bien d'ailleurs de se fier à tous ces essais de laboratoire pour juger des réelles qualités du béton en oeuvre. Pour s'en faire une idée précise, il est indispensable de faire des prélèvements répétés dans la masse elle-même du barrage, extraits à la sondeuse longtemps même après la prise.

Avec le béton coulé, on constate de façon systématique que les résistances en oeuvre sont très supérieures aux résistances des cubes d'essai. Nous avons vu l'exemple de béton coulé dont la résistance d'essai était de l'ordre de 100 Kgs par cm^2 et qui en oeuvre donnait plus du double, au même âge.

Le phénomène est général et tient au fait que les énormes excès d'eau du béton coulé ne peuvent parvenir à s'éliminer, avant la prise, dans l'éprouvette d'essai. Sur le chantier, au contraire, une décantation s'opère dans les premières heures de la mise en oeuvre, d'autant plus puissante que l'épaisseur de la couche, et par conséquent l'importance des tassements sous l'effet des pressions hydrostatiques en jeu, est plus grande.

On a trouvé au barrage de l'Oued Foddah que du béton gâché à la bétonnière avec 210 litres d'eau par mètre avait une compacité réelle en oeuvre de 0,84, ce qui correspondait à 160 litres d'eau au maximum, par conséquent à une expulsion de 40 ou 50 litres d'eau, soit 25 % de la quantité admise à la bétonnière.

Or, gâché avec 160 litres d'eau, le béton était, à peu de choses près, à la bonne consistance plastique, compatible avec une mise en oeuvre exigeant beaucoup de soin. Ainsi l'excès ajouté à la bétonnière servait à faciliter le transport et la mise en oeuvre sans nuire, bien au contraire, aux qualités, definitives du béton.

Influence du $\frac{C}{E}$ avec le temps —

Il faut d'ailleurs remarquer que l'influence des excès d'eau s'atténue avec le temps.

Voici quelques chiffres à ce sujet:

Dosages	$\frac{C}{E}$	Résistances à la compression				Observations
		7j.	28j.	90j.	1 an	
ciment		165,1	225,1	248,3	291,6	
250 K.	1,504	167,2	226,2	261,6	299,0	Béton plastique
eau		—	—	—	—	
166,2		166,2	225,6	254,9	295,3	Résistance moyenne
ciment		103,1	146,0	176,9	227,3	
250 K.	1,160	108,6	167,2	183,3	237,2	Béton coulé
eau		—	—	—	—	
215,5		105,8	156,6	180,1	232,3	Résistance moyenne

Les résistances du béton coulé croissent plus rapidement que celles du béton plastique.

Si l'on considère le rapport $\rho = \frac{\text{Résistance béton plastique}}{\text{Résistance béton coulé}}$ pour les différentes échéances d'écrasement, on obtient les chiffres suivants:

ρ 7 jours = 157 %
ρ 28 jours = 144 %
ρ 90 jours = 141 %
ρ 1 an = 127 %

Pour le béton plastique, même vibré, la différence entre éprouvettes d'essai et béton en oeuvre parait bien moindre et, pour peu qu'il ne soit pas très mou, il n'est pas du tout certain que sa résistance en oeuvre dépasse celle des cubes d'essai prélevés dans la gâchée.

Néanmoins, la résistance de rupture à la compression sera en général très supérieure à ce qu'exige le respect des coëfficients de sécurité couramment admis dans les barrages poids, ce qui autoriserait des réductions du dosage en ciment.

Or, il y a un très grave danger, comme on le verra plus loin, à réduire le dosage surtout en parement, à cause des attaques de l'eau et des agents atmosphériques.

Les hautes températures auxquelles est maintenu le béton d'un barrage, après la prise, ont un effet certain sur le durcissement. Elles l'accélèrent dans les premières semaines. Il n'est pas dit qu'elles ne le ralentissent pas au-delà.

Les points faibles: joints de reprise et fissures —

Les reprises sont des points faibles dans un barrage, au double point de vue de la résistance au cisaillement et de l'étanchéité. Ce sont les lieux d'élection des nids de cailloux, et c'est souvent par les joints de reprise horizontaux que cheminent les infiltrations à travers la masse.

Deux précautions sont couramment employées: la première consiste à repiquer la surface du joint de reprise de façon à éliminer la couche de laitance souvent très épaisse pour le béton coulé et à faire apparaître le hérisson de cailloux: la deuxième consiste à répandre systématiquement une couche de mortier ou de béton fin de quelques centimètres d'épaisseur sur le joint au moment de la reprise.

Cette dernière précaution est, à notre avis, indispensable pour éviter les fuites. A la première on peut substituer, à la rigueur, et lorsqu'il n'y a pas accumulation de laitances en surface, un simple lavage au jet mixte d'eau et d'air comprimé quelques heures après la coulée, alors que le béton est encore assez mou pour se laisser légèrement dégrader.

Le retrait des massifs de barrage est relativement faible. Nous avons eu l'occasion de constater qu'un massif de quelque importance, même plusieurs mois après la coulée, contenait toujours une forte proportion d'eau libre, et qu'il était dans un état voisin de la saturation. Cette eau maintient le béton dans un état d'imbibition permanente, qui annule pratiquement le retrait de dessication, ou le réduit à des chiffres extrêmement faibles, 1/10.000^{e} au plus. Il

faut simplement veiller à éviter, au début du durcissement, le dessèchement des parements.

Le retrait des barrages est donc presque uniquement un phénomène de contraction thermique. On sait les mesures prises à cet effet qui consistent à découper l'ouvrage en voussoirs ou blocs séparés, qui ne doivent pas dépasser 15 m de longueur, comme l'expérience l'a montré un peu partout. Malheureusement ces précautions ne suffisent pas à éviter les fissures longitudinales qui ont tendance à se produire dans les barrages poids et qui sont les plus dangereuses.

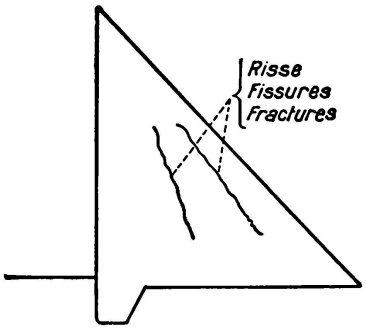

Fig. 3.

Enfin, il arrive très souvent que les parements des blocs en cours de construction sont sujets à des fissurations en tous sens, comme conséquence de la différence de température entre le noyau et la surface.

Pendant la construction du barrage de l'Oued Foddah, par suite d'un arrêt des chantiers, un gros bloc de béton de 35 m × 35 m à la base et de 12 m de hauteur est resté pendant un an et demi à l'air. Au bout de 6 mois, on constata que le bloc était coupé non seulement par deux fissures verticales en croix, mais encore par une fissure horizontale régnant sur tout son pourtour à mi-hauteur. Ce phénomène s'explique aisément. Le retrait s'est fait plus rapidement vers la surface; le noyau central ne subissant pas la même contraction a mis l'extérieur en tension et l'a fait claquer.

On voit l'intérêt des mesures adoptées à Boulder Dam pour refroidir les blocs et créer artificiellement un état d'équilibre thermique qui ne pourrait se réaliser qu'au bout de plusieurs centaines d'années. Cet état étant créé, il faut, bien entendu, injecter les fissures de contraction produites dans la masse, et même, à notre avis, se donner la possibilité de les réinjecter à deux ou trois reprises différentes.

On voit à quel point on aurait tort de considérer la masse d'un grand barrage comme un monolithe et avec quelle prudence le praticien est obligé de se fier aux calculs en usage qui font état de l'homogénéité de la masse.

CHAPITRE IV

Etanchéité et Résistance à l'action des eaux

Etanchéité —

C'est un fait d'expérience que le béton coulé est de beaucoup le plus étanche des matériaux qu'on puisse employer pour la construction d'un barrage. Le

contraire se produit en Laboratoire, où le béton sec est le plus étanche et où le béton coulé ne vaut rien. Cette contradiction met en lumière une fois de plus l'importance fondamentale des conditions de mise en oeuvre.

Comme on l'a vu précédemment, on peut compter pour le béton coulé employé en grandes masses, sur l'expulsion automatique de 40 à 50 litres d'eau par m^3 qui n'ont servi que de véhicule et de lubrifiant au béton et qui l'ont garanti contre toutes déficiences locales.

Avec le béton plastique et à fortiori avec le béton sec c'est l'inverse qui se produit. En oeuvre ils contiennent fréquemment, surtout aux joints de reprise, des nids de cailloux qui forment chemins d'eau.

Mais l'étanchéité des bétons, mis en oeuvre avec un excès d'eau tient à une autre cause qui a été récemment mise en lumière par *M. Mary*, Ingénieur des Ponts et Chaussées, au Laboratoire de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, à Paris.[3] Si l'on soumet en effet une éprouvette de béton à un essai de filtration sous pression constante, on constate que le débit filtré diminue très rapidement avec le temps, même s'il s'agit d'eau distillée.

C'est le gonflement du béton dans l'eau qui en est la cause, chose que confirme la très faible perméabilité des bétons conservés sous l'eau.

Dissolution de la chaux —

De plus, la même quantité d'eau filtrée entraîne beaucoup moins de chaux pour des bétons conservés sous l'eau que pour des bétons conservés à l'air. On voit l'intérêt qui s'attache à ce que les bétons de barrage soient maintenus en état d'imbibition permanente, ce qui justifie dans une certaine mesure les excès d'eau à la coulée: ils sont moins perméables, et à perméabilité égale, moins solubles.

Colmatage calcaire —

Avec les eaux calcaires, il se produit un colmatage superficiel en carbonate de chaux, très efficace pour réduire le débit d'eau filtrée, qui sort néanmoins chargée en chaux. Après avoir déposé son calcaire sur le parement, elle s'est attaquée de nouveau à la chaux du ciment qu'elle a dissous.

Le phénomène cesse au bout d'un certain temps.

Avec l'eau pure, au contraire, il se poursuit et l'on constate même en laboratoire qu'il s'aggrave avec le temps, par augmentation progressive du débit filtré, ce qui témoigne d'une dissolution et destruction lente de la structure du béton.

Colmatages végétaux —

Fort heureusement interviennent, sur les ouvrages eux-mêmes, des phénomènes de colmatage naturels dûs soit aux matières en suspension dans l'eau, soit à la prolifération d'algues sur les parements et jusque dans les fissures du béton.

---

[3] Voir Annales des Ponts et Chaussées Mai-Juin 1933 et Novembre-Décembre 1934.

Dosage minimum —

Si ce dernier est assez dosé (250 à 300 Kgs au moins en parement, suivant la dimension des pierres) il est beaucoup moins vulnérable. S'il est maigre, on peut craindre les pires décompositions. C'est donc un très grave danger de réduire d'une façon excessive les dosages, surtout sur le parement amont.

Comme on l'a vu précédemment, les ciments de laitier et ciments métallurgiques sont beaucoup moins solubles que le ciment Portland.

Granulométrie du sable fin —

La granulométrie du sable fin ($\leqslant$ 0,5 mm) a une grande importance pour l'étanchéité, qu'on augmente beaucoup en forçant la proportion de sable très fin, ou ce qui vaut mieux, le dosage en ciment.[4] Au-dessus de 0,5 mm, la granulométrie n'a d'influence sur l'étanchéité des ouvrages que dans la mesure où elle rend le béton maniable.

Le kieselguhr, aux dosages habituellement employés (2 à 3 % du poids du ciment) n'a de la même façon qu'un intérêt indirect, celui de rendre le béton maniable et compact.

Résistance à l'érosion —

Au point de vue des résistances à l'érosion, le béton est capable de supporter, sans avaries, le contact et même le choc d'une eau animée de très grandes vitesses, jusqu'à 25 m/seconde, à condition qu'il soit riche en ciment compact, que sa surface soit parfaitement dressée et sans fissures. On a même constaté qu'il était capable de supporter une vitesse beaucoup plus grande (justqu'à 50 m/sec) pourvu que la direction des filets d'eau soit parallèle à la surface du béton, et que cette dernière soit très bien dressée et très lisse. Il sera alors prudent de l'armer. Les galeries de vidange au barrage de Marèges sont conçues de la façon suivante: un tuyau d'acier, formant élément étanche et résistant, traverse le barrage. Mais pour éviter sa corrosion, il est peint avec un enduit de mortier projeté au canon à ciment, et dont l'adhérence a été renforcée au moyen d'une légère armature soudée à la conduite.

Les derniers centimètres de l'enduit sont en mortier de carborandum pour mieux résister à l'érosion et armés par un grillage. La vitesse est de l'ordre de 20 m/seconde.

Résistance à l'action du climat —

On a constaté de divers côtés de très sérieuses dégradations aux parements des barrages causées par le climat. Les alternances de chaleur et de froid, et notamment le gel, exerçant leur influence sur les parements ont déterminé des avaries profondes qui ont, un temps, ému les particiens. A la longue, on a fini par s'apercevoir que l'on constatait aussi des dégradations sur des ouvrages qui bénéficiaient de climats très doux. De sorte qu'on en a conclu que ce n'est pas la rigueur du climat qui est la cause unique de ces incidents, mais aussi les malfaçons.

[4] A cet égard le sand cement, ou ciment additionné de sables très finement moulus, aurait donné quelques déboires — décompositions par l'eau ou attaque par les agents atmosphériques.

Par malfaçon, il faut entendre le défaut d'homogénéité et de compacité du béton (accumulation des laitances aux joints de reprise dans le béton coulé, nids de cailloux, et surtout insuffisance de dosage). Sous prétexte d'économie, on est quelquefois descendu à des dosages de 125 et même 100 Kgs par mètre cube pour le corps des ouvrages, et l'on a péniblement atteint 150 à 200 Kgs par mètre cube en oeuvre sur les parements.

L'expérience prouve que de tels bétons sont très attaquables par l'atmosphère et essentiellement gélifs. Le meilleur remède à ce mal consiste surtout sous un climat rigoureux à doser davantage les parements. Il ne faudra pas craindre alors d'employer jusqu'à 300 et même 350 Kgs de ciment par mètre cube en oeuvre, pour être sûr d'échapper à tout incident de ce genre.

Chose curieuse, les avaries signalées l'ont toutes été sur des barrages poids. Les barrages en béton armé (à l'exception du barrage de Gem Lake, dont le béton était mal fait) donnent en général d'excellents résultats, même celui de Suorva qui est situé en Suède dans le cercle polaire, et dont l'épaisseur en parement n'est que de l'ordre de quelque décimètres. Ceci est bien la preuve que c'est avant tout le défaut de dosage qu'il faut incriminer.

Résumé.

En l'état actuel de la technique, la première des qualités à exiger du béton, pour construire sans risque d'insuccès graves un barrage massif, est la maniabilité, permettant d'obtenir l'automatisme à peu près intégral de la mise en oeuvre, ce qui entraîne l'adoption de bétons *mous*.

Les quantités d'eau de gâchage, de sable et de sable fin étant dès lors imposées pour satisfaire à cette première condition (suivant les matériaux dont on dispose et le mode de mise en oeuvre), le dosage en résulte.

Mais le dosage exigible pour la résistance étant en général assez faible, il faut s'imposer un dosage plus élevé sur les parements pour garantir l'ouvrage contre les risques de filtration, de décomposition par les eaux et d'attaque par les agents atmosphériques. Ce dosage sera de 250 à 300 Kgs de ciment par mètre cube en oeuvre, au moins, sur le parement amont. On ira jusqu'à 300 ou 350 Kgs sur les 2 parements si le climat est rigoureux.

Pour éviter les échauffements excessifs, la fabrication d'un ciment spécial pour barrages massifs s'impose, et pour les très gros massifs le refroidissement artificiel.

La vibration, en l'etat actuel de la technique, ne permet pas de se dispenser de la maniabilité. C'est néanmoins un adjuvant précieux de la mise en oeuvre, surtout destiné à renforcer l'étanchéité de la zone amont. Il est souhaitable que son usage se généralise, sous forme de vibration interne à grande puissance et à haute fréquence.

Des précautions spéciales sont à prendre aux joints de reprise horizontaux (repiquage soigné et répandage d'une couche de mortier ou béton de gravillon au moment de la reprise).

Le seul contrôle fidèle, aussi bien pour la résistance que pour l'étanchéité, est le contrôle du béton en oeuvre, sur échantillons extraits de la masse même du barrage.