Durcissement des bétons

Autor(en): **Bolomey, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **62 (1936)**

Heft 5

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-47566

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

La note qui précède montre que, dans le calcul du coup de bélier qui résulte de pareilles manœuvres, il n'est, à moins de cas particulier, *ni nécessaire, ni utile de faire intervenir l'analyse de détail des réflexions partielles* de l'onde aux points de discontinuité pour connaître, en chaque point de la conduite, avec une exactitude suffisante, la valeur de la surpression maximum. Mais il est désirable et facile de se constituer, dès l'abord, un jugement sur la nature de la réflexion des ondes et de se rendre compte si la mesure dans laquelle intervient une discontinuité de la conduite ou une forme particulière de la chambre d'équilibre joue un rôle qu'il vaut la peine d'apprécier par le menu dans le calcul de la surpression maximum.

A cet égard et si la conduite est munie d'une chambre d'équilibre, on peut se rendre compte, par un calcul très simple qui consiste à chiffrer (à l'aide des seules dimensions des ouvrages) *un terme correctif c*, si l'on est dans un cas où la réflexion des ondes successives par la chambre d'équilibre se fait complètement ou non. Ce terme additionnel c, ajouté à 1, constitue un simple facteur de correction du coefficient $\rho''_* : \sigma''$ dans l'équation d'Allievi qui fait connaître la valeur de la *surpression limite* à laquelle on est pratiquement conduit, à l'obturateur, avec les temps de manœuvre laissés à disposition.

Pour les manœuvres « lentes » (au sens donné ci-dessus), qui seules peuvent être envisagées dans la réalité, l'expérience a montré qu'on obtient la valeur du coup de bélier avec toute l'exactitude désirable en remplaçant, soit la conduite forcée à caractéristiques multiples, soit la chambre d'équilibre à sections multiples, par une conduite et par une chambre fictives de sections constantes, pour chacune desquelles on peut définir une *vitesse moyenne d'écoulement* et *une vitesse moyenne de propagation de l'onde.*

A l'aide de ces deux définitions, basées sur le principe de l'équivalence de la force vive et de la durée de propagation, on ramène donc, dans des conditions *qui satisfont à toutes les exigences de la pratique*, le problème de la conduite à caractéristiques multiples, avec ou sans chambre d'équilibre, au problème de la conduite à caractéristique unique et aux équations d'Allievi ; on ramène, en outre, au point de vue du coup de bélier d'onde, le problème d'une chambre d'équilibre raisonnablement conçue, à sections multiples, sans étranglement ou avec étranglement (ou diaphragme), au problème de la chambre de section constante et aux formules de la « Théorie des chambres d'équilibre » qui donnent des résultats immédiats.

La comparaison, faite sur les données qui précèdent, des divers types de chambres d'équilibre, fait ressortir notamment qu'*aucun type ne mérite, a priori et si la chambre est bien conçue, d'être considéré comme dangereux*, car il suffit, pour rendre pratiquement la réflexion complète, de donner aux diverses régions de la chambre, même à étranglement, des dimensions compatibles avec les exigences du service, et *de telles dimensions sont faciles à réaliser.*

Dès l'instant où la réflexion des ondes par la chambre est pratiquement complète, il devient, de plus, tout à fait spécieux de vouloir associer le problème du coup de bélier d'onde et celui de l'oscillation en masse. Dire que la réflexion est complète par la chambre d'équilibre, n'est-ce pas dire, du même coup, qu'aucune onde montante, venant de l'obturateur aval et arrivant à la bifurcation, ne passe pratiquement dans la galerie d'amenée ? *L'oscillation en masse peut* dès lors, sans aucun scrupule, *être calculée sans tenir compte du coup d'onde.* De plus, nous continuons à être persuadés de la coexistence de ces deux phénomènes qui, au début d'une manœuvre, se superposent, leurs causes demeurant — nous l'avons démontré ailleurs — absolument *indépendantes.*

* * *

Il nous en coûte d'avoir dû — à l'occasion de cette démonstration — apporter des oppositions formelles à diverses thèses de M. Jæger. Mais, étant donné le nombre croissant de ceux qui, ne pouvant songer à s'attaquer aux équations touffues données par lui, s'en remettent à ses conclusions et qui se sentent ébranlés par ses nombreuses publications, il nous a semblé que des affirmations aussi alarmantes ne pouvaient être maintenues sans qu'un contrôle intervînt par d'autres méthodes.

Genève, juillet 1935.

Durcissement des bétons,

par *J. Bolomey*, ingénieur, professeur à l'Université de Lausanne.

La résistance probable des bétons peut être calculée par la formule de Feret :

$$R = K\left(\frac{c}{1-s}\right)^2$$

ou par celle, moins générale, mais d'un emploi plus facile sur les chantiers, qui en a été déduite :

$$R = K\,(C/E - 0{,}50).$$

c = volume absolu du ciment dans l'unité de volume du béton ;
s = volume absolu du ballast dans l'unité de volume du béton ;
C/E = rapport du poids du ciment au poids de l'eau de gâchage ;
K = coefficient de résistance du ciment utilisé à l'âge considéré.

Le rapport $c : (1 - s)$ ou C/E dépend uniquement des conditions de fabrication du béton, c'est-à-dire du *dosage* en ciment, de la *compacité* du béton, de la *quantité d'eau* de gâchage. Cette dernière est, elle-même, fonction de la nature et de la granulation du ballast ainsi que de la consistance du béton.

Le coefficient K peut varier très fortement suivant : la *nature et la qualité* du ciment utilisé ; la *durée* du durcissement ; la *température et l'humidité* du béton pendant le durcissement.

K est ainsi indépendant des conditions de fabrication du béton et ne dépend que de la qualité du ciment, de la durée et du mode de durcissement.

Dans une précédente étude nous avons rappelé les méthodes et formules permettant de déterminer rapidement, dans chaque cas particulier, la granulation la plus favorable du béton ; de calculer l'eau de gâchage ainsi que la résistance probable du béton correspondant à cette granulation, connaissant la consistance désirée, le dosage en ciment, le coefficient de résistance K.

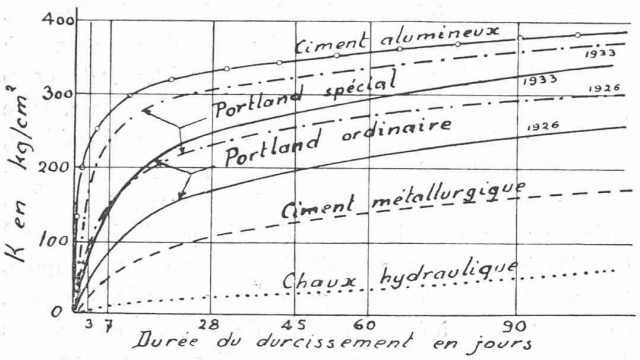

Fig. 1. — Valeurs de K en fonction de la durée de durcissement, pour la formule de résistance $R = K\ (C : E - 0{,}50)$.

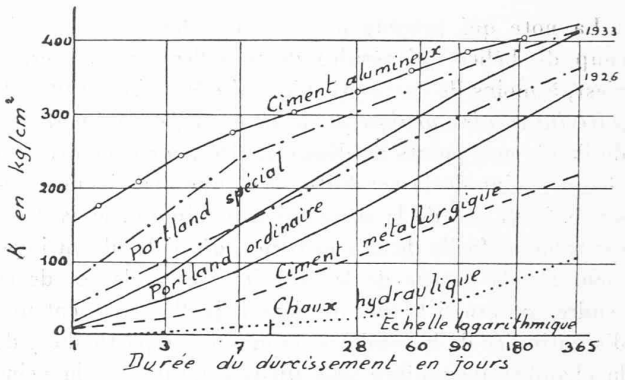

Fig. 2. — Valeurs de K en fonction de la durée de durcissement, pour la formule de résistance $R = K\ (C : E - 0{,}50)$.

Les variations de ce coefficient K étant souvent insuffisamment connues, ce qui entraîne parfois des erreurs d'appréciation sur la qualité réelle et les conditions d'emploi des divers ciments, il nous a paru utile de résumer ci-dessous les résultats de nos recherches sur le durcissement des bétons.

Influence de la nature et de la qualité du ciment et de la durée du durcissement.

Nous avons fabriqué, avec une même gâchée de béton, de caractéristiques exactement connues, un certain nombre de cubes qui ont été écrasés à 1, 3, 7, 28, 60, 90, 180 et 365 jours, le durcissement s'étant effectué dans l'eau à une température de + 15° C.

Les mêmes essais ont été répétés pour divers dosages du même ciment, ce qui nous a permis de déterminer les coefficients K en fonction de la durée du durcissement. Nous avons opéré de même avec d'autres ciments de nature et de provenance différentes.

Les graphiques (1) et (2) donnent les valeurs du K de quelques liants pour la formule de résistance à la compression $R = K\ (C/E - 0{,}50)$. Sur la figure 1, les durées de durcissement sont reportées à l'échelle arithmétique ; elles le sont à l'échelle logarithmique sur la figure 2.

Nous remarquons sur ces graphiques que :

a) En valeur absolue les coefficients K varient avec la qualité et la nature du liant, ainsi qu'avec la durée du durcissement ; nous avons en effet :

Tableau I.

Nature du liant	Valeurs de K en kg/cm² à l'âge de :				
	3 jours	7 jours	28 jours	3 mois	12 mois
Ciment alumineux . . .	230	280	330	380	425
C. P. spécial 1933 . . .	165	240	305	360	415
C. P. spécial 1926 . . .	100	150	230	295	360
C. P. ordinaire 1933 . .	80	150	245	330	415
C. P. ordinaire 1926 . .	50	85	165	245	335
Ciment métallurgique . .	23	48	105	160	220
Chaux hydraulique . . .	3	10	23	50	75

b) Si nous représentons par 100 la valeur de K du ciment alumineux, à un âge donné, nous avons pour les autres liants les valeurs relatives de K suivantes :

Tableau II.

Nature du liant	Valeurs relatives des cœfficients K à l'âge de :				
	3 jours	7 jours	28 jours	3 mois	12 mois
Ciment alumineux . . .	100	100	100	100	100
C. P. spécial 1933 . . .	72	85	92	95	98
C. P. spécial 1926 . . .	43	53	70	78	85
C. P. ordinaire 1933 . .	35	53	75	87	98
C. P. ordinaire 1926 . .	22	30	50	65	79
Ciment métallurgique . .	10	18	32	42	52
Chaux hydraulique . . .	1	3	7	13	18

Les valeurs relatives des K des divers liants varient ainsi très notablement avec la durée du durcissement. Les écarts, très prononcés les premiers jours, s'atténuent progressivement. Pour juger sainement d'un liant, il ne faut donc pas considérer uniquement la résistance qu'il permet d'obtenir à 3, 7 ou 28 jours, mais également les possibilités de durcissement ultérieur, particulièrement importantes pour les ciments métallurgiques et les *C. P.* ordinaires, si les conditions de température et d'humidité sont favorables.

c) La comparaison des ciments portland ordinaires et spéciaux de 1926 et 1933 met en évidence les progrès réalisés, ces dernières années, dans la fabrication des ciments portland.

A 28 jours, les valeurs de K de ciments provenant des mêmes usines ont passé de

230, en 1926, à 305, en 1933, pour le *C. P.* spécial, majoration de 32 %,

et de 165, en 1926, à 245, en 1933, pour le *C. P.* ordinaire, majoration de 48 %.

Ici encore, ces différences s'atténuent avec la durée du durcissement. A un an, les valeurs de K ont passé de

360, en 1926, à 415, en 1933, pour le *C. P.* spécial, majoration de 15 %

335, en 1926, à 415, en 1933, pour le *C. P.* ordinaire, majoration de 24 %.

d) La figure 2, sur laquelle les durées de durcissement sont portées à l'échelle logarithmique, offre un intérêt tout particulier. Nous remarquons, en effet, que, pour tous les ciments, le coefficient K croît sensiblement linéairement à partir de l'âge de 7 jours et que sa valeur peut être représentée par la formule, valable pour $t \geqq 7$ jours :

$$K = a + b \log t.$$

a et b sont des constantes dépendant de la nature du ciment
t = durée du durcissement en jours.

Nous avons ainsi :

Tableau III.

Formules de durcissement de divers ciments.

Ciment alumineux	$K = 202 + 90 \log t$
C. P. spécial 1933	$K = 150 + 107 \log t$
C. P. spécial 1926	$K = 32 + 140 \log t$
C. P. ordinaire 1933	$K = 10 + 167 \log t$
C. P. ordinaire 1926	$K = -37 + 147 \log t$
Ciment métallurgique . . .	$K = -37 + 100 \log t$

Connaissant les résistances d'un béton à deux âges (7 et 28 jours par exemple), il est facile d'en déduire celles qui seront atteintes à trois mois ou un an si les conditions de durcissement (humidité, température) ne sont pas modifiées.

$$\text{Par exemple } R_{90} = R_7 + (R_{28} - R_7)\,\frac{\log 90 - \log 7}{\log 28 - \log 7}\,.$$

e) Connaissant les valeurs de K à divers âges, il est aisé de calculer le dosage de ciment correspondant à une résistance donnée à un âge déterminé.

Considérons par exemple le *C. P.* ordinaire 1926. Supposons

qu'avec ce ciment, nous voulions réaliser un béton à la consistance habituelle de chantier exigeant environ 170 l d'eau au m³ et ayant une résistance de 200 kg/cm², à 28 jours. Nous avons (voir tableau I) $K_{28} = 165$ kg/cm². De la formule :

$$R = K\,(C/E - 0{,}50)$$

nous tirons

$$200 = 165\,(C/170 - 0{,}50)$$

d'où $C = 290$ kg $\quad C/E = 1{,}71$.

Connaissant le C/E de ce béton, sa courbe de durcissement s'établit sans difficulté au moyen du tableau I.

Sur la figure 3 (échelle arithmétique des temps) et la figure 4 (échelle logarithmique), nous avons déterminé, pour les divers ciments de la figure 1, les courbes de durcissement de bétons ayant tous une résistance de 200 kg/cm² à 28 jours. Pour une quantité d'eau de gâchage supposée constante de 170 l/m³, cette résistance sera réalisée par les dosages suivants :

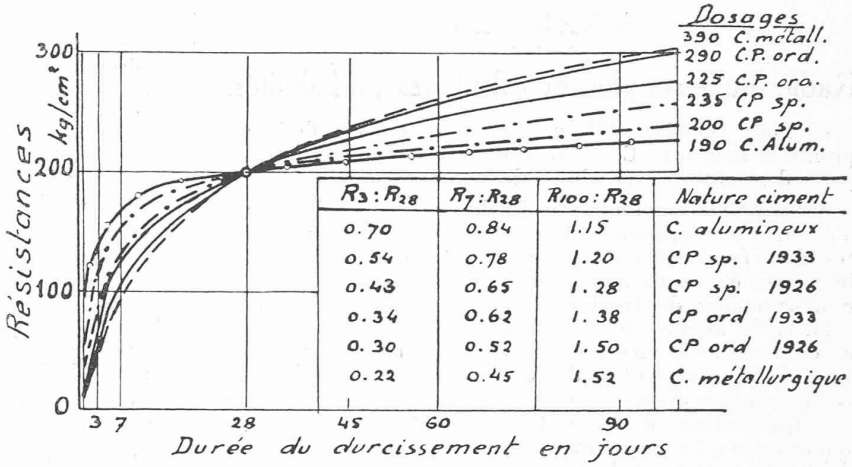

Fig. 3. — Résistances, entre 1 et 100 jours, de bétons ayant la même résistance, de 200 kg/cm², à 28 jours et fabriqués avec divers ciments. (Eau 170 l : m³).

Tableau IV.

Dosage en ciment pour réaliser des bétons ayant une résistance de 200 kg/cm² à 28 jours.

	Dosage par m³ de béton	Dosages relatifs C. A. = 1,00
Ciment alumineux	190	1,00
C. P. spécial 1933	200	1,05
C. P. spécial 1926	235	1,24
C. P. ordinaire 1933 . . .	225	1,18
C. P. ordinaire 1926 . . .	290	1,53
Ciment métallurgique . .	390	2,05

La résistance de 200 kg/cm² à 28 jours ne peut être obtenue avec de la chaux hydraulique.

Les dosages relatifs seraient différents pour une autre résistance ou une autre durée de durcissement. C'est ainsi que pour réaliser cette même résistance de 200 kg/cm² à 7 jours, ou à 1 an, il aurait fallu (même $E = 170$ l/m³).

	$R_7 = 200$ kg/cm²	$R_{365} = 200$ kg/cm²
Ciment alumineux	210 kg	165 kg
C. P. spécial	225-310	170-180
C. P. ordinaire	310-460	170-185
Ciment métallurgique . . .	—	240

f) Les figures 3 et 4 mettent en évidence des différences très marquées dans l'allure du durcissement des divers ciments. Certains d'entre eux ont presque achevé leur durcissement à 28 jours (ciments riches en aluminates et en silicates tricalciques) d'autres, par contre, sont loin d'avoir dégagé toute leur énergie chimique et enregistrent des augmentations notables de résistance après 28 jours (ciments métallurgiques ou pouzzolaniques, ciments riches en silicates bicalciques).

Le tableau V donne les résistances à 3, 7, 90 jours et 1 an en fonction de celle à 28 jours prise comme unité.

Tableau V.

Résistances à divers âges en fonction de celle à 28 jours.

	3 jours	7 jours	28 jours	90 jours	1 an
Ciment alumineux . . .	0,70	0,84	1,00	1,15	1,28
C. P. spécial 1933 . . .	0,54	0,78	1,00	1,18	1,36
C. P. spécial 1926 . . .	0,43	0,65	1,00	1,28	1,57
C. P. ordinaire 1933 . .	0,34	0,62	1,00	1,36	1,72
C. P. ordinaire 1926 . .	0,30	0,52	1,00	1,48	2,02
Ciment métallurgique .	0,22	0,45	1,00	1,52	2,10
Chaux hydraulique . . .	0,13	0,43	1,00	2,18	3,25

Si le mode de durcissement (humidité, température) est maintenu constant, les résistances à 7 jours d'un béton au ciment portland (ordinaire ou spécial) peuvent ainsi varier entre 50 à 80 %, celles à 90 jours entre 120 à 150 % de la résistance à 28 jours.

Le tableau V montre qu'il n'est pas possible de déduire la résistance à un âge donné connaissant la résistance à un *seul* autre âge (par exemple déduire la résistance à 28 jours connaissant celle à 7 jours), à moins que les caractéristiques du ciment (tableau III) aient été préalablement déterminées.

Pour juger de la valeur effective d'un ciment, il faut donc tenir compte, non seulement du dosage nécessaire pour obtenir une résistance déterminée, à un certain âge, mais aussi des possibilités de durcissement ultérieur. S'il convient d'utiliser un ciment à durcissement rapide pour des constructions légères qui ne peuvent être maintenues humides et qui doivent être mises en service dans un délai très court, il est préférable de choisir un ciment lent, à moindre échauffement et à plus faible retrait, pour les ouvrages massifs placés dans des conditions de durcissement favorables.

(A suivre.)

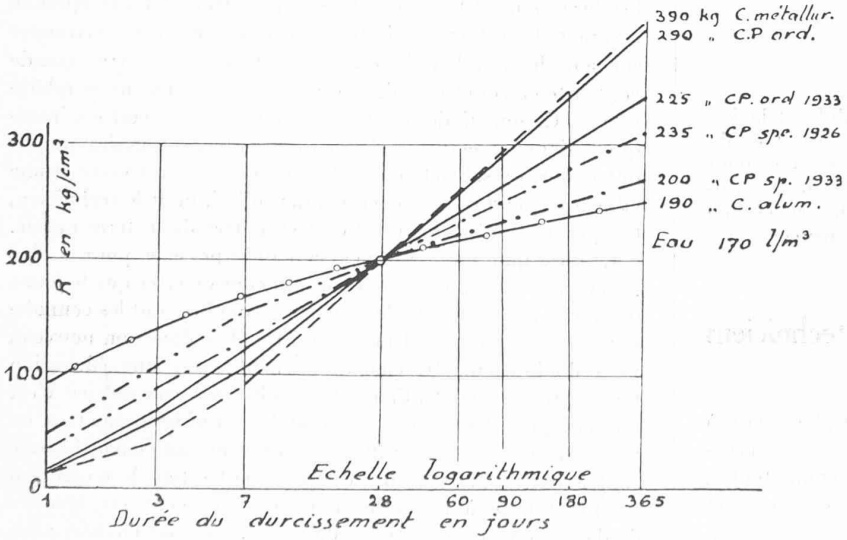

Fig. 4. — Résistance, entre 1 et 365 jours, de bétons ayant la même résistance, de 200 kg/cm², à 28 jours et fabriqués avec divers ciments.