

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 63 (1937)
Heft: 12: Quatrième centenaire de l'Université de Lausanne

Artikel: Influence du mode de mise en œuvre du béton sur la résistance
Autor: Bolomey, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-48453>

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: 26.01.2026

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

Influence du mode de mise en œuvre du béton sur sa résistance.

par J. BOLOMEY,
professeur à l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne.

La résistance d'un béton est influencée, non seulement par le dosage et la qualité du ciment, par la granulation et la nature du ballast, mais aussi par le mode de mise en œuvre du béton. De celui-ci dépend la consistance et la maniabilité à donner au béton lors de sa fabrication (teneur initiale en eau de gâchage), ainsi que l'élimination, plus ou moins accentuée, d'une partie de l'excès d'eau avant le début de la prise du ciment, c'est-à-dire la teneur finale en eau de gâchage, qui seule importe au point de vue de la résistance des bétons.

Le damage permet de réaliser le contact entre les grains de gravier et fait ainsi participer *directement* le ballast à la résistance à la compression (mais non à celle à la traction) du béton. En outre, il rend possible l'emploi d'un béton très sec, à faible teneur en sable fin, dont la pâte liante a une résistance élevée et soude solidement les grains de ballast entre eux.

Les inconvénients de ce mode de mise en œuvre, c'est-à-dire le manque d'homogénéité, le feuillement, la porosité du béton, dus au faible rayon d'action (10 à 20 cm en profondeur) du damage, sont en grande partie évités par la vibration qui, si elle ne réalise pas le contact direct entre les grains de ballast, permet l'emploi d'un béton peu mouillé et même, d'après certains expérimentateurs, assure l'évacuation d'une notable partie d'un excès d'eau de gâchage éventuel.

Il est bien connu que les tuyaux centrifugés sont très résistants, bien que fabriqués avec un béton fluent, grâce à l'élimination par essorage de la majeure partie de l'excès d'eau. C'est toutefois aux dépens de l'homogénéité du béton, la force centrifuge chassant les gros grains de ballast à l'extrados, tandis que le mortier, la laitance et l'eau en excès refluent à l'intrados des tuyaux.

Les essais décrits ci-après ont été entrepris en vue de déterminer de façon précise, dans quelques cas particuliers, l'influence du mode de mise en œuvre du béton sur les résistances à la flexion et à la compression et dans quelle mesure il est possible d'éliminer une partie de l'excès d'eau de gâchage sans provoquer la ségrégation des matériaux. Les essais ont été effectués sur des bétons à divers dosages, granulations et consistances, mis en place par vibration, damage, secousses, compression, compression et vibration simultanées.

Matériaux et granulations des bétons.

Les bétons ont été fabriqués en utilisant un ciment portland spécial ($\Delta_c = 3,07$) et des ballasts calcaires à grains arrondis provenant des Préalpes ($\Delta_s = 2,65$). Le mélange ciment + ballast a été gradué suivant notre formule $P = 10 + 90 \sqrt{d : 30}$.

$D = 30$ mm pour les séries A à G et $D = 6$ mm pour les séries H, K, L.

Les prismes de bétons de $12 \times 12 \times 36$ cm³, fabriqués en position horizontale, ont durci dans l'eau à 15° C et ont été soumis aux essais à la flexion et à la compression à 7 et à 28 jours.

Dosages et consistances des bétons.

Le tableau I ci-après indique les caractéristiques des divers bétons.

Les séries B et K ont été gâchées à la même consistance et ont le même C/E, par contre, les dosages, les granulations et les quantités d'eau de gâchage sont nettement différents. Il en est de même pour les séries C et L et, dans une certaine mesure, pour les séries A et H.

Les séries A à D, ainsi que F et G, H à L, ont les mêmes dosages et granulations, mais ont été gâchées à des consistances différentes.

Modes de mise en œuvre des bétons.

Le béton des prismes de $12 \times 12 \times 36$ cm³ a été mis en place par l'un ou l'autre des procédés suivants :

a) Mise en œuvre par vibration.

Poids total du vibrateur 3,6 kg, poids du piston 0,3 kg, course du piston 1,1 cm, pression d'air 3,5 kg/cm². La vibration a été maintenue jusqu'à ce que le béton soit complètement liquéfié (bétons à la consistance de terre humide) ou jusqu'au début de la ségrégation des matériaux (bétons mous ou fluents).

b) Mise en œuvre par damage.

Dame de 11,3 kg ayant une surface de frappe de 82 cm². Le damage a été effectué par couches successives, chaque fois jusqu'à ce que la laitance apparaisse à la surface.

c) Mise en œuvre par secousses.

Les secousses ont été provoquées par des chutes successives d'environ 3 cm de hauteur (100 secousses à la minute) et poursuivies jusqu'à ce que le béton soit complètement liquéfié (laitance à la surface), sans chercher à expulser toutes les bulles d'air.

d) Mise en œuvre par compression.

Une compression de 20 kg/cm² a été appliquée sur le béton, préalablement mis en place par secousses ou par vibration ; elle a été maintenue jusqu'à ce que l'écoulement d'eau ait pratiquement cessé. Ces pertes d'eau, très faibles pour les bétons à la consistance de terre humide, ont été d'autant plus considérables que le béton a été gâché à une consistance plus molle.

e) Mise en œuvre par vibration et compression.

Une compression de 20 kg/cm², agissant simultanément avec une vibration, a été appliquée sur le béton préalablement mis en place par secousses ou par vibration ; elle a été maintenue jusqu'à ce que les pertes d'eau aient pratiquement cessé. Par ce procédé combiné, l'élimination de l'excès d'eau a été plus accentuée que par la seule vibration ou compression.

Tableau I. Densités, résistances à la flexion et à la compression, modules E

| Séries | Dosages et consistances des bétons | Modes de mise en place | Densités des bétons | C/E au gâchage | Résistances en kg/cm ² | | | | Modules élasticité <u>E</u> |
|--------|--|---|------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------|--------------------|--------------------|--|
| | | | | | théor. | effect. | Flexion | Compression | |
| | | | | | 7 j. | 28 j. | 7 j. | 28 j. | |
| A | C.P. 300 Kg 0.1-30 1950 Eau 111 Terre humide | Vibration Damage Secousses Compression Vibr. et comp. | 2.50 | 2.70 | 2.49 | 2.50 | Kg/cm ² | Kg/cm ² | t/cm ² 442 406 — 408 415 |
| | | | | | 69 | 85 | 566 | 601 | |
| | | | | | — | — | 503 | 635 | |
| | | | | | 71 | 73 | 565 | 586 | |
| | | | | | 72 | 76 | 570 | 639 | |
| B | C.P. 300 Kg 0.1-30 1950 Eau 129 " Terre humide | Vibration Damage Secousses Compression Vibr. + comp. | 2.47 | 2.33 | 2.48 | 2.48 | 71 | 76 | 390 437 400 417 424 |
| | | | | | 68 | 75 | 535 | 630 | |
| | | | | | 71 | 88 | 538 | 649 | |
| | | | | | 72 | 77 | 531 | 611 | |
| | | | | | | | 555 | 636 | |
| C | C.P. 300 Kg 0.1-30 1950 " Eau 149 " Molle | Vibration Damage Secousses Compression Vibr. + Comp. | 2.44 | 2.03 | 2.45 | 2.45 | 71 | 75 | 386 360 362 410 410 |
| | | | | | 70 | 72 | 466 | 535 | |
| | | | | | 66 | 73 | 445 | 542 | |
| | | | | | 71 | 81 | 434 | 518 | |
| | | | | | 75 | 81 | 485 | 565 | |
| D | C.P. 300 Kg 0.1-30 1950 " Eau 181 " Fluente | Vibration Damage Secousses Compr. Vibr. + Comp. | 2.40 | 1.66 | 2.42 | — | 49 | 63 | 336 — 343 376 392 |
| | | | | | 2.41 | — | — | — | |
| | | | | | 51 | 58 | 303 | 441 | |
| | | | | | 63 | 83 | 380 | 533 | |
| | | | | | | 71 | 370 | 544 | |
| E | C.P. 410 Kg 0.1-30 1950 Eau 149 " Terre humide | Vibration Damage Secousses Compr. Vibr. + Comp. | 2.47 | 2.75 | 2.47 | 2.47 | 73 | 85 | 420 428 404 404 429 |
| | | | | | 81 | 80 | 573 | 611 | |
| | | | | | 70 | 75 | 578 | 635 | |
| | | | | | 77 | 89 | 545 | 597 | |
| | | | | | 64 | 66 | 599 | 627 | |
| F | C.P. 200 Kg 0.1-30 1950 Eau 115 " Terre humide | Vibration Damage Secousses Compr. Vibr. + Comp. | 2.47 | 1.74 | 2.45 | 2.48 | 62 | 61 | 386 378 380 412 435 |
| | | | | | 68 | 68 | 345 | 472 | |
| | | | | | 61 | 65 | 347 | 514 | |
| | | | | | 61 | 72 | 352 | 493 | |
| | | | | | 69 | 76 | 395 | 520 | |
| G | C.P. 200 Kg 0.1-30 1950 " Eau 133 " Molle | Vibration Damage Secousses Compr. Vibr. + Comp. | 2.45 | 1.51 | 2.46 | 2.45 | 52 | 71 | 372 350 370 405 405 |
| | | | | | 54 | 75 | 259 | 396 | |
| | | | | | 56 | 73 | 292 | 430 | |
| | | | | | 71 | 85 | 294 | 420 | |
| | | | | | 58 | 71 | 378 | 523 | |
| H | C.P. 460 Kg 0.1-6 1710 " Eau 178 " Terre humide | Vibration Damage Secousses Compr. Vibr. + Comp. | 2.41 | 2.57 | 2.35 | 2.40 | — | 80 | — — — — — |
| | | | | | 2.37 | — | 83 | — | |
| | | | | | 2.40 | — | 76 | — | |
| | | | | | 2.41 | — | 92 | — | |
| | | | | | | 99 | — | 650 | |
| K | C.P. 425 Kg 0.1-6 1700 " Eau 182 " Terre humide | Vibration Damage Secousses Compr. Vibr. + Comp. | 2.40 | 2.33 | 2.36 | 2.39 | 73 | 88 | 355 355 360 378 395 |
| | | | | | 69 | 81 | 518 | 636 | |
| | | | | | 66 | 91 | 558 | 643 | |
| | | | | | 83 | 98 | 535 | 622 | |
| | | | | | 81 | 100 | 625 | 670 | |
| L | C.P. 460 Kg 0.1-6 1710 " Eau 226 " Molle | Vibration Damage Secousses Compr. Vibr. + Comp. | 2.35 | 2.03 | 2.34 | 2.31 | 61 | 68 | 302 271 287 364 359 |
| | | | | | 2.32 | — | 61 | 398 | |
| | | | | | 2.42 | — | 57 | 430 | |
| | | | | | 2.41 | — | 84 | 542 | |
| | | | | | | 72 | 82 | 474 | |

Les durées de mise en œuvre, exprimées en minutes, ont été par prisme :

| Série | Vibration | Damage | Secousses | Compression | Vibr. et compr. |
|-------|-----------|--------|-----------|-------------|-----------------|
| A | 30 | 10 | — | 30 + 10 | 30 + 10 |
| B | 7 | 8 | 13 | 13 + 10 | 13 + 10 |
| C | 2 | 2 | 3 | 3 + 10 | 3 + 10 |
| D | 2 | — | 2 | 2 + 4 | 2 + 4 |
| E | 3 | 8 | 13 | 13 + 10 | 13 + 10 |
| F | 6 | 6 | 8 | 6 + 10 | 6 + 10 |
| G | 2 | 3 | 3 | 2 + 6 | 2 + 6 |
| H | 14 | 10 | 10 | 10 + 15 | 10 + 15 |
| L | 15 | 8 | 6 | 6 + 12 | 6 + 12 |
| K | 5 | 3 | 3 | 3 + 8 | 3 + 8 |

Le béton de la série A n'a pu être mis en place par secousses, parce que trop sec. Celui de la série D n'a pu être damé utilement, parce que trop fluent ; il a accusé de fortes pertes d'eau sous l'effet de la compression ou compression et vibration simultanées qui n'ont été maintenues que pendant 4 minutes, l'écoulement d'eau ayant presque cessé après ce court délai. Les pertes en eau ont aussi été très notables pour les séries G et L à la consistance molle, tandis qu'elles ont été peu importantes pour les bétons à la consistance de terre humide.

Un début de ségrégation (remontée du mortier à la surface) a été observé pour les bétons à la consistance molle ou fluente après 2 à 5 minutes de vibration (séries C, D, G et K), c'est pourquoi la vibration n'a pas été maintenue plus longtemps.

La mise en œuvre par vibration a été plus longue, à égalité de consistance, pour les bétons à petits éléments ($D = 6$ mm) que pour les bétons à gros éléments ($D = 30$ mm). La plus ou moins grande efficacité de la vibration dépend de la rapidité des vibrations, de leur intensité et de la masse des gros grains du ballast.

Résultats des essais.

Le tableau I indique les caractéristiques de chaque béton, les modes de mise en place, les densités théoriques et effectives, le rapport C/E au moment du gâchage, les résistances à la flexion et à la compression à 7 et à 28 jours, les modules d'élasticité à 28 jours.

La densité théorique a été calculée en admettant que la porosité du béton est nulle, ce qui correspond à peu près à la réalité, la densité absolue du ciment étant de 3,07 et celle du ballast de 2,65. La densité effective a été déterminée par immersion, à 7 et 28 jours, à la sortie des prismes du bassin dans lequel ils ont durci dans l'eau à 15° C.

Le rapport C/E est celui existant au moment du gâchage, sans tenir compte de l'élimination variable d'une partie de l'excès d'eau. Ce rapport C/E initial s'écarte peu de celui effectif au moment de la prise du ciment pour les bétons à la consistance de terre humide ou pour ceux mis en place par vibration, damage ou secousses ; il en diffère notablement pour les bétons à la consistance molle soumis à une compression ou à une compression et

vibration, ce qui se constate en comparant les densités théoriques avec les densités effectives. Les écarts, faibles pour les premiers bétons, sont très notables pour les seconds dont les densités, résistances et modules d'élasticité se rapprochent de ceux des bétons, de mêmes granulation et dosage, gâchés à la consistance de terre humide.

Les résistances à la flexion ont été déterminées sur prismes de $12 \times 12 \times 36$ cm³, charge concentrée au milieu de la portée de 28 cm. Les résistances à la compression ont été déterminées sur les coupons tombés de l'essai à la flexion, surface de charge 144 cm² ; chaque résultat correspond à la moyenne de 2 essais.

Les modules d'élasticité ont été déterminés, immédiatement avant l'essai à la flexion, sur les prismes de $12 \times 12 \times 36$ cm³ placés debout, le taux de travail à la compression variant entre 14 et 97 kg/cm². Ils correspondent aux déformations totales (permanentes et élastiques) observées sur une longueur centrale de 10 cm, de façon à éviter l'action des appuis.

Elimination d'une partie de l'eau de gâchage.

La quantité d'eau éliminée avant la prise du ciment peut être calculée approximativement en comparant la densité effective du béton avec celle théorique au moment du gâchage. Nous avons établi le tableau II en admettant que cette perte est nulle lorsque la densité effective est inférieure à celle théorique par suite d'une certaine porosité du béton (bulle d'air).

Le tableau III nous montre que l'élimination de l'excès d'eau dépend à la fois de la consistance du béton et du mode de mise en œuvre ; elle a été négligeable pour les bétons à la consistance de terre humide mis en place par secousses, damage et vibration, par contre elle a été importante pour tous les bétons à la consistance molle soumis à une compression ou compression et vibration immédiatement après leur mise en place.

La vibration seule, non suivie ou accompagnée de compression, n'a pas permis d'évacuer une plus grande quantité d'eau que celle qui s'écoule naturellement avant la prise du ciment lorsque la mise en œuvre se fait par les procédés ordinaires (damage ou secousses). Il convient de remarquer que la vibration n'a été maintenue que pendant une ou deux minutes après la liquéfaction complète du béton ; lors de l'exécution d'autres essais, nous avons constaté à plusieurs reprises qu'une vibration prolongée n'entraîne aucune modification des bétons secs, tandis qu'elle provoque la ségrégation des bétons mous.

Nous avons contrôlé, au moyen de quelques essais comparatifs, que l'effet de la compression est sensiblement le même lorsque celle-ci est comprise entre 10 et 30 kg/cm² ; il est donc inutile d'exercer des efforts de compression trop considérables qui contrarient l'effet de la vibration simultanée.

Résistances à la flexion et à la compression.

Elles sont indiquées sur le tableau I, ainsi que sur le graphique 1.

Tableau II. Elimination d'une partie de l'eau de gâchage.

| Série | Consistances des bétons | Dosages | Densités Δ Eau E au gâchage | Densités effectives Δ_e et eau de gâchage restante E_r | | | | | | | |
|-------|-------------------------|---------|--------------------------------------|---|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | | | | Vibration | | Damage | | Secousses | | Compression | |
| | | | | Δ_{th} | E_g | $\Delta_{eff.}$ | E_r | $\Delta_{eff.}$ | E_r | $\Delta_{eff.}$ | E_r |
| A | Terre humide | 300 | 2.50 111 | 2.49 | 111 | 2.50 | 111 | - | - | 2.49 | 111 |
| B | Terre humide | 300 | 2.47 129 | 2.48 | 124 | 2.48 | 124 | 2.48 | 124 | 2.50 | 111 |
| C | Molle | 300 | 2.44 149 | 2.45 | 144 | 2.45 | 144 | 2.45 | 144 | 2.50 | 111 |
| D | Fluente | 300 | 2.40 181 | 2.42 | 163 | - | - | 2.41 | 170 | 2.47 | 130 |
| E | Terre humide | 410 | 2.47 149 | 2.47 | 149 | 2.47 | 149 | 2.47 | 149 | 2.51 | 118 |
| F | Terre humide | 200 | 2.47 115 | 2.45 | 115 | 2.48 | 113 | 2.45 | 115 | 2.48 | 113 |
| G | Molle | 200 | 2.45 133 | 2.46 | 125 | 2.45 | 133 | 2.45 | 133 | 2.48 | 113 |
| H | Terre humide | 460 | 2.41 178 | 2.35 | 178 | 2.40 | 178 | 2.37 | 178 | 2.40 | 178 |
| K | Terre humide | 425 | 2.40 182 | 2.36 | 182 | 2.39 | 182 | 2.35 | 182 | 2.43 | 160 |
| L | Molle | 460 | 2.35 226 | 2.34 | 226 | 2.31 | 226 | 2.32 | 226 | 2.42 | 174 |
| | | | | | | | | | | | |

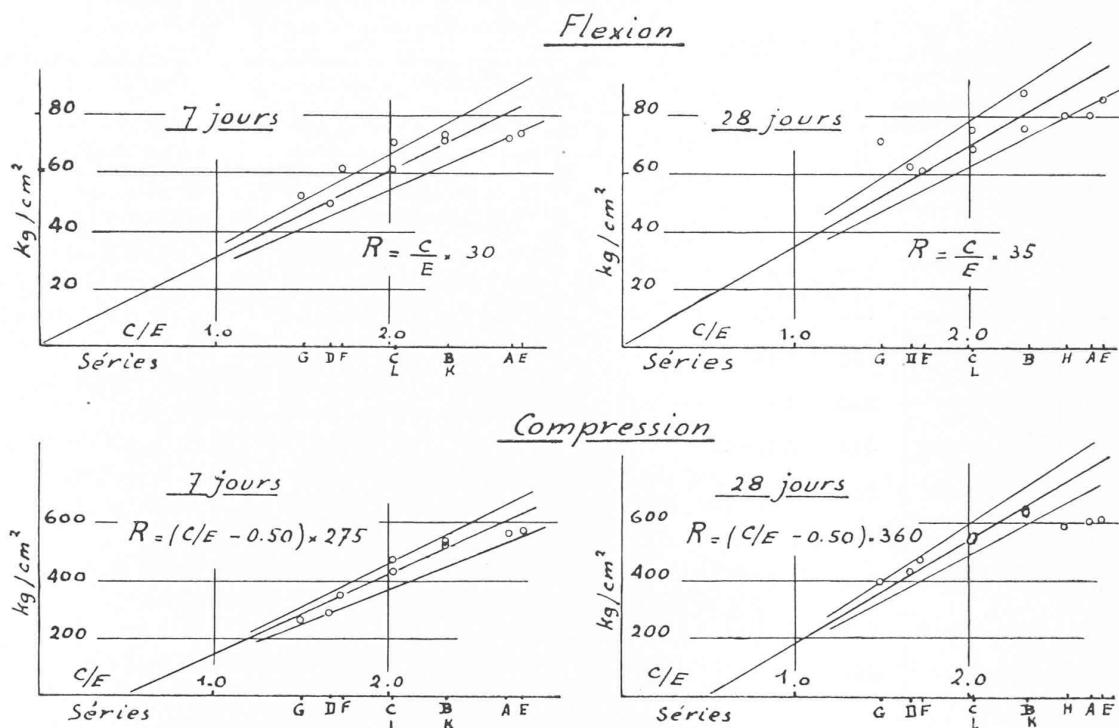
Tableau III. Eau retenue par le béton au moment de la prise du ciment, exprimée en pour-cent de l'eau de gâchage initiale.

| Série | Consistances des bétons | Eau de gâchage initiale | Modes de mise en œuvre des bétons | | | | |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | Vibration | Damage | Secousses | Compression | Vib.+Comp. |
| A | Terre humide | 111 | 100 % | 100 % | - | 100 % | 100 % |
| B | " " | 129 | 96 " | 96 " | 96 % | 86 " | 81 " |
| E | " " | 149 | 100 " | 100 " | 100 " | 79 " | 75 " |
| F | " " | 115 | 100 " | 98 " | 100 " | 98 " | 98 " |
| H | " " | 178 | 100 " | 100 " | 100 " | 100 " | 100 " |
| K | " " | 182 | 100 " | 100 " | 100 " | 88 " | 88 " |
| Moyennes A,B,E,F,H,K | | | <u>99 %</u> | <u>99 %</u> | <u>99 %</u> | <u>92 %</u> | <u>90 %</u> |
| C | Molle | 149 | 97 " | 97 " | 97 " | 75 " | 78 " |
| D | Fluente | 181 | 93 " | - | 94 " | 72 " | 72 " |
| G | Molle | 133 | 94 " | 100 " | 100 " | 85 " | 85 " |
| L | " | 226 | 100 " | 100 " | 100 " | 77 " | 80 " |
| Moyennes C,D,G,L | | | <u>98 %</u> | <u>99 %</u> | <u>98 %</u> | <u>77 %</u> | <u>79 %</u> |

Les résistances des bétons d'une même série, mis en œuvre par vibration, damage ou secousses, diffèrent peu entre elles et peuvent être représentées par les formules :

$$R_{\text{flexion}} = (C/E) \cdot K \quad \begin{cases} K_7 = 30 \text{ kg/cm}^2 \pm 10 \% \\ K_{28} = 35 \text{ kg/cm}^2 \pm 10 \% \end{cases}$$

$$R_{\text{compression}} = (C/E - 0,50) \cdot K \quad \begin{cases} K_7 = 275 \text{ kg/cm}^2 \pm 10 \% \\ K_{28} = 360 \text{ kg/cm}^2 \pm 10 \% \end{cases}$$

Fig. 1. — Résistances des bétons vibrés, en fonction des $C : E$ initiaux.

Les résistances des bétons mous ou fluents, mis en place par compression ou par compression et vibration, sont notablement plus élevées que celles données par ces formules parce que le C/E effectif au moment de la prise du ciment a été amélioré, par rapport au C/E initial, par suite de l'élimination d'une partie de l'excès d'eau. Les résistances confirment ainsi les déductions tirées de l'examen des densités.

Les résistances fournies par les bétons des séries A , E et H , très secs et à dosages élevés, sont inférieures aux prévisions. Il semble que, pour chaque nature et granulation du ballast, il ne convienne pas de réduire la quantité d'eau de gâchage au delà d'une certaine limite, même si les procédés de mise en œuvre permettent encore d'obtenir un béton très compact.

Cette particularité a d'ailleurs été déjà signalée par d'autres expérimentateurs et rend difficile la réalisation pratique de bétons à très hautes résistances (700 à 1000 kg/cm²), pour lesquels il faut utiliser un ciment à coefficient K très élevé ($K = 500$ — 600 kg/cm²). Cette condition n'est pas suffisante. Il ne suffit pas de tenir compte de la qualité du ciment et du rapport C/E effectif, mais aussi de la nature et de la granulation du ballast, qui peut provoquer une répartition inégale des charges à l'intérieur du bloc de béton si son module d'élasticité diffère de celui de la pâte liante et s'il contient des gros grains de gravier. La résistance apparente du béton est souvent plus faible que celle de la pâte liante, même si le ballast est bien gradué et provient d'une roche saine très résistante. A égalité de C/E les bétons fabriqués avec un ballast à petits éléments seront généralement plus

résistants que ceux préparés avec un ballast à gros grains.

Ces particularités s'observent dans nos séries d'essai. En effet nous avons difficilement réussi à dépasser la résistance de 650 kg/cm², même en augmentant le dosage ou en réduisant la quantité d'eau de gâchage au strict minimum (comparer les séries A , B et E dont le C/E a varié entre 2,33 et 2,75 sans qu'il y ait eu modification sensible des résistances).

Avec le même ballast, mêmes granulation, dosage, C/E et consistance que le béton A , nous avons pu atteindre la résistance de 795 kg/cm² à 7 jours en utilisant du ciment alumineux. Cette résistance est d'ailleurs, elle aussi, inférieure aux prévisions ; elle correspond à un coefficient K de 350 kg/cm² alors que celui-ci, déterminé par d'autres essais, est de 460 kg/cm² à 7 jours pour le ciment alumineux utilisé.

D'autre part l'intensité du durcissement entre 7 et 28 jours a été d'autant plus faible que le rapport C/E a été plus élevé ; c'est ainsi que nous avons obtenu les durcissements suivants à la compression (voir graphique 3) :

$$\begin{array}{ll} R_7 = 0,67 & R_{28} \quad \text{pour } C/E = 1,50 \\ R_7 = 0,80 & R_{28} \quad \text{» } C/E = 2,00 \\ R_7 = 0,87 & R_{28} \quad \text{» } C/E = 2,50 \\ R_7 = 0,90 & R_{28} \quad \text{» } C/E = 2,70 \end{array}$$

Les rapports entre résistance à la flexion et résistance à la compression ont été, en moyenne :

$$\begin{array}{ll} R_f = 0,137 R_c \text{ à 7 jours} & \left. \right\} \text{Séries } A, B, E, F, K, \text{ bétons secs.} \\ R_f = 0,131 R_c \text{ à 28 } & \text{»} \\ R_f = 0,158 R_c \text{ à 7 } & \left. \right\} \text{Séries } C, D, G, L, \text{ bétons mous.} \\ R_f = 0,144 R_c \text{ à 28 } & \text{»} \end{array}$$

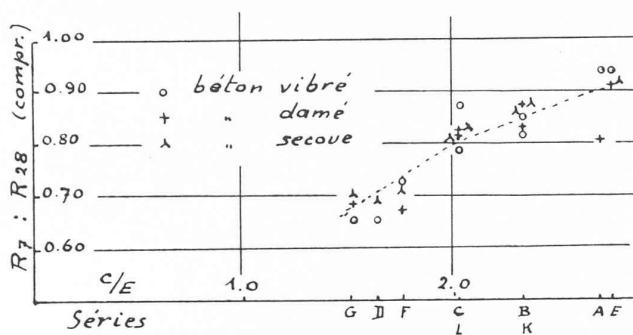


Fig. 3. — Intensité du durcissement entre 7 et 28 jours, en fonction du rapport $C : E$.

Ces rapports diminuent ainsi avec la durée du durcissement et lorsque le rapport C/E augmente. En d'autres termes la résistance à la compression croît proportionnellement plus rapidement que celle à la flexion. Ceci est d'ailleurs bien connu et ressort directement des formules de résistance indiquées au début de ce chapitre.

L'influence du mode de mise en œuvre sur la résistance à la compression est mise en évidence par le tableau IV qui donne les résistances des bétons damés, secoués ou comprimés en fonction de celle des bétons vibrés (moyenne des résultats à 7 et 28 jours).

La comparaison des tableaux III et IV fait ressortir que l'amélioration des résistances des bétons comprimés

est due essentiellement à l'expulsion d'une partie de l'excès d'eau de gâchage, donc à l'amélioration du rapport C/E (qui tient compte de la variation des dimensions des espaces intersticiels) et non à d'autres phénomènes capillaires, se superposant à l'effet de la majoration du rapport C/E .

La mise en œuvre du béton par vibration n'est donc pas supérieure en elle-même à celle par damage ou par secousses. Elle ne permet d'éliminer pratiquement qu'une très faible partie de l'excès d'eau de gâchage et ne confère pas au béton des propriétés spéciales. Par contre elle facilite la mise en place et autorise l'emploi d'un béton plus sec, donc à C/E plus élevé pour le même dosage en ciment, que celle par secousses, sans offrir les inconvénients du feuilletage dû au damage. L'intensité et la rapidité de la vibration, dont le rayon d'action est relativement faible, devront être adaptées à la consistance et à la masse du béton, ainsi qu'aux dimensions des gros grains du ballast.

La compression du béton, préalablement mis en place par secousses ou vibrations, assure l'évacuation de la majeure partie de l'excès d'eau, sans danger de ségrégation des matériaux. Elle est donc particulièrement intéressante puisqu'elle justifie l'emploi de bétons très fluides donc très faciles à mettre en place, sans avoir à craindre des pertes de résistance appréciables par rapport à celles obtenues par le même béton à la consistance de terre humide. Lors de nos essais, les bétons à la consistance

Tableau IV. Influence du mode de mise en œuvre du béton sur sa résistance à la compression.
Les résistances des bétons vibrés sont prises comme unité

| Séries | Consistances | Moyennes des résistances à 7 et à 28 jours | | | | |
|--------------------|--------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Vibration | Damage | Secousses | Compression | Vibr.+Comp. |
| A | Terre humide | 1.00 | 0.97 | — | 0.98 | 1.03 |
| B | " " | 1.00 | 1.02 | 0.98 | 1.02 | 1.04 |
| E | " " | 1.00 | 1.02 | 0.96 | 1.04 | 1.04 |
| F | " " | 1.00 | 1.05 | 1.03 | 1.12 | 1.14 |
| H | " " | 1.00 | 1.02 | 1.02 | 1.03 | 1.10 |
| K | " " | 1.00 | 1.04 | 0.99 | 1.13 | 1.17 |
| Moyennes A,B,F,H,K | | <u>1.00</u> | <u>1.02</u> | <u>1.00</u> | <u>1.05</u> | <u>1.09</u> |
| C | Molle | 1.00 | 0.98 | 0.95 | 1.05 | 1.10 |
| D | Fluente | 1.00 | — | 1.03 | 1.27 | 1.27 |
| G | Molle | 1.00 | 1.11 | 1.10 | 1.39 | 1.27 |
| L | " | 1.00 | 0.97 | 0.98 | 1.23 | 1.14 |
| Moyennes C,D,G,L | | <u>1.00</u> | <u>1.02</u> | <u>1.02</u> | <u>1.24</u> | <u>1.19</u> |

molle ou fluente, soumis à une compression de 20 kg/cm² pendant quelques minutes seulement, ont tous atteint des densités et des résistances comparables à celles des mêmes bétons à la consistance de terre humide. A ce point de vue nos essais confirment les expériences de M. Freyssinet, ainsi que les résultats obtenus par la fabrication des tuyaux centrifugés.

Module d'élasticité.

Les modules d'élasticité sont récapitulés dans le tableau V et sur le graphique 2 qui nous permettent de faire les constatations suivantes :

Les modules sont sensiblement les mêmes, que la mise en œuvre ait eu lieu par vibration, damage ou secousses ; ils ont été majorés par la compression, surtout pour les bétons gâchés à la consistance molle.

Le module diminue, mais relativement peu, en même temps que le rapport C/E . Pour le même C/E il est d'autant plus faible que le diamètre maximum D des grains du ballast est plus petit, c'est-à-dire que le béton contient plus de mortier (comparer les modules des séries B et K ou C et L).

Le module d'élasticité du béton dépend en premier lieu de celui de la roche constitutive du ballast. Il se rapprochera d'autant plus de cette dernière valeur que le béton sera à plus gros éléments convenablement gradués (comparer les modules des séries K et G).

Le module de la pâte liante étant généralement beaucoup plus faible que celui du ballast, les charges se répartissent inégalement à l'intérieur du béton, ce qui

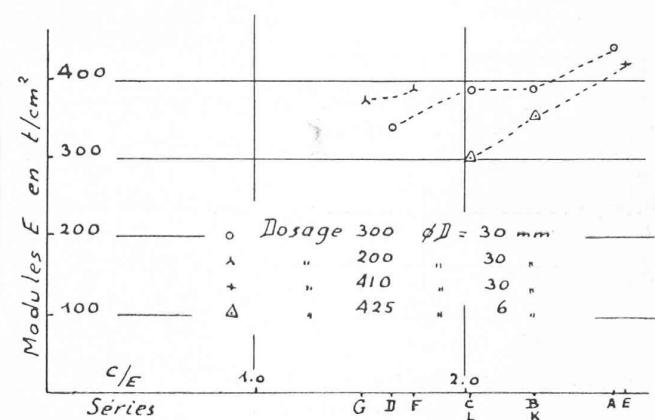


Fig. 2. — Modules d'élasticité, à 28 jours, des bétons vibrés, en fonction de leurs $C : E$ initiaux.

peut entraîner des ruptures prématuées. Il est, en effet, connu que le mortier extrait d'un béton a une résistance plus élevée que le béton entier et que de deux bétons, à C/E égaux, celui-là aura la meilleure résistance qui aura été fabriqué avec un ballast à grains de plus petit diamètre. A cette inégalité de répartition des taux de travail à l'intérieur d'un bloc de béton, se superposent d'ailleurs les effets du retrait (auquel s'opposent les gros grains du ballast) et ceux provoqués par les coefficients de dilatation inégaux de la roche constitutive du ballast et de la pâte liante.

Résumé.

La vibration ne permet pas, à elle seule, d'éliminer une notable partie de l'excès d'eau de gâchage sans entraîner

Tableau V. Influence de la consistance, de la granulation, du mode de mise en œuvre sur le module d'élasticité des bétons.

Modules, en t/cm², déterminés à 28 jours pour $\sigma_{\text{comp.}} = 14-97 \text{ Kg/cm}^2$

| Séries | Consistances | Dosages | ϕ_D | C/E | Modules d'élasticité en t/cm ² | | | | | |
|--------------------|--------------|---------|----------|-------|---|--------|-----------|--------|-----------|----------|
| | | | | | Vibrat. | Damage | Secousses | Compr. | Vib.+Com. | Moyennes |
| A | Terre humide | 300 | 30 | 2.70 | 442 | 406 | — | 415 | 408 | 418 |
| B | " " | 300 | 30 | 2.33 | 390 | 437 | 400 | 424 | 417 | 414 |
| E | " " | 410 | 30 | 2.75 | 420 | 428 | 404 | 429 | 404 | 421 |
| F | " " | 200 | 30 | 1.74 | 386 | 378 | 380 | 412 | 435 | 398 |
| K | " " | 425 | 6 | 2.33 | 355 | 355 | 360 | 378 | 395 | 368 |
| Moyennes A,B,E,F,K | | | | | 398 | 401 | 387 | 412 | 412 | 404 |
| C | Molle | 300 | 30 | 2.03 | 386 | 360 | 362 | 410 | 410 | 386 |
| D | Fluente | 300 | 30 | 1.66 | 336 | — | 343 | 392 | 376 | 362 |
| G | Molle | 200 | 30 | 1.51 | 372 | 350 | 370 | 405 | 405 | 380 |
| L | " | 460 | 6 | 2.03 | 302 | 271 | 287 | 364 | 359 | 316 |
| Moyennes C,D,G,L | | | | | 348 | 326 | 341 | 392 | 387 | 362 |

la ségrégation des matériaux. Par contre, elle facilite la mise en œuvre correcte du béton, de sorte que celui-ci pourra être peu mouillé. De ce fait, il y aura gain de résistance et économie de main-d'œuvre.

A égalité de consistance, les bétons sont d'autant plus difficiles à vibrer que les grains du ballast sont plus petits. La rapidité et l'intensité des vibrations semblent jouer un rôle important. D'après quelques essais comparatifs, il ressort que la vibration doit être d'autant plus lente, mais à plus forte intensité, que le diamètre des grains de ballast est plus petit (comparer les durées de mise en œuvre par vibration et par secousses des bétons B et L ou C et K, à la même consistance).

La compression, appliquée sur un béton préalablement mis en place par un procédé quelconque, assure l'élimination de la majeure partie de l'excès d'eau de gâchage et nous a donné des résultats très intéressants. Un béton mou ou fluent, d'une mise en œuvre très aisée, acquerra des résistances aussi élevées que le même béton à la consistance de terre humide. Une compression de quelques kg/cm^2 , appliquée sur le béton pendant 5 à 10 minutes, suffit à produire ces heureux effets. Ceux-ci ne seront effectifs sur le chantier que si l'écoulement de l'excès d'eau est assuré par diverses dispositions (coffrages, épaisseurs de béton réduites, etc.).

La comparaison des densités du béton, déterminées au moment du gâchage et lors de la prise du ciment, renseigne immédiatement sur l'intensité de l'élimination d'une partie de l'excès d'eau de gâchage, ainsi que sur la compacité du béton. Les déductions que nous en avons tirées ont été confirmées par les essais de résistance.

Le module d'élasticité d'un béton dépend bien moins de sa résistance mécanique que du module d'élasticité de la roche d'où provient le ballast et de la granulation de celui-ci. Pour les bétons à très hautes résistances, il faut rechercher un ballast ayant sensiblement le même module d'élasticité que la pâte liante, tout en étant plus résistant.

Lausanne, le 6 mai 1937.

DIVERS

Roue centrifuge à grande vitesse.

Une roue centrifuge de forme originale, dont les dimensions et la vitesse sont extraordinaires, fut livrée, il y a environ trois ans, par la maison Brown Boveri, de Baden, comme partie intégrante d'un groupe centrifuge à grande vitesse (voir Fig. 1). Il s'agit de centrifugation de liquides, pour en exalter les propriétés médicales. Cette exécution s'est avérée excellente jusqu'à maintenant. Pour un diamètre extérieur de 1 m et une vitesse normale de service de 6000 t/min., la roue acquiert une vitesse périphérique de 314 m/sec., vitesse qui peut être qualifiée d'énorme en considérant le fait qu'il s'agit d'un profil tournant de forme creuse, défavorable au point de vue résistance, qui est soumis à une charge supplémentaire par le liquide à traiter.

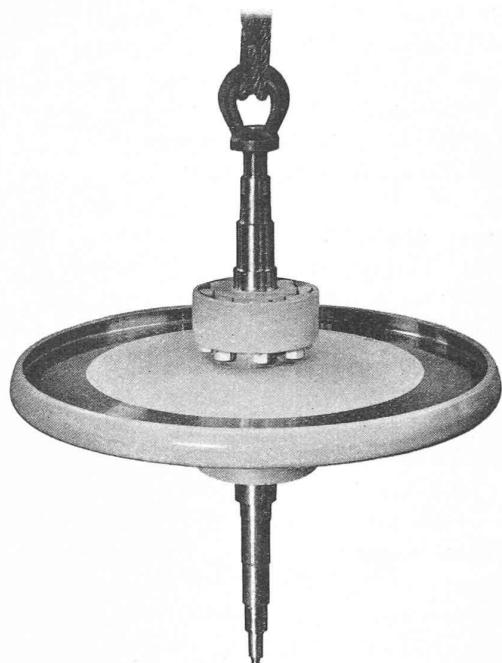


Fig. 1. — Roue centrifuge B.B.C., à grande vitesse.

La solution du problème qui a été posé par le client fut rendue possible par l'utilisation d'un acier d'exceptionnelle qualité, dur, très élastique et homogène, comme l'industrie métallurgique moderne est à même d'en produire aujourd'hui. C'est un acier nickel-chrome St 585, accusant les caractéristiques de résistance suivantes, telles qu'elles découlent d'un grand nombre de mesures effectués sur la roue brute de forge (les chiffres entre parenthèses sont les valeurs minimum garanties par le fournisseur).

| | En moyenne | Au minimum |
|--|------------|------------|
| Résistance, à la limite de rupture, en kg/mm^2 . . . | 103 | 100 (100) |
| Résistance, à la limite d'allongement, en kg/mm^2 . . . | 94 | 89,4 (80) |
| Allongement spécifique de rupture, en % | 15 | 13 (12) |

Les contraintes tangentielles et radiales dans le disque de la roue, sont reportées dans la figure 2 en fonction du diamètre. On voit qu'à la vitesse de 6000 t/min., il se présente une contrainte tangentielle maximum de $17,3 \text{ kg/mm}^2$ et une contrainte radiale maximum de 21 kg/mm^2 . Il naît dans la forme du profil extérieur des contraintes composées d'un genre plus complexe qui sont données comme résultante dans les coupes $x-x$ et $y-y$ (fig. 2) pour la vitesse de 6000 t/min. et accusent la même valeur maximum de $24,6 \text{ kg/mm}^2$.

La roue fut lancée à 6600 t/min. et ne subit aucune déformation mesurable.

Comme on peut s'en rendre compte d'après les figures, cette roue centrifuge est exécutée sans alésage, mais avec de fortes brides qui la fixent aux bouts d'arbre. La fixation se fait de telle façon que les parties subissant des contraintes ne présentent aucun défaut d'homogénéité.