

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

—
Cours de Construction du Génie Civil
—

N° 73

Réalisation de bétons compacts par vibration

par

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège

Tirage à part extrait du Rapport final
du Troisième Congrès de l'Association Internationale
des Ponts et Charpentes

Liège – 13-18 septembre 1948



Réalisation de bétons compacts par vibration

Die Herstellung von dichtem Beton durch Vibration

Compact concrete by vibration

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège

Le critère usuel de qualité des bétons est la résistance à la compression. Dans les limites pratiques, ce facteur est principalement influencé par la qualité du ciment et par la quantité de ciment par mètre cube. De ce fait, la haute résistance des bétons peut être accompagnée de propriétés défavorables pour la plupart des applications, telles que grande déformabilité thermo- et hygrométrique, fluage et relaxation importants, grand développement de chaleur de durcissement, etc. Depuis plus de vingt années, je professe que la compacité est un critère de qualité plus approprié, il a l'avantage de s'accommoder de teneurs en ciment plus faibles sans préjudice de compacité, ce qui réduit considérablement les propriétés indésirables précitées. L'obtention de compacités élevées des bétons est toutefois liée à l'emploi de moyens mécaniques puissants de mise en œuvre et a été principalement rendue possible par la vibration. C'est pourquoi, en 1937, au Congrès international d'essai des matériaux à Londres, j'ai déjà préconisé l'adoption de la compacité comme critère d'efficacité de la vibration plutôt que la résistance à la compression.

En désignant par p , s , c , e et v , suivant les notations de R. Féret, les proportions en volumes absolus de pierrailles, de sable, de ciment, d'eau et de vides dans l'unité de volume du béton ($p + s + c + e + v = 1$);

Par vp la porosité apparente ou proportion de vides de la pierraille;

Par ρ le coefficient de remplissage des vides de la pierraille par le mortier;

Par r le rapport $\frac{\rho vp}{1 - vp}$ du volume de mortier au volume absolu de pierrailles;

Par μ le rapport $\frac{s + c}{s + c + e + v}$, c'est-à-dire la compacité sèche du mortier;

Par γ le rapport $\frac{c}{e+v}$ (généralisant le facteur ciment/eau); on établit aisément les relations :

$$p = \frac{1}{1+r} \quad s = \frac{[\mu - \gamma(1-\mu)]r}{1+r}$$

$$c = \frac{\gamma(1-\mu)r}{1+r} \quad e+v = \frac{(1-\mu)r}{1+r}.$$

Ces formules permettent théoriquement de déterminer la composition d'un béton de compacité et de résistance données. En effet, d'après R. Féret :

$$R'b = K \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right)^2$$

ou

$$\gamma = \frac{\sqrt{\frac{R'b}{K}}}{1 - \sqrt{\frac{R'b}{K}}},$$

$R'b$ étant la résistance à la compression sur cubes à un âge déterminé, K le coefficient correspondant.

La compacité du béton frais est

$$p + s + c = \beta = \frac{1 + \mu r}{1 + r}.$$

La compacité du béton durci est

$$\beta' = \frac{1 + r \left[\mu + \frac{\gamma \varepsilon \Delta c}{1.000} (1 - \mu) \right]}{1 + r},$$

en appelant ε la proportion en poids d'eau fixée par le ciment et $\frac{\Delta c}{1.000}$ le rapport du poids spécifique absolu du ciment à celui de l'eau. ε est ordinairement compris entre 0,15 et 0,20, en moyenne il vaut 0,175.

μ croît généralement avec la consistance du béton. Pour les bétons fluides, μ peut descendre vers 0,60. Pour les bétons plastiques, en moyenne $\mu = 0,67$. Pour les bétons secs, μ tend vers 0,70 et il semble que la limite pratique supérieure de μ pour les bétons vibrés les plus secs ne soit guère supérieure et plus petite que 0,75. Ce facteur influe sensiblement sur la compacité du béton.

Pour les bétons très fluides, ρ peut atteindre 1,80 à 2,00. Pour les bétons plastiques, en moyenne 1,5 (de telle sorte que $\mu\rho = 1$). Pour les bétons les plus secs mis en œuvre par damage, ρ est compris entre 1,30 et 1,40, en moyenne 1,35 (valeur optimum selon Leclerc du Sablon). Pour les bétons vibrés les plus secs, à mélange préalable de tous les constituants, il semble que ρ pourrait descendre jusqu'à 1,20. Ces chiffres ont notamment été contrôlés par des expériences dans mes laboratoires.

Dans ces conditions, r est pratiquement compris entre des limites

voisines de 1,80 pour les bétons les plus fluides et de 0,30 pour les bétons vibrés les plus secs, la valeur moyenne étant de 1 environ pour les bons bétons plastiques. Ce coefficient r est donc en relation avec la consistance du béton; il varie dans le même sens que la fluidité ou maniabilité ou « workability ». Quant à l'influence de la compacité sur la résistance, elle peut être mise en évidence comme suit par la formule de Féret :

$$R'b = K \left(\frac{c}{1 - \beta + c} \right)^2 = K \left(\frac{c}{(1 - \beta)(1 + \gamma)} \right)^2$$

$$R'b = K \left(\frac{c}{1 - \beta' + c \left(1 + \frac{\varepsilon \Delta c}{1.000} \right)} \right)^2 = K \left(\frac{c}{c' + v'} \right)^2$$

en posant $c' = c \left(1 + \frac{\varepsilon \Delta c}{1.000} \right)$ = volume absolu de ciment hydraté, et $v' = e + v - \varepsilon c \frac{\Delta c}{1.000}$ = porosité réelle du béton durci et desséché.

La résistance augmente avec la compacité, mais elle dépend essentiellement du dosage en ciment.

Le dosage peut être établi mathématiquement en fonction de γ et de deux des trois paramètres β , μ ou r , β pouvant être substitué à μ par la relation $\mu = \beta - \frac{1 - \beta}{r}$.

En se référant à la compacité β' du béton durci, on peut éliminer γ comme suit :

$$\gamma = \frac{\beta' (1 + r) - (1 + \mu r)}{r (1 - \mu) \varepsilon \frac{\Delta c}{1.000}}$$

La formule de Féret peut alors s'écrire :

$$R'b = K \left\{ \frac{\beta' (1 + r) - (1 + \mu r)}{\beta' (1 + r) - \left[1 + \mu r - \varepsilon \frac{\Delta c}{1.000} (1 - \mu) r \right]} \right\}^2$$

Si l'on se réfère à la formule linéaire de résistance de Bolomey, on obtient :

$$R'b = K \left(\frac{\Delta c}{1.000} \gamma - 0,5 \right) = K \left[\frac{\beta' (1 + r) - (1 + \mu r)}{(1 - \mu) r \varepsilon} - 0,5 \right]$$

Dans ce cas

$$\gamma = \left(\frac{R'b}{K} + 0,5 \right) \frac{1.000}{\Delta c}$$

Ces formules ne sont pas très significatives; elles établissent que la résistance augmente avec la compacité du béton durci, mais relativement peu. Or, si μ , r et ε sont invariables, β' ne peut augmenter que par l'augmentation de γ , c'est-à-dire de c , e ne pouvant guère diminuer si l'on ne veut pas modifier ε . D'après les dernières formules, il est clair que β' , μ , r et ε ne peuvent varier d'une manière quelconque, mais seu-

lement dans des limites plausibles et d'une manière corrélative, de façon à donner une valeur convenable de γ . Donc, la résistance est principalement déterminée par la proportion de ciment; il n'en est pas de même de la compacité. Ce qui n'empêche que l'on peut réaliser des bétons compacts et très résistants; ce sont même les plus économiques, car ils contiennent le moins de ciment, mais ils exigent une puissante vibration.

Les dernières formules établissent aussi que la résistance diminue lorsque la richesse en mortier r augmente. Les grandes compacités s'obtiennent en diminuant r , c'est-à-dire ρ et vp , secondairement en augmentant μ et γ ; on n'a guère d'action sur ε dont l'influence sur la compacité est subordonnée. On peut diminuer considérablement vp en étendant l'échelle granulométrique ⁽¹⁾.

Au cours des dernières années, dans divers pays, des procédés spéciaux (« Prepakt » aux Etats-Unis d'Amérique, « Colcrete » en Grande-Bretagne et d'autres) ont été proposés et appliqués pour certains ouvrages. Ils consistent à confectionner le béton en place, dans la forme, par pénétration ou injection du mortier dans la masse de gravier. Selon les formules précédentes, cela revient à faire $\rho = 1$, d'où $r = \frac{vp}{1 - vp}$.

Le procédé « Prepakt » invoque la possibilité d'un tassement du gravier préalable à l'injection du mortier, ce qui équivaut à d'assez faibles valeurs de r , favorables à une grande compacité. Mais ce procédé exige naturellement des mortiers assez fluides, peu visqueux, qui, dans le « Prepakt » par exemple, contiennent des produits spéciaux destinés à faciliter l'injection. Ces mortiers ont probablement une faible valeur de μ , ce qui entraîne une réduction de la compacité selon les formules qui la régissent. Néanmoins le principe est intéressant et il atteint à la limite de la voie indiquée plus haut pour réaliser des bétons compacts, à savoir $\rho = 1$. Les valeurs de ρ inférieures à l'unité donnent des bétons caverneux, donc non compacts. Ces considérations, plutôt théoriques, ne préjugent en rien au sujet des difficultés éventuelles de mise en œuvre.

A la suite d'une communication faite à Liège en avril 1947 par M. Ch. Mallet, d'Alger ⁽²⁾, citant les résultats obtenus au moyen de bétons mis en œuvre selon une granulométrie dite « Walter » et double vibration (pré vibration sur table vibrante à fréquence moyenne à la sortie de la bétonnière, vibration à haute fréquence dans les moules), et attirant l'attention sur le rôle important du mortier dans la résistance, qui incite à le confectionner avec plus de soin que par le mélange grossier à la bétonnière, par exemple par un opération séparée, des expériences furent entreprises dans mes laboratoires selon le principe suivant. La pierraille mouillée est compactée à part dans des moules métalliques sur table vibrante; le mortier est broyé à part pendant 10 minutes dans un broyeur à boulets; il est ensuite introduit dans la pierraille à la faveur de la vibration, en quantité strictement nécessaire pour remplir les vides.

Donc $\rho = 1$ et $r = \frac{vp}{1 - vp}$. Le coefficient vp est mesuré par pesée

⁽¹⁾ F. CAMPUS, *Bétons compacts pour ouvrages massifs hydrauliques*. Association française pour l'avancement des sciences, 63^e Session, Liège, 1939 (*Bulletin du C. E. R. E. S.*, t. II, Liège, 1947).

⁽²⁾ Ch. MALLET, *Le béton précontraint; applications nord-africaines* (*Bulletin du C. E. R. E. S.*, t. III, Liège, 1948).

du moule rempli de gravier après vibration, le poids spécifique absolu de la pierreaille étant connu.

Les expériences sont encore trop peu nombreuses pour pouvoir être concluantes. Elles doivent être poursuivies et développées. Voici quelques résultats :

I. Influence de la confection des mortiers au broyeur.

a) Mortier par poids égaux de sable de rivière 0 — 2 et de ciment portland à haute résistance, ciment : eau = 3,33, éprouvettes vibrées.

Résistance en kg/cm ²		Gâché manuellement	Broyé
A la flexion	7 j.	88	94
	28 j.	87	112
	90 j.	111	125
A la compression	7 j.	507	640
	28 j.	710	785
	90 j.	766	1 000

b) Mortier par poids égaux de poussier de calcaire dur et de ciment portland à haute résistance, ciment : eau = 3,33, éprouvettes vibrées.

Résistance en kg/cm ²		Gâché manuellement	Broyé
A la flexion	7 j.	98	95
	28 j.	115	108
	90 j.	134	140
A la compression	7 j.	577	647
	28 j.	837	875
	90 j.	940	1 000

c) Mortier contenant 2,5 parties en poids de sable de rivière 0 — 2 pour 1 partie en poids de ciment portland à haute résistance, ciment : eau = 2,50, éprouvettes vibrées.

Résistance en kg/cm ²		Gâché manuellement	Broyé
A la flexion	7 j.	52	45
	28 j.	57	53
	90 j.	72	76
A la compression	7 j.	219	281
	28 j.	470	435
	90 j.	600	543

L'effet relatif du broyage paraît donc dépendre de la nature du sable et aussi de la proportion de ce dernier; il est surtout appréciable pour les mortiers relativement riches en ciment, comme le sont ceux des bétons.

II. Comparaison entre divers bétons confectionnés au moyen de pierreilles de porphyre 20-40, de sable de rivière 0-2 et de ciment portland à haute résistance.

a) $p = 0,633$, $s = 0,138$, $c = 0,118$, $e = 0,110$, $\rho = 1$,
 $vp = 0,367$, $\mu = 0,698$
 $\beta = 0,889$, $\beta' = 0,959$

Densité 2,55 — 360 kg de ciment par mètre cube de béton.

Résistance à la compression sur cubes :

à 7 jours : 597 kg/cm²
à 28 jours : 742 kg/cm²

- b) $p = 0,56$, $s = 0,191$, $c = 0,131$, $e = 0,119$, $\rho = 1,35$,
 $vp = 0,367$, $\mu = 0,73$
 $\beta = 0,882$, $\beta' = 0,968$
 Densité 2,54 — 430 kg de ciment par mètre cube de béton.
 Résistance à la compression sur cubes :
 à 7 jours : 620 kg/cm²
 à 28 jours : 730 kg/cm²

- c) $p = 0,607$, $s = 0,140$, $c = 0,146$, $e = 0,106$, $\rho = 1$,
 $vp = 0,393$, $\mu = 0,73$
 $\beta = 0,893$, $\beta' = 0,985$
 Densité 2,59 — 462 kg de ciment par mètre cube de béton.
 Résistance à la compression sur cubes :
 à 7 jours : 740 kg/cm²
 à 28 jours : 747 kg/cm²

- d) Un béton témoin, de la même composition que le béton b ci-dessus, a été confectionné manuellement et mis en place par vibration. Il a donné les résultats suivants dont la comparaison à ceux de b montre l'effet de la vibration préalable de la pierraille et de la confection séparée du mortier au broyeur.
 Résistance à la compression sur cubes :
 à 7 jours : 476 kg/cm²
 à 28 jours : 653 kg/cm²

- e) Béton confectionné en suivant exactement la courbe de Fuller pour des éléments d'un grosseur maximum de 40 mm, le mortier étant préparé au broyeur au moyen des éléments de moins de 2,33 mm, même mode opératoire que pour a, b et c.
 $p = 0,620$, $s = 0,153$, $c = 0,118$, $e = 0,109$, $\rho = 1$,
 $vp = 0,382$, $\mu = 0,71$
 $\beta = 0,890$, $\beta' = 0,964$
 Densité 2,55 — 369 kg de ciment par mètre cube de béton.
 Résistance à la compression sur cubes :
 à 7 jours : 613 kg/cm²
 à 28 jours : 672 kg/cm²

III. Des pierrailles de grès 40-60 mouillées sont vibrées dans les moules. On y introduit par vibration un mortier composé de 1 m³ de sable de rivière 0-2 (1 430 kg), 1 200 kg de sable et 392 litres d'eau, ou de 1 m³ de sable de rivière 0-2 (1 430 kg), 800 kg de sable et 300 litres d'eau, broyé pendant 10 minutes.

Résistances du mortier à 1 200 kg de ciment :
 à 3 jours : 70,7 kg/cm² à la flexion
 421,0 kg/cm² à la compression
 à 7 jours : 91,0 kg/cm² à la flexion
 593,0 kg/cm² à la compression
 Résistances du mortier à 800 kg de ciment :
 à 3 jours : 57,6 kg/cm² à la flexion
 314,0 kg/cm² à la compression
 à 7 jours : 72,2 kg/cm² à la flexion
 474,0 kg/cm² à la compression

- a) Béton au mortier à 1 200 kg de ciment $\rho = 1$
 $p = 0,558$, $s = 0,176$, $c = 0,126$, $e = 0,140$,
 $vp = 0,443$, $\mu = 0,683$, $\beta = 0,86$, $\beta' = 0,938$.
 390 kg de ciment par mètre cube de béton, densité 2,47.
 Résistance à la compression sur cubes :
 à 3 jours : 347,5 kg/cm²
 à 7 jours : 390,0 kg/cm²

Conservation sous eau.

- b) Béton au mortier à 800 kg de ciment $\rho = 1$
- | | | | |
|---------------|----------------|------------------|-------------------|
| $p = 0,568,$ | $s = 0,205,$ | $c = 0,099,$ | $e = 0,128,$ |
| $vp = 0,431,$ | $\mu = 0,703,$ | $\beta = 0,872,$ | $\beta' = 0,933.$ |
- 304 kg de ciment par mètre cube de béton; densité 2,48.
- Résistance à la compression sur cubes :
- Conservation sous eau : à 3 jours : 292,5 kg/cm²
à 7 jours : 368,0 kg/cm²
- Conservation à l'air : à 3 jours : 295,0 kg/cm²
à 7 jours : 345,0 kg/cm²

De ces essais, par ailleurs préliminaires et peu concluants, on remarque :

La supériorité des pierrailles du calibre 20-40 sur celles du calibre 40-60; ceci est probablement surtout la conséquence d'une forme plus régulière des pierrailles 20-40 par rapport aux 40-60; il en résulte aussi une moindre valeur de vp (0,37 au lieu de 0,43) ⁽³⁾;

La variation relativement faible de la résistance en fonction de l'âge, de la quantité de ciment et du mode de conservation pour un même essai.

Ces observations pourraient s'expliquer comme suit. Dans les bétons confectionnés de la sorte, avec $\rho = 1$, les pierrailles se touchent nécessairement. Lors d'un essai d'écrasement, les efforts sont en partie directement transmis de pierre à pierre; le mortier a surtout pour effet de maintenir les pierres en position relative, de telle sorte que sa résistance propre n'exerce pas une grande influence sur celle du béton. Il serait très intéressant d'étudier toutes les propriétés de déformabilité de ces bétons : déformations instantanées et retardées (fluage), thermiques et hygrométriques (retrait), réversibles et permanentes. Il est permis de présumer qu'elles diffèrent de celles des bétons classiques.

Il est connu que la résistance à la compression d'un amas de pierrailles est relativement réduite, à cause de la fragilité de forme (pointes, arêtes, plaquettes, aiguilles, etc.). Il est permis de se demander si $\rho = 1$, qui correspond au contact des pierrailles, n'entraîne pas de ce fait une diminution de résistance et si l'on n'obtiendrait pas un meilleur résultat en laissant subsister entre les pierrailles une interposition minimum de mortier atténuant l'effet de leur fragilité de forme. Voici les résultats d'une série préliminaire d'expériences à ce sujet.

La pierraille de grès 40-60 de la série précédente a été vibrée avec le mortier à 1 200 kg de ciment par m³ de sable, en proportions telles que $\rho = 1, 1,10$ et 1,20. Les résultats sont les suivants :

ρ	Quantité de ciment	β	β'	Résistance à la compression sur cubes en kg/cm ²	
				à 3 jours	à 7 jours
1,00	390	0,86	0,938	347,5	390
1,10	408	0,858	0,938	330	430
1,20	416	0,852	0,935	278	435

L'effet d'accroissement de résistance du mortier avec l'âge est plus marqué. Le béton à $\rho = 1$ a une résistance plus précoce et plus élevée à 3 jours, mais il est dépassé dès 7 jours par les bétons $\rho > 1$.

Les propriétés de déformabilité et de résistance doivent naturellement varier progressivement avec la croissance de ρ . Il est probable que les

⁽³⁾ Au point de vue de la compacité, l'effet de paroi a pu aussi intervenir défavorablement pour les bétons de pierrailles 40/60, les moules ayant 200 mm seulement de côté. L'influence de la forme assez irrégulière du ballast a probablement été prédominante.

bétons correspondant à une valeur de $\rho = 1$ ou peu supérieure n'obéissent pas à la formule de résistance de Féret .

Des valeurs de ρ de l'ordre de 1,20 ou supérieures établissent la continuité entre ces bétons ultra-raides qui ne peuvent être tassés que par vibration, les bétons vibrés ordinaires et les bétons les plus raides qui puissent être tassés manuellement ou par damage pneumatique. On constate d'ailleurs que pour des valeurs de ρ comprises entre 1 et 1,30, les compacités changent peu. L'influence de v_p est prédominante. Or, il y a lieu de signaler une difficulté, celle de confectionner des bétons par vibration successive de la pierraille et du mortier en utilisant un gravier à granulométrie variée pour réduire les vides : le mortier ne pénètre pas ou est filtré. L'expérience n'a réussi dans mes laboratoires qu'avec du 20-40 assez régulier de forme et du 40-60, réservant des vides d'assez grandes dimensions par rapport à la grosseur des éléments du mortier. Les progrès récents ou prochains du matériel de vibration, notamment l'élévation de la fréquence à l'ordre de 12 000 à 16 000 cycles par minute, permettront, je l'espère, des progrès dans cette voie.

Ces suggestions et expériences sont en avance sur la pratique courante; à ce titre elles trouvent bien leur place dans les échanges de vue d'un congrès tel que celui-ci. Je ne serais pourtant pas surpris qu'elles fussent d'application dans un proche avenir. Les bétons très compacts et peu déformables seraient utiles pour les ouvrages précontraints; les bétons très compacts conviennent pour les éléments préfabriqués d'un volume suffisant, destinés par exemple aux travaux hydrauliques et maritimes. Il est d'autre part non dépourvu d'intérêt de relever que, depuis les bétons fluides coulés jusqu'aux bétons ultra-compacts vibrés et même les bétons caverneux $\rho < 1$, l'ingénieur dispose pour les applications multiples et diverses de la construction d'une gamme étendue de bétons aussi riche au moins que celle des aciers de construction et dont il est possible d'établir, ce qui est un avantage appréciable, une théorie entièrement générale de composition.

Résumé

L'auteur reprend la théorie volumétrique et pondérale des bétons compacts qu'il professe depuis vingt années et l'étend à des domaines que les progrès des appareils de vibration déjà réalisés et perfectibles encore permettent d'atteindre dès maintenant en laboratoire. Ils rendent notamment possible d'abaisser le minimum du coefficient de remplissage des vides du ballast jusqu'à l'unité. De tels bétons présentent des caractéristiques particulières de résistance qui sont brièvement commentées. Les expériences en sont à leur début et continuent.

Zusammenfassung

Der Verfasser behandelt die volumetrische und die gewichtsmässige Theorie des dichten Betons, die er seit 20 Jahren in seinen Vorlesungen vorträgt. Er erweitert sie auf den Bereich der Betonqualitäten, die durch die bis jetzt erreichte und weiterhin noch mögliche Verbesserung der Vibratoren im Laboratorium bereits erhalten wurden. Diese Apparate ermöglichen es, den minimalen Wert des Füllungskoeffizienten der Hohlräume

der Zuschlagsstoffe bis auf 1 zu senken. Ein derartiger Beton hat ganz besondere Festigkeitseigenschaften, welche kurz besprochen werden. Die entsprechende Versuche sind erst im Anfangsstadium und werden weitergeführt.

Summary

The author refers to the volumetrical and ponderal theory of compact concrete which he has followed for twenty years and extends it to realms which the progress made in vibrators which are already in existence and which can be further perfected enable us to study henceforth in laboratories. Thus they make it possible to lower the minimum of the coefficient of filling voids in ballast to a unit. Such concretes have particular characteristics of resistance, which are briefly commented. The experiments are in the initial stage and will be continued.