

UNIVERSITE DE LIEGE
Faculté des Sciences Appliquées
Cours de Constructions du Génie Civil
N° 135

Le calcul des compositions rationnelles des bétons

par

F. CAMPUS

Recteur honoraire de l'Université de Liège

CALCUL DES COMPOSITIONS RATIONNELLES DES BETONS

par

Ferdinand CAMPUS

Le vocable « calcul » associé à la composition des bétons doit être compris dans le sens que les Anglo-Saxons attachent à la notion de « designed mixes », c'est-à-dire « compositions ayant fait l'objet d'un projet ». Ce dernier terme peut paraître excessif, cependant il répond à la tendance croissante d'exiger des bétons des qualités à la fois très variées et assez précises. Dans cet esprit, les « designed mixes » ne constituent que des améliorations des « standard mixes » ou compositions normales britanniques, puisque les proportions de tous les composants, y compris l'eau, sont définies en poids [1]. Les normes belges, mêmes les plus récentes, ne sont pas encore aussi évoluées, puisqu'elles expriment encore les proportions de gravier et de sable en volumes apparents et subordonnent la quantité d'eau à des mesures de consistance. Or, il est connu depuis longtemps que le volume vrai de sable dans un volume apparent est grandement influencé par son humidité, effet quasi insignifiant pour les gros granulats. Les proportions réelles de sable et d'eau peuvent ainsi varier assez considérablement, en exerçant une influence sensible sur les propriétés du béton, sans que les mesures de consistance soient susceptibles d'y parer.

Si ces errements peuvent suffire encore pour des bétonnages peu importants, il ne peut en être de même pour les fabrications industrielles organisées, telles que les centrales à béton préparé et les usines de préfabrication, non plus que pour les grands travaux et les constructions importantes, pour lesquels les tendances actuelles d'économie par les hautes performances sans risques prononcés d'insécurité exigent que les écarts aléatoires sur les qualités des bétons mis en œuvre soient relativement réduits. Ceci demande l'emploi de composants répondant à des spécifications précises, mélangés dans des proportions telles qu'une mise en œuvre appropriée permette d'assurer les qualités requises du béton durci.

Le problème de la composition rationnelle des bétons est précisément de déterminer ces proportions en vue

de répondre au mieux à des conditions diverses et multiples. C'est une question complexe dont la solution requiert de la réflexion. Le calcul n'est envisagé ici que comme la forme la plus efficace de la réflexion, non comme une fin en soi. Car le béton n'est après tout pas une matière à calcul, mais d'expérience. Le calcul établit une prévision (projet) avec une approximation déjà bonne; l'expérience n'aura plus qu'à y apporter le cas échéant des changements mineurs, elle est ainsi simplifiée à moindre frais.

Les conditions auxquelles doit satisfaire une composition rationnelle du béton sont la compacité, la résistance du béton durci aux actions de toutes natures auxquelles il est soumis et la consistance du béton frais assurant la possibilité de mise en œuvre adéquate. Ces conditions sont assez variables selon la nature des ouvrages, les moyens de mise en œuvre et éventuellement des circonstances particulières.

Une composition de béton frais est définie exactement par les proportions en volumes absolus des constituants. Selon les notations de R. Feret, on écrit

$$p + s + c + e + v = 1,$$

formule dans laquelle p, s, c, e et v représentent respectivement les volumes absolus des gros granulats (pierrailles ou gravier) des granulats menus (sable) de ciment, d'eau et de vides (air) dans l'unité de volume du béton frais mis en œuvre dans sa forme. Les poids correspondants s'obtiennent en multipliant ces volumes par les densités réelles des divers éléments, de telle sorte que la somme de ces poids donne le poids de l'unité de volume du béton frais mis en place

$$p\Delta p + s\Delta s + c\Delta c + e\Delta e = \Delta_{\text{bet.}}$$

On remarque la mise en évidence dans le mélange de la somme $s + c + e + v$, qui représente le volume de

mortier dans l'unité de volume du béton. Si l'on désigne par m le rapport de ce volume à celui du gros granulat p , on voit que

$$p = \frac{1}{1 + m}$$

Ce rapport m est un facteur important de la composition des bétons. Si v_p est le volume des vides de l'unité de volume apparent des gros granulats, le volume absolu p donne lieu à un volume apparent

$$\frac{p}{1 - v_p}$$

et à un volume de vides

$$\frac{p v_p}{1 - v_p}$$

En divisant mp par ce volume, on obtient

$$r = \frac{m(1 - v_p)}{v_p}$$

que l'on appelle le facteur de remplissage (par le mortier) des vides des gros granulats. Si $r < 1$, le béton est poreux ou caverneux. Pour qu'il soit plein ou compact, il est nécessaire que $r > 1$, car pour assurer la cohésion du béton, il faut que tous les gros granulats soient enrobés de mortier liant sans solutions de continuité, ce qui exige un écartement des gros granulats et un volume de mortier supérieur à celui des vides initiaux. On admet généralement 1,30 à 1,35 comme valeur minimum de r . Il est possible, dans des conditions exceptionnelles [2], de descendre en dessous de ces valeurs, par exemple pour du béton de blocage (ou injecté). Les bétons à faible valeur de r ne conviennent que pour des éléments massifs, de grandes dimensions transversales et non ou très peu armés. Pour des éléments de petites dimensions transversales et fortement armés, il faut plus de mortier, à cause des effets de paroi importants des coffrages et pour assurer un bon enrobage des armatures. Généralement, m sera compris entre 1,10 et 1,40 pour les bétons les plus usuels.

Lorsque la valeur de r dépasse 1,35, la résistance du béton est pratiquement égale à celle de son mortier. Cette propriété a été anciennement reconnue déjà par R. Feret, J. Bolomey et M. Ros; elle a encore été constatée récemment d'une manière indirecte par G. Dreux [3]. Ce n'est que lorsque les valeurs de r et de m sont relativement faibles que la résistance du béton s'élève au-dessus de celle de son mortier en raison de l'enchevêtrement des gros granulats.

Le choix de r dépendra de la nature de l'ouvrage et des difficultés de bétonnage qu'il comporte. Connaissant v_p d'après la nature des gros granulats, on en déduit m , ce qui détermine p , compte tenu des caractéristiques réelles des gros granulats.

Cette manière de procéder est plus rationnelle que celle qui se fonde sur le rapport de la quantité de gravier à celle du sable. Le calcul rationnel des compositions de béton ne met pas ce rapport particulièrement en évidence; il n'a pas une signification physique aussi nette que les paramètres r et m en rapport avec les conditions du travail. Si on l'applique aux volumes absolus ($\frac{P}{S}$) ou

aux poids secs ($\frac{P}{S} = \frac{p\Delta p}{s\Delta s}$), cela lui donne du moins

de l'exactitude. Mais on l'applique encore aux volumes apparents, usage vraiment périmé, car la réalisation du dosage par le moyen de capacités de volume taré ne correspond plus aux méthodes modernes de manutention et de malaxage du béton, auxquelles le passage convient. Ainsi qu'il a été indiqué plus haut, les volumes apparents sont influencés par leur degré d'humidité, de telle sorte que leur rapport ne garantit nullement celui des quantités réelles de gravier et de sable.

La composition et la compacité du béton frais déterminent celles du béton durci, dont dépendent ses qualités mécaniques et sa durabilité, c'est-à-dire sa résistance aux dégradations dans le cours du temps par l'usure, les chocs, les météores, les agents agressifs de l'ambiance, etc... De cette durabilité dépendent l'entretien et la conservation de l'aspect. Sa considération est déterminante lorsque le béton est placé dans une ambiance agressive.

Les résistances mécaniques du béton et du mortier durcis dépendent de la cohésion de la pâte de ciment $c + e + v$, qui est d'autant plus grande que le rapport

$\frac{c}{c + e + v}$ est plus grand. Cette propriété a été mise en

formule pour la première fois par R. Feret [4] à la fin du siècle dernier. Depuis lors, beaucoup d'autres formules ont été publiées; comme elles interprètent toutes le même phénomène, elles sont naturellement équivalentes à celles de R. Feret et il n'y a pas de raison de les préférer. On pourra toutefois user de celle de J. Bolomey [5] qui possède l'avantage d'être linéaire.

La propriété relève du bon sens. Si l'on considère le volume $c + e + v$, il est certain que la résistance sera d'autant plus grande qu'il contiendra plus de ciment, à condition toutefois qu'il reste assez d'eau pour l'hydrater. Par contre, le volume de vides v est toujours défavorable. Le même raisonnement s'applique au mortier et au béton.

La remarque précédente conduit à écrire $c_h + (e_l + v)$, avec $e = e_h + e_l$, e_h étant l'eau d'hydratation, e_l l'eau libre non liée au ciment et que l'on peut faire évaporer du béton durci par dessiccation. Elle donne alors des vides, auxquels l'eau libre est assimilable. Il en résulte que physiquement la cohésion de la pâte de ciment dépend du rapport

$$\frac{c_h}{c_h + e_l + v}$$

c_h étant le volume absolu du ciment hydraté.

Cette théorie élaborée par l'Ecole du Génie Civil de l'Université de Liège a fait l'objet des thèses doctorales de R. Jacquemin [6] et de M. Dzulyński [7].

Les formules sont les suivantes :

R. Feret (1890)

$$R'_b = k \left(\frac{c}{c + e_l + v} \right)^2$$

J. Bolomey (1925-1936)

$$R'_b = K \left(\frac{C}{E} - 0,50 \right)$$

$$\frac{C}{E} = \frac{c \Delta c}{e \Delta e}$$

M. Dzulyński (1953)

$$R'_b = R'_{b_0} \exp \frac{a c_h}{c_h + e_l + v}$$

Les paramètres k , K , R'_{b_0} et a caractérisent la qualité du ciment et l'âge auquel on considère la résistance à la compression R'_b déterminée sur des éprouvettes de formes et de dimensions définies.

Ces formules ont plutôt une signification théorique ou doctrinale que pratique. Il n'est pas usuel de calculer la résistance d'un béton. Elle est aléatoire et vérifiée par des mesures expérimentales. Pour un âge déterminé, elle est essentiellement dépendante de la quantité et de la qualité du ciment. Celle-ci est aléatoire. M. G. Dreux [3] a donné récemment pour le coefficient K de la formule de J. Bolomey à 28 jours la valeur $K = 0,47 \sigma'_c$, σ'_c étant la résistance à la compression à 28 jours caractéristique de la qualité du ciment sur mortier plastique normal AFNOR (Norme française P 15 - 433). Cette résistance est aléatoire en raison des variations de qualité du ciment et des erreurs de détermination expérimentale. On verra plus loin que le rapport $\frac{C}{E}$ est assez lié à la quantité de ciment par m^3 de béton frais, ce que la pratique consacre en fixant cette quantité d'après les performances attendues du béton.

La durabilité du béton durci dans des ambiances agressives sera d'autant plus grande que $\frac{e_l + v}{c_h}$ sera plus petit, c'est-à-dire que $\frac{e + v}{c}$ sera plus petit dans le béton frais. Ceci exige des faibles valeurs de $\frac{E}{C}$ et de fortes va-

leurs de C , qui, dans le cas d'ambiances très agressives, dépassent les valeurs requises pour assurer les résistances mécaniques nécessaires.

Il y a enfin la condition très importante de la consistance du béton frais, qui peut varier de l'état pâteux très sec, grumeleux à peine lié, à l'état de pâte très molle et même coulante, dont la limite est atteinte lorsque les composants se séparent; on n'a plus alors du béton digne de ce nom. C'est de cette consistance en rapport avec les circonstances et les conditions de l'exécution que découlent les propriétés du béton mis en œuvre et après durcissement. La compacité et la résistance mécanique en dépendent par le terme v , qui les influence défavorablement. La composition nominale du béton en définit les qualités possibles, potentielles, mais les qualités effectives dépendent de la mise en œuvre. Celle-ci peut être plus ou moins difficile ou facile, suivant les circonstances dépendant de la nature, de la forme, des dimensions, de la constitution de l'ouvrage et de sa localisation : aérienne, enterrée, souterraine ou sous eau. Pour le béton armé ou précontraint, l'importance, la disposition et l'enchevêtrement des armatures compliquent plus ou moins le bétonnage. Il faut que toutes les armatures soient suffisamment enveloppées de béton compact pour être protégées des ambiances extérieures, éventuellement agressives, et pour réaliser une adhérence suffisante entre le béton et les armatures.

Tous ces résultats dépendent de la composition et de la consistance du béton frais et des moyens employés pour sa mise en œuvre, c'est-à-dire sa compaction. Il faut que le béton frais remplisse exactement ses formes ou coffrages, en restant partout homogène, c'est-à-dire identique à sa composition nominale, en enrobant parfaitement les armatures et ce sans vides, sauf introduction éventuelle d'air contrôlée par l'emploi d'entraîneurs d'air.

La diversité des consistances du béton permet d'adapter celle-ci au mieux de toutes les circonstances, tant en ce qui concerne la compacité du béton dans les moules que son transport et sa mise en place, qui sont faits par des moyens divers selon les circonstances : pelles, brouettes, baquets, wagonnets, bennes, goulottes, courroies transporteuses, chutes, refoulement par air comprimé ou par pompage, etc... Toute ségrégation doit être évitée.

Il est donc essentiel pour l'adaptation de la composition du béton aux circonstances et aux conditions de sa mise en œuvre de disposer d'une relation entre cette composition et la consistance du béton. On a imaginé beaucoup d'appareils et de méthodes de contrôle de cette consistance, mais il n'existe généralement pas de relations entre les consistances ainsi déterminées et la composition des bétons.

C'est pourquoi, en 1961-1962, une recherche de laboratoire a été proposée comme travail de diplôme à

M. A. Thirion (d'Amay), ingénieur civil des constructions A.I.Lg. Son étude a porté sur 64 bétons de compositions et de consistances variant dans un large domaine et composés de matériaux d'un usage courant en Belgique. Il s'agit de gravier 5/15 ($v_p = 0,39$), de concassés de porphyre 8/22 ($v_p = 0,45$), de sable de rivière 0,15/2,4 et de ciment portland normal. La consistance était déterminée à la table à secousses selon les normes belges. Cet essai d'étalement (flow test) est caractérisé par un indice $F_b > 1$. Toutes les mesures ont été effectuées en triple, avec une dispersion assez faible. La discussion des résultats a été faite ailleurs [8]. Leur analyse statistique par M. Arnould, assistant à l'Université de Liège, faite en 1963-1964, est exposée et commentée dans un article complémentaire du présent, auquel le lecteur est prié de se référer [9].

On se bornera ici à appliquer la formule

$$F_b = 6,105 - 1,4 \left(\frac{0,5 p + s + c}{e} \right)$$

déduite de cette analyse statistique, dont le domaine d'application, le coefficient de corrélation et la dispersion relative sont indiqués dans le travail de M. Arnould. On ne peut attribuer à cette formule un caractère universel et définitif. C'est plutôt une « tentative ». Son application est limitée aux matériaux définis ci-dessus et assimilables, par exemple aux ciments normalisés en Belgique. Son domaine est assez vaste pour comprendre tous les bétons usuels. Faute de formule universelle, il n'y a guère de risque à s'en servir, puisque le calcul n'est appelé qu'à donner une indication, à contrôler ou à mettre au point par l'expérience.

Les paramètres p , s et c de la formule ne sont pas indépendants, ils sont liés par la relation $p + s + c + e = 1$, en admettant $v = 0$, ce qui implique une compaction parfaite ou une quantité suffisante d'eau. La formule précédente peut donc être mise sous les formes

$$F_b = 7,505 - 1,4 \left(\frac{1 - 0,5 p}{e} \right)$$

et

$$F_b = 6,805 - 0,7 \left(\frac{1 + s + c}{e} \right)$$

Ces dernières formules de la consistance englobant la condition de compacité.

Le calcul d'une composition rationnelle de béton est fait comme suit à partir des diverses conditions et relations exposées ci-dessus. Par r et m , on fixe p . Les propriétés mécaniques requises ou la résistance nécessaire

à l'agression par l'ambiance fixent $\frac{c}{e}$ ou c . Enfin, il faut réaliser une certaine consistance F_b . D'où l'on obtient

$$e = \frac{1,4 (1 - 0,5 p)}{7,505 - F_b}$$

$$\text{et } s = 1 - p - c - e$$

Il est à remarquer que pour les bétons usuels, p est compris entre des limites assez étroites, intérieures au domaine 0,40 — 0,48. La variation de $1 - 0,5 p$ est donc assez faible, entre 0,76 et 0,80. De même, en considérant comme limites de variation de F_b 1,20 à 2,00, le terme $7,505 - F_b$ varie aussi modérément entre 5,505 et 6,305. Dans ces conditions, e varie entre 0,169 et 0,203 et, en règle générale, moins. Il en résulte que si l'on fixe C/E ou son inverse E/C , on fixe à peu près C (kg par m^3) ou $c = C/\Delta c$. C'est-à-dire que les grandes résistances mécaniques et les hautes qualités de durabilité correspondent d'une manière concomitante aux grandes valeurs de c (ou C) et de C/E .

CHOIX DES DIVERS PARAMETRES SELON LES CONDITIONS DE L'OUVRAGE

Pour simplifier et rendre l'exposé aussi pratique que possible, on classera les bétons d'après la richesse en ciment des compositions.

1. $C =$ environ 200 kg par m^3 de béton frais, $E/C \cong 0,85$.
Bétons massifs et de fondations peu profondes, en absence d'agression caractérisée, non ou très peu armés.
 - 1.1. Ouvrages massifs ou blocs préfabriqués de grandes dimensions.
 - 1.1.1. Pervibrés, $m = 1,10$, $p = 0,476$, $F_b = 1,30$.
 - 1.1.2. Pervibrés ou piqués, $m = 1,20$, $p = 0,455$, $F_b = 1,50$.
 - 1.1.3. Mise en place par gravité, sans compaction, $m = 1,30$ à 1,40, $p = 0,435$ à 0,416, $F_b \leq 1,80$.
2. $C =$ environ 250 kg par m^3 de béton frais, $E/C \cong 0,70$.
 - 2.1. Bétons massifs ou de fondation exposés à des intempéries ou des agents agressifs modérés, sans percolation ni actions mécaniques, peu ou légèrement armés.
 - 2.1.1. Pervibrés, $m = 1,10$, $p = 0,476$, $F_b = 1,30$.
 - 2.1.2. Pervibrés ou piqués, $m = 1,20$, $p = 0,455$, $F_b = 1,50$.
 - 2.1.3. Mise en place par gravité, sans compaction, $m = 1,30$ à 1,40, $p = 0,435$ à 0,416, $F_b \cong 1,70$.
 - 2.2. Eléments provisoires en béton modérément armé, sans qualité de durabilité, $m = 1,30$, $p = 0,435$, $F_b = 1,50$.
3. $C =$ environ 300 kg par m^3 de béton frais, $E/C \cong 0,60$.

- 3.1. Bétons massifs ou de fondation exposés à des agressions caractérisées climatiques, chimiques et mécaniques (par exemple dans la mer), éventuellement risque de percolation, non ou modérément armés.
- 3.1.1. Pervibrés, $m = 1,10$, $p = 0,476$, $F_b = 1,30$.
- 3.1.2. Pervibrés ou piqués, $m = 1,20$, $p = 0,455$, $F_b = 1,50$.
- 3.2. Eléments de structures en béton modérément armé, non exposés à des agressions caractérisées, résistance et durabilité modérées.
- 3.2.1. Dimensions transversales assez grandes, $m = 1,20$, $p = 0,455$.
- 3.2.1.1. Préfabrication avec vibration, $F_b = 1,30$.
- 3.2.1.2. Bétonnage in situ avec pervibration, $F_b = 1,50$.
- 3.2.1.3. Bétonnage in situ avec piquage, $F_b = 1,60$ à $1,70$.
- 3.2.2. Dimensions transversales assez faibles, $m = 1,30$, $p = 0,435$.
- 3.2.2.1. Préfabrication avec vibration, $F_b = 1,30$.
- 3.2.2.2. Bétonnage in situ avec pervibration, $F_b = 1,60$.
- 3.2.2.3. Bétonnage in situ avec piquage, $F_b = 1,70$.
4. $C =$ environ 350 kg par m^3 de béton frais, $E/C \approx 0,50$.
- 4.1. Eléments de structures en béton modérément armé, à résistance et durabilité élevées, sans difficulté de bétonnage, $m = 1,20$, $p = 0,455$.
- 4.1.1. Préfabrication avec vibration, $F_b = 1,30$.
- 4.1.2. Bétonnage in situ avec pervibration, $F_b = 1,40$ à $1,50$.
- 4.2. Eléments de structures en béton fortement armé, bétonnage difficile, durabilité modérée, $m = 1,30$, $p = 0,435$.
- 4.2.1. Préfabrication avec vibration, $F_b = 1,30$ à $1,40$.
- 4.2.2. Bétonnage in situ avec pervibration ou piquage, $F_b = 1,50$ à $1,60$.
- 4.3. Revêtement de sol d'eau moins $0,15$ d'épaisseur, non ou légèrement armé, livrant passage à des surcharges mobiles modérées et peu fréquentes, vibration superficielle, $m = 1,20$, $p = 0,455$, $F_b = 1,40$ à $1,50$.
5. $C =$ environ 400 kg par m^3 de béton frais, $E/C \leq 0,50$.
- 5.1. Eléments de structures en béton fortement armé, durabilité élevée, bétonnage difficile in situ par pervibration, $m = 1,30$, $p = 0,435$, $F_b = 1,50$.
- 5.2. Eléments de structure en béton légèrement armé à postcontraindre, bétonnés sans difficulté spéciale in situ par pervibration, $m = 1,20$, $p = 0,455$, $F_b = 1,40$.
- 5.3. Eléments de béton fortement armé à durabilité élevée, préfabriqués vibrés, $m = 1,20$, $p = 0,455$, $F_b = 1,30$ à $1,40$.
- 5.4. Eléments de béton légèrement armés préfabriqués à postcontraindre, vibrés.
- 5.4.1. Dimensions transversales assez grandes, bétonnage facile, $m = 1,10$, $p = 0,476$, $F_b = 1,30$.
- 5.4.2. Dimensions transversales faibles, bétonnage difficile, $m = 1,20$ à $1,30$, $p = 0,455$ à $0,435$, $F_b = 1,40$.
- 5.5. Eléments en béton précontraint préfabriqués vibrés.
- 5.5.1. Bétonnage facile, $m = 1,20$, $p = 0,455$, $F_b = 1,30$.
- 5.5.2. Bétonnage difficile, $m = 1,30$, $p = 0,435$, $F_b = 1,40$.
- 5.6. Revêtement de sol d'eau moins $0,20 \text{ m}$ d'épaisseur, non ou légèrement armé, livrant passage à des surcharges mobiles assez lourdes et fréquentes, vibration superficielle, $m = 1,10$, $p = 0,476$, $F_b = 1,40$ à $1,50$.

QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION

Ils sont seulement destinés à illustrer d'une manière concrète les indications qui précèdent.

1. Béton de fondation de gravier 5/15, mis en place par gravité sans compaction.
 $m = 1,30$, $p = 0,435$, $C = 200 \text{ kg de C.H.F.N. par m}^3$ de béton, $c = 0,069$, $F_b = 1,80$, $e = 0,192$,
 $s = 0,304$, $\frac{E}{C} = 0,96$, $\frac{p}{s} = 1,43$
 Résistance probable à 28 jours,
 $R'_b = 200 \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) = 107 \text{ bars.}$
2. Béton de gravier 5/15 pour un mur de soutènement massif non armé, bien drainé et non soumis à des actions agressives autres que les météores d'un climat froid humide (Belgique). Mise en place par bennes, pervibration.
 Cas 2.1.1. et 2.1.2.
 $m = 1,10$, $p = 0,476$, $C = 250 \text{ kg de C.H.F.N. par m}^3$ de béton frais, $c = 0,086$, $F_b = 1,50$, $e = 0,1775$,
 $s = 0,2605$, $E/C = 0,71$, $p/s = 1,83$.
 Résistance probable à 28 jours,
 $R'_b = 200 \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) = 183 \text{ bars.}$

Eventuellement pour la protection du parement contre le gel, addition d'un entraîneur d'air, pour introduire

0,05 d'air occlus, réduction correspondante de la quantité d'eau.

3. Béton de gravier 5/15 pour l'ossature intérieure d'un bâtiment à étages, en béton modérément armé. Ambiance physiquement stable, non agressive chimiquement. Pervibration.

Cas 3.2.1.2. et 3.2.2.2.

$m = 1,20$, $p = 0,455$, $C = 300$ kg de C.P.N. par m^3 de béton, $c = 0,097$, $F_b = 1,60$, $e = 0,183$, $s = 0,275$, $E/C = 0,61$, $p/s = 1,65$.

Résistance probable à 28 jours,

$$R'_b = 200 \left(\frac{C}{E} - 0,50 \right) = 228 \text{ bars.}$$

4. Béton de gravier 5/15 pour un mur de soutènement à contreforts et nervures à armature serrée et complexe, coffrages élevés, bétonnage difficile. Mise en place par chutes, vibration de coffrages et pervibration. Bon drainage, mais sol légèrement agressif.

Cas 4.2.2.

$m = 1,30$, $p = 0,435$, $C = 350$ kg de C.H.F.N. par m^3 de béton, $c = 0,121$, $F_b = 1,70$, $e = 0,189$, $s = 0,255$, $E/C = 0,54$, $p/s = 1,71$.

Résistance probable à 28 jours,

$$R'_b = 200 \left(\frac{C}{E} - 0,50 \right) = 270 \text{ bars.}$$

5. Préfabrication de poutres en béton légèrement armé et postcontraintes, sections transversales assez larges, vibration poussée. Pièces soumises en service aux intempéries d'un climat assez rude et passablement agressif.

Cas 5.4.1.

$m = 1,08$, $p = 0,48$, $C = 400$ kg de C.H.F.H.R. par m^3 de béton, $c = 0,138$, $F_b = 1,30$, $e = 0,1715$, $s = 0,2105$, $E/C = 0,429$, $p/s = 2,28$.

Résistance probable à 28 jours,

$$R'_b = 250 \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) = 460 \text{ bars.}$$

6. Béton de concassés de porphyre 8/22 pour un revêtement de sol de 0,25 d'épaisseur, livrant passage à des surcharges mobiles assez lourdes et fréquentes. Grilles très légers d'armatures à mailles très larges. Résistance requise à l'usure et aux intempéries. Mise en place par bennes, compactage par vibration superficielle.

Cas 5.6.

$v_p = 0,45$, $r = 1,35$, $m = 1,10$, $p = 0,476$, $C = 400$ kg de C.P.H.R., $c = 0,129$, $F_b = 1,50$, $e = 0,1775$, $s = 0,2175$, $C/E = 0,444$, $p/s = 2,20$.

Résistance probable à 28 jours,

$$R'_b = 250 \left(\frac{C}{E} - 0,50 \right) = 437,5 \text{ bars.}$$

REMARQUES FINALES

Les indications qui précèdent sont exemplatives mais non limitatives ni exclusives, dans l'étendue du domaine d'application de la formule de F_b . C'est-à-dire pour les matériaux d'usage courant en Belgique de densité comprise entre 2,60 et 2,70 et de 25 mm de grosseur maximum. Dans ce domaine, elles établissent la possibilité d'adapter la composition du béton d'une manière raisonnée à toutes les circonstances, afin qu'il y réponde avec une précision et une constance suffisantes. Il en sera de même pour les qualités mécaniques si le ciment possède des caractéristiques constantes de résistance.

On peut être tenté de se demander si la méthode exposée ne néglige pas la granularité. Elle est satisfaite si les granulats répondent aux spécifications des normes N.B.N. 15, N.B.N. 329 (pour les gros granulats) et N.B.N. 589 (pour les granulats menus). La granularité du sable est importante; sa courbe granulométrique sera celle du gros sable et la fraction inférieure à 0,2 mm sera très faible. Il est bien connu que la granularité n'a pas l'importance que suggère la notion de courbe granulométrique idéale. Il y a longtemps déjà [10] que l'on a établi la notion des courbes limites situées de part et d'autre des courbes idéales et qui définissent un fuseau assez large dans lequel sont comprises les courbes granulométriques satisfaisantes. L'influence relativement faible de la granularité a été encore constatée récemment par M. Dreux [3] pour des bétons dont les gros grains ne dépassent pas 25 mm.

La formule de F_b est admissible pour les ciments normalisés d'usage courant. Pour la résistance à l'agression chimique dans des cas caractérisés, tels que les eaux sulfatées, l'eau marine, les gaz sulfureux, etc., il est recommandable de recourir à des ciments spéciaux dont la résistance à ces agents agressifs est garantie ou notoire. La formule de F_b reste admissible en première approximation, attendu que dans un tel cas des vérifications expérimentales sont nécessaires.

Les valeurs de m supérieures à 1,40, $p \approx 0,416$, doivent être considérées d'un usage assez exceptionnel, pour les cas où la mise en place du béton est très difficile et sa compaction impossible, ce qui implique aussi une valeur de F_b assez grande, égale ou supérieure à 1,80.

En première approximation, ces valeurs conviendraient aussi pour le béton coulé sous eau, avec une valeur de E/C assez faible, mais une étude expérimentale est indispensable dans ce cas. Pour le transport dans les conduites et la mise en place par l'air comprimé ou par pompage, des études expérimentales sont nécessaires et l'emploi d'adjuvants appropriés peut être recommandable, par exemple de plastifiants. En première approximation, on pourrait partir du calcul de la composition la plus appropriée pour l'ouvrage et établir par l'expérience les cor-

rections éventuellement nécessaires pour le transport en conduite.

L'emploi d'adjuvants peut être utile, par exemple de plastifiants. La formule de F_b n'est pas établie pour le cas d'emploi de tels produits agissant sur la consistance, qui doivent faire l'objet d'une étude expérimentale basée sur les propriétés garanties des adjuvants. Pour la résistance au gel, dans les cas sévères, notamment pour la résistance des bétons de routes à l'action des sels de déglacage, il faudra éventuellement introduire dans le béton frais des entraîneurs d'air. En première approximation, le volume v d'air entraîné pourra être ajouté à e dans la formule de F_b .

La formule de F_b ne convient pas pour les granulats lourds (pour usages nucléaires) ni pour les granulats légers. Il en est de même des bétons spéciaux de remplissage, caverneux ou isolants ($r < 1$), dont les compositions sont établies par expérience. Pour ces bétons, comme pour ceux dont il est question ci-après, seule la formule $p + s + c + e + v = 1$ reste valable à l'état frais. Pour des granulats légers poreux, il faut adopter des valeurs assez élevées de m et de c , de manière à bien enrober tous les granulats d'un mortier assez compact.

La formule de F_b ne peut également être employée qu'en première approximation pour les micro-bétons (gros maximum égale ou inférieure à 10 mm) et pour les bétons grossiers (gros maximum de l'ordre de 40 mm). Des vérifications expérimentales sont nécessaires.

Pour des grosseurs encore plus grandes, de 60 mm et davantage, jusqu'à 150 ou 250 mm, la notion même de consistance devient problématique, tellement l'hétérogénéité du béton frais est grande. Les appareils classiques de mesure de consistance sont en défaut, même ceux qui opèrent par remoulage vibratoire.

L'emploi de ces très gros granulats répond à des buts spéciaux : bétons à très haute résistance (routes, avec des granulats ne dépassant pas 60 mm) [11] ou bétons à très haute compacité (grands massifs d'ouvrages hydrauliques) [12]. Ces gros granulats donnent généralement lieu à des granularités très étudiées, à nombre de composants d'autant plus grand que la dimension maximale est plus élevée. Ces études, justifiées par l'importance des applications, conduisent à des granularités ayant des valeurs assez basses de v_p , par exemple de l'ordre de 0,30 [11] pour des grosseurs maximales de 60 mm et de 0,20 [12] pour des grosseurs maximales de 200 mm.

Même avec des valeurs assez élevées de r , recommandables pour faciliter la mise en place et la compaction du béton, il en résulte des valeurs de m inférieures à 1, des valeurs de p supérieures à 0,5, susceptibles même de tendre vers 0,75 [12]. Les conditions de mise en œuvre de ces bétons ne peuvent plus être caractérisées par la notion de consistance, mais doivent faire l'objet d'expériences de mise au point.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Journée C.E.R.E.S. sur la durabilité du béton et du béton armé. Annexe à la communication VII (*Mémoires — Nouvelle Série — du C.E.R.E.S.*, n° 16, septembre 1966, Liège).
- [2] F. CAMPUS — Réalisation de bétons compacts par vibration (Rapport final du 3ème Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentiers, Liège, 1948).
- [3] G. DREUX — Centrale à béton du Centre d'essais des structures (Saint-Remy-lès-Chevreuse). Dosage des bétons. (Supplément aux *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics de Paris*, n° 238, octobre 1967).
- [4] R. FERET — Etude expérimentale du ciment armé. (Ed. Gauthier-Villars, Paris, 1906).
- [5] J. BOLOMEY — Recherches et essais sur les bétons. (*Bulletin technique de la Suisse Romande*, n°s 15 et 16, Lausanne, juillet 1945).
- [6] R. JACQUEMIN — Recherches sur l'hydratation des liants hydrauliques. (*Bulletin du Centre d'Etudes, de Recherches et d'Essais Scientifiques des Constructions du Génie Civil et d'Hydraulique Fluviale — C.E.R.E.S.*, Tome II, Liège, 1947).
- [7] M. DZULYNSKI — Relation entre la résistance et l'hydratation des liants hydrauliques. (*Bulletin du Centre d'Etudes, de Recherches et d'Essais Scientifiques des Constructions du Génie Civil et d'Hydraulique Fluviale — C.E.R.E.S.*, Tome VI, Liège, 1953).
- [8] F. CAMPUS — La signification des mesures de consistance du béton frais. (Festschrift Prof. Dr. Ing. H. RÜSCH zum 65-sten Geburtstag. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin — München, 1968).
- [9] R. ARNOULD — Détermination des facteurs caractéristiques de la consistance des bétons et mortiers à l'état frais (A.T.P.B., n° 5/68-69, Bruxelles).
- [10] H. IMBERECHTS — La composition granulométrique idéale des bétons. (Premier congrès international du béton et du béton armé. Volume I, Liège, 1930. Ed. *La Technique des Travaux*, Liège et Paris).
- [11] F. CAMPUS — La composition des bétons. (*Revue universelle des Mines*, n° 2, 15 février 1951, Liège).
La composition des bétons de route (2ème Congrès belge de la route, Anvers, 1933).
- [12] F. CAMPUS — Bétons compacts pour ouvrages massifs hydrauliques. (*Bulletin du Centre d'Etudes, de Recherches et d'Essais Scientifiques des Constructions du Génie Civil et d'Hydraulique Fluviale — C.E.R.E.S.* — Tome II, Liège, 1947).

BEREKENING VAN DE RATIONELE BETONSAMENSTELLINGEN

De jongste, universele evolutie op het gebied van de betonconstructies, — welke zich kenmerkt door het streven naar een steeds grotere nauwkeurigheid, — vergt een overeenkomstige aanpassing van de betonsamenstellingen om te voldoen aan zeer uiteenlopende eisen inzake duurzaamheid, besparing en weerstand, naargelang van de omstandigheden eigen aan het werk.

Dit probleem kan door middel van zeer eenvoudige en zeer realistische berekeningen worden opgelost, terwijl eveneens kan worden voldaan aan de voorwaarden die een uitstekende verwerking mogelijk maken.

Deze resultaten van deze berekeningen dienen natuurlijk gestaafd te worden door proefondervindelijke verificaties.