

## LA COMPOSITION DES BÉTONS

par F. CAMPUS,

Professeur à l'Université de Liège

**Résumé.** — *L'expression la plus correcte et la plus efficace de la composition des bétons est en proportions pondérales ou volumétriques absolues. Elle conduit à quelques formules très simples dont les facteurs caractéristiques varient dans les limites définies en rapport avec la variété très étendue des bétons. L'expression de la composition des bétons par l'analyse granulométrique est moins précise, moins assurée et plus compliquée; elle est utile comme complément de la composition pondérale pour les granulations dites « continues ». Celles-ci sont inférieures aux granulations « discontinues ». Tous les facteurs d'utilisation du béton peuvent être pris en considération dans l'application de la méthode. Certaines relations existent entre la surface spécifique des grains du mélange et l'eau de mouillage. La granulométrie des bétons discontinus peut être conçue selon une règle de similitude.*

### I. — Composition volumétrique et pondérale (1, 2, 3)

La composition des bétons est définie d'une manière complète et parfaite par les proportions volumétriques et pondérales de leurs constituants. Suivant les notations de Féret, pour un m<sup>3</sup> de béton, on désigne :

par  $p$  le volume absolu de pierrailles et par  $P$  son poids ;

par  $s$  le volume absolu de sable et par  $S$  son poids ;

par  $c$  le volume absolu de ciment et par  $C$  son poids ;

par  $e$  le volume absolu d'eau et par  $E$  son poids ;

par  $v$  le volume absolu de vides ou d'air.

Appelant  $\Delta_p$ ,  $\Delta_s$ ,  $\Delta_c$  et  $\Delta_e$  les poids spécifiques absolus des pierrailles, du sable, du ciment et de l'eau, on a :

$$p = \frac{P}{\Delta_p}, \quad s = \frac{S}{\Delta_s}, \quad c = \frac{C}{\Delta_c}, \quad e = \frac{E}{\Delta_e}$$

Soient  $vp$  la porosité apparente ou proportion de vides de la pierraille (par rapport au volume apparent) ;

$\rho$  le coefficient de remplissage des vides de la pierraille par le mortier ;

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

$\mu$  le rapport  $\frac{s + c}{s + c + e + v}$  représentant la compacité sèche du mortier ;

$\gamma$  le rapport  $\frac{c}{e + v}$ , généralisant le facteur ciment eau.

De la relation  $p + s + c + e + v = 1$ , on déduit aisément les formules :

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

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

D'après Féret, la loi de la résistance à la compression des bétons s'écrit :

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

d'où :

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

D'après Bolomey :

$$R'_b = K' \left( \frac{\Delta_c}{\Delta_e} \gamma - 0,5 \right)$$

d'où :

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

La compacité du béton frais est :

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

Celle du béton durci est :

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

en désignant par  $\varepsilon$  la proportion d'eau d'hydratation fixée par le ciment.

On en déduit :

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

Ceci permet de mettre la formule de Féret sous les diverses formes suivantes :

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

$$R'_b = K \left[ \frac{c}{1 - \beta' + c \left( 1 + \varepsilon \frac{\Delta c}{\Delta e} \right)} \right]^2 = K \left( \frac{c}{c' + v'} \right)^2$$

en posant  $c' = c \left( 1 + \varepsilon \frac{\Delta c}{\Delta e} \right)$ , qui représente le volume absolu du *ciment hydraté* (1), et

$$v' = e + v - \varepsilon c \frac{\Delta c}{\Delta e},$$

qui représente la porosité réelle du *béton durci et desséché*.

Pour la formule de Bolomey, on obtient de même

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

Ces formules sont à double fin. Elles permettent l'analyse complète d'un béton réel, par des pesées et des mesures de volume (Les volumes peuvent aussi être mesurés au moyen de pesées, par la balance hydrostatique). D'autre part, elles permettent théoriquement de déterminer a priori la composition d'un béton de compacité et de résistance données, en fonction de  $\gamma$  ou  $\beta'$  et de  $\mu$ ,  $r$  et  $\varepsilon$ . Toutefois, ces facteurs ne peuvent pas varier d'une manière quelconque, mais seulement dans des limites plausibles et

d'une manière corrélatrice.  $\varepsilon$  notamment n'est pas une variable, mais une quantité définie pour un certain ciment à un certain âge. La variation corrélatrice de  $r$ ,  $\mu$  et  $\gamma$  ou  $\beta'$  doit assurer une valeur convenable de  $\gamma$ , dont la limite supérieure absolue est définie par

$$e > \frac{\varepsilon C}{\Delta e}$$

d'où :

$$\gamma < \frac{\Delta e}{\varepsilon \Delta c \left( 1 + \frac{v \Delta e}{\varepsilon c \Delta c} \right)}$$

et correspond à la quantité d'eau strictement nécessaire à l'hydratation du ciment.

## II. — Valeurs et variations des facteurs caractéristiques

Les poids spécifiques des constituants des bétons peuvent être déterminés dans chaque cas par les méthodes classiques. On peut admettre pour les avant-projets des valeurs moyennes usuelles.

Pour les pierrailles et les poussières de porphyre :

$$\Delta_p = \Delta_s = 2730 \text{ kg/m}^3$$

Pour les graviers, les pierrailles et les sables siliceux :

$$\Delta_p = \Delta_s = 2650 \text{ kg/m}^3$$

Pour le ciment portland et le ciment fondu :

$$\Delta_c = 3100 \text{ kg/m}^3$$

Pour les ciments de haut fourneau, perméallurgique et sursulfaté :

$$\Delta_c = 2950 \text{ kg/m}^3$$

Pour l'eau :

$$\Delta_c = 1000 \text{ kg/m}^3$$

La détermination de la proportion de vides  $vp$  est assez incertaine. Si le calibre est assez uniforme, cette proportion peut varier assez considérablement d'après le tassement. Si la granulométrie est plus étendue, la variation de  $vp$  est moindre, mais sa détermination est plus difficile. La difficulté ne se présente à vrai dire que pour les bétons de haute qualité, très compacts et à grande résistance. Pour les bétons de qualité ordinaire ou médiocre, on peut obtenir des résultats très satisfaisants en mesurant  $vp$  par pesée dans un état de tassement moyen.

Pour les avant-projets, on peut admettre les valeurs usuelles suivantes :

(1) Abstraction faite de la contraction volumétrique des composés d'hydratation.

Pour des pierrailles concassées de calibre assez uniforme :

$$vp = 0,50, \quad \frac{vp}{1 - vp} = 1;$$

Pour des graviers roulés de calibre assez uniforme :

$$vp = 0,40, \quad \frac{vp}{1 - vp} = 0,66.$$

Selon la forme plus ou moins anguleuse ou ronde des pierrailles ou graviers, les valeurs de  $vp$  peuvent être comprises entre 0,50 et 0,40 (par exemple : 0,435 pour un gravier contenant une certaine proportion d'éléments plats).

Pour le sable appelé en Belgique sable du Rhin,  $v = 0,45$ . Pour les bétons de haute qualité, par des mélanges convenables de pierrailles de divers calibres, on peut réduire  $vp$  jusqu'à des valeurs voisines de 0,30 ou moindres encore.

Le coefficient de remplissage  $\rho$  se rapporte aux vides de la pierraille avant le mélange. En raison de l'incertitude sur  $vp$ , il y a aussi quelque incertitude sur  $\rho$ .

En somme, le coefficient de remplissage  $\rho > 1$  correspond au foisonnement de la pierraille dû à l'introduction du mortier, foisonnement contrôlable dans certaines limites. Ce coefficient pourrait avoir invariablement la valeur 1 (et disparaître ainsi des formules) en donnant à  $vp$  la valeur d'ordre correspondant aux vides géométriques entre les pierrailles dans le béton, c'est-à-dire d'après les notations précédentes

$$vp = 1 - p$$

Ceci présenterait cependant des inconvénients théoriques, notamment de ne pas définir de limites à  $p$  pour les bétons de haute qualité. Il est préférable formellement de conserver le facteur  $\rho$ , car il permet de définir un domaine de variation en rapport avec la consistance des bétons.

Pour les bétons très fluides, en moyenne  $\rho = 1,80$ , sans dépasser la valeur extrême 2,00.

Pour les bétons mous de béton armé, en moyenne  $\rho = 1,50$ .

Pour les bétons plus secs, cependant susceptibles d'être mis en place par damage en masses assez grandes ou par vibration dans les éléments de béton armé,  $\rho = 1,40$  à 1,30, en moyenne 1,35.

Pour les bétons vibrés les plus secs,  $\rho$  peut descendre jusqu'à 1,20, même 1,10.

Pour les bétons injectés (Prepakt, Colcrete)  $\rho = 1,00$ .

Pour les bétons caverneux  $\rho < 1$ .

La combinaison de  $vp$  et de  $\rho$  conduit à définir le facteur :

$$r = \frac{\rho vp}{1 - vp} = \frac{1 - p}{p},$$

rapport du volume absolu de mortier au volume absolu de pierres, qui est un facteur considéré depuis longtemps dans la composition des bétons, sous cette forme ou sous la forme voisine mais moins satisfaisante du rapport du volume de sable au volume de pierres. Il varie d'une manière assez parallèle à celle de  $\rho$ , selon la consistance des bétons.

Pour les bétons les plus fluides,  $r$  peut varier de 1,80 à 1,40 selon la forme anguleuse ou ronde des pierrailles.

Pour les bétons mous,  $r$  varie de 1,50 à 1,00.

Pour les bétons secs, de 1,30 à 0,90.

Pour les bétons vibrés les plus secs, de 0,80 à 0,50.

Les formules montrent que  $r$  est un des facteurs essentiels de la composition des bétons; il a aussi une importance considérable sur la consistance et la facilité de mise en œuvre.

Le facteur  $\mu$  est assez peu variable; il est compris entre 0,60 et 0,75. Sa valeur moyenne pour la plupart des bétons est 0,667. Pour les bétons très fluides, il peut descendre jusque vers 0,60. Pour les bétons très secs vibrés, il dépasse rarement 0,70.

La valeur de  $\varepsilon$  varie avec la nature du ciment et avec l'âge. On considère en général la valeur limite pour un ciment donné, ne croissant plus avec l'âge. Elle est comprise entre 0,20 et 0,25. On peut admettre, semble-t-il, comme valeurs moyennes :

1° pour le ciment portland

$$\varepsilon = 0,225 \left( \text{d'où } \frac{\varepsilon \Delta c}{\Delta e} = 0,70 \right)$$

2° pour les ciments métallurgiques

$$\varepsilon = 0,25 \left( \text{d'où } \frac{\varepsilon \Delta c}{\Delta e} = 0,735 \right)$$

Les valeurs de  $\beta$  et de  $\beta'$  dépendent des éléments précédents, mais leur variation est relativement peu étendue.  $\beta$  est très rarement inférieur à 0,80 pour des bétons très médiocres ou très fluides. Pour de bons bétons mous, il est voisin de 0,82 — 0,83. Pour des bétons très secs de qualité exceptionnelle, il est voisin de 0,89, valeur qu'il ne peut guère dépasser. Corrélativement,  $\beta'$  est rarement inférieur à 0,87, moyennement compris entre 0,89 et 0,92 et il peut atteindre exceptionnellement des valeurs allant jusqu'à 0,96, même 0,98.

Quant au coefficient  $\gamma$ , tel qu'il est défini, il dépend essentiellement de la quantité d'eau par rapport au ciment et des vides. Il dépend donc de la consistance, ou encore de la facilité de mise en œuvre désirée, et de la qualité du travail de mise en place. L'idéal classique est  $v = 0$ , correspondant à un tassement parfait pour un béton assez sec. Mais cet idéal est difficilement accessible sous cette forme et il paraît difficile, même par la vibration la plus poussée, de réduire certainement  $v$  à moins de 0,02 à 0,01. Il est possible de réduire  $v$  à 0 par un excès d'eau, dans les bétons très fluides, mais cette solution est pire que l'existence d'une petite quantité de vides. Une disposition plus récente, recourant aux agents entraîneurs d'air, vise à produire une quantité contrôlée de vides sous forme de fines bulles sphériques d'air, avec une réduction corrélative d'eau pour une même facilité de mise en œuvre. La quantité d'air entraîné est généralement comprise entre 3 et 10 %, en moyenne 6 %. Quant à la quantité d'eau  $e$ , elle a une valeur minimum pratique que l'on peut exprimer en poids comme suit. Il faut tout d'abord, comme il a été indiqué sous I, une quantité suffisante pour l'hydratation complète du ciment, égale à  $\epsilon C$ . Cette quantité intervient activement dans la compacité finale  $\beta'$ . Ensuite il faut une quantité minimum d'eau pour le mouillage des grains, non compris le ciment, qui est suffisamment mouillé par son eau d'hydratation. Sa détermination peut être faite de diverses manières. La plus simple semble être de déterminer par pesage direct la proportion en poids d'eau de mouillage des divers composants du béton autres que le ciment. Elle conduit à un excès d'eau. Une autre méthode, qui paraît plus certaine, consiste à calculer la surface spécifique des composants autres que le ciment et à la multiplier par un facteur expérimental représentant l'épaisseur moyenne de la pellicule d'eau de mouillage des agrégats. Cette méthode est assez compliquée en raison de la nécessité de calculer la surface spécifique, dont la valeur est assez conventionnelle. En outre, elle oblige à déterminer à partir de quelle limite les grains les plus fins du sable s'agglomèrent par l'eau, en raison des actions capillaires, qui diminuent considérablement la proportion d'eau de mouillage. D'après les indications données par divers auteurs, on peut très approximativement assimiler la farine de sable au ciment. On considérera par exemple comme farine de sable les grains traversant le tamis à mailles carrées de 0,147 mm de jour, qui est le tamis le plus fin de la série Tyler employée pour la détermination du module de finesse.

La valeur de  $\epsilon$  correspond sensiblement aux 23 % d'eau du poids du ciment admis par Féret

et généralement aussi par les auteurs modernes. Pour la farine de sable qui vient d'être définie, on doit donc ajouter environ 23 % de son poids d'eau. Cette eau n'intervient pas dans la compacité finale, n'étant pas liée par l'hydratation du ciment. Il en résulte que pour les bétons à grande compacité finale  $\beta'$ , il faut éviter l'emploi de sable fin et n'employer comme farine que des grains actifs de ciment capables de fixer de l'eau d'hydratation contribuant à la compacité. Au contraire, pour des bétons très fluides contenant beaucoup d'eau, il faut une quantité suffisante de fin pour retenir cet excès d'eau sans ségrégation ou séparation.

Tout supplément d'eau ajouté au minimum sert à augmenter la mobilité des grains, c'est-à-dire à augmenter la maniabilité du béton, éventuellement à faciliter son transport (pompage, transport par l'air comprimé, coulage par gravité). Ce supplément contribue, avec l'eau de mouillage des grains non actifs, à réduire la compacité. Il est d'ailleurs limité par la tendance à la séparation de l'eau pendant le transport ou lors du tassement du béton dans les coffrages, qui se manifeste dès que le supplément devient excessif, la capacité de rétention du béton étant dépassée. Bien entendu, la quantité d'eau considérée ci-dessus est la quantité d'eau totale, dont une partie est éventuellement apportée par les agrégats mouillés. L'établissement et l'emploi des formules supposent tous les facteurs ramenés aux agrégats secs. On peut écrire  $E > \epsilon (C + S') + \epsilon' \delta \Delta e$ ,  $\delta$  représentant la surface spécifique de tous les agrégats autres que le sable fin,  $\epsilon'$  l'épaisseur moyenne de la pellicule de mouillage et  $S'$  le poids de sable fin.

D'où :

$$e > \frac{\epsilon (C + S')}{\Delta e} + \epsilon' \delta$$

ou :

$$e > \epsilon \left( c \frac{\Delta c}{\Delta e} + s' \frac{\Delta s}{\Delta e} \right) + \epsilon' \delta$$

$$\gamma < \frac{c}{\epsilon \left( c \frac{\Delta c}{\Delta e} + s' \frac{\Delta s}{\Delta e} \right) + \epsilon' \delta}$$

On adoptera par exemple une valeur de  $\epsilon'$  de l'ordre de 0,020 à 0,025 mm.

D'après le pourcentage en poids d'eau admis pour le ciment,  $\epsilon'$  semble être de l'ordre de 0,005 à 0,006 mm. Le même pourcentage admis pour la farine de sable donne une valeur de  $\epsilon'$  de l'ordre du double. Ensuite  $\epsilon'$  augmente avec les dimensions des grains pour atteindre à partir des gros sables (> 2,36 mm) des valeurs

de l'ordre de 0,050 à 0,070 mm. Cela provient de ce que les tensions capillaires sont beaucoup plus faibles pour les gros grains que pour les grains fins. Lorsque l'on introduit dans le béton l'eau nécessaire au mouillage de toutes les catégories de grains considérées isolément, il y a un excès d'eau de mouillage parce que les grains de ciment et de farine répandus dans tout le mélange développent partout des tensions capillaires et réduisent les valeurs de  $\epsilon'$  des gros grains.

Pour cette raison, il ne faut adopter qu'une fraction de l'eau de mouillage des gros grains, par exemple 1/2,5 pour les graviers et pierrailles et 1/1,25 pour le sable s'il ne contient pas beaucoup d'éléments fins ( $< 0,147$  mm).

On pourrait donc écrire :

$$E < \epsilon C + 0,8 k S + 0,4 k'P$$

ou :

$$e > \frac{\epsilon C + 0,8 k S + 0,4 k'P}{\Delta_e} = \epsilon c \frac{\Delta_c}{\Delta_e} + 0,8 k s \frac{\Delta_s}{\Delta_e} + 0,4 k'p \frac{\Delta_p}{\Delta_e}$$

d'où :

$$\gamma < \frac{c}{\epsilon c \frac{\Delta_c}{\Delta_e} + 0,8 k s \frac{\Delta_s}{\Delta_e} + 0,4 k'p \frac{\Delta_p}{\Delta_e}}$$

$k'$  est généralement petit, de l'ordre de 0,015 pour du gravier de rivière 5/20 et de l'ordre de 0,005 pour du concassé de porphyre 20/40. Le facteur  $k$  est plus grand, d'autant plus qu'il y a plus de fin dans le sable. Il est par exemple de l'ordre de 0,1 pour un sable de rivière dont le module de finesse est 3 et qui ne contient pas de farine ( $< 0,147$  mm). La valeur de  $\epsilon'$  correspondante est de l'ordre de 0,028 mm.

Toutes les valeurs numériques citées dans ce paragraphe ne sont que des valeurs moyennes, indiquées à titre d'exemple. Elles peuvent souvent convenir pour des déterminations rapides ou peu importantes. Pour tout cas concret d'importance suffisante, il faut procéder à la détermination des valeurs réelles, qui ne peut donner lieu à aucune difficulté. Il suffit de disposer d'une bonne balance et de capacités tarées (par pesées).

### III. — Facteurs granulométriques de la composition des bétons (4)

Depuis quelques décades, il est devenu fréquent d'exprimer la composition des bétons (sauf l'eau) par la granulométrie du mélange des matériaux secs. Cette granulométrie est caractérisée par la courbe granulométrique du mélange

ou par des facteurs conventionnels qui en sont déduits : module de finesse ou surface spécifique. La composition du béton résulte de certaines règles, telles que celle du module de finesse idéal d'Abrams ou d'une courbe granulométrique idéale (Fuller, Bolomey, Faury, etc.).

L'analyse et la synthèse granulométriques constituent une forme indirecte, compliquée et incertaine, de l'étude précédente. Elles ne dispensent pas de pesées, mais utilisent en outre les instruments de mesure très imprécis que sont les tamis. Ils sont imprécis notamment parce que la composition granulométrique des agrégats n'est pas uniforme, non plus que la forme des grains. Il en résulte que toute analyse granulométrique réelle est aléatoire, susceptible de dispersion, et que toute composition granulométrique projetée constitue une moyenne statistique. De ce fait, les courbes idéales ou les modules idéaux sont sans signification réelle. M. Imberechts (5) a judicieusement établi en 1930 que la seule notion significative est celle de courbes granulométriques limites situées de part et d'autre des courbes idéales. Nous avons fréquemment décomposé des agrégats par tamisage sur tous les tamis de la série Tyler afin de réaliser avec les fractions une granulométrie répondant strictement à une courbe idéale. Sans exception, des mélanges différents de la courbe idéale ont toujours donné des bétons supérieurs (3).

Notre intention n'est pas de méconnaître la granulométrie, mais de la remettre à sa place dans l'étude de la composition des bétons. Cette place n'est pas essentielle mais accessoire. Le tracé des courbes granulométriques est souvent superflu et, sous réserve de certaines remarques ultérieures, l'introduction de l'analyse granulométrique et de ses facteurs caractéristiques n'a produit aucun progrès réel dans la composition des bétons.

La composition ou l'analyse granulométrique et ses facteurs caractéristiques dérivent d'une manière directe et univoque de la théorie volumétrique et pondérale qui précède. Ce sont des fonctions linéaires des éléments correspondants des constituants granulaires du béton. En conséquence, connaissant la granulométrie des constituants, celle du béton est entièrement déterminée par sa composition volumétrique ou pondérale, qui en est la meilleure expression. La granulométrie du béton se conçoit donc à titre de contrôle, souvent superflu.

La détermination de la quantité d'eau de mouillage à partir de la granulométrie, proposée par certaines formules plus ou moins empiriques, dérive également des mêmes principes mais aussi d'une manière indirecte.

La composition volumétrique ou pondérale constitue en tous cas une doctrine nettement

supérieure à une conception de caractère granulométrique de la composition des bétons, parce qu'elle exprime en fait la même chose, sous une forme directe, précise et susceptible d'opérations et de calculs simples<sup>(2)</sup>; elle n'écarte pas l'analyse granulométrique, car elle l'englobe.

La composition volumétrique et pondérale, telle qu'elle est présentée ci-dessus, implique en réalité ce qu'on appelle la *granulométrie discontinue*. Elle correspond à l'usage de ce pays et de beaucoup d'autres de définir pratiquement la composition des bétons par l'indication des proportions de gravier, de sable et de ciment. Dans certains pays, ces trois proportions sont encore exprimées en volumes apparents. En Belgique, on conserve les proportions en volumes apparents pour le gravier et le sable et celle du ciment s'exprime en poids. (Voir Norme N. B. N. 15 de l'Institut belge de Normalisation — Instructions relatives aux ouvrages en béton armé — 4<sup>e</sup> Edition 1944 — Article 27).

On sait que ces dispositions sont très imparfaites. Les proportions en volume apparent de gravier et surtout de sable, aussi celles de ciment, sont susceptibles de grands écarts sur les quantités réelles, notamment en raison du degré de tassement et du degré d'humidité des agrégats. La norme belge précitée reconnaît explicitement, dans son article 52, l'incorrection des dispositions de l'article 27. L'expression du dosage en poids est seule correcte et constitue un progrès réel là où elle est appliquée. Elle découle directement de la théorie ci-dessus exposée.

La granulométrie discontinue, résultat d'un dosage défini en proportions de gravier, de sable et de ciment, correspond généralement à l'emploi d'agrégats classés, de catégories de dimensions nettement différentes. Par exemple, pour des bétons ordinaires, le ciment aura des grains de moins de 0,100 mm en général; le sable ira d'au moins 0,200 mm à 2 mm et le gravier d'au moins 5 mm à 20 ou 25 mm.

Dans ces conditions, un dosage bien établi suivant les règles volumétriques et pondérales précédentes est toujours dans le domaine des courbes granulométriques limites de M. Imberchts. Ce n'est que pour des dosages exceptionnels, soit de bétons très fluides (excès de fin), soit de bétons très secs (peu de fin), que la considération de la granulométrie des constituants, dont on déduira celle du mélange, sera éventuellement utile à titre de contrôle. Il y aura d'ailleurs toujours utilité à une considération de principe des règles de la bonne granulométrie des agrégats, en ce sens qu'il est recommandable, dans les limites des possibilités économiques,

que la granulométrie des constituants, surtout des pierrailles, soit aussi serrée que possible (dimensions extrêmes peu écartées), et que les écarts de dimensions des diverses catégories successives soient aussi grands que possible. Eu égard aux dimensions des grains de ciment, dont l'ordre de grandeur est peu modifiable, il est donc utile que le sable ne contienne guère de fin (en dessous de 0,250 à 0,500 mm par exemple). Pour les bétons très fluides, qui doivent contenir beaucoup de farine, ou pour les bétons peu riches en ciment, une addition plus ou moins importante de sable très fin peut être utile (par exemple < 0,150 à 0,200 mm). On peut admettre que, moyennant observation de ces règles simples et sauf incompétence ou négligence avérée, des erreurs granulométriques ne sont guère à craindre dans un dosage établi par voie de composition pondérale et volumétrique.

Dans certains pays et pour certains usages, on emploie des matériaux dont la composition naturelle contient tous les agrégats du béton en proportions plus ou moins convenables (moraines, produits de dragages lacustres ou fluviaux, gravières, etc.). L'idée est naturelle d'employer ces matériaux tels qu'ils se trouvent pour la composition des bétons. Le classement de leurs grains réalise généralement une *granulométrie continue*. La proportion des grains de diverses dimensions exige dans ce cas un contrôle indispensable, car cette proportion peut être inadéquate, ce qui exige des corrections par additions de catégories de grains manquants ou par criblage d'élimination de catégories de grains en excès. On peut se représenter que là réside l'origine de la notion de granulométrie continue et l'occasion du développement de l'analyse granulométrique ou plutôt de ses facteurs caractéristiques et de ses valeurs idéales. Encore que les mêmes critiques fondamentales soient à exprimer au sujet du caractère aléatoire des facteurs granulométriques et de l'absence de signification absolue des valeurs idéales, il n'en est pas moins apparent que l'analyse granulométrique prend dans ce cas une importance justifiée. L'appréciation de la convenance de tels matériaux pour la confection de béton ne se peut faire que par des criblages plus ou moins détaillés.

Le criblage minimum, nécessaire à l'application de la méthode de composition exposée plus haut, consiste à séparer le sable, formé par exemple des grains inférieurs à 5 mm, du gravier, formé des grains plus gros. Ce criblage peut déjà mettre en évidence une mauvaise composition granulométrique par le fait que les proportions *s* et *p* ne sont pas dans un rapport convenable. L'agrégat ne pourra dans ce cas convenir tel qu'il se présente naturellement et

(2) Elle a notamment l'avantage de donner les proportions pour 1 m<sup>3</sup> de béton, alors qu'il arrive fréquemment que des dosages établis d'une autre manière correspondent à un volume de béton mis en œuvre différent d'un m<sup>3</sup>.

devra être corrigé, ce qui entraîne des dépenses ou d'autres inconvénients.

Il est utile, même nécessaire, de pousser l'analyse granulométrique plus loin, aussi bien pour le sable que pour le gravier. Car il ne s'agit pas ici de matériaux classés, contrôlés. Les règles de l'écart suffisant des dimensions des catégories de grains et de leurs proportions décroissantes avec la dimension ne sont pas naturellement observées. Ces agrégats présentent des grains dont la variation des dimensions est plus ou moins continue et dont les proportions des grains de diverses grosseurs sont quelconques. C'est ainsi que, même si les proportions  $s$  et  $p$  se trouvent dans un rapport convenable, les proportions des constituants du sable et du gravier peuvent être défavorables. Par exemple, le gravier contient un excès de fin et peu de gros; au contraire, le sable contient un excès de gros et trop peu de fin, les dimensions du gros sable différant peu de celles du fin du gravier. On comprend que, dans un tel matériau, ces défauts ou d'autres analogues, se reconnaissent par une courbe granulométrique de forme défavorable. Le tracé de cette courbe est indispensable dans ce cas et sa convenance s'apprécie par rapport à une courbe idéale, de préférence complétée par des courbes limites.

Pour un tel agrégat, il peut se justifier de déterminer la composition du béton sur la base de l'analyse granulométrique, puisque celle-ci est préalablement nécessaire. En fait, les principes des méthodes granulométriques de composition des bétons ne diffèrent pas de ceux exposés plus haut, mais le plus souvent, ils n'y apparaissent pas explicitement et les méthodes présentent un caractère apparemment tout à fait empirique. Cela est vrai surtout de celles qui ne se basent pas explicitement sur une courbe granulométrique, mais sur des facteurs qui en sont déduits (module de finesse ou surface spécifique). La meilleure considération est celle d'une courbe idéale accompagnée de courbes limites ou s'y ramenant.

Un auteur espagnol, M. Goded (6), a établi récemment, par une voie semi-rationnelle, une équation générale de courbe granulométrique idéale de composition du béton, qui englobe certaines méthodes plus anciennes (Fuller-Bolomey). L'application de sa méthode aux granulométries discontinues est laborieuse et moins satisfaisante. Elle a trait d'ailleurs à une catégorie limitée de bétons, de caractère plutôt mou ou plastique, excluant les très fluides, les très secs et les caverneux.

L'analyse granulométrique étant faite ainsi que la correction éventuelle de l'agrégat naturel continu, la méthode de la composition volumétrique et pondérale est applicable aussi aux granulométries continues. Il suffit de séparer

l'agrégat en deux fractions  $p$  (plus gros que 5 mm par exemple) et  $s$  (plus fin que 5 mm), en proportions telles qu'elles se présentent dans l'agrégat naturel ou corrigé. Si le gravier est bien composé,  $vp$  peut être inférieur à 0,40 et atteindre jusqu'à 0,35, même 0,33. Le coefficient de remplissage  $\rho$  doit généralement être un peu plus grand que pour une granulométrie discontinue.

On peut aussi, mais c'est moins recommandable, se référer à l'agrégat total  $p + s = m$ . Alors  $m + c + e + v = 1$ , d'où :

$$m = \frac{1}{1+r'}, \quad c = \frac{\gamma r'}{(1+r')(1+\gamma)},$$

$$e + v = \frac{r'}{(1+r')(1+\gamma)}$$

en désignant par  $r'$  le rapport  $\frac{\rho' vm}{1 - vm}$  de la pâte de ciment ( $\gamma$  compris les vides) à l'agrégat total,  $vm$  la proportion de vides en volumes apparents de l'agrégat total et  $\rho'$  le coefficient de remplissage de ces vides.

Le coefficient  $\rho'$  est plus grand que 1 pour les bétons pleins mais très inférieur à  $\rho$ ; il ne dépasse pas 1,20 et sa valeur moyenne est voisine de 1,10. On se rend compte d'après ces formules que, pour avoir un béton de bonne composition, il faut que  $r'$  soit assez petit, inférieur à 0,5. Ceci exige que  $v/m$  soit, en moyenne, inférieur à 0,31, voire 0,29, et requiert, de toute évidence, une bonne granulométrie de l'agrégat continu. La méthode de composition volumétrique et pondérale corrobore ainsi la nécessité de l'analyse granulométrique et d'une granulométrie très convenable pour les bétons d'agrégats continus.

Cela correspond au fait connu que les bétons d'agrégat complets naturels employés sans précautions donnent des résultats souvent défavorables et qu'ils demandent une attention beaucoup plus grande que les bétons confectionnés au moyen d'éléments classés. Des travaux particuliers importants ont, à juste titre, conduit à des études granulométriques approfondies de tels agrégats dans divers pays. C'est par manque de discernement ou par engouement que les résultats de ces études ont été considérés comme généraux et universels et appliqués aux granulométries discontinues. C'est même par une véritable aberration que la granulométrie continue a été opposée à la granulométrie discontinue pour la discréditer. Cette dispute sans fondement a été opportunément close par M. J. Bolomey en 1948 (7). Il conclut comme suit : « Le choix entre granulation continue et discontinue dépendra des conditions locales. Les ballasts naturels sont habituellement constitués par des grains de toutes les grosseurs ;

dans ce cas la granulation continue correspond à la solution économique. Si par contre on exploite séparément le sable et le gravier, il pourra y avoir avantage à adopter une granulation discontinue. Dans ce domaine, comme dans d'autres, il faut se garder du schéma et des idées préconçues, mais baser sa décision sur les matériaux à sa disposition, en évitant un excès de grains moyens ».

On ne peut que souscrire à cette conclusion, même si l'on y perçoit un reste d'ultime préférence pour la granulation continue. Dans son travail, M. J. Bolomey propose d'ailleurs l'étude de la composition des bétons à granulation discontinue par sa formule applicable aux bétons à granulation continue. Comme il ne peut s'agir dès lors de réaliser une courbe définie par la formule, il propose l'égalité des modules de finesse, solution préconisée déjà par MM. R. Dantinne et R. Jacquemin en 1935 (8).

Ceci amène à faire une remarque au sujet de la comparaison faite dans ce travail de M. Bolomey de deux bétons continus et de deux bétons discontinus, comparaison d'ailleurs favorable aux bétons continus, mais avec d'assez faibles différences, ne dépassant pas 10 % pour la résistance à la compression. Seulement, les deux bétons à granulation discontinue n'ont pas même module de finesse que les bétons à granulation continue de comparaison; ils ont un module de finesse plus élevé, donc plus de fin. Cependant, ils ont la même consistance que les bétons continus, avec moins d'eau. S'ils avaient eu le même module de finesse, il aurait fallu moins d'eau encore pour la même consistance et la supériorité de la granulation discontinue aurait été plus accusée.

Concluons donc que, là où la granulation discontinue est d'usage courant, ce serait une erreur de l'abandonner au profit de la granulation continue, qui demande plus de précautions et dont les résultats sont en principe inférieurs (3). Là où les conditions locales favorisent l'emploi des granulations continues, il y a lieu d'y recourir avec les précautions nécessaires et dans la mesure compatible avec l'économie. Dans tous les cas et avec plus de facilité pour la granulation discontinue, la composition volumétrique et pondérale est d'application.

#### IV. — Considération des conditions de transport et de mise en œuvre

Les bétons étant composés en vue d'un usage déterminé, les conditions de transport et de mise en œuvre doivent être prises dûment en

(3) L'utilisation de matériaux classés en vue d'une granulation continue est non seulement peu intéressante, mais conduit à la multiplication des catégories. L'emploi de tout-venant de concassage, non classé, pour une granulation continue, est évidemment très aléatoire.

considération dans l'étude de la composition. Ces conditions concernent l'adaptation de la composition aux dispositions prévues pour le transport et pour la mise en œuvre, qui sont très variées. La facilité de transport et de mise en œuvre n'a donc rien d'absolu; elle est relative à des moyens bien définis. Il n'y a d'ailleurs pas à envisager que la facilité comprise dans le sens de faible résistance opposée ou de faible puissance requise. Il faut encore prendre en considération le comportement du béton pendant ces opérations, c'est-à-dire la conservation de son homogénéité et de sa continuité uniforme, par opposition à sa séparation, sa ségrégation ou au départ d'eau ou de laitance. Seulement ceci aussi n'est pas absolu si l'on considère toute la gamme des bétons, depuis les cavernaux jusqu'aux fluides.

Toutes ces caractéristiques sont exprimées, de la manière qui a été définie sous II, dans les facteurs  $\rho$  ou  $r$ ,  $\mu$  et  $\gamma$ . Seulement ces facteurs aussi ne sont pas absolus mais sont influencés d'une manière complexe par la répartition et la forme des grains (notamment la valeur de  $vp$ ), par l'état de surface des grains, la nature et la granulométrie du ciment, l'addition éventuelle de produits spéciaux, de plastifiants, d'agents entraîneurs d'air, etc... et même par le mode de transport et de mise en œuvre.

La question de la consistance des bétons frais et de leur facilité de mise en œuvre (workability) a été mise en évidence il y a quelques décades, concurremment avec l'analyse granulométrique et la granulation continue. Des méthodes de contrôle ont été préconisées (par exemple l'essai de tassement ou « slump-test » au cône d'Abrams, l'essai d'étalement ou « flow-test » à la table à secousses). Ces méthodes sont d'application dans un domaine limité de consistance. La vibration du béton frais conduit à des compositions qui sont en dehors de ce domaine. Si l'on considère toute la gamme des bétons, depuis les plus fluides aux cavernaux, aucune méthode de contrôle de consistance et de facilité de mise en œuvre n'est universelle. Il existe actuellement une grande quantité de méthodes très diverses quant à leur principe et leur opportunité.

Dans certaines conditions, certaines de ces méthodes sont applicables sur les chantiers en vue du contrôle. Cependant, ce n'est pas en vue de ces méthodes, mais en vue de l'usage réel du béton que la composition doit être étudiée, le rapport entre les méthodes de contrôle et le comportement réel du béton selon sa destination n'étant nullement caractéristique. Cela revient à dire que les notions de consistance et de facilité de mise en œuvre, pas plus que celle de granulométrie, ne doivent être trop rigide-ment définies. En fin de compte, c'est le comportement

à l'usage du béton qui est essentiel et qui constitue le vrai guide. Un travail important requiert des études préalables de mise au point de la composition complète, y compris l'eau, qui doit se rapporter aux qualités d'usage attendues du béton. Pour des travaux de faible importance, on peut se rapporter avec confiance aux formules utilisées avec des valeurs moyennes des coefficients. Le contrôle de la composition des bétons sur les chantiers se fera de préférence en se rapportant à l'analyse volumétrique et pondérale. Avec quelques appareils élémentaires : récipients, cribles, réchaud, balance, la composition peut être contrôlée par analyse directe et simultanément l'hétérogénéité de composition du béton frais. L'observation du comportement du béton pendant le transport et pendant la mise en œuvre constitue une méthode supérieure à tout essai conventionnel. Les études sur la consistance ne perdent pas pour cela leur raison d'être, mais reprennent un caractère de recherches fondamentales de laboratoire.

### V. — Conclusions

La méthode de composition volumétrique et pondérale est d'application universelle et simple ; elle met en évidence tous les facteurs et permet, par les valeurs appropriées de ses coefficients, dont la détermination est facile ou dont la connaissance est suffisante, la résolution adéquate de tous les cas.

Elle met bien en évidence les influences réciproques de la compacité et de la résistance ; elle montre notamment qu'une haute résistance et une haute compacité finale  $\beta'$  exigent une richesse assez grande de ciment. Il n'en est pas de même de la compacité  $\beta$  à l'état frais, qui n'a pas une signification aussi caractéristique. Elle peut être relativement élevée avec peu de ciment, sans que la résistance correspondante soit très élevée.

La compacité et la résistance peuvent cependant atteindre des valeurs très élevées avec des dosages très modérés en ciment par la perfection de la granulométrie des agrégats grâce à deux moyens :

1° La multiplication des catégories combinées de grains de dimensions assez écartées. La dimension des grains de ciment étant invariable, cela conduit à recourir à de très gros grains allant jusqu'à 200 mm et au-delà (2).

2° Le serrage très considérable des grains, grâce à des moyens mécaniques puissants, surtout la vibration combinée éventuellement avec des pressions, un damage, etc... (3). La mise en œuvre des très grosses granulométries est naturellement facilitée par la vibration, mais ne la requiert pas absolument.

Ces résultats, correspondant à des bétons de qualités exceptionnelles, sortent nettement des limites assignées par les considérations usuelles d'analyse granulométrique et de consistance considérées sous III et IV. Elles se placent par contre d'une manière tout à fait normale dans la doctrine de la composition volumétrique et pondérale.

En ce qui concerne la dimension maximum des grains, il est évident que celle-ci doit être en rapport avec l'importance des éléments à bétonner. Les plus gros grains auront une dimension nominale maximum inférieure si c'est possible au huitième de la plus petite dimension de la pièce à bétonner, en tous cas pas supérieure au quart, cela afin de rendre négligeable l'effet de paroi. Pour des pièces en béton armé, il faudra tenir compte non seulement du diamètre des barres, mais surtout des écarts entre elles et par rapport aux parois de coffrage, de manière à éviter le criblage du béton par l'armature. La dimension nominale des grains ne dépassera pas 0,8 par exemple de ces écarts et, dans la mesure du possible, ne dépassera pas le diamètre des barres principales, en tous cas pas 1,5 fois ce diamètre.

### ANNEXE I

#### Surface spécifique de l'agrégat et quantité d'eau de mouillage

Nous nous référons aux tamis à mailles carrées de la demi-série Tyler usuelle pour l'analyse granulométrique des bétons. Ainsi qu'il a été indiqué dans la note, nous assimilons à la farine active (ciment) les grains de sable qui traversent le tamis le plus fin (mailles carrées de 0,147 mm de jour).

La norme N. B. N. 15 — Instructions relatives aux ouvrages en béton armé, 4<sup>e</sup> édition, février 1944 — indique dans son annexe 9 une méthode conventionnelle de calcul de la surface spécifique du sable. Nous nous en écarterons en ce sens que nous n'appliquons pas le calcul aux grains ayant traversé le tamis de 0,147 mm de jour, mais que nous l'étendrons aux grains du gravier, dont les plus gros sont retenus par le tamis de 76,2 mm de jour et sont également écartés.

Appelons  $d_1, d_2, \dots, d_i, d_{i+1}, \dots, d_n$  les jours des mailles carrées des divers tamis successifs ( $d_1 = 0,147$  mm,  $d_n = 76,2$  mm) ;  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_n$  les proportions en poids des grains compris entre les tamis correspondants ou refus partiels. Pour les grains ne traversant pas le tamis de 0,147 mm et traversant celui de 76,2 mm, on a :

$$\delta = 9,60 \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{\alpha_i}{\Delta_i (d_i + d_{i+1})}$$

On peut reprocher à cette formule d'assimiler tous les grains d'indice  $i$  à des sphères de diamètre  $1,25 \frac{(d_i + d_{i+1})}{2}$ , alors que le coefficient de majoration 1,25 ne peut de toute évidence concerner que des grains non sphériques. M. Goded (6) introduit un coefficient de forme  $\delta$  égal à 9 pour des grains tétraédriques réguliers, à  $3\sqrt{3}$  pour des grains octaédriques réguliers et à 3 pour des sphères. Il propose pour les grains roulés la valeur 3 et 3,7 à 4,2 pour les concassés. En prenant comme diamètre moyen

$$\frac{d_i + d_{i+1}}{2},$$

on a :

$$\delta = 4 \delta \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{\alpha_i}{\Delta_i (d_i + d_{i+1})}$$

$\Delta_i$  est le poids spécifique des grains d'indice  $i$  et, selon leur calibre, correspond à  $\Delta_s$  (sable) ou  $\Delta_p$  (pierrailles). En opérant sur l'unité de poids de l'agrégat total

$$\sum_{i=1}^{i=n-1} \alpha_i = 1 - \alpha_o - \alpha_n$$

$\alpha_o$  étant la proportion en poids des grains traversant le tamis de 0,147 mm,  $\alpha_n$  la proportion des grains retenus sur le tamis de 76,2 mm. Comme les jours des tamis à mailles carrées de la demi série Tyler croissent en proportion géométrique de raison 2, on a :

$$d_1 = \frac{d_2}{2} = \frac{d_3}{2^2} = \dots = \frac{d_i}{2^{i-1}} = \frac{d_{i+1}}{2^i} = \dots = \frac{d_n}{2^{n-1}}$$

d'où :

$$d_i + d_{i+1} = 3 \times 2^{i-1} d_1 \quad (3)$$

et

$$\delta = \frac{4}{3} \frac{\delta}{d_1} \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{\alpha_i}{2^{i-1} \Delta_i}$$

Pour  $d_1 = 0,147$  mm ou 0,000147 m, on a :

$$\delta = \frac{4}{3} \delta \times 6800 \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{\alpha_i}{2^{i-1} \Delta_i} \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$\delta = 9066 \delta \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{\alpha_i}{2^{i-1} \Delta_i} \text{ m}^2/\text{kg}.$$

Pour les fractions :

$i =$	1	2	3	4	5
$d_i =$	0,147	0,295	0,589	1,17	2,36
$2^{i-1} =$	1	2	4	8	16
$i =$	6	7	8	9	10
$d_i =$	4,70	9,42	18,85	38,10	76,2
$2^{i-1} =$	32	64	128	256	

Donc, à poids égal, les grains de dimensions supérieures à 76,2 mm ont une surface inférieure à 0,003 de celle des grains de diamètre compris entre 0,147 mm et 0,295 mm et peuvent être négligés dans la détermination de la surface.

Quant aux grains de moins de 0,147 mm de dimension (ciment et farine), il vaut mieux déterminer leur surface spécifique conventionnelle par des méthodes physiques que par le calcul.

Pour ce qui concerne la quantité d'eau, on écrira donc :

$$E = \varepsilon (C + S') + \delta \varepsilon' \Delta_e + E'$$

$S'$  étant le poids par m<sup>3</sup> de béton de sable traversant le tamis de 0,147 mm,  $\varepsilon'$  l'épaisseur de la pellicule de mouillage des agrégats ne traversant pas le tamis de 0,147 mm et  $E'$  le supplément expérimental d'eau pour assurer la consistance et la facilité de mise en œuvre désirée.

Nous avons indiqué plus haut qu'il est fallacieux de se référer à la détermination directe de l'eau de mouillage du sable et des graviers. On peut faire cette opération pour les diverses fractions granulométriques. On a trouvé les pourcentages en poids ci-après, sujets d'ailleurs à des erreurs considérables.

On en déduit que  $\varepsilon'$  a approximativement les valeurs suivantes :

pour du sable dépourvu de farine (< 0,147 mm) de 0,025 à 0,040 mm.

pour des grains supérieurs à 5 mm, de 0,050 à 0,090 mm.

On peut toujours se référer avec utilité aux rapports du poids d'eau au poids du mélange sec définis par le Professeur M. Roš dans son

(3) Certains auteurs proposent comme diamètre moyen  $\sqrt{d_i d_{i+1}}$ . Il en résulte comme valeur du diamètre moyen  $0,707.2^i d_1$ , au lieu de  $0,75.2^i d_1$ . La différence est sans signification pour un calcul aussi conventionnel et peut être compensée par la valeur expérimentale de  $\delta$ .

Fraction	Sable et gravier roulés ( $\delta = 3$ ) $\Delta = 2650 \text{ kg/m}^3$			Pierrailles de porphyre ( $\delta = 4,2$ ) $\Delta = 2730 \text{ kg/m}^3$			Pierrailles de grès ( $\delta = 3,7$ ) $\Delta = 2650 \text{ kg/m}^3$		
	$\delta \text{ (m}^2/\text{kg)}$	$k$	$\epsilon' \text{ (mm)}$	$\delta \text{ (m}^2/\text{kg)}$	$k$	$\epsilon' \text{ (mm)}$	$\delta \text{ (m}^2/\text{kg)}$	$k$	$\epsilon' \text{ (mm)}$
1	10,26	0,20	0,0195	13,95			12,65		
2	5,13	0,14	0,0273	6,97			6,33		
3	2,57	0,10	0,0389	3,49			3,17		
4	1,28	0,07	0,0546	1,74			1,58		
5	0,64	0,05	0,078	0,87			0,79		
6	0,32	0,0225	0,0705	0,435	0,03	0,069	0,395	0,0225	0,057
7	0,16	0,013	0,0815	0,217	0,01	0,0461	0,1975	0,01	0,0505
8	0,08	0,0055	0,069	0,109	0,0055	0,0505	0,005	0,005	0,0505
9	0,04			0,0545	0,0038	0,070	0,0494	0,00375	0,077

rapport n° 7 du Laboratoire fédéral d'essais des matériaux de Zurich (9), à savoir :

Consistance terre humide	0,05 à 0,06
Consistance terre plastique	0,07 à 0,08
Consistance terre fluide	0,08 à 0,10

## ANNEXE II

### Considérations sur la similitude en matière de granulométrie

Deux fractions de grains assez uniformes géométriquement et statistiquement semblables ont même compacité. Leurs surfaces spécifiques sont en raison inverse du diamètre moyen. Si nous considérons des écarts suffisants entre les diamètres moyens de deux fractions ou catégories successives, de manière à pouvoir négliger les effets de parois, on peut établir des formules de granulométrie et de compacité, en supposant que les petits grains n'écartent pas les gros.

Envisageons 4 fractions dont l'inférieure 1 correspond au sable de la catégorie immédiatement supérieure à la farine active (ciment) dont nous admettons le diamètre moyen égal à 0,050 mm. Nous posons  $d_1 \gg n \times 0,050 \text{ mm}$ .  $n$  étant la raison de la progression géométrique du diamètre moyen des catégories.

$$\text{Donc } d_4 = n^3 d_1, d_3 = n^2 d_1, d_2 = n d_1$$

Soit  $\kappa$  la compacité de chaque fraction.

$d_4$  occupe un plein  $\kappa$  et laisse un vide  $(1 - \kappa)$ .

$d_3$  occupe un plein  $(1 - \kappa)$  et laisse un vide  $(1 - \kappa)^2$ .

$d_2$  occupe un plein  $(1 - \kappa)^2$  et laisse un vide  $(1 - \kappa)^3$ .

$d_1$  occupe un plein  $(1 - \kappa)^3$  et laisse un vide  $(1 - \kappa)^4$ .

Si  $\kappa = 0,5$  par exemple, la compacité finale est  $1 - (1 - \kappa)^4 = 0,9375$ . La porosité est 0,0625.

Une telle granulométrie discontinue permettra, par l'addition d'eau et de ciment, en réduisant au minimum les vides lors de la mise en œuvre, de réaliser des bétons très compacts avec assez peu de ciment (de l'ordre de 200 kg par m<sup>3</sup>) (2). Si les grains s'écartent mutuellement, cela revient à réduire  $\kappa$ , par exemple à 0,40. D'où la porosité finale  $(1 - \kappa)^4 = 0,60^4 = \sim 0,13$ , encore très favorable et qui, comprenant le sable, permet un coefficient de remplissage  $\rho'$  de la pâte de ciment assez faible, inférieur par exemple, à 1,10.

Par exemple, un agrégat composé en poids de :

50 %	160-200 mm	( $d_{\text{moy}} = 180 \text{ mm}$ ).
25 %	15-30 mm	( $d_{\text{moy}} = 23 \text{ mm}$ ).
12,5 %	3-4 mm	( $d_{\text{moy}} = 3 \text{ mm}$ ).
6,25 %	0,3-0,5 mm	( $d_{\text{moy}} = 0,387 \text{ mm}$ ).

Pour un agrégat ternaire, à 12,5 % de porosité finale, on aurait 50 % de 15-30 mm, 25 % de 2-4 mm et 12,5 % de 0,3-0,5 mm. Le poids spécifique est supposé uniforme.

On remarque d'après cela l'intérêt qu'il y aurait pour la confection des bétons discontinus, à classer les matériaux de la manière la plus serrée possible, compatible avec les possibilités économiques. En réalité, il n'est pas nécessaire que  $n$  soit constant, il suffit qu'il soit assez grand, par exemple supérieur à 5.

Les chiffres précédents sont naturellement trop simplistes, mais les ordres de grandeur sont corrects et confirmés par l'expérience qui doit naturellement entrer en ligne de compte dans l'étude de telles compositions. Il s'agit ici d'établir un principe plutôt qualitatif que quantitatif.

## INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

1. F. Campus. — La composition des bétons de route 2<sup>e</sup> Congrès belge de la route. Anvers 1933.
  2. F. Campus. — Bétons compacts pour ouvrages massifs hydrauliques. *Bulletin C. E. R. E. S.* Tome II, Liège 1947.
  3. F. Campus. — Réalisation de bétons compacts par vibration. 3<sup>e</sup> Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentiers, Liège 1948, Publication finale 1950.
  4. F. Campus. — Hommage à M. Féret et considérations sur la granulométrie. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils de France*, fasc. 1-4, janvier-avril 1946.
  5. H. Imberechts. — La composition granulométrique idéale des bétons. Premier Congrès International du béton et du béton armé, Liège 1930. Volume II. Edit. *La Technique des Travaux*, Liège et Paris.
  6. F. Goded. — Un aspect du problème de la granulation des bétons. *Bulletin technique de la Suisse romande*, 10 septembre 1949.
  7. J. Boloméy. — Granulation continue ou discontinue des bétons. *Bulletin technique de la Suisse romande*, n<sup>o</sup> 11, 22 mai 1948.
  8. R. Dantine et R. Jacquemin. — Le dosage des bétons. *Revue Universelle des Mines*, novembre 1935.
  9. M. Roš. — Die Festigkeit des Mörtels und des Betons. *Diskussionsbericht n<sup>o</sup> 7*. Eidgenössische Material-Prüfungsanstalt Zürich, Décembre 1925.
-