

BÉTONS COMPACTS POUR OUVRAGES MASSIFS HYDRAULIQUES ⁽¹⁾

par

F. CAMPUS ⁽²⁾

I. - Théorie de la composition des bétons

Les études expérimentales et théoriques modernes au sujet des bétons ont comme point de départ les travaux de R. FERET, au Laboratoire des Ponts et Chaussées de Boulogne-sur-Mer. A la fin du siècle dernier (vers 1897), ce savant a établi la formule fondamentale :

$$R'_b = K \left(\frac{c}{1-s-p} \right)^2, \quad (1)$$

dans laquelle :

R'_b = résistance à la compression du béton sur cubes à un âge déterminé, par exemple, à 28 jours, en kg/cm² ;

K = coefficient expérimental relatif à un ciment déterminé ;

p = proportion en volume absolu de pierrailles contenue dans l'unité de volume de béton ;

s = proportion en volume absolu de sable contenue dans l'unité de volume de béton ;

c = proportion en volume absolu de ciment contenue dans l'unité de volume de béton.

(1) Texte de la communication faite sous ce titre le 20 juillet 1939, à la 63^e session de l'Association française pour l'avancement des Sciences, à Liège. Publication différée en raison des événements. (Note de l'auteur, avril 1947.)

(2) Ingénieur des constructions civiles, grade légal, Université de Bruxelles 1914. Ingénieur électricien, grade complémentaire scientifique, Université de Liège 1919. Professeur ordinaire à la Faculté des Sciences appliquées à l'Université de Liège 1925. Directeur des Laboratoires d'essais des constructions du Génie civil et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège 1930.

En désignant par e et v les proportions en volumes absolus d'eau et de vides (air), ces quantités satisfont à la relation :

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

La formule de FERET peut donc s'écrire sous les formes :

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

qui montrent que le facteur ciment : eau, inverse du « water-cement-ratio » défini par DUFF. A. ABRAMS, n'est qu'un cas particulier des facteurs $\frac{c}{e + v}$ ou $\frac{e + v}{c}$ lorsque la quantité d'eau est suffisante pour remplir exactement tous les vides. (Eug. FREYSSINET, *Génie Civil*, 21-7-1928).

Ces formules expriment que la résistance du béton, à égale richesse en ciment, augmente avec sa compacité. Cependant, il importe de s'entendre au sujet de ce terme. Si on l'exprime par $1 - v = p + s + c + e$, on obtient une compacité toute factice. Un béton coulé fluide posséderait d'après cette définition une compacité totale, ce que l'expérience et le sens commun contredisent. Une partie notable de l'eau introduite dans le béton frais reste à l'état libre d'eau interstitielle, qui n'est combinée ni chimiquement ni physiquement. Pendant son durcissement, le béton peut perdre une grande partie de cette eau sous l'effet de causes diverses. Même si toute l'eau est conservée, elle n'en possède pas moins en partie le même caractère que les vides au point de vue de la structure du béton. C'est ce qu'exprime la formule de FERET en ce qui concerne la résistance. Cela est vrai aussi en ce qui concerne la déformabilité mécanique, tant élastique que plastique, la déformabilité thermique et la déformabilité hygrométrique (retrait), propriétés dont certaines sont importantes pour les ouvrages hydrauliques, tels que les barrages et les écluses. Une autre catégorie de qualités, d'importance primordiale pour ces ouvrages et les travaux maritimes, comprend l'étanchéité, l'imperméabilité et la résistance aux actions dissol-

vantes ou agressives des eaux. A ce point de vue comme à ceux considérés plus haut, on peut exprimer la loi générale que *les qualités d'un béton varient en sens inverse de $e + v$ et dans le même sens que $p + s + c = 1 - (e + v)$* (1).

Cette loi n'est, somme toute, pas nouvelle ; cependant on peut dire qu'elle n'est certes pas appréciée pratiquement comme il convient ni dans toute sa généralité. Elle rencontre des objections pratiques dans les difficultés de mise en œuvre. Dans la pratique courante du béton armé il semble que $(e + v)$ ne puisse descendre en-dessous d'une certaine limite, dont la valeur moyenne convenable paraît être 0,20 pour des bétons de qualité moyenne. De telle sorte que si e est faible (béton sec), les difficultés plus grandes de mise en œuvre font augmenter v , tandis que v peut être nul si e est assez grand (béton fluide coulé). La pratique consciencieuse ancienne du béton sec bien damé permettait de gagner peu de centièmes, par la qualité de la surveillance et de la main d'œuvre, en tenant e assez bas, tout en évitant d'augmenter v . La généralisation de l'emploi du béton armé a tout d'abord mis en faveur le béton plastique, plus mouillé et peu damé, mais non dépourvu de vides.

L'emploi du béton en masses énormes a ensuite introduit l'usage du béton fluide coulé. La pratique a cherché un compromis entre les desiderata de la facilité de mise en œuvre et de la qualité suffisante du béton. Le rôle de l'eau s'y manifeste de manière contradictoire, comme plastifiant et même comme véhicule, conditionnant la « workability » ou travaillabilité ou maniabilité, et comme « poison » des qualités du béton, terme très suggestif quoiqu'en fait assez impropre. en raison de la manière dont l'eau agit sur ces qualités par diminution de la compacité et augmentation de la porosité.

(1) On appelle $\beta = p + s + c$ la *compacité du béton frais*. D'après la formule de FÉRET, $R'_b = K \left(\frac{c}{1 + c - \beta} \right)^2$

La *compacité du béton durci* est $\beta' = p + s + c \left(1 + \varepsilon \frac{\Delta_c}{1000} \right)$, ε étant la proportion en poids d'eau liée par l'hydratation du ciment.

On peut estimer qu'une très nette réaction s'est manifestée contre l'emploi du béton fluide coulé et que l'adoption finale du béton plastique ou mou marque une tendance, peut-être consciente et certes inspirée de l'expérience, à limiter ($e + v$) à des valeurs raisonnables et aussi favorables que possible.

L'usage plus récent de la vibration pour la mise en œuvre du béton rend possible de grands progrès dans cette voie. On peut considérer comme un précurseur du béton vibré le procédé « Vibrolithic » qui, par le moyen de châssis vibrants, incorporait de la pierraille sèche répandue à la surface d'une couche de béton frais destiné à constituer un revêtement de route. Cette opération avait pour effet d'augmenter p et de diminuer relativement $e + v$, donc d'augmenter la compacité, abstraction faite de toute action directe de la vibration sur le béton même. D'une manière toute naturelle, on a toujours considéré, je pense, que la vibration devait avoir pour effet de rendre le béton plus compact. Cependant, dans la pratique courante et même à certains points de vue plus scientifiques, cette notion de compacité est plutôt empirique et peu précise. C'est ainsi qu'au dernier Congrès International d'Essais des Matériaux à Londres en avril 1937, j'ai été conduit à préciser que la mesure effective de la compacité du béton vibré constituait un moyen direct d'apprécier l'efficacité de la vibration, tandis que la résistance à la compression n'en déterminait qu'une mesure indirecte, imprécise et sujette à une dispersion assez notable. Cependant, la notion de l'augmentation de la résistance du béton par l'effet de la vibration est la plus usuelle ; beaucoup de travaux effectués dans divers pays s'y réfèrent. Les résultats en sont souvent peu concluants ou problématiques. Cela provient de ce qu'en envisageant la question sous cet angle, on ne met nullement en évidence les effets de la composition du béton et ses rapports avec les possibilités de la vibration, qui sont finalement assez limités et parfois décevants lorsqu'on l'applique à des bétons susceptibles d'être mis en œuvre par les moyens ordinaires.

C'est pour les bétons que l'on peut appeler spéciaux, c'est-à-dire auxquels on cherche à conférer des qualités spéciales en

rapport avec leur destination, que la notion et la mesure de la compacité ont été précisées en premier lieu et pour la première fois, je pense, en France, où la vibration du béton a d'ailleurs pris son essor, sous l'impulsion d'Alb. CAQUOT, d'Eug. FREYSSINET et d'autres.

Pour les bétons de revêtement de routes, dont on exige des qualités élevées de résistance et de compacité, une formule de compacité a été proposée par FÉDI (cfr. *Les bétons et les revêtements de chaussées*) qui est exprimée par $1,7c + s + p$ ⁽¹⁾. Des prescriptions officielles françaises récentes prescrivent une méthode de vérification de la compacité par dessiccation à l'étuve et comparaison du poids spécifique correspondant à une densité théorique de référence établie par une formule. (Cfr. GENET, Travaux du VIII^e Congrès International de la Route à La Haye en 1938.)

Pour les bétons de grands barrages, dont la compacité doit assurer l'imperméabilité, l'étanchéité et la résistance à l'action dissolvante des eaux plutôt que la résistance, dans la construction de certains ouvrages français récents (notamment le grand barrage du Sautet, je pense), la compacité du béton a été contrôlée par mesure directe. La méthode consiste à déterminer la différence de poids du béton complètement imprégné d'eau à chaud et sous pression (en autoclave) et desséché à outrance à l'étuve, peu au-dessus de 100° C.

Ces méthodes ont ensuite été appliquées en Belgique. Celle de l'autoclave et de l'étuve a été utilisée pour le grand barrage en construction à Eupen et pour les dernières écluses du Canal Albert. La formule de FÉDI a été employée par les Ingénieurs des Ponts et Chaussées pour certaines routes en béton (cfr. HONDERMARCQ et MANOUVRIER, *Bulletin de l'A. P. C. B. R.*, n° 11, de 1938).

L'exactitude et la précision de la méthode de l'autoclave et

(1) La formule exacte de la compacité est $\beta' = p + s + c \left(1 + \varepsilon \frac{\Delta_c}{1000} \right)$
 ε étant la proportion en poids du ciment d'eau d'hydratation non séparable par dessiccation entre 110° et 130° C. La formule de FÉDI assigne à $\varepsilon \frac{\Delta_c}{1000}$ la valeur moyenne 0,7, un peu élevée dans la plupart des cas.

de l'étuve ont été vérifiées à mon laboratoire par deux de mes collaborateurs (cfr. DANTINNE et JACQUEMIN, *Revue Universelle des Mines*, 15 octobre 1937). Les résultats ont été trouvés en accord très satisfaisant avec ceux d'une mesure absolue, par la méthode des poids spécifiques apparent et absolu (ce dernier déterminé au pycnomètre) et ceux d'un calcul absolu pondéral et volumétrique.

On peut donc constater que des méthodes d'appréciation des qualités des bétons basées sur un indice de compacité ou, mieux encore, sur une mesure directe de la compacité sont désormais admises dans la pratique pour des usages spéciaux importants. Il n'est pas exclu que leur application soit étendue dans la suite à d'autres usages du béton.

L'avantage de ces méthodes réside dans une précision plus grande que celle des mesures de résistance. Elles rendent possible un contrôle réel de la constance de qualité du béton et sont, de la sorte, génératrices d'un grand progrès pratique, qui est précisément la réalisation de cette constance. Le corollaire immédiat de ce progrès est la nécessité de la substitution du dosage en poids de la composition du béton au dosage en volume, de manière directe ou indirecte (par contrôle fréquent du poids spécifique apparent et correction corrélative du dosage en volume).

On aboutit ainsi à un déterminisme de la composition et de la confection du béton auquel j'ai consacré quelques efforts dans mon enseignement, dans mon laboratoire et dans mes écrits depuis une dizaine d'années. Beaucoup de travaux ont été consacrés au cours des dernières décades dans le monde entier à la composition des bétons. De nombreuses méthodes et notions ont vu le jour et ont été mises en pratique : le module de finesse idéal, les courbes granulométriques idéales ou limites, etc. Ces méthodes basées sur l'analyse granulométrique peuvent, sous certaines formes, convenir parfaitement pour les usages les plus courants ; elles ont l'avantage d'une grande commodité (cfr. DANTINNE et JACQUEMIN, *Revue Universelle des Mines*, juillet 1935). Je considère qu'il ne convient pas de les appliquer en dehors des limites de ces usages courants, sinon

elles deviennent non seulement moins commodes, mais elles exposent en outre au risque de commettre des erreurs dans les cas où la pratique n'a pas encore établi des normes, tels ceux des bétons très compacts dont il est question ci-après. Même dans les limites correctes de leur application pratique, on peut objecter à ces méthodes, du point de vue théorique et pédagogique, c'est-à-dire en ce qui concerne les principes, leur apparence empirique, car elles ne trouvent leur justification que dans les résultats de statistiques expérimentales, et leur insuffisante considération des lois de la discontinuité de la granulométrie, reconnues par R. FÉRET et confirmées par LECLERC DU SABLON (*A. P. C.*, 1927).

J'ai préféré fonder mon enseignement et mes études relatifs à la composition et aux qualités des bétons sur les méthodes d'analyse pondérale et volumétrique, c'est-à-dire, en définitive, d'analyse structurale (macrostructure), inspiré des travaux et formules de FÉRET. L'analyse granulométrique trouve naturellement sa place dans l'analyse structurale plus générale, dont elle n'est qu'une partie statistique.

J'utilise depuis le début de mon enseignement (1926) pour l'étude de la composition des bétons une formule volumétrique ou pondérale, dont la forme générale est :

$$\frac{c + s}{\mu} = \rho p \frac{v_p}{1 - v_p}$$

Les termes c , s et p ont été définis précédemment.

μ et ρ sont des coefficients expérimentaux qui représentent :

$$\mu = \text{la compacité sèche du mortier définie par } \frac{1}{1 + \frac{e + v}{s + c}}$$

ρ = le coefficient de remplissage des vides de la pierraille ;

v_p = la proportion centésimale des vides de la pierraille.

μ est un coefficient assez peu variable entre les limites 0,60 et 0,70 et dont la valeur moyenne pour les bétons les plus courants est d'environ 0,66, mais peut atteindre 0,70 pour les bétons les plus compacts.

ρ est un coefficient en rapport avec la plasticité ou facilité de mise en œuvre du béton (« workability ») et, par le fait

même, en rapport avec sa compacité. LECLERC DU SABLON lui assigne la limite inférieure 1,35 pour le béton le plus compact. Pour des bétons plastiques, les valeurs 1,50 à 1,60 conviennent bien ; pour des bétons fluides coulés, 1,80 à 2,00.

μ et ρ peuvent d'ailleurs être combinés en écrivant la formule sous la forme :

$$c + s = \mu \rho p \frac{v_p}{1 - v_p}$$

Pour les bétons plastiques courants, on peut donner au produit $\mu \rho$ la valeur 1.

Quant à v_p , il est toujours facile de le mesurer, même sur le chantier, pour une composition quelconque de pierraille. Si son calibre est assez uniforme, v_p est compris entre 0,50 et 0,40. Si un mélange granulométrique compact est réalisé, v_p peut descendre à 0,30, voire en dessous. On aura recours avec avantage, à ce point de vue, aux règles de la granulométrie discontinue.

Combinée avec la formule de FÉRET sous la forme :

$$R'_b = K \left(\frac{c}{c + e + v} \right)^2,$$

la formule précédente permet de calculer mathématiquement la composition d'un béton contenant un poids déterminé de ciment par m³ et permettant d'atteindre une résistance déterminée, compte tenu de la relation : $1 = p + s + c + e + v$.

Cette dernière formule permet aussi, en combinaison avec la formule de composition et pour un poids déterminé de ciment par m³, de composer un béton de compacité donnée ; la résistance est alors déduite de la formule de FÉRET.

En adoptant pour les coefficients μ , ρ et v_p les valeurs moyennes usuelles, déterminables par expérience directe et dont les ordres de grandeur sont donnés ci-dessus, on vérifie facilement que ces formules reproduisent les compositions de béton sanctionnées par la pratique courante du béton armé et de la construction massive. Je ne m'étendrai pas sur ce sujet. A ce point de vue, l'avantage de ces formules est plutôt didactique. Où elles deviennent plus intéressantes et acquièrent des avan-

tages pratiques, c'est pour la prédétermination des compositions de bétons spéciaux, sortant de la pratique courante.

Elles m'ont inspiré et guidé dans mes études de bétons pour routes (cfr. Travaux du 2^{me} Congrès Belge de la Route à Anvers, 1933, du 3^{me} Congrès Belge de la Route, à Bruxelles, 1935, du 4^{me} Congrès Belge de la Route à Gand, 1938, du 8^{me} Congrès International de la Route à La Haye en 1938 et les études précitées de DANTINNE et JACQUEMIN et de HONDERMARCQ et MANOUVRIER). Je ne m'étendrai pas non plus sur ce sujet, étranger à ma communication. Je me bornerai à leur application à l'étude des bétons très compacts pour les grands ouvrages massifs, tels que les barrages de réservoirs, les écluses, les digues, môles ou jetées, les blocs pour travaux maritimes, etc.

Auparavant, j'indiquerai la forme pratique sous laquelle il est commode d'écrire ces formules en vue de leur usage.

Appelons P , S , C et E les poids en kg de pierrailles de sable, de ciment et d'eau par m³ de béton et V le volume des vides en litres ; Δ_p , Δ_s et Δ_c , les poids spécifiques absolus de la pierraille, du sable et du ciment. Les formules s'écrivent comme suit, en fonction de ces facteurs :

$$1 = \frac{P}{\Delta_p} + \frac{S}{\Delta_s} + \frac{C}{\Delta_c} + \frac{E + V}{1000}$$

$$\frac{C}{\Delta_c} + \frac{S}{\Delta_s} = \mu \rho \frac{P}{\Delta_p} \frac{v_p}{1 - v_p}$$

$$R'_b = K \left(\frac{\frac{C}{\Delta_c}}{\frac{C}{\Delta_c} + \frac{E + V}{1000}} \right)^2 ;$$

d'où

$$P = \frac{\Delta_p}{1 + \frac{\rho v_p}{1 - v_p}},$$

$$S = \Delta_s \left[\frac{\mu \rho \frac{v_p}{1 - v_p}}{1 + \rho \frac{v_p}{1 - v_p}} - \frac{C}{\Delta_c} \right]$$

Le poids du m³ de béton frais est $P + S + C + E$.

Le dosage en volume peut se déduire de la connaissance des poids spécifiques apparents faciles à déterminer, même sur le chantier, mais qui sont susceptibles de variations importantes d'après le tassement et le degré d'humidité, surtout pour le sable (cfr. Travaux cités à propos des bétons de routes). L'application des formules aux dosages en volumes montre très clairement l'incertitude et les possibilités de variations de ces dosages et le rôle qu'y joue le degré d'humidité des matériaux. Pour le dosage en poids, dans la plupart des cas et toujours en première approximation, le degré d'humidité des matériaux peut être négligé. Il est toujours facile, dans un second calcul, d'envisager une correction, qui porte surtout sur le poids total d'eau.

Les valeurs Δ_p , Δ_s et Δ_c sont généralement connues ou facilement déterminables. Pour des calculs sommaires, on peut admettre $\Delta_p = \Delta_s = 2650$, $\Delta_c = 3100$ pour du ciment Portland, $\Delta_c = 2950$ pour du ciment de haut-fourneau, etc.

L'application montre que de petits écarts sur ces valeurs n'ont pas une influence qui sorte de l'ordre de grandeur des imprécisions que permet l'étude d'une composition de béton, aussi scientifiquement conduite soit-elle. En fin de compte, pour des bétons spéciaux et de très grands ouvrages, des essais directs préalables sont toujours désirables pour la mise au point. Pour des applications modestes, la pratique courante est un guide suffisant.

II. - Application aux bétons très compacts pour ouvrages massifs hydrauliques

Des études faites sur les bétons de routes m'ont conduit à préconiser des compositions très riches en pierres et de calibre augmenté, notamment le ballast standardisé belge 40/60 mm au lieu du ballast 20/40 mm. Certaines de ces compositions sont telles que p dépasse 0,54 et atteint 0,59. Les poids spécifiques, les compacités et les résistances sont élevées. Par exemple, $p + s + c$ atteint 0,82 et même 0,85. Il faut bien considérer que chaque centième gagné au-dessus de 0,80 représente un progrès considérable dont la possibilité décroît rapidement.

Ces résultats étaient acquis lorsqu'en 1935, M. L. VAN WETTER, Directeur-Général des Voies Hydrauliques à l'Administration des Ponts et Chaussées, confia à mon laboratoire les études préliminaires de détermination de compositions convenables de béton pour des blocs vibrés destinés au revêtement amont d'un grand barrage de réservoir. Les formules ont conduit au dosage suivant, après aménagement au laboratoire.

<i>Béton I.</i>	Porphyre 40/80	970 kg
	Porphyre 5/20	640 kg
	Sable du Rhin 0/2	375 kg
	Ciment permétallurgique	350 kg
	Eau	130 litres

($\mu = 0,667$, $p + s + c = 0,87$). Poids du m³ de béton frais : 2465 kg. Ce béton tout à fait sec a été vibré sur table à la fréquence de 50 hertz, en cubes de 40 cm de côté. Résistance à 32 jours : 300 et 304 kg/cm² (conservation à l'air). Le ciment permétallurgique est un ciment à durcissement lent, à faible teneur en chaux et faible dégagement de chaleur.

<i>Béton II.</i>	Porphyre 40/80	1050 kg
	Porphyre 10/30	420 kg
	Porphyre 2/5	172 kg
	Sable de Lommel 0/2	342 kg
	Ciment	350 kg
	Eau	128 litres.

Poids du m³ de béton frais : 2462 kg.

$\mu = 0,71$, $p + s + c = 0,872$.

Les cubes ont été préparés comme pour le béton I.

La résistance à la compression à 32 jours était de 350 à 363 kg/cm² en cas de conservation à l'air. Un autre cube, conservé sous des sacs de jute arrosés deux fois par jour, a donné 369 kg/cm² à l'âge de 28 jours. Dans les mêmes conditions, un quatrième cube confectionné avec un ciment perméallurgique un peu plus actif a donné 382 kg/cm² à 28 jours. Enfin, un cube du même dosage effectué à la demande de M. VAN VOLSOM, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Directeur du Service des Routes de l'Etat de la Province de Liège, en employant du ciment Portland à haute résistance, a prouvé une résistance de 381 kg/cm² à l'âge de 7 jours.

Ce béton II contient en poids 59,6 % de pierres (40/80 et 10/30), 20,9 % de sable (porphyre 2/5 et sable 0/2), 14,2 % de ciment et 5,2 % d'eau. Soumise à une pression de 10 atmosphères, une tranche de 10 cm d'épaisseur sciée dans ce béton a laissé suinter tout d'abord un peu d'eau, par suite de la nature particulière du ciment, mais s'est montrée entièrement étanche après quatre jours de filtration.

Ce béton a fait l'objet de l'essai comparé des déterminations de compacité dont il a été question plus haut, effectué par MM. DANTINNE et JACQUEMIN.

Les résultats ont été les suivants :

1. Méthode de la détermination de la densité apparente et de la densité réelle au picnomètre : 0,9555 ;
2. Méthode par dessiccation à l'étuve à 100-110° C et imbibition à l'autoclave (à 4,5 atm.) : 0,962 ;
3. Par le calcul, en admettant que le ciment ait combiné 16,6 % de son poids d'eau : 0,9547.

La compacité mesurée cadre assez bien avec la formule citée de FÉDI. La porosité est très voisine de 0,35 *e*, ce qui met bien en évidence que les fortes compacités ne peuvent être obtenues

qu'en réduisant l'eau à l'extrême, sans pouvoir descendre en dessous de 0,70 c (1).

Dans l'exécution du barrage, la technique primitivement prévue a été modifiée et les blocs de parement vibrés ont été abandonnés. L'ouvrage est réalisé en béton massif très compact qui constitue un pas important dans la voie de l'augmentation du calibre. Je dois à l'obligeance de M. DE CLERCQ, Ingénieur des Ponts et Chaussées dirigeant des travaux, les renseignements suivants sur les compositions mises en œuvre.

<i>Calibre</i>	<i>Béton de la masse</i>	<i>Béton de parement</i>
100/150	639 kg de grès	639 kg de porphyre
40/80	511 kg id.	511 kg id.
10/30	409 kg id.	409 kg id.
Sable 0/5 (module de finesse 2,25)	477 kg	477 kg
Ciment H. F. spécial (— de 50 % de chaux)	230 kg	350 kg
Compacité exigée (contrôlée par autoclave et étuve)	90 %	92 %
Résistance à la compression à 28 jours	230 kg/cm ²	350 kg/cm ²

La mise en place se fait à l'aide de pervibrateurs tournant à 6000 tours/minute (100 hertz) et développant 2,2 Kw en régime normal.

La quantité d'eau n'est pas indiquée, mais elle ne doit guère être supérieure à 150 litres dans le béton mis en place et pervibré pour pouvoir réaliser les compacités exigées. Le grand intérêt de ces compositions réside dans le fait qu'elles sont mises en œuvre avec succès sur un grand chantier et qu'elles ont été établies avec la collaboration de l'entrepreneur, ce qui démontre que leur caractère pratique ne le cède en rien à leur aspect théorique.

J'ai souhaité me rendre compte au laboratoire jusqu'à quelle limite on peut atteindre dans cette voie de l'augmentation du

(1) Plus exactement $\left(\varepsilon \frac{\Delta_r}{1000} \right) c$.

calibre et surtout de l'accroissement de la compacité. J'ai fait confectionner, à nouveau sur table vibrante, à la fréquence de 50 hertz, des cubes de 40 cm de côté de la composition suivante, élaborée d'après les formules précitées. Leurs caractéristiques sont définies ci-après :

Matériaux :

Calcaire	160/200
Grès	40/60
Porphyre	5/20
Sable du Rhin	0/2
Ciment P. A. N. (Haccourt)	

Analyse granulométrique

(En ajoutant un tamis supplémentaire fictif de 151 mm à la série TYLER.)

<i>Jours des tamis en mm</i>	<i>Refus cumulés en %</i>			
	<i>160/200</i>	<i>40/60</i>	<i>5/20</i>	<i>Sable</i>
151	100			
75,4	100			
37,7	100	100		
18,85	100	100		
9,42	100	100	61,6	
4,70	100	100	96,9	
2,36	100	100	99,5	1,1
1,17	100	100	99,8	10,4
0,589	100	100	99,8	32,6
0,295	100	100	99,8	78,9
0,147	100	100	99,8	98,9

Module de finesse : 11,0 9,0 6,572 2,114

<i>Calibre</i>	<i>Poids spéc. apparent kg/m³ état sec non tassé</i>	<i>Poids spéc. absolu kg/m³</i>	<i>Pourcentage de vides %</i>
160/200	1400	2700	48
40/60	1360	2650	48,5
5/20	1420	2750	48,3
Sable	1500	2650	43,4

Poids spécifique du ciment : 3,1.

Dosage du béton :

Poids spécifique : 2590 kg/m³.

Calibre	Poids par m ³	% du poids des matériaux secs	Volume réel litres
160/200	1194 kg	47,7	442,22
40/60	327 »	13,0	123,40
5/20	517 »	20,6	188,00
sable 0/2	235 »	9,35	88,68
ciment	235 »	9,35	75,80
eau	82 »	3,27	82,00
Poids d'un m ³		2590 kg	Volume total : 1000,10 l.

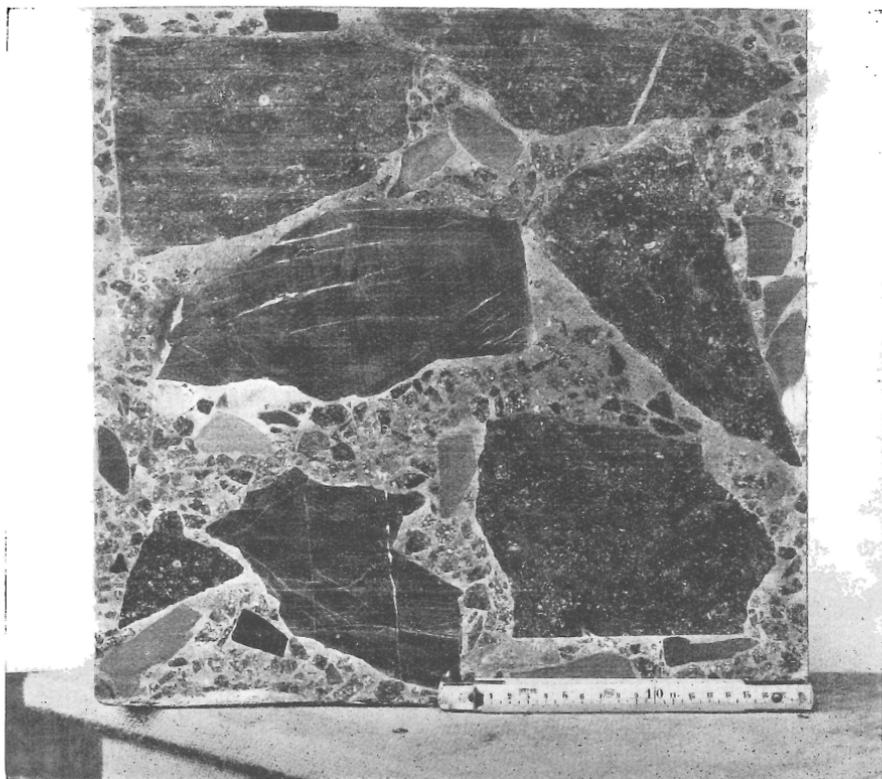
$$\frac{\text{ciment}}{\text{eau}} = 2,87$$

Compacité à l'état frais : 1.

$$\mu = 0,667 ; p + s + c = 0,9181 ; p = 0,74363 ; v_p = 0,20 ; \rho = 1,30$$

La compacité a été déterminée sur un cube de 30 cm confectionné à l'aide du béton ci-dessus, moins le 160/200 et damé à la main. Le poids de ce cube était de 66 kg, correspondant à un poids unitaire réel de 2445 kg/m³. D'après la formule de composition, le poids unitaire de ce béton devait être 2500 kg. Il en résulte que le damage laissait subsister 55 litres de vides par m³ dans le cube de béton partiel, soit 5,5 % en volume. Par dessiccation complète à l'étuve, ce cube a perdu 1,600 kg de son poids, soit 2,43 %. Comme ce béton de 40/60 intervient dans la composition du béton de gros éléments à raison de 52,3 % du poids total, la perte de poids de ce béton par dessiccation complète n'aurait pu dépasser 2,43 × 0,523 = 1,27 % du poids, soit 3,30 % en volume.

Le poids des cubes de 40 cm de côté de béton de gros éléments, confectionnés par vibration, est de 166 kg, ce qui correspond exactement au poids unitaire de 2590 kg/m³ résultant du calcul. On en déduit que ce béton ne contient pas de vides et que sa compacité à l'état sec est donc au moins égale à 0,967.



La figure reproduit la photographie d'une coupe dans ce béton.

Quant à celle des cubes de 30 cm de côté, confectionnés au moyen de béton 40/60 damé à la main, elle est égale à

$$1 - \left(\frac{2,43 \times 2,445 + 5,5}{100} \right) = 0,885$$

Résistance à la compression à 7 jours.

- a) Cube de 40 cm de côté (poids 166 kg).
Charge de rupture totale : 585 tonnes.
Charge de rupture unitaire : 365 kg/cm².
- b) Cube de 30 cm de côté (poids 66 kg).
Charge de rupture totale : 262 tonnes.
Charge de rupture unitaire : 292 kg/cm².

Résistance à la compression à 16 jours.

- a) Cube de 40 cm de côté (poids 166 kg).
Charge de rupture totale : 625 tonnes.
Charge de rupture unitaire : 391 kg/cm².
- b) Cube de 30 cm de côté (poids 66 kg).
Charge de rupture totale : 300 tonnes.
Charge de rupture : 333 kg/cm².

Ces résultats appellent les remarques suivantes :

1° la compacité a été mesurée par l'intermédiaire du béton « partiel » 40/60 entrant dans la composition du béton « total » parce que l'étuve dont dispose le laboratoire ne permet pas d'opérer commodément sur des cubes de 40 cm de côté et que le résultat que l'on aurait obtenu sur un bloc découpé dans la masse aurait pu différer de la valeur moyenne en raison du volume des gros éléments et du découpage. Le principe de la méthode employée est exact. La compacité trouvée pour le béton vibré correspond de nouveau bien avec le résultat de la formule de Fédi, qui est 0,971 et donne une valeur légèrement par excès. Les effets de paroi n'ont donc guère d'importance dans ce cas.

2° La compacité du béton de gros éléments est supérieure à celle du béton partiel pour deux raisons : la présence des gros éléments et la vibration. La vibration aurait pu élever la compacité du béton partiel de 0,885 à 0,94. Les gros éléments l'augmentent encore à 0,967.

Les facteurs qui concourent aux grandes valeurs de la compacité sont :

- a) la forte proportion de pierres et la faible proportion de ciment et d'eau ;
- b) le calibre maximum élevé des pierres, qui permet de réduire v_p par une granulométrie discontinue multiple ;
- c) la vibration complète supprimant entièrement les vides.

Si l'on se réfère aux chiffres de compacité précités, on constate que la vibration complète est un facteur principal de forte compacité. Il permet d'atteindre la compacité limite, correspondant à l'absence de vides du béton frais, ou d'en approcher

suffisamment. Ces chiffres de compacité limite sont respectivement de 0,967 et 0,94 pour le béton à gros éléments et le béton partiel. La différence est notable, car les derniers points de compacité sont les plus difficiles à gagner.

Quelle est l'influence des facteurs *a*) et *b*) sur cette différence de compacité limite ? Pour l'apprécier, considérons la composition du béton partiel supposé vibré sans vides.

<i>Composant</i>	<i>Poids par m³</i>	<i>Volume réel en litres</i>
40/60	586	221
5/20	925	337
Sable 0/2	421	159
Ciment	421	136
Eau	147	147
	<hr style="width: 100px; margin: 0 auto;"/>	<hr style="width: 100px; margin: 0 auto;"/>
	2500 kg/m ³	1000 litres

Le rapport $\frac{c}{e}$ est le même que celui du béton à gros éléments, mais les proportions *c* et *e* sont considérablement augmentées de telle sorte que la porosité limite $e - c \varepsilon \frac{\Delta_r}{1000}$

est nécessairement augmentée dans la même proportion. On remarque que *p* n'est plus que 0,558 et *p* + *s* + *c* est descendu à 0,853. On remarque aussi que les proportions de 40/60 et de 5/20 sont inverses de ce qu'elles devraient être pour un béton régulier. En fait, par rapport aux gros éléments du béton « total », le béton « partiel » a plutôt une composition de « mortier pour béton » comportant, en accord avec les observations formulées anciennement par FÉRET, plus d'éléments fins que d'éléments moyens. Un béton du calibre maximum 40/60, étudié d'après les formules fondamentales et les règles usuelles de granulométrie, pourrait contenir plus de pierres, moins de ciment et d'eau et posséderait une compacité limite plus élevée que 0,94 et plus voisine de 0,967. C'est ce que l'étude précitée des bétons 40/80 a montré.

Les facteurs essentiels d'une haute compacité limite sont donc la forte proportion de pierres et la faible proportion de ciment et d'eau. Des valeurs limites déjà très élevées, de

l'ordre de 0,95 à 0,96, peuvent être obtenues avec des calibres maxima de 40/60 à 40/80. Mais pratiquement, l'emploi de pierres d'un calibre plus élevé peut faciliter l'obtention de compacités limites et réelles élevées, parce que la surface spécifique est diminuée et que la faible quantité d'eau reste suffisante pour réaliser le film lubrifiant qui favorise la mise en œuvre et l'expulsion de l'air, qui se dégage plus facilement dans les grands vides. De plus, l'adoption d'un calibre maximum plus élevé permet une meilleure exploitation des avantages de la granulométrie discontinue.

La forte réduction de la quantité d'eau de mouillage et la perfection de la vibration sont certes les conditions les plus difficiles à réaliser en pratique. L'effet des gros éléments est en conséquence le plus sûr pour augmenter la compacité réelle, moyennant une mise en œuvre appropriée.

Grâce à la vibration, cette mise en œuvre est possible. Par leur nature spéciale, ces bétons sont ceux qui permettent d'obtenir de la vibration l'effet le plus grand. On peut estimer cependant qu'il n'y a pas d'intérêt à dépasser sensiblement des calibres maxima de l'ordre de 150 à 200 mm.

3° La résistance du béton total est considérablement supérieure à celle du béton partiel. Ceci vérifie l'effet de la compacité sur la résistance. Le béton partiel est en effet beaucoup moins compact, mais également beaucoup plus riche en ciment (près de 400 kg de ciment par m³, compte tenu des vides, contre 235 pour le béton total). L'effet de la compacité est nettement prédominant.

Selon la formule de FERET, les bétons vibrés sans vides devraient avoir la même résistance, le rapport $\frac{c}{c + e}$ étant le même. L'expérience n'a pas encore été faite (1). Les essais relatifs à ces bétons sont assez incommodes par suite des manipulations pondéreuses et des dépenses qu'ils occasionnent.

(1) L'expérience a été faite effectivement pendant la guerre, après la communication. Malheureusement, les résultats en ont été perdus par suite de la dévastation des laboratoires par les bombardements aériens de mai 1944. (Note de l'auteur, avril 1947.)

Aussi n'en a-t-il encore été fait qu'un petit nombre, dont les résultats sont caractéristiques. Je présume que l'expérience comparative qui sera faite établira que le béton partiel vibré sans vides aura une résistance supérieure à celle du béton à gros éléments. Les raisons de cette prévision sont les suivantes :

Si le même coefficient K de la formule de FÉRET était valable pour le béton à gros éléments et le béton partiel damé, à 5,5 % de vides, le rapport des résistances devrait être 1,44 environ. Il est en réalité 1,25 à 7 jours et 1,175 à 16 jours. Pour apprécier ces résultats il ne faut pas perdre de vue que la formule de FÉRET n'est pas rationnelle, mais de nature statistique et sujette à écarts notables par rapport aux valeurs particulières. D'autre part, il est connu que le coefficient K dépend de la grosseur des éléments. Le rapport n° 7 du Laboratoire Fédéral d'Essais des Matériaux de Zurich indique que la valeur moyenne de K pour les bétons ordinaires est égale à 0,87 fois celle relative aux mortiers, pour un ciment donné et à l'âge de 28 jours. Ceci va à l'encontre de l'observation ancienne de FÉRET que la résistance d'un béton est sensiblement égale à celle de son mortier lorsque $p < 0,667$.

En fait, la résistance du mortier est généralement supérieure à celle du béton. La limite $p = 0,667$ est indiquée par FÉRET parce que, lorsque p dépasse cette valeur dans les bétons ordinaires, celui-ci est caverneux. Cette restriction n'est naturellement pas valable pour les bétons à gros éléments et vibrés sans vides, qui ne sont nullement caverneux quoique p atteigne la valeur 0,75.

De même que le coefficient K est plus élevé pour le mortier que pour le béton ordinaire, les chiffres précédents permettent de croire, par analogie, que K est plus grand pour le béton partiel que pour le béton à gros éléments. Les raisons pour lesquelles les compositions obtenues à partir d'un béton déterminé, en supprimant successivement les éléments les plus gros, sont de plus en plus résistantes, peuvent être multiples et complexes.

La diminution des dimensions des grains inertes doit ré-

duire les tensions initiales de retrait (1). D'autre part, à égalité du rapport $\frac{c}{c + e + v}$, la proportion de ciment augmente notablement, tandis que la compacité effective diminue.

Quoi qu'il en soit, on doit considérer comme bien établi que le coefficient K de la formule de FÉRET n'est pas une constante pour toute la gamme des produits s'étendant des mortiers les plus fins jusqu'aux bétons les plus gros, qui ne dépendrait que de la nature du ciment et de l'âge. Cela est d'ailleurs établi aussi par les études de Duff A. ABRAMS, qui se réfère explicitement à des proportions définies du ciment aux matières inertes et aux dimensions maxima des grains.

4° Cependant, il a été constaté que l'effet de la compacité prédomine nettement sur celui de la richesse en ciment. Même pour ces bétons à gros éléments 160/200 mm, la fréquence de vibration de 3000/minute sur table a permis d'atteindre la compacité limite. Il n'est pas douteux que pour la pervibration en grandes masses, qui demande beaucoup de soins, des fréquences notablement supérieures soient avantageuses.

Les bétons très compacts à très gros éléments sont-ils susceptibles d'usage pratique. Sous la réserve qu'il n'est peut-être pas possible ni nécessaire de réaliser sur les chantiers la compacité limite et en considérant que des compacités effectives de 0,92 à 0,94 dépassent toujours considérablement les valeurs moyennes des bétons ordinaires, j'admets que ces bétons seront utilisés et appréciés, en raison de leurs avantages certains, pour les gros massifs de barrages, d'écluses et d'ouvrages maritimes, qui sont :

a) Grande compacité, donc poids élevé, étanchéité et imperméabilité, résistance à l'action dissolvante ou agressive des eaux.

b) Réduction de la quantité de ciment tout en conservant une résistance largement excessive, d'où diminution du dégagement de chaleur et du retrait.

(1) La cohésion du béton très compact à gros éléments, peu riche en ciment et en eau, est parfaite. La rupture des cubes fragmente les grosses pierres. L'essai effectué au laboratoire le 20 juillet 1939 sous les yeux des membres de l'A. F. A. S. (cubes essayés à l'âge de 16 jours) leur a permis de s'en convaincre.

c) Pour les blocs à immerger à la mer, utilisation de déchets de carrière, poids spécifique élevé et résistance à l'agression par l'eau marine.

Un moyen simple, sûr et précis de contrôler la compacité d'un béton de composition pondérale connue réside dans la détermination du poids spécifique apparent du béton frais et du béton desséché à outrance.

Du point de vue scientifique de la connaissance des matériaux, il est intéressant de noter qu'un béton de compacité 0,967 se rapproche de la compacité des meilleures pierres naturelles et dépasse notablement celle des produits céramiques.

Post-scriptum (juin 1947). Les formules complètes de la composition des bétons sont :

$$p = \frac{1}{1 + \rho \frac{v_p}{1 - v_p}}$$

$$s = \frac{\mu \rho \frac{1 - v_p}{v_p}}{1 + \rho \frac{v_p}{1 - v_p}} - c, \quad e + v = \frac{\rho (1 - \mu) \frac{v_p}{1 - v_p}}{1 + \rho \frac{v_p}{1 - v_p}}$$

D'après la formule de FÉRET,

$$\frac{c}{e + v} = \frac{\sqrt{\frac{R'_b}{K}}}{1 - \sqrt{\frac{R'_b}{K}}} = \gamma, \quad c = \frac{\gamma \rho (1 - \mu) \frac{v_p}{1 - v_p}}{1 + \rho \frac{v_p}{1 - v_p}}$$

Ces formules permettent théoriquement de déterminer la composition d'un béton de consistance et de résistance données.

$$\text{La compacité du béton frais est } \beta = \frac{1 + \mu \rho \frac{v_p}{1 - v_p}}{1 + \rho \frac{v_p}{1 - v_p}}$$

La compacité du béton durci est

$$\beta' = \frac{1 + \rho \frac{v_p}{1 - v_p} \left[\mu + \frac{\gamma \varepsilon \Delta c}{1000} (1 - \mu) \right]}{1 + \rho \frac{v_p}{1 - v_p}}$$

La limite extrême supérieure de μ est 0,75. La limite extrême inférieure de ρ est 1,20, dans le cas d'emploi de gravier roulé très exactement calibré, donnant une valeur de v_p assez élevée. Le facteur essentiel étant $\frac{\rho v_p}{1 - v_p}$ il est préférable de réduire v_p , par une granulométrie discontinue, ce qui permet d'augmenter ρ .