

UNIVERSITE DE LIEGE.

COURS DE CONSTRUCTIONS DU GENIE CIVIL.

N° 14.

La composition des bétons de routes

par

F. CAMPUS,

Ingénieur A. I. Lg., A. I. Br. et A. I. M.,

Professeur, Directeur du Laboratoire du Génie civil
de l'Université de Liège.

RAPPORT

présenté au Deuxième Congrès Belge de la Route

Anvers — Septembre 1933.

1933

Impr. De Vos-van Kleef, rue Rouge, 44, Anvers

LA COMPOSITION DES BETONS DE ROUTES.

L'Administration des Ponts et Chaussées de Belgique prescrit pour ses routes en béton la composition suivante :

- 600 litres de pierraille 20/40 ;
- 300 litres de pierraille 5/20 ;
- 250 litres de pierraille 2/5 ;
- 350 litres de sable du Rhin ou de sable rude de Moll ;
- 450 Kg. de ciment Portland artificiel à haute résistance.

La quantité d'eau n'est généralement ni définie ni limitée.

La résistance à la compression sur cubes, prélevés dans la masse, doit être, après 56 jours, supérieure à 400 kg./cm².

Ces points donnent lieu aux observations suivantes :

La définition granulométrique des constituants est trop sommaire pour pouvoir espérer, compte tenu de la diversité des provenances et fournitures, une composition très constante.

La dispersion constatée dans les résultats des essais de compression en est un indice partiel, mais n'est pas uniquement la conséquence de cette variation. La résistance est encore influencée par la différence de mouillage du béton, les variations banales de la mise en œuvre, les circonstances climatiques, etc. Les imperfections accidentelles des cubes d'essai, leurs différences naturelles, les variations inévitables des conditions d'expérience interviennent aussi dans ces résultats, qui ne sont pas indépendants des opérations des essais. C'est ce qui explique que deux cubes extraits d'un même bloc, en même position relative peuvent donner des résultats très voisins ou assez différents.

L'essai de résistance n'est donc susceptible de trancher la question du classement de qualité des bétons de route, que si l'on dispose d'un nombre très grand de résultats, dont on puisse tracer une courbe de fréquence. Les influences perturbatrices considérées ci-dessus étant indépendantes, si le nombre d'essais est assez grand, on obtiendra une courbe en cloche pour chaque catégorie de béton et la comparaison de ces courbes sera seule pertinente. Quelques résultats seulement ne permettent pas de classer ; ils fixent des ordres de grandeur.

La question devient plus aisée si l'on se réfère à la limite infé-

rière de 400 kg./cm² de résistance à la compression. Il ne s'agit plus alors de classer, il suffit de séparer deux catégories. Il devient dès lors assez facile, par un petit nombre d'essais, de vérifier dans quelle catégorie un béton doit être rangé. On peut aussi imposer, dans la catégorie supérieure, des conditions supplémentaires, éventuellement plus intéressantes que celles de la résistance la plus élevée. Telle, par exemple, est la condition d'économie.

La variation de composition des bétons de routes se révèle le mieux par l'examen des textures en coupes planes assez étendues. Il faut se méfier de l'aspect d'une cassure brute, faite au marteau par exemple. Il faut examiner des sciages. Une petite surface (par exemple 10 × 10 cm.) peut donner lieu à fausse interprétation. En effet, d'après la localisation de la face de sciage, on peut se trouver entre les cailloux et n'apercevoir en section que de petits pointements de pierre noyés dans de grandes plages de mortier ou inversement. Si l'on opère sur une surface assez grande, par exemple 20 × 40 cm., le nombre d'éléments est assez grand pour que nécessairement un sciage quelconque donne une bonne image moyenne, quoique non uniforme. De tels sciages révèlent des proportions relatives assez variables dans divers bétons de routes, établis selon la formule des Ponts et Chaussées et qui nous ont été envoyés par cette administration. Ces variations ne sont pas seulement accidentelles dans une même route, auquel cas elles sont inévitables et dénuées d'importance, mais elles sont plutôt systématiques pour des routes différentes, ceci tenant à la diversité des matériaux et des conditions de mise en œuvre. Ces différences systématiques sont évidemment insolites et méritent d'être examinées.

Elles conduisent en premier lieu à la notion du contrôle du calibre ou de la granulométrie des constituants. Je la crois surtout nécessaire pour le 5/20 et le 2/5, ainsi que pour le sable. La définition des granulométries de ces éléments, avec des tolérances raisonnables et contrôlées, serait en tout état de cause une mesure favorable à l'uniformité de composition du béton des routes.

Cependant un autre élément intervient pour les concassés, c'est la forme du cassage, qui varie caractéristiquement d'après les roches et d'après les fabrications.

Mon rapport sur les essais des matériaux pierreux contient des chiffres qui montrent la variation de compacité des pierrailles d'un même calibre d'après la nature de la roche, surtout pour les éléments les moins gros. On pourrait, comme perfectionnement, envisager la méthode employée sur certains chantiers de routes en béton asphaltique. Un petit laboratoire de chantier étudie couram-

ment les qualités des constituants et fixe journallement le dosage à mettre en œuvre.

Les opérations nécessaires sont simples : pesées, tamisages, volumes de vides et quelques opérations arithmétiques. Des diagrammes simples peuvent servir à ces études. Cette méthode est employée pour certains grands travaux de bétonnage autre que des routes. Comme jusqu'à présent les bétons de routes sont ceux dont on semble attendre — et obtenir — les plus hautes qualités, on conçoit très bien l'application de la méthode. Il est certain que l'action du laboratoire devrait aussi s'étendre aux facteurs humi-

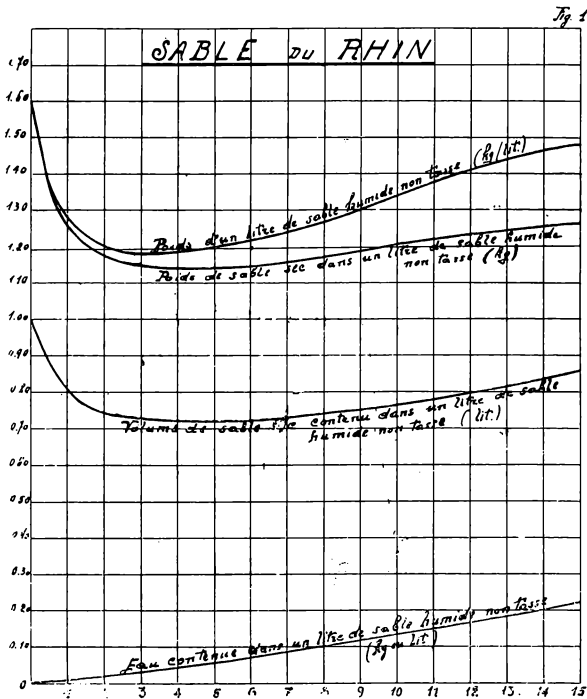


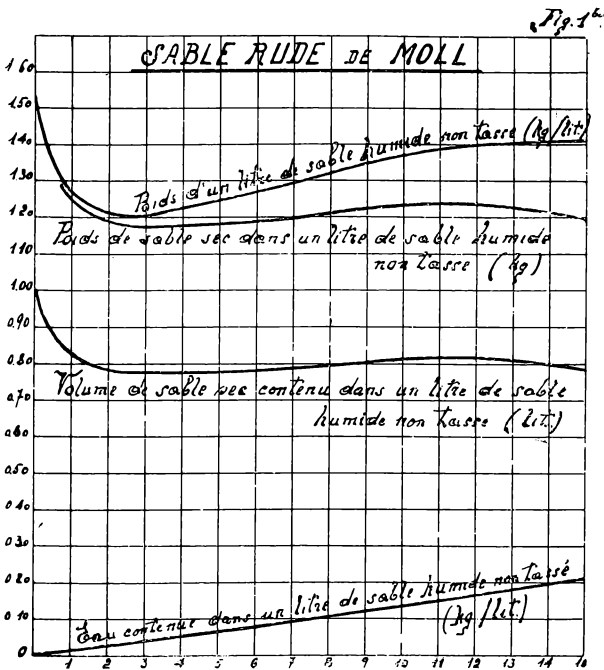
Fig. 1.

dité des matériaux et eau de mouillage. Il n'est pas douteux que le degré d'humidité influe déjà sur le poids spécifique du 2/5; il en est de même, et dans une forte proportion, pour le sable. De telle sorte que le dosage en volume peut, selon l'état d'humidité des matériaux, être à lui seul responsable de variations importantes et inadmissibles de compositions et de texture du béton.

Les courbes des figures 1 et 1^{bis} indiquent les variations des poids spécifiques, en fonction du degré d'humidité, du sable du Rhin

et du sable rude de Moll. La figure 2 représente la courbe granulométrique de ces sables. La figure 3 indique les variations du poids spécifique du 2/5 de porphyre ; l'effet est moins marqué que pour les sables. La courbe granulométrique du 2/5 est reproduite à la figure 5. Il est certain que pour les pierrailles de plus gros calibre, l'influence de l'humidité est négligeable pratiquement.

Les figures 1, 1^{bis} et 3 indiquent aussi le poids effectif du sable et le volume de sable sec qu'il y a dans un litre de sable humide selon son degré d'humidité variable. On voit que les erreurs peuvent être réellement appréciables.



Si la méthode du dosage variable déterminé par le laboratoire de chantier ne parvenait pas à s'introduire dans la pratique, il ne serait pas permis cependant de s'en tenir purement et simplement à l'empirisme du dosage en volume. Une petite balance et une capacité de 5 litres permettraient, moyennant quelques pesées journalières, une correction suffisante ne portant par exemple que sur le sable et sur la grenaille 2/5. Naturellement, la quantité d'eau introduite par le sable humide est assez grande ; elle figure aussi aux figures 1, 1^{bis} et 3 par litre de sable selon le degré d'humidité.

La pesée du sable, au besoin la perte de poids par dessiccation (qui n'exige qu'un réchaud) permettent une correction de l'eau de mouillage, dont la limitation de la quantité totale est la seule méthode adéquate pour un béton de route. Les essais de plasticité sont, en effet, totalement dénués de signification pour ces bétons. Je suis informé que les ingénieurs en chef de certains ressorts, notamment Monsieur Van Volsom, à Liège, ont introduit dans leurs cahiers des charges des clauses de ce genre.

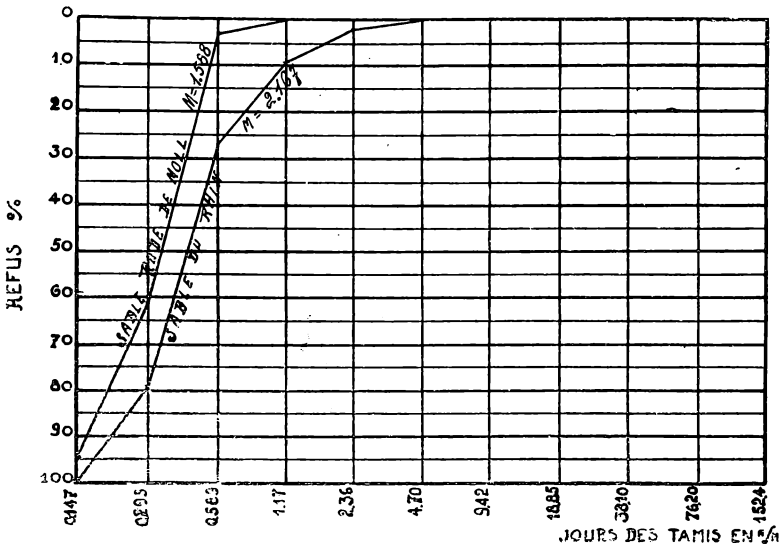


Fig. 2. — Courbes granulométriques du sable du Rhin et du sable rude de Moll.

Les opérations que nous venons d'énoncer : contrôle d'une granulométrie régulière des constituants, correction du volume des éléments fins selon le degré d'humidité, contrôle et limitation de la quantité d'eau totale, me paraissent susceptibles de régulariser appréciablement les qualités du béton de route sans complication réelle. Ces opérations élémentaires, beaucoup plus simples que celles du dosage variable par un laboratoire de chantier, seraient peut-être plus sûres quant au résultat moyen.

Leur conséquence serait d'assurer une résistance uniformément plus élevée, l'expérience montrant que la composition du béton de routes des Ponts et Chaussées permet des résistances très supérieures à 400 kg./cm²; elle sont même généralement supérieures à 500 kg./cm².

Ceci conduit à une autre observation. La résistance minimum imposée est 400 kg./cm² à 56 jours. L'opportunité d'augmenter cette résistance à 500 kg./cm² est discutable. Des critiques très

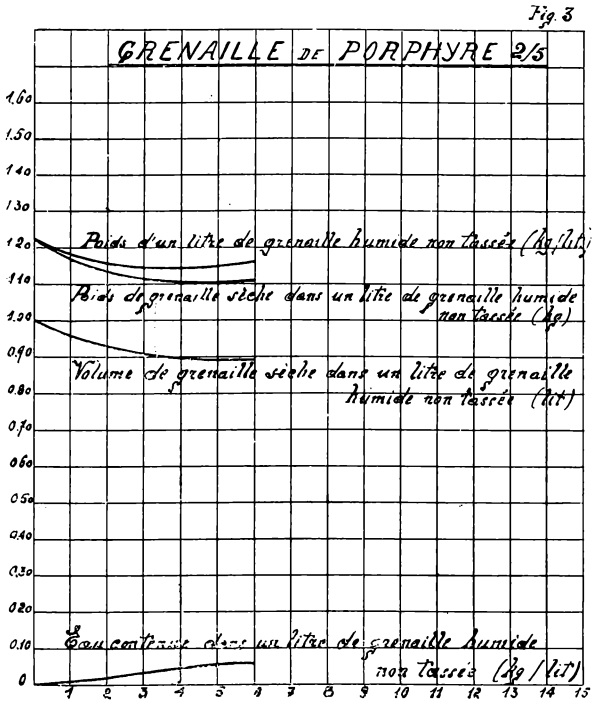


Fig. 3.

autorisées ont été exprimées à la semaine de la route à Paris, en 1931, contre les dosages très riches du béton de route (voir « Revue générale des routes », décembre 1931). Admettons même, afin de fixer un progrès plutôt que de rétrogarder, que l'on adopte 500 Kg./cm², il n'y a pas lieu, en tous cas, semble-t-il d'élever encore les exigences au-delà. Cette limite étant fixée, elle peut avoir le simple caractère d'un contrôle de la mise en œuvre convenable d'un béton dont la composition permet des résistances supérieures à celle qui est exigée. Il semble que ce soit la conception actuellement courante chez nous. Mais on peut aussi la considérer comme définissant une catégorie de bétons qui conviendraient pour les routes et se différencieraient par ailleurs par d'autres propriétés. Dès lors n'existe plus l'opportunité d'un dosage unique et l'on peut étudier divers dosages entrant dans la catégorie indiquée.

Il faut observer que le dosage des Ponts et Chaussées a été établi

à une époque, remontant à quelques années, où les dalles avaient 10 à 12 centimètres d'épaisseur. On leur donne actuellement 18 à 20 cm. Cette modification ne permet-elle pas d'autres dosages, notamment en employant des pierrailles plus grosses, de 40/60 mm. par exemple. Une autre question surgit pour la route épaisse de 18 à 20 cm. : sera-t-elle à simple ou double couche. En France, il y a beaucoup de partisans de la double couche. Elle est compatible avec l'emploi de matériaux plus gros dans la couche de base et permet une économie sérieuse de ciment. Elle se conjugue avec un autre problème. Au 1^{er} Congrès de la route à Liège, en 1930, la question a été posée de ce qu'il adviendrait d'une route en béton à simple couche devenue trop mince par longue usure. Le concept de la double couche permet d'envisager son rechargement en béton, moyennant certaines précautions. Il faudrait assurer l'adhérence parfaite et éviter les effets de retrait. Il faudrait donc :

- 1° un nettoyage et un décapage parfaits de l'ancienne route ;
- 2° une humectation copieuse et prolongée de celle-ci ;
- 3° des précautions particulières contre la dessiccation rapide de la couche nouvelle ;
- 4° des joints dans cette couche au droit de ceux de la couche de bas et peut-être même intermédiairement (c'est un cas d'espèce) ;
- 5° une épaisseur suffisante de la nouvelle couche (4 à 6 cm. au moins).

Il y a donc toute une série de problèmes qui se posent au sujet du dosage des bétons de route, ils ne pourront être définitivement résolus que par des essais réels, sur la route même, ce qui ne serait pas très coûteux d'ailleurs. Néanmoins, il m'a paru intéressant de procéder à des essais préalables de laboratoire susceptibles d'orienter des essais plus importants et d'éclairer sur leurs chances de succès.

Ces essais sont nécessairement à petite échelle. Cependant, je leur ai donné un caractère spécial et, je pense, peu courant, quoique très utile.

On obtient des résultats incertains en déterminant la résistance à la compression des bétons de route sur des cubes, même de 20 cm. de côté, moulés à ces dimensions. L'effet des parois est considérable, vu les dimensions assez grandes des pierrailles. En outre, le damage de ces bétons très secs dans de petits moules est difficile. D'autre part, les essais de flexion sur prismes et de choc sur cubes sont aussi intéressants que la compression. J'ai donc fait confectionner d'assez grandes dalles de béton, de 18 cm. d'épaisseur et

j'y ai fait ensuite, en pleine masse, prélever des cubes et des prismes, tout comme on opère sur un bloc détaché dans la route. De la sorte, les essais de laboratoire se rapprochent le plus qu'ils peuvent des conditions réelles et sont du moins corrigés de certains défauts importants. Naturellement, le travail et la dépense d'une telle recherche sont considérablement augmentés, de même que la durée. La plus grande pertinence des résultats a pour contre-partie un moindre nombre d'éprouvettes.

* * *

Il a été fait deux séries d'essais. La première, peu importante, a été faite au moyen de silex du Hainaut qui nous avaient été envoyés pour examen de leur possibilité d'emploi pour les bétons de routes. Nous avons constaté au laboratoire que le dosage des Ponts et Chaussées paraissait riche en mortier et nous avons étudié, Monsieur Dantine et moi, des dosages modifiés. On a opéré sur les compositions suivantes.

	I	II	III
20/40 (litres)	600	600	775
5/20 (litres)	300	420	380
2/5 (litres)	250	530	néant
Sable du Rhin (litres)	350	néant	340
Ciment P. H. R. (Kilogr.)	450	450	340
Eau (litres)	200	177	180
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Densités :	2.23	2.18	2.25

La densité assez faible provient du poids spécifique très faible du silex, de 2,30 seulement.

La figure 4 reproduit les photographies de coupes des 3 bétons. On a obtenu les résistances suivantes à 56 jours :

	I	II	III
	568 kg./cm ²	662	627
	605	583	620
	558	598	608
	520	623	623
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Moyenne :	563	617	619.5

Le ciment employé a donné les résultats suivants :

Résistance à la compression :	3 j. 362	7 j. 500	28 j. 542
Résistance à la traction :	31.7	35.8	39.1

La quantité de sable du Rhin correspondait à une humidité de 3 % à 4 %.

On constate une supériorité marquée des mélanges II et III par rapport au dosage officiel ; le type III est le plus régulier et le plus recommandable.

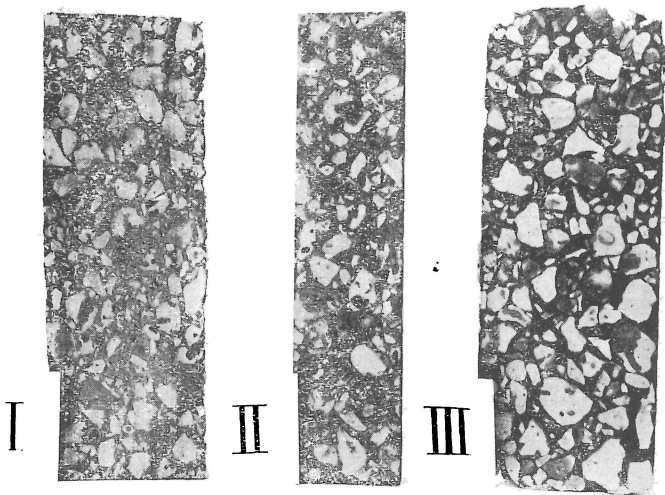


Fig. 4.

Il est curieux aussi de noter que malgré le faible poids spécifique de la pierraille et la faible densité du béton qui en résulte, les résistances à la compression sont très élevées. Le béton I était naturellement le plus travaillable ; le béton III l'était suffisamment et le béton II était le plus sec, mais cependant encore susceptible de mise en œuvre sur la route.

* * *

La deuxième série d'expériences est beaucoup plus importante. Nous avons utilisé comme ballast des porphyres concassés, gracieusement mis à notre disposition par le Comptoir de Vente des Porphyres, qui a droit à mes vifs remerciements. Le ciment PHR employé provient de la Cimenterie de Haccourt et a donné les résultats suivants :

Résistance à la compression :	3 j. 332	7 j. 475	28 j. 612
Résistance à la traction :	29.2	36	39.9

La granulométrie des matériaux employés est représentée par les courbes de la figure 5.

Les dosages des divers bétons essayés sont définis ci-après, tous les matériaux étant pratiquement secs.

DOSAGES.

<i>Bétons :</i>	1 (a-b)	2	3	4	5	6	7-8
Porphyre 40/60 (en litres)	—	—	—	—	844	860	—
20/40 » »	611	610	710	716	—	—	—
5/20 » »	293	292	464	—	280	423	—
5/10 » »	—	—	—	373	—	—	815
2/5 » »	242	242	—	—	—	—	—
Sable du Rhin, sec »	281	259	260	309	262	222	435
Ciment P.H.R. (en kg.)	435	435	437	430	440	327	385
Eau (en litres)	171	185	167	180	170	151	175
C							
—	2.545	2.35	2.62	2.39	2.63	2.17	2.20
E							
Densité	2.52	2.50	2.53	2.50	2.55	2.56	2.25
Consistance	sec, peu travail.	sec, un peu plastique	sec, un peu plastique	sec, assez plastique	rude et sec, peu travail.	dur et sec, peu travail.	sec et dur peu travail.

POURCENTAGES (EN POIDS DES MATIERES SECHES).

<i>Bétons :</i>	1 (a-b)	2	3	4	5	6	7-8
Pierrailles (total)	63.50	64.50	65.—	61.5	65.—	72.5	50.—
Sable du Rhin	18.—	16.75	16.5	20.—	16.5	13.95	31.5
Ciment	18.50	18.75	18.50	18.50	18.50	13.55	18.5
Eau	7.3	8.—	7.05	8.10	7.15	6.30	8.45

Des dalles de 18 cm. d'épaisseur ont été confectionnées au moyen des dosages 1 (a-b), 2, 3, 4, 5 et 6. Le dosage 1 est sensiblement le dosage normal des Ponts et Chaussées en admettant que celui-ci comporte 350 litres de sable du Rhin à 3 % d'humidité, ce qui donne environ 281 litres de sable sec.

Deux dalles, de 12 et de 14 cm. d'épaisseur, confectionnées au moyen du dosage normal des Ponts et Chaussées (N° 1), ont été surchargées respectivement de 6 cm. et de 4 cm. de béton fin, ce qui a donné les dalles N^{os} 7 et 8. Pour ce dernier béton, étant donnée sa finesse, nous avons cru pouvoir nous dispenser de scier les cubes et les prismes d'essai hors des dalles et pouvoir mouler directement des cubes de 10 cm. de côté et des prismes de flexion. Malgré un damage énergique de ces bétons très secs, l'effet de surface a été considérable, ce qui se voyait rien qu'à l'aspect. Aussi les résultats ont-ils été insuffisants et ne sont-ils pas comparables à

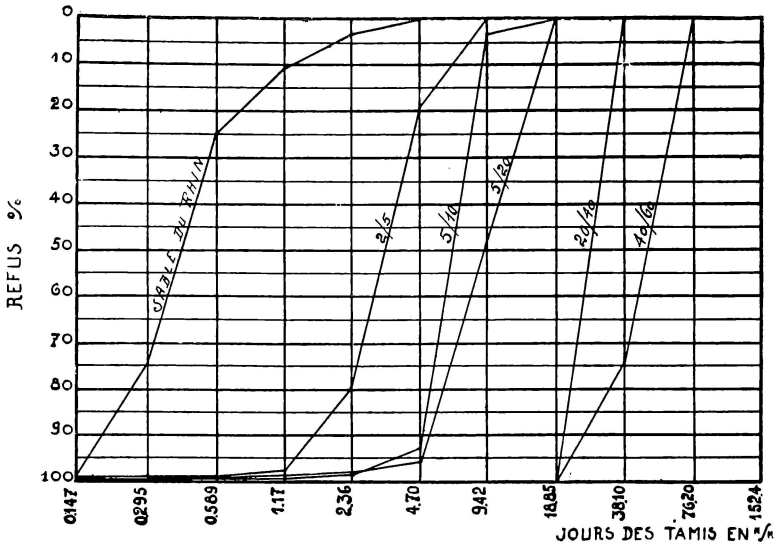


Fig. 5. — Courbes granulométriques des constituants des bétons de porphyre et sable du Rhin.

ceux des autres dosages. Il me paraît certain que les qualités du béton de route ne peuvent être exactement appréciées par les essais courants de laboratoires sur cubes ou prismes moulés; les résistances doivent être effectivement supérieures.

Les figures 6 (a, b et c) reproduisent des faces de sciage dans les divers bétons et mettent bien en évidence les différences de

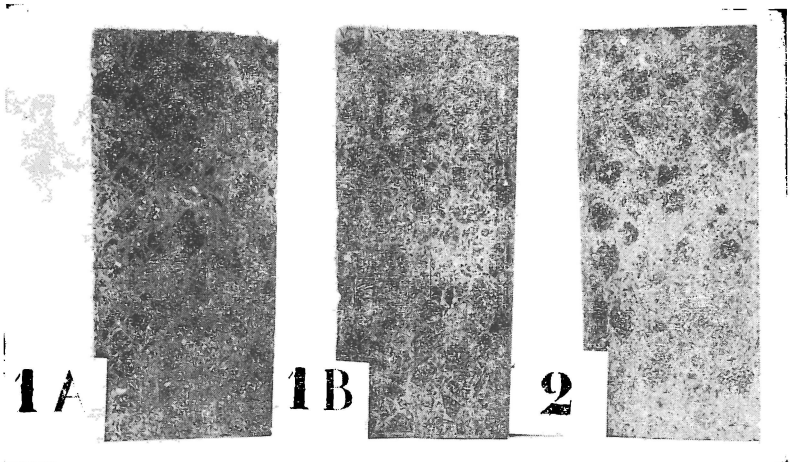


Fig. 6/a.

texture. On notera les différences entre les dosages 1, 2 et 3, l'aspect du dosage 6 et enfin celui des plaques 7 et 8, montrant les excellentes reprises du béton fin sur le béton de base plus âgé, malgré que l'on n'ait guère pris de précautions pour assurer cette reprise.

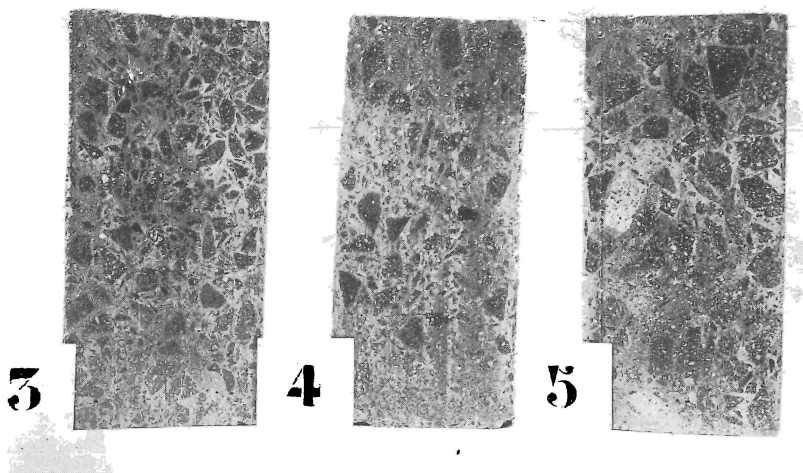


Fig. 6/b.

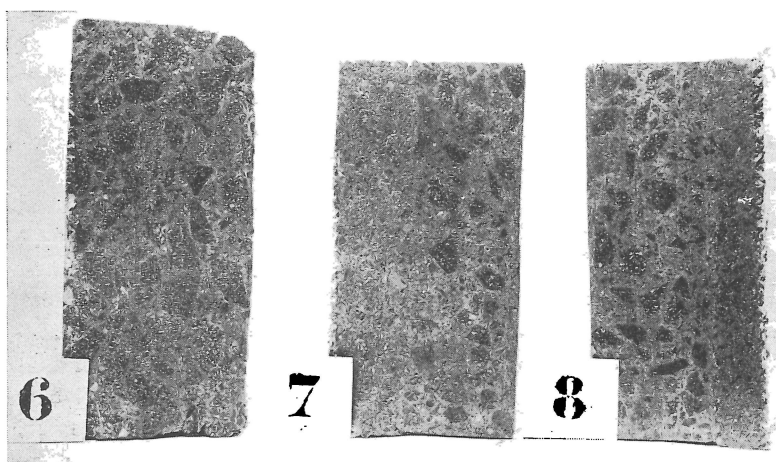


Fig. 6/c.

Les résultats des essais ont été les suivants :

Bétons :	1a	1b	2	3	4	5	6	7-8
Résistance à la compression	667.5	726	745	639	563	623	605	347
Sur cubes de 10 cm. à 56 jours (kg./cm ²)	655	793	683	637	660	—	716	378
Résistance à la flexion sur prismes de 10 cm. de largeur et 18 cm. de hauteur, portée env. 0,40 m. charge centrale (kg./cm ²)	51.5	53.1	53	53.5	45.9	44.4	50.3	36.3
	57.5	57.7	57	55.1	45.5	53.3	—	—
Résistance au choc sur cube de 10 cm. (kg./cm ²)	45.5	45.5	52.5	33	33	33	33	10.5
	68	45.5	52.5	39	45.5	22.5	33	22.5

La dalle N° 7, en béton I, âgé de 4 mois (12 cm.), recouvert de 6 cm. de béton 7, âgé de 56 jours, a donné à la flexion :

béton fin comprimé (sous la charge) : 59,5 Kgr./cm²

béton fin étendu (sur les appuis) : 58,00 Kgr./cm²

La dalle N° 8, en béton I, âgé de 4 mois (14 cm.), recouvert de 4 cm. de béton 8, âgé de 56 jours, a donné à la flexion :

béton fin comprimé (sous la charge) : 69,00 Kgr./cm²

béton fin étendu (sur les couteaux) : 70,25 Kgr./cm²

L'essai de choc est fait sur cubes de 10 cm. par le mouton de Föppl de 50 Kgr., selon la méthode définie dans le rapport de Monsieur Dantine.

La tension de flexion se calcule, conventionnellement, d'après la charge de rupture par la formule de Navier :

$$F = \frac{3}{2} \frac{Pl}{bh^2}$$

Ces résultats appellent les observations suivantes :

Les éprouvettes devaient pouvoir être essayées à 56 jours. En tenant compte de leur durée de préparation, la confection des dalles a dû être échelonnée sur un grand nombre de semaines. Pendant ce temps, il est probable que le ciment P.H.R. a subi une légère évaporation progressive, de telle sorte que les résultats en ont été affectés d'une manière de plus en plus défavorable en passant du dosage 1 au dosage 7 et 8.

Ensuite, le travail matériel très considérable d'une pareille série d'essais n'a pas permis d'effectuer un très grand nombre d'éprouvettes et les dernières n'ont pu être confectionnées avec tout le soin habituel, par suite d'une activité intense du laboratoire. Cependant, la régularité est assez bonne, surtout pour les essais de flexion et de choc.

On voit que tous les bétons essayés dépassent largement 500 Kg./cm² à la compression et 40, voire même pour la plupart, 50 Kg./cm² pour la flexion. Pour le choc, les écarts sont plus importants et la différenciation des bétons est plus grande. Ce qui est tout-à-fait remarquable, c'est la résistance à la flexion des dalles rechargées, résultat qui confirme que les faibles résistances trouvées pour le béton de recouvrement seul sont dues, comme il est dit ci-dessus, au mode opératoire. On pourrait d'ailleurs enrichir ce béton de recouvrement en ciment, mais il faudrait craindre davantage alors les effets du retrait qu'il faut éviter autant que possible.

Il est intéressant de rapporter les résultats des essais aux valeurs

du rapport $\frac{C}{E}$ en poids et du rapport $\frac{C}{S}$ en poids, ainsi que de

rapporter les résultats à la densité du béton et au poids de matière active, c'est-à-dire de ciment. On ne constate aucune tendance à une loi déterminée. Cela provient essentiellement de la dispersion inévitable des résultats d'un tel nombre d'essais, peut-être aussi de l'éventation progressive du ciment. Toutefois, je pense que les règles d'Abrams concernant l'influence du facteur C/E, ne sont pas applicables à ces bétons. M. Feret a rappelé encore récemment, dans « Science et Industrie », le caractère trop sommaire de ces règles, qui valent surtout pour des bétons mouillés ou très plastiques. On comprend aisément que les bétons très secs de routes échappent à ces règles; le pourcentage de vides inévitable influence notamment sur la résistance d'une manière appréciable.

Par rapport au poids de ciment, le gros béton 6 l'emporte sur tous les autres en ce qui concerne la résistance à la compression et à la flexion, tandis que les bétons 1 et 2 l'emportent en ce qui concerne le choc.

Il semble bien apparent que ce n'est pas du poids de ciment que dépend la résistance au choc, mais de la teneur en matières fines. On constate que la résistance au choc distingue deux classes de bétons: ceux qui contiennent du 2/5 et ceux qui n'en contiennent pas. Le 2/5 ne paraît guère influencer sur les autres propriétés.

Il est établi par ces essais que les constituants du béton selon le dosage officiel des Ponts et Chaussées permettent, avec un même poids de ciment, d'établir des dosages équivalents ou plus résistants, par diminution des éléments les plus fins, sable et 2/5. On peut d'ailleurs supprimer le 2/5 en vue d'obtenir des dosages plus simples. Comme contre-partie, la résistance au choc sera diminuée, semble-t-il. Mais on peut aussi, dans de tels dosages, diminuer le ciment et obtenir encore des résultats satisfaisants.

L'emploi de pierrailles 40/60 comme calibre maximum ne s'impose peut-être par aucune raison importante (voir semaine de la route à Paris, « Revue générale des routes », Décembre 1931). Néanmoins il permet d'établir des bétons ayant largement les résistances voulues et ce avec une sérieuse économie de ciment (béton 6).

Enfin, il est possible d'établir des dosages de béton fin pour des routes à double couche ou pour recharger des routes usées. Ces rechargements paraissent possibles avec d'excellents résultats.

* * *

Dans une troisième série d'expériences, faite antérieurement avec le concours de plusieurs élèves-ingénieurs effectuant un stage de vacances au laboratoire, des recherches plus systématiques ont été faites sur les dosages, par la détermination des granulométries et des variations des compacités de mélanges divers. Les résistances des bétons n'ont été déterminées que sur cubes de 20 cm. et de 10 cm. de côté, moulés directement et rompus par compression à divers âges. Il s'agit donc d'une étude comparative, les résistances trouvées étant vraisemblablement inférieures à celles que l'on trouverait dans la route.

Les essais ont été effectués surtout sur des concassés de grès, gracieusement mis à notre disposition par la Ligue pour la défense des Carrières de grès à Liège, et plus particulièrement par la Société Socogrès, qui a droit à mes vifs remerciements. Les plaquettes de porphyre, du type courant pour béton armé, avaient la même provenance que les matériaux de porphyre employés pour les essais de la 2^{me} série. La figure 7 représente les courbes granulométriques de tous les matériaux employés. On a établi, par expérience directe que le maximum de compacité des mélanges

Grès 2/10 — sable du Rhin	(22 % de vides)
Grès 5/20 — sable du Rhin	(18 % de vides)
Grès 20/30 — grès 2/10	(28 % de vides)
Grès 5/20 — grès 2/10	(38 % de vides)
Porphyre 3/15 — sable du Rhin	(22 % de vides)

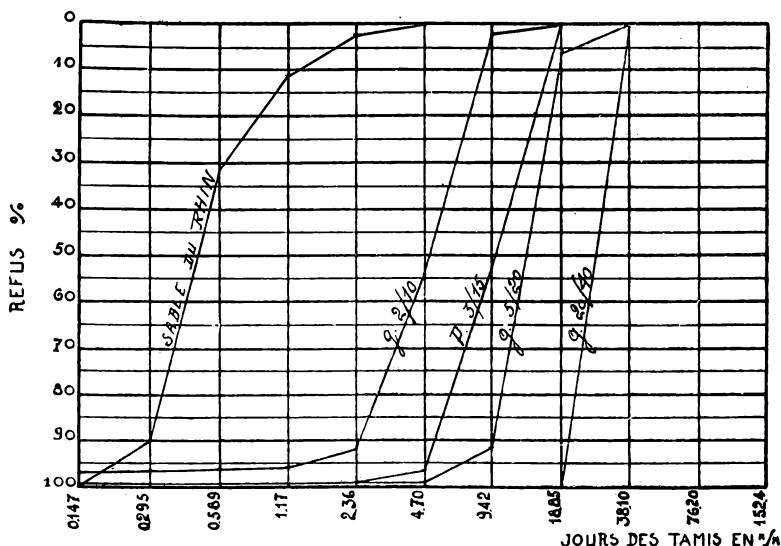


Fig. 7.

correspond toujours à environ 40 % de fin et 60 % de gros en poids.

On constate, en outre, que la compacité est d'autant plus grande que les 2 constituants sont plus écartés les uns des autres, dans les limites des matériaux employés. Le meilleur mélange binaire est : 60 % de 5/20 + 40 % de sable de Rhin.

L'étude des mélanges ternaires :

- grès 20/40 ;
- grès 2/10 ;
- sable du Rhin ;

suivant les proportions :

$$\frac{\text{grès 20/40}}{\text{grès 2/10}} = 2, 1,33 \text{ et } 1.$$

a montré que les compacités décroissaient en même temps que le rapport ci-dessus, mais beaucoup plus vite.

Le maximum de compacité (environ 14 % de vides) pour la valeur 2 du rapport précité, correspondait à environ 25 % de sable du poids total, soit :

50 % de 20/40 25 % de 2/10 et 25 % de sable.

Le maximum de compacité pour la valeur 1,33 du rapport précité (environ 16,5 % de vides) correspondait à :

44,5 % de 20/40 33,3 % de 2/10 et 22,2 % de sable.

D'après un diagramme triangulaire, le maximum absolu de compacité correspondrait à environ :

60 à 55 % de 20/40 et 40 à 45 % de sable.

Cependant, pour former un béton, ce dernier dosage contiendrait trop de sable et exigerait une forte quantité de ciment pour donner une grande résistance ; finalement sa compacité en subirait un détriment et ce béton serait très coûteux.

Au contraire, le béton à :

44,5 % de 20/40 33,3 % de 2/10 et 22,2 % de sable.

contient le moins de sable et est susceptible avec le moins de ciment de donner une forte résistance. C'est ce que l'expérience confirme. Il est à remarquer que dans ce dosage, les proportions relatives de 20/40 et de 2/10 satisfont très sensiblement au maximum de compacité du mélange de ces deux constituants.

On constate aussi que les compacités des mélanges ternaires sont à peine plus fortes que celles des mélanges binaires, tels que : 60 % de 5/20 et 40 % de sable.

Seulement, la quantité de sable est beaucoup plus grande dans les mélanges binaires et il en résulte que, pour obtenir une résistance suffisante, il faut beaucoup de ciment, d'autant plus que la quantité d'eau doit aussi être automatiquement augmentée. C'est ce qui conduit d'ailleurs à la constatation déjà faite par M. Feret que, pour un poids de ciment donné, le meilleur béton ne correspond pas au maximum de compacité du mélange des matières inertes, mais plutôt au minimum de sable compatible avec un béton plein et travaillable. C'est aussi ce qui exigera le minimum d'eau, ce qui est tout bénéfique pour la résistance.

L'expérience montre que le mélange de matières inertes le plus favorable ne satisfait nullement à la courbe de Fuller : $p = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$ mais s'en écarte souvent assez considérablement.

Il n'y a pas une concordance beaucoup meilleure avec la courbe de Fuller-Bolomey du mélange comprenant le ciment, dont l'équation est $p = 12 + (100 - 12) \sqrt{\frac{d}{D}}$, du moins en ce qui concerne l'allure de la courbe réelle, qui chevauche irrégulièrement par rapport à la courbe idéale et s'en écarte souvent beaucoup. Le module de finesse est cependant en général assez voisin de celui de la courbe de Fuller-Bolomey, quoique souvent un peu plus petit, à

cause de l'influence prédominante de la quantité de ciment sur la résistance.

Ce qui caractérise tous les bétons de routes, c'est qu'ils ont plus de gros que n'exigent les courbes de Fuller et de Fuller-Bolomey, moins de sable et plus de ciment. La granulométrie favorable des bétons de route ne paraît d'ailleurs pas réductible à une courbe continue du genre de la courbe de Fuller-Bolomey.

En ce qui concerne la résistance pour un même poids de matières inertes, l'influence de la quantité de ciment est prédominante.

Mais pour un même poids de ciment, la résistance est d'autant plus grande qu'il y a plus de pierres, et moins de sable, le béton restant cependant bien plein.

Si l'on ne mélange qu'une catégorie de pierres au sable, on prendra délibérément plus de 60 % de pierres et moins de 40 % de sable et on déterminera la quantité de ciment minimum qui, avec cette quantité de sable, donne encore un béton plein. En ajoutant plus de ciment, on augmentera la résistance.

On pourra normalement prendre 66 à 70 % de pierres et 34 à 30 % de sable. On ne pourra guère admettre moins de 400 kg. de ciment.

Lorsque l'on choisira des mélanges à trois matières inertes, on veillera à avoir des écarts granulométriques assez grands, par exemple 20/40 — 2/10 et sable 0/3 et on mélangera les éléments les plus gros 20/40 et 2/10 au maximum de compacité, soit environ : 60 % de 20/40 et 40 % de 2/10.

Un pareil magma de pierrailles a à peu près 28 % de vides et demande un volume de sable un peu moindre pour donner un béton compact. Ce mélange inerte étant déterminé, plus on ajoutera de ciment, plus la résistance sera grande. Mais l'expérience montre qu'à partir de 300 à 350 kg. de ciment par m³, pour environ 7 % d'eau du poids des matières sèches, on dépasse largement les résistances requises.

Il a été étudié ainsi toute une série de dosages, qui justifient les observations ci-dessus et qui sont en règle générale très économiques quant à la proportion de ciment.

Nous ne citons que les résultats les plus intéressants des 17 dosages étudiés. En général, on a comparé seulement les résultats à la compression à 28 jours, sur cubes moulés, de 10 et 20 cm. de côté. Nous retiendrons les dosages dont les résistances considérées dépassent nettement 400 kg./cm² à 28 jours. On peut admettre qu'ils atteindraient 500 kg./cm² à 56 jours.

I. Grès 5/20	1000 litres	67 %	59 %	$\Delta = 2.476$
Sable du Rhin	430 litres	33 %	29 %	$m = 4.76$
Ciment	275 kg.	—	12 %	Béton plastique
Eau	170 litres	—	7,3 %	

$$R. 28 \text{ (à l'air humide)} = \frac{415 + 464}{2} = 440 \text{ Kg./cm}^2.$$

II. Grès 20/40	720 litres	48 %	44.4 %	$\Delta = 2.44$
Grès 2/10	340 litres	24 %	22.2 %	$m = 5.18$
Sable du Rhin	350 litres	28 %	21.3 %	Béton plastique
Ciment	300 kg.	—	12.1 %	
Eau	170 litres	—	7 %	

$$R. 28 = \frac{395+432+430+438+468}{5} = 433 \text{ Kg./cm}^2.$$

III. Grès 20/40	610 litres	44.5 %	38.2 %	$\Delta = 2.47$
Grès 2/10	460 litres	33.3 %	28.6 %	$m = 5.04$
Sable du Rhin	260 litres	22.2 %	19.1 %	Béton plastique
Ciment	330 kg.	—	14.1 %	
Eau	170 litres	—	7 %	

$$R. 7 = 440 \text{ Kg./cm}^2.$$

$$R. 28 = \frac{619+636+650+622}{4} = 621 \text{ Kg./cm}^2.$$

$$R. 365 = 860 \text{ Kg./cm}^2.$$

IV. Grès 20/40	600 litres	44.5 %	39.3 %	$\Delta = 2.46$
Grès 2/10	430 litres	33.3 %	29.5 %	$m = 5.18$
Sable du Rhin	260 litres	22.2 %	19.7 %	Béton plastique
Ciment	260 kg.	—	11.5 %	
Eau	160 litres	—	7 %	

$$R. 28 = \frac{430+420+403+400+411}{5} = 413 \text{ Kg./cm}^2.$$

V. Grès 5/20	565 litres	42.5 %	35.4 %	$\Delta = 2.48$
Grès 2/10	330 litres	25.5 %	21.1 %	
Sable du Rhin	355 litres	32.0 %	26.6 %	
Ciment	400 kg.	—	16.9 %	
Eau	200 litres	—	8,5 %	

$$R. 28 = \frac{580+555+550}{3} = 562 \text{ Kg./cm}^2.$$

VI. Porphyre 3/15	1000 litres	68 %	57.5 %	$\Delta = 2.52$
Sable du Rhin	400 litres	32 %	27.0 %	$m = 4.19$
Ciment	360 kg.	—	15.5 %	Béton plastique
Eau	195 litres	—	8.4 %	

$$R. 28 = \frac{546 + 558}{2} = 552 \text{ Kg./cm}^2.$$

VII. Porphyre 3/15	940 litres	64 %	53 %	$\Delta = 2.52$
Sable du Rhin	520 litres	36 %	30 %	$m = 3.90$
Ciment	450 kg.	—	17 %	assez plastique
Eau	450 kg.	—	7,5 %	

$$R. 28 = \frac{555 + 562}{2} = 558 \text{ Kg./cm}^2.$$

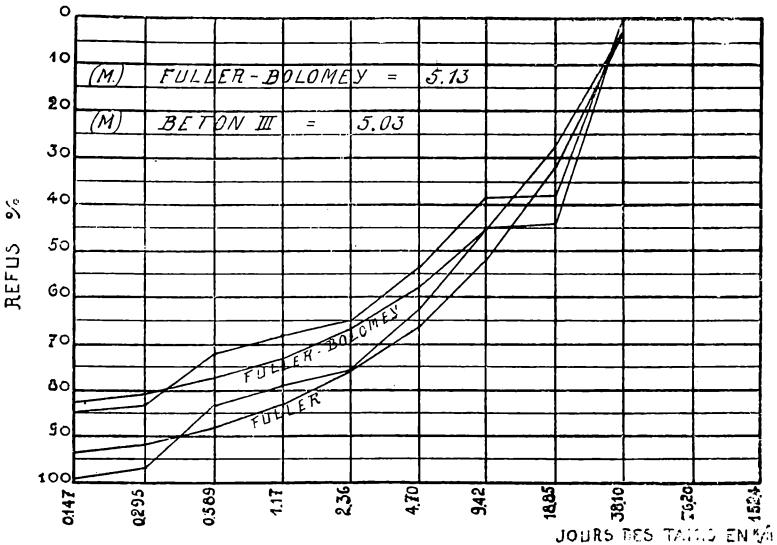


Fig. 8. — Courbes granulométriques du béton III.

Tous ces bétons avaient été confectionnés avec un ciment Portland artificiel à durcissement rapide ayant donné les résultats suivants aux essais sur mortier normal battu :

Résistance à la compression :	1 j. 332	3 j. 438	7 j. 528	28 j. 620
Résistance à la traction :	29.6	33.2	34.8	36.6

Les figures 8, 9 et 10 reproduisent les courbes granulométriques des dosages III, V, VI et VII, sans et avec ciment, comparées aux courbes de Fuller et de Fuller-Bolomey. Ces diagrammes justifient les observations faites précédemment sur l'insuffisance des courbes de Fuller et de Fuller-Bolomey en vue de l'étude des compositions de bétons pour routes.

Comme contre-épreuve de cette impropriété de la courbe de Fuller-Bolomey pour les bétons de route, on a fait un béton en s'astreignant et en parvenant à suivre presque exactement la courbe de Fuller-Bolomey (fig. 11). Ce dosage, dont certains termes,

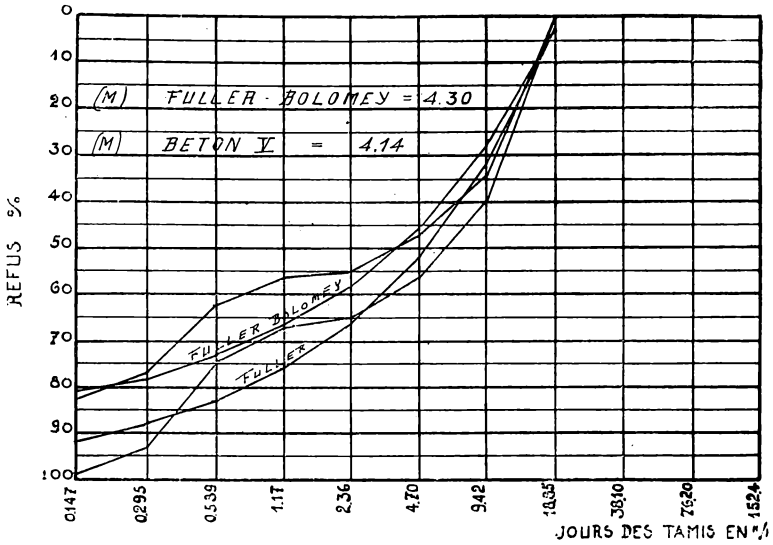


Fig. 9. — Courbes granulométriques du béton V.

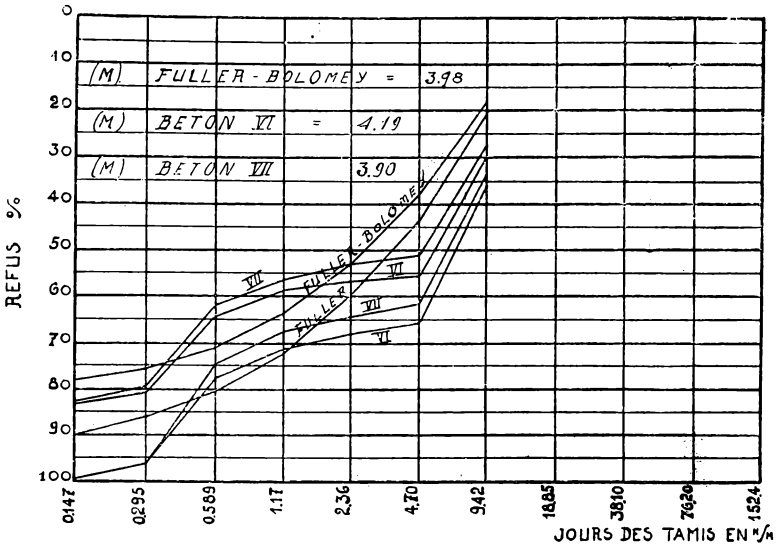


Fig. 10. — Courbes granulométriques des bétons VI et VII.

notamment la proportion de $\frac{2}{5}$, étonnant, n'a d'autre justification que la réalisation de la courbe de Fuller-Bolomey. Les résultats sont les suivants :

$$R. 28. = \frac{356 + 458}{2} = 407 \text{ Kg./cm}^2.$$

le béton ayant été confectionné avec un ciment Portland artificiel normal ayant pratiquement à 28 jours les qualités requises du C.P.H.R. On voit que, malgré la grande quantité de ciment ce béton donne des résultats beaucoup moins bons que certains bétons précédents, sensiblement moins riches en ciment. Il vaut donc

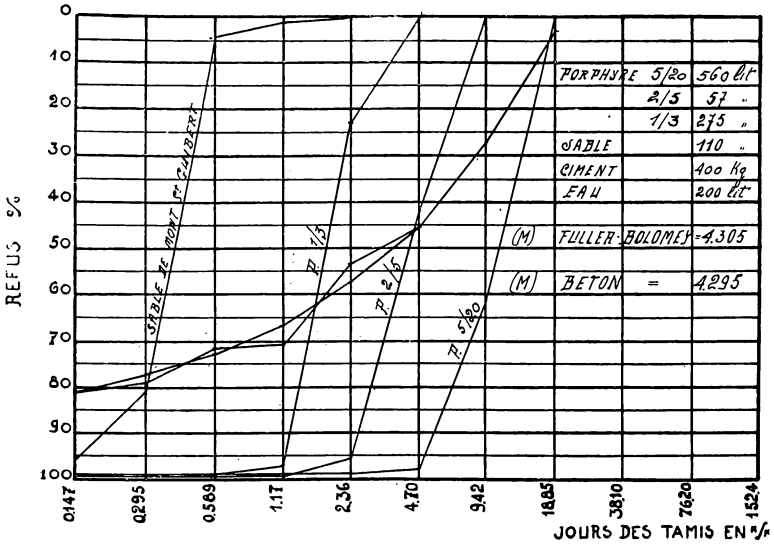


Fig. II. — Béton suivant la courbe de Fuller-Holomey.

mieux s'en tenir aux règles de compacité énoncées ci-dessus qu'aux courbes de Fuller et de Fuller-Holomey. Celles-ci donnent certes de bons dosages, mais non les meilleurs ni les plus économiques.

Il me semble que l'on pourrait adopter la règle suivante pour la composition des bétons de routes. On fera choix d'un ballast, éventuellement composé, selon ce qui est dit plus haut, et on en déterminera le pourcentage de vides directement par pesée ou par la méthode de remplissage d'eau, méthode suffisamment précise lorsque les pierres sont dures et peu poreuses (porphyre, grès, quartzite).

On ajoutera au mélange un volume de mortier égal à 1.50 ou 1.60 fois le volume des vides, pour obtenir une travaillabilité suffisante.

En admettant 3.150 comme poids spécifique du ciment, 2.65 comme poids spécifique du sable du Rhin et de la pierre, en appelant c , s et p les volumes absolus de ciment, de sable et de pierre et v le pourcentage des vides des pierres, déterminé par expérience comme il est dit ci-dessus, on écrira :

$$\frac{c+s}{0.7} = 1.60 \frac{v}{1-v} p \quad \text{ou} \quad \frac{c+s}{0.75} = 1.50 \frac{v}{1-v} p$$

relations qui donnent l'équation unique

$$c+s = 1.125 \frac{v}{1-v} p$$

En poids on aura :

$$\frac{C}{3.150} + \frac{S}{2.65} = 1.125 \frac{P}{2.65} \frac{v}{1-v}$$

ou finalement :

$$0.84 + \frac{S}{C} = 1.125 \frac{P}{C} \left(\frac{v}{1-v} \right)$$

C, S et P étant les proportions en poids de ciment, de sable et de pierres totales.

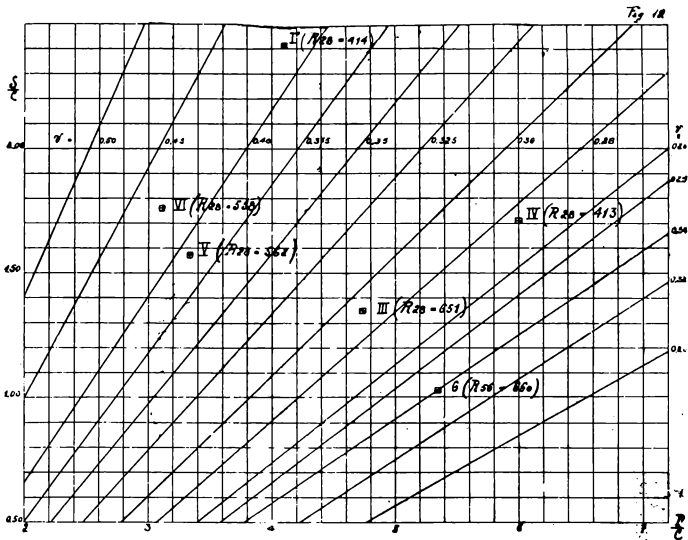


DIAGRAMME POUR LE DOSAGE DES BETONS DE ROUTES

Fig. 12.

Le diagramme de la figure 12 reproduit la relation ci-dessus pour un domaine étendu de valeurs de v . On peut facilement vérifier par ce diagramme que les dosages III, IV, V et VII de la 3^{me} série d'expériences satisfont à la relation ci-dessus, sachant que l'on a trouvé expérimentalement les valeurs suivantes de v :

Grès 2/10	41 %
Grès 5/20	42 %
Grès 20/40	42 %
60 % 20/40 + 40 % 2/10	28 %
60 % 5/20 + 40 % 2/10	38 %
Porphyre 3/15	44 %

Le dosage I de cette série ne satisfait pas. Le diagramme donne un dosage plus riche en ciment, qui a d'ailleurs été étudié. Il comportait :

Béton I'. Grès 5/20	930 litres	63 %	54.5 %	$\Delta = 2.472$
Sable du Rhin	475 litres	37 %	32.2 %	$m = 4.49$
Ciment	300 kg.	—	13.3 %	plastique
Eau	190 litres	—	8.5 %	

$$R. 28 = \frac{441 + 452 + 396 + 366}{4} = 414 \text{ Kg./cm}^2.$$

En d'autres termes, le diagramme de la figure 12 convient très bien pour les mélanges à squelette de ballast très compact, la quantité assez grande de mortier étant destinée à assurer une travaillabilité suffisante. Pour les squelettes moins compacts, on peut réduire de 5 à 10 % les proportions de ciment et de sable établies selon le diagramme de la figure 12.

Le remarquable béton 6 de la 2^{me} série d'expériences correspondrait au diagramme de la figure 12 si v était égal à 0.24. Malgré le mélange favorable de 40/60 et de 5/20, il est certain que le degré de vides (qui n'a pas été mesuré) n'était pas aussi faible. Il devait être plutôt voisin de 0.30, le dosage correspond donc à une moindre quantité de mortier qu'il n'est prévu à la figure 12, aussi est-il assez peu travaillable.

Pour ce qui est de la quantité d'eau de mouillage, elle sera en moyenne de 7 % du poids des matières sèches et variera vraisemblablement entre 6.5 et 8 %.

Il faudrait, pour être complet, délimiter sur le diagramme le domaine des dosages susceptibles de donner 400 ou 500 kg./cm² de résistance à la compression à 56 jours. Je me suis borné à reporter sur la figure 12 les points représentatifs de 6 dosages de qualité, précédemment définis, et satisfaisant à la règle de dosage précitée. Ces points délimitent un domaine assez étendu dans l'intérieur duquel on trouve toute une gamme de compositions satisfaisantes.

Les résistances augmenteront naturellement lorsque $\frac{P}{S}$ et $\frac{S}{C}$ diminueront, l'influence de $\frac{S}{C}$ étant prépondérante. L'économie

alliée à la résistance conduit donc à de fortes valeurs de $\frac{P}{S}$, conjuguées avec d'assez faibles valeurs de $\frac{C}{C}$. C'est ainsi que les bétons III et 6, les plus résistants de ceux qui sont figurés au diagramme de la figure 12, sont aussi des dosages relativement économiques.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

Il n'y a aucune raison de se tenir à un dosage unique standard pour les bétons de routes. La présente note contient une règle de composition et un choix de dosages très convenables pour les bétons de routes, se distinguant par des avantages divers, de simplicité de composition et d'économie de prix de revient. Il semble qu'il y aurait intérêt à simplifier le dosage des Ponts et Chaussées par suppression du 2/5. Cet élément est susceptible d'altérer la qualité par erreur sur la mesure du volume et introduction d'eau, par suite de l'influence de l'humidité variable, mais surtout parce qu'il est susceptible d'apporter des poussières et des matières terreuses.

Les dosages passés en revue présentent des caractères très distincts.

Il y a une catégorie de gros bétons, à grande compacité de pierres et contenant de ce fait peu de mortier, mais ayant une forte résistance à la compression et à la flexion, une moindre résistance au choc. Ces bétons, économiques et assez faciles à mettre en œuvre en grande épaisseur, conviennent pour les dalles épaisses et un trafic lourd et rapide, mais à bandages élastiques. Ces bétons conviennent aussi pour la sous-couche, d'environ 14 cm. d'épaisseur, d'une route à double couche de 18 à 20 cm. d'épaisseur totale, à trafic quelconque.

Pour les trafics relativement peu lourds, mais à bandages métalliques, des dosages relativement simples et riches en mortier (sable et ciment) conviendraient bien et pourraient être mis en œuvre en épaisseurs moindres (12 à 15 cm.).

Pour la couche supérieure des routes à double couche ou pour recharger une route usée, il est possible de faire des bétons assez fins, faciles à mettre en œuvre sous de faibles épaisseurs, et ayant à la fois de fortes résistances à la compression et à la flexion et au choc (par exemple le béton VI ou VII de la 3^{me} série).

Je pense que cette gamme étendue de qualités de bétons de routes est une des propriétés les plus favorables au succès de la route en béton.

Après que la confection mécanique de ces routes, que je préconisais au 1^{er} Congrès à Liège en 1930, a depuis lors fait ses preuves certaines en Belgique, de nouveaux progrès, notamment au point de vue du prix de revient, peuvent être réalisés par l'expérience de nouveaux dosages. C'était l'opinion exprimée par M. Bouteville à la Semaine de la route à Paris en 1931. Toutefois pour serrer l'économie de plus près sans aléas, il sera nécessaire de contrôler davantage les dosages sur le chantier qu'il n'est fait actuellement. Cela consistera éventuellement en une correction par pesées des dosages exprimés en volumes.

* * *

Il me reste à rendre hommage à l'important concours apporté à ce travail par Messieurs R. Dantinne et R. Spronck, ainsi que par M. R. Jacquemin, actuellement ingénieur attaché au laboratoire, et qui fut le principal artisan de la 3^{me} série d'expériences, alors qu'il était encore élève-ingénieur en 1932.
