

UNIVERSITE DE LIEGE.

COURS DE CONSTRUCTIONS DU GENIE CIVIL.

N° 15.

Résultats d'essais effectués sur
divers matériaux pierreux
Belges

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.

RESULTATS D'ESSAIS EFFECTUES SUR DIVERS MATERIAUX PIERREUX BELGES.

Dans un rapport présenté au premier Congrès national de la route, à Liège en 1930 (1), j'ai fait un exposé critique des essais principaux des matériaux pierreux pour routes. J'ai mis en évidence leur caractère souvent conventionnel et assez peu en rapport avec le processus de dégradation réel des matériaux. A ce propos, je faisais allusion à une étude allemande relatant un essai de choc sur ballast (2) et j'établissais un rapprochement entre cet essai et mes constatations d'écrasement d'un ballast de laitier, enrobé de goudron, sous l'effet d'une compression statique relativement faible. Ces observations sur la fragilité statique et dynamique du ballast ont donné lieu, au premier Congrès, à une discussion assez importante, notamment au sujet du poids le plus favorable des cylindres (3). Le résultat de ces échanges de vues a été exprimé dans le premier vœu de la section A, qui souhaite que les laboratoires s'ingénient à tirer des essais toutes les conclusions susceptibles d'être utiles aux exécutants.

M. Marcotte, directeur du Laboratoire d'essais physiques de l'École nationale des Ponts et Chaussées, à Paris, a approuvé entièrement mon point de vue dans un article documenté consacré à mon rapport. (4)

En septembre 1931 s'est tenu à Zurich un important Congrès international d'essai des matériaux. La question des pierres naturelles était à l'ordre du jour et a fait l'objet d'intéressants rapports et d'une discussion approfondie. (5) Dans l'ordre d'idées que j'envisage, il faut citer surtout le rapport du Professeur H. Burchartz, du Laboratoire d'essais des matériaux de l'Etat à Berlin-Dalhem. (6) Ce rapport passe en revue, d'une manière très analytique, la plupart des essais pratiqués et décrit particulièrement les essais de compression statique et de choc sur ballast, pratiqués à Berlin-Dalhem, ainsi que l'essai de choc sur éprouvette cubique par le mouton de Föppl, l'essai d'usure réciproque à la machine Deval et d'autres procédés analogues. Il souligne la dualité entre les essais destinés à caractériser les matériaux au point de vue de leurs propriétés physiques et ceux destinés à déterminer leurs qualités de mise en œuvre. M. Burchartz estime que ces derniers essais

ne peuvent être inspirés du souci de reproduire trop servilement les conditions de la pratique, qu'ils doivent rester « purs », c'est-à-dire soustraits à des influences incontrôlables et être comparables pour des matériaux différents.

En faisant allusion aux travaux du Congrès de Liège, dans une contribution à la discussion du Congrès de Zurich (5, pages 576-578), j'ai brièvement critiqué ce point de vue et exprimé l'opinion que les essais visant les qualités de mise en œuvre sont plus suggestifs pour le constructeur et peut-être plus sûrs. Pour les rendre tout à fait convenables, il suffit de les normaliser, après une étude préparatoire suffisante. J'exprimais l'opinion qu'il serait désirable de se mettre d'accord, internationalement, sur un petit nombre d'essais normalisés et aussi caractéristiques que possible.

L'orateur suivant du Congrès de Zurich, Monsieur l'Ingénieur R. Schlyter, Chef de la section des matériaux de construction au Laboratoire d'essais des matériaux de l'État suédois, soutint le même point de vue (5, page 578).

J'ai tenu à apporter au deuxième Congrès belge de la route des éléments plus précis d'appréciation et de discussion des essais des matériaux pierreux, dans le cadre des considérations précédentes. Je me conforme ainsi au dernier vœu de la Section A du Congrès de Liège, qui demandait que les questions traitées restassent à l'ordre du jour des Congrès successifs jusqu'à solution satisfaisante.

Dans cet esprit et faisant suite à mon rapport au Congrès de Liège, j'ai prié Monsieur Dantine, Chef de travaux au Laboratoire d'essais du Génie civil de l'Université de Liège, d'établir un rapport décrivant avec précision les méthodes et machines d'essais utilisées pour les matériaux pierreux. Cela constitue, je pense, une introduction indispensable à la définition et à la normalisation des essais, préalable à la rédaction de cahiers des charges, question qui figure à l'ordre du jour des travaux de l'Association permanente.

Parmi les machines, j'attire surtout l'attention sur le mouton de choc que nous avons fait construire, en vue d'opérer non seulement le choc sur cubes selon Föppl, mais aussi le choc sur ballast selon la méthode de Berlin-Dalhem, ainsi que le choc sur ballast selon la méthode de Monsieur Stübel, de Cassel (Allemagne), Directeur du service central d'essais des matériaux pierreux des Chemins de fer allemands (7, 8 et 9). Ces essais sont définis dans le rapport de Monsieur Dantine, ainsi que l'essai d'écrasement statique du ballast et celui de la machine Deval.

Les essais relatés ci-après ont été effectués sur quatre natures

de pierres et de ballast d'origine belge, couramment employés. Je les désignerai dorénavant par les lettres A, B, C et D. Tous les matériaux nécessaires aux essais nous ont été fournis à titre bénévole et je dois remercier pour leur gracieux concours : le Comptoir de vente des Carrières de porphyre à Bruxelles, la Ligue de Défense des Carrières de Grès à Liège et spécialement, je pense, la Société Socogrès, les Carrières de Quartzite de Dongelberg et la Société Anonyme John Cockerill (ballast de laitier).

Les essais ont été effectués, en grande partie, au cours de leur dernière année d'étude, par Messieurs les ingénieurs Foulon, Karassik, Pirard et Szapiro, sous la conduite constante de Monsieur Dantinne, selon le programme que j'avais élaboré. Autant que de besoin, les résultats douteux ou imparfaits ont été contrôlés ou corrigés par des contre-essais effectués par les soins du personnel ordinaire du laboratoire. Les résultats sont donc garantis par une répétition suffisante et un contrôle réciproque. Tous les collaborateurs que j'ai nommés et les autres membres du personnel du laboratoire, ont donc pris une grande part au travail important exigé par ces essais.

I. ESSAIS SUR ROCHES.

POIDS SPECIFIQUES REELS DES ROCHES (déterminés au moyen du picnomètre):

A	B	C	D
2.758	2.675	2.670	3.13
2.756	2.640	2.668	3.11
2.760	2.650	2.679	2.87
<hr/>			
Moyennes : 2.758	2.655	2.675	3.07

POIDS SPECIFIQUES APPARENTS DES ROCHES, DANS L'AIR, déterminés par la balance hydrostatique :

A	B	C	D
—	2.635	2.66	2.805
—	2.622	2.64	2.74
—	2.645	2.63	2.84
<hr/>			
Moyennes : 2.733	2.634	2.643	2.795

PROSITE DES ROCHES, DANS L'AIR :

A	B	C	D
0,91 %	0,89 %	1,19 %	8,95 %

Ces chiffres sont des moyennes déduites des poids spécifiques moyens réels et apparents dans l'air. Etant obtenus par les différences assez petites de quantités peu différentes, leur précision

en changeant la machine et le module de l'éprouvette. Les essais au mouton américain standard ont toujours accusé une dispersion très considérable, que j'ai été tenté d'attribuer surtout au petit module de l'éprouvette. Le résultat me paraissait plutôt caractéristique de chaque éprouvette et de ses défauts, non de la matière. C'est pourquoi je n'ai pas compris systématiquement dans le programme l'essai au mouton américain. Il semble que les résultats du mouton de Föppl, qui opère sur des éprouvettes plus importantes, dont la rupture est généralement très violente, indiquent plutôt que, pour certaines roches, l'essai de choc en lui-même est peu régulier.

Il faut reconnaître que le processus de l'essai de choc est plus mal connu encore que celui de l'essai de compression. L'effet interne des percussions est, dans l'état actuel de la science, un mystère.

Faut-il en déduire que l'essai doit être écarté. Ce qui fait hésiter à répondre par l'affirmative, c'est la tenue différente de la roche B, dont la constance au choc est remarquable, la dispersion des résultats étant moindre que celle de l'essai de compression statique. Ensuite, il y a les différences d'ordre de grandeur des résultats.

Si l'essai est pris en considération, il faudrait opérer au moins sur 6 à 12 éprouvettes et il faut reconnaître que les chiffres précités rendent malaisée la fixation d'une spécification. Un autre point de vue serait de ne considérer cet essai comme caractéristique de qualité et comme contrôle que pour les roches du type B. Il est logique d'exprimer le chiffre obtenu en Kg.cm/cm^3 , c'est-à-dire en Kg./cm^2 . Bien entendu, il n'a pas le caractère d'une tension, mais bien celui d'un travail de rupture par unité de volume.

J'insiste encore sur le fait que, pour obtenir des résultats réguliers avec la roche B, il faut des cubes dont les faces perpendiculaires à la direction du choc soient parfaitement planes et parallèles. Un échantillon de la roche B a donné 462 Kg.cm/cm^3 . Il a été détruit au 21^me coup, mais il était complètement fêlé par flexion après le 19^me coup. Tandis que les cubes à faces bien planes et parallèles cassent net au dernier coup, d'une manière d'ailleurs très violente.

Usure sur meule sablée, au moyen de sable des dunes, la charge des éprouvettes étant de 250 gr./cm^2 et le sable étant renouvelé à raison de 500 cm^3 par 500 tours de la meule.

L'usure est exprimée en grammes par cm^2 .

Cubes de 5 cm. de côté :

A	B	C	D
0.278	0.748	0.328	0.844
0.323	0.738	—	0.928

Cubes de 7 cm. de côté :

A	B	C	D
0.355	0.870	0.252	1.245
0.429	0.862	0.264	1.270

Ces chiffres d'usure correspondent à 2000 tours de la meule, c'est-à-dire à un parcours de 2.880 mètres.

Les chiffres moyens en grammes/cm², transformés en usure moyenne en millimètres, sont les suivants :

Cubes de 5 cm. de côté :

A	B	C	D
1,10	2,82	1,24	3,17

Cubes de 7 cm. de côté :

A	B	C	D
1,44	3,29	0,98	4,5

Ces chiffres sont des moyennes. L'expérience montre :

1° que l'on commet des erreurs souvent appréciables en mesurant l'usure directement en mm, car l'usure n'est pas toujours uniforme ;

2° que l'usure des roches est variable, même pour une seule éprouvette. On le constate en mesurant l'usure sur 3000 tours tous les mille tours par exemple ; les écarts sont souvent très considérables. A plus forte raison varient-ils d'une éprouvette à l'autre, pour des roches de même nature. C'est un essai qui donne aussi peu de constance de résultats ; cependant les **ordres de grandeur** sont bien déterminés. De nouveau, les écarts les plus importants se rencontrent chez les roches A et C, dont les résultats sont d'ailleurs les plus favorables ;

3° la dimension des éprouvettes influe sur le chiffre d'usure, de même d'ailleurs qu'un grand nombre d'autres circonstances, mais d'une manière assez complexe, de telle sorte que toutes ces influences, y comprises celles provenant de la roche même, se contrarient et peuvent se masquer.

Il en résulte que l'essai d'usure sur meule sablée ne fixe qu'un ordre de grandeur et que des exigences trop draconiennes pour cet essai risquent de faire rebuter de bonnes roches. L'interprétation de l'essai d'usure sur meule sablée demande donc une grande circonspection. Cet essai semble devoir donner lieu à des spécifications différentes pour les divers types de roches.

II. ESSAIS DE BALLAST.

Certains de ces essais sont relativement nouveaux et peu connus. On peut estimer qu'ils ont tous le caractère d'essais relatifs aux qualités de mise en œuvre de la roche concassée. Par leur dépendance de la forme sous laquelle se présente le ballast, on peut penser aussi que leurs résultats sont influencés par l'équipement et l'exploitation des ballastières. Il est certain cependant que la constitution du ballast dépend beaucoup de la nature et des qualités particulières de la roche. A ce point de vue, les essais de ballast seraient représentatifs aussi des propriétés de la roche. M. Stübel (7, 8 et 9) estime que l'on peut vérifier si une roche possède une résistance de l'ordre de 1500 kg./cm² à la compression sur cube par le moyen de l'essai de compression statique du ballast, dont il est question ci-après. On jugerait par comparaison avec un ballast de même calibre provenant d'une roche dont la résistance à la compression sur cube serait de 1500 kg./cm². Cette méthode ne donne qu'une grosse approximation, car elle néglige toute l'influence de la forme des pierres cassées, qui dépend de qualités de la roche n'affectant pas toujours l'essai de compression sur cube, et aussi de la fabrication. Il n'est pas douteux que les réserves de Monsieur Burchartz, citées en introduction, sont entièrement justifiées à l'égard d'extrapolations de la nature de celles que préconise M. Stübel. Donc, sans qu'il faille attribuer à cette opinion une valeur absolue, je penche à croire que les essais de ballast sont plutôt caractéristiques des qualités de mise en œuvre des roches sous la forme concassée et peuvent, de la sorte, constituer une synthèse très caractéristique de leurs qualités essentielles.

DENSITE DU BALLAST NON TASSE ET SEC,
déterminée directement par pesée d'une capacité de 20 litres (tonne/m³):

Calibre	A	B	C	D
40/60	1.40	1.61	1.52	1.45
20/40	1.37	1.63	1.49	1.58
5/10	1.25	1.63	1.42	1.41

PROPORTION DES VIDES DU BALLAST NON TASSE ET SEC
(déduite de la densité), en % :

Calibre	A	B	C	D
40/60	49.—	39.—	42.75	48.—
20/40	50.—	38.—	43.90	43.5
5/20	54.15	38.—	46.10	50.—

Les chiffres ci-dessus sont sujets à caution, car ils n'ont pas été établis par un même opérateur. Ils découlent cependant de plu-

sieurs séries de mesure. Le tassement exerce naturellement une influence, mais moindre probablement qu'on n'imagine. Pour la roche A, on a en effet déterminé la densité par pesée d'une capacité de 20 litres remplis de ballast et soumise à 100 secousses successives d'une table à secousse de flow test (chute de 15 mm.).

On a obtenu :

Calibre	Poids spécifique	Proportion de vides
40/60	1.55	43.25 %
20/40	1.537	43.80 %
5/20	1.49	45.50 %

La dispersion des résultats des divers essais n'est pas beaucoup plus grande dans l'état non tassé que dans l'état tassé, mais on remarque que le tassement diminue les différences de poids spécifique entre les ballasts de divers calibres. La forme de la pierre cassée et la granulométrie du ballast, jouent certes un rôle appréciable. Le résultat dépend d'ailleurs beaucoup de la capacité et de la forme de mesure employée. Par exemple, pour du ballast de la roche B, on a trouvé :

CAPACITE :

Calibre	5 litres	10 litres	20 litres
5/20	1.5554	1.614	1.632
20/40	—	1.616	1.635
40/60	—	1.607	1.625

On peut admettre qu'une capacité de 20 litres donne une bonne approximation. Cependant, on notera que la notion de poids spécifique du ballast est plutôt précaire. Si j'y insiste, c'est que la plupart des essais de ballast opèrent sur un poids déterminé, sauf l'essai dynamique de Stübel, qui opère sur un volume déterminé. C'est une critique que l'on peut faire à cet essai et à laquelle nous avons voulu obvier en contrôlant le volume par le poids, grâce à la connaissance du poids spécifique.

Granulométrie. — Il semble que la meilleure manière de définir la granulométrie du ballast, bien qu'elle ne soit pas usuelle, est de recourir à la méthode généralement adoptée pour les bétons. Par raison d'unification, nous avons eu recours à la série des tamis américains standard Tyler. La meilleure manière de représenter une granulométrie, est incontestablement de tracer la courbe de tamisage ou courbe granulométrique. Pour rapporter les résultats d'un grand nombre d'essais systématiques, le travail graphique serait excessif et le nombre de figures prohibitif. Comme pour les granulométries de béton armé relatives à des matériaux bien déterminés, l'expérience a montré que l'on peut caractériser sommaire-

ment une granulométrie par un seul chiffre, que nous appellerons module de finesse selon l'usage, alors que c'est plutôt un module de grosseur. On sait que ce module est la somme des pourcentages des refus cumulés sur dix tamis successifs de la série standard Tyler. Sa valeur maximum est 10 (tous les éléments ont plus de 76,20 mm.) et sa valeur minimum 0 (tous les éléments ont moins de 0,147 mm.).

Les jours carrés des tamis de la série standard Tyler, croissent en progression géométrique de raison 2. La courbe granulométrique a pour abscisses les logarithmes des jours, donc les divers tamis correspondent à des abscisses équidistantes. Il en résulte aussi que le module de finesse représente sensiblement la surface de la courbe granulométrique (partie des refus). Pour des granulométries de même allure régulière, le module de finesse permet donc la comparaison des résultats.

Les expériences montrent :

1° que la granulométrie d'un même ballast est, en général, très constante ;

2° qu'elle ne varie pas énormément d'un ballast à l'autre.

BALLAST.		A	B	C	D
5/20	Nombre de granulométries	7	6	6	6
	Module de finesse moyen	6.859	6.863	6.836	6.778
	Module de finesse maximum	6.892	6.900	6.91	6.87
	Module de finesse minimum	6.832	6.823	6.785	6.74
20/40	Nombre de granulométries	9	9	9	9
	Module de finesse moyen	7.993	8.00	7.924	8.00
	Module de finesse maximum	8.00	8.00	8.00	8.00
	Module de finesse minimum	7.977	8.00	7.702	8.00
40/60	Nombre de granulométries	9	9	9	9
	Module de finesse moyen	8.923	9.00	8.887	8.93
	Module de finesse maximum	9.00	9.00	9.00	9.00
	Module de finesse minimum	8.6475	9.00	8.355	8.73

Les petites variations de la granulométrie peuvent-elles avoir une influence sur les essais? La réponse à cette question doit tenir compte du fait que l'on opère sur des quantités assez petites, de quelques kilogrammes seulement ou de quelques litres. Pour l'essai Deval, on opère sur des échantillons de 5 Kg., comprenant 40 à 45 pierres calibrées au moyen des anneaux de 40 et de 60 mm. On opère donc sur un ballast trié spécialement, ce dont il faut tenir compte dans l'appréciation de l'essai Deval. D'une part, les conditions de comparabilité des diverses roches sont régularisées et l'essai Deval est très souvent considéré comme un essai de qualité de roche. Cependant, il n'est pas douteux que la forme du cassage

a une grande influence et que la granulométrie interviendrait aussi. L'essai Deval ne peut donc être significatif comme essai de ballast, que si le calibre du ballast fait d'autre part l'objet d'une surveillance attentive.

Les essais d'écrasement statique et dynamique du ballast ne témoignent pas d'une influence déterminée de la granulométrie initiale sur les résultats, lorsqu'elle varie dans les limites des chiffres indiqués ci-dessus. Je crois qu'il convient vraiment que ces essais soient effectués sur le ballast tel qu'il se présente, sans triage. Une remarque assez curieuse est que, contrairement à ce que l'on attendrait, les granulométries les plus variées ne correspondent pas en général aux plus fortes compacités, celles-ci se rapportent le plus souvent aux granulométries les plus grosses. En effet, les ballasts se classent dans les ordres suivants au point de vue de la compacité :

40/60 — 20/40 — 5/20

au point de vue de la variété (étendue) de la granulométrie :

5/20 — 20/40 — 40/60

Pour tout ce qui dépend donc de la compacité, c'est-à-dire de la diminution des vides de la pierraille, les gros calibres sont généralement les plus avantageux.

Essais d'écrasement et de destruction de ballast. — Ces essais sont au nombre de quatre :

- 1) l'essai d'écrasement statique ;
- 2) l'essai de compression dynamique selon Berlin-Dalhem ;
- 3) l'essai de choc sur ballast selon Stübel (Cassel) ;
- 4) l'essai Deval.

On opère dans chaque essai sur une quantité définie de ballast. La question essentielle qui se pose est, de trouver le meilleur terme de comparaison de l'état du ballast avant et après l'essai, c'est-à-dire la meilleure mesure de la destruction opérée, dont la valeur s'appellera d'une manière générale **coefficient de destruction**. On a le choix entre divers moyens :

1° Mesurer la quantité de poussière formée, en définissant le diamètre maximum des grains de poussière. C'est ainsi que l'on opère pour l'essai Deval, la poussière étant tout ce qui traverse une passoire à trous de 1,6 mm. Pour être certain de considérer la poussière impalpable, très adhérente aux pierrailles, on lave les pierres à l'eau et on les sèche ensuite, étant entendu que les pierrailles sont aussi desséchées avant l'essai.

Cette méthode est très adéquate à l'essai Deval, qui est plutôt un

essai d'usure réciproque et d'usure sur les parois du tambour qu'un essai de choc. Il y a relativement peu de destruction, la plupart des pierrailles restent entières et il y a principalement formation de poussière. Les autres essais donnent relativement peu de poussière, sauf la compression dynamique (voir fig. 6 à 9).

2° Mesurer la quantité de la pierraille qui s'est déclassée, c'est-à-dire qui est devenue inférieure au calibre initial. Par exemple, après un essai de destruction de ballast 40/60, une partie appréciable du ballast traverse la claie de 40 mm. Elle mesure le coefficient de destruction. J'estime que c'est la méthode la plus adéquate pour le ballast de voie ferrée et pour l'essai de destruction par choc selon Stübel; j'exposerai mes raisons à propos de cet essai.

3° Comparer les courbes granulométriques ou, plus sommairement, les modules de finesse avant et après l'essai. La comparaison des courbes granulométriques donne l'expression la plus détaillée et la plus suggestive de l'essai, lorsque la destruction est assez poussée. C'est la méthode la plus scientifique. Je la préconise pour l'essai de compression statique et l'essai de compression dynamique selon Berlin-Dalhem. La comparaison des modules de finesse en procède. Elle a l'avantage de permettre d'exprimer par un chiffre le coefficient de destruction et, pour une publication telle que le présent rapport, elle évite la reproduction d'un grand nombre de diagrammes. En dehors de ces avantages de pure opportunité, la comparaison des modules de finesse ne présente pas d'autres éléments de supériorité.

4° Enfin, pour exprimer les résultats de son essai d'écrasement dynamique, M. Stübel procède à un tamisage sur une série particulière de passoires (tôles à trous ronds de 30, 15, 7, 3 et 1 mm. de diamètre). Il considère les refus partiels et les multiplie par des coefficients de dévalorisation, croissant en sens inverse des diamètres des trous des passoires. Ils varient de 0 à 2 en progression arithmétique de raison 0,4. Le coefficient de destruction est la somme des produits des refus par ces coefficients.

Cette méthode paraît à première vue arbitraire. Elle résulte en fait d'une mise au point à la suite d'essais multiples et il y a tout lieu de croire qu'elle donne satisfaction au but que poursuivait son auteur. Il n'en est pas moins vrai qu'elle est compliquée et très conventionnelle, en outre elle ne me paraît pas significative pour le ballast de chemin de fer et j'expliquerai plus loin pourquoi la deuxième méthode exposée ci-dessus me paraît préférable à la quatrième.

Le choix de l'une ou de l'autre des quatre méthodes qui vien-

nent d'être définies, dépend surtout de la nature et du but de l'essai, c'est-à-dire du degré et de la nature de la destruction. Il faut encore envisager un autre facteur, commun à tous les essais et conforme aux réserves de M. Burchartz, c'est la comparabilité des résultats, dont le meilleur critère est leur faible dispersion pour des matériaux pratiquement identiques. Donc le choix de la méthode de mesure ne sera pas seulement dépendant du raisonnement, mais devra être sanctionné par une pratique suffisante.

Compression statique du ballast, dans un pot cylindrique de 17 cm. de diamètre, sous un effort de 40 tonnes, appliqué pendant une minute, soit 176 kg./cm² de section du pot. Quantité de ballast 3 kg. On a déterminé le module de finesse avant et après destruction ; le rapport de la différence au module initial est appelé coefficient de destruction.

TABLEAU DES COEFFICIENTS DE DESTRUCTION, en % :

Calibres	Roches :	A	B	C	D
5/20		16.61	19.45	13.6	19.4
		16.51	19.40	17.5	17.3
		16.25	16.15	16.00	16.00
	Moyennes :	16.46	18.35	15.7	17.57
20/40		13.25	14.15	11.80	19.00
		14.80	14.90	11.68	20.3
		14.75	16.00	11.65	18.6
	Moyennes :	14.27	15.02	11.71	19.3
40/60		16.70	19.60	21.55	23.2
		16.65	18.80	14.18	25.2
		17.66	17.70	18.71	27.15
	Moyennes :	17.00	18.70	15.15	25.18

Ces résultats sont très intéressants. Pour les illustrer davantage, nous reproduisons quatre courbes granulométriques avant et après compression, relatives aux diverses roches et à différents calibres (fig. 1 à 4). Elles montrent la très grande régularité des résultats et l'importance appréciable de la destruction. Après l'essai, la courbe granulométrique à l'allure parabolique des courbes idéales de la composition des bétons. Elle ne correspond toutefois pas encore à un maximum de compacité. Des essais de destruction plus poussés sur diverses matières, ont montré que la courbe granulométrique tend vers une droite en cas de destruction extrême, les

abscisses représentant les jours des tamis étant mesurées suivant une échelle logarithmique. A titre d'exemple, la figure 5 reproduit la courbe de destruction d'un ballast 5/20 de la roche A, sous une

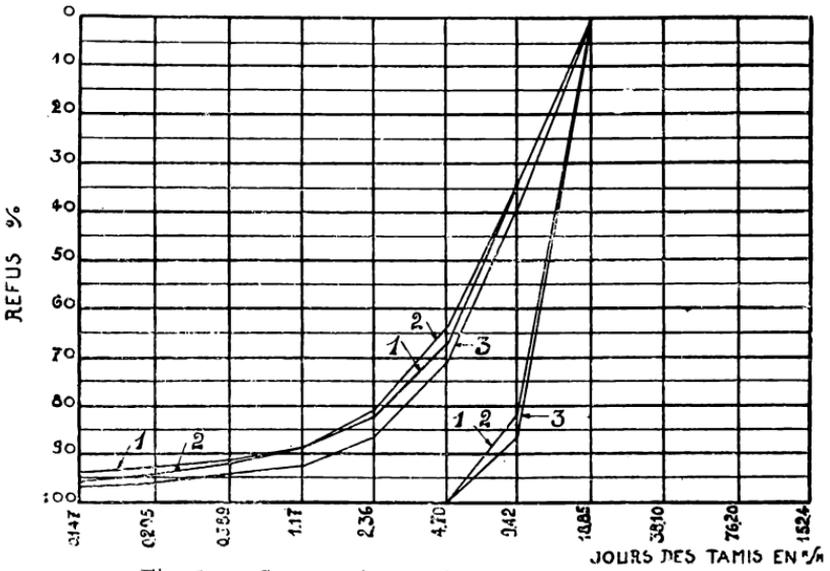


Fig. 1. — Compression statique de ballast B 5/20.
(1 minute sous 40 T.)

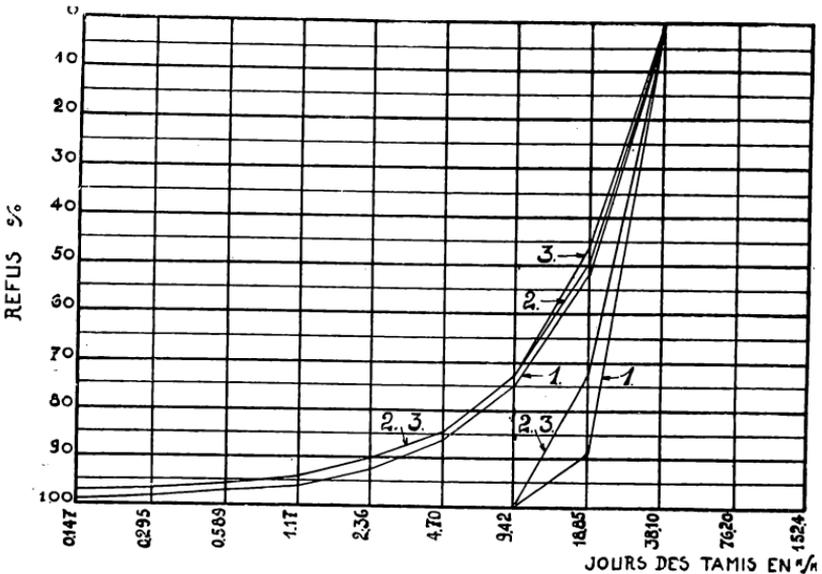


Fig. 2. — Compression statique de ballast C 20/40.
(1 minute sous 40 T.)

charge statique de 160 tonnes ou 704 kg./cm^2 , appliquée dans les mêmes conditions que celle de 40 tonnes. Le coefficient de destruction de 30,8 % est à peu près doublé par quadruplement de la

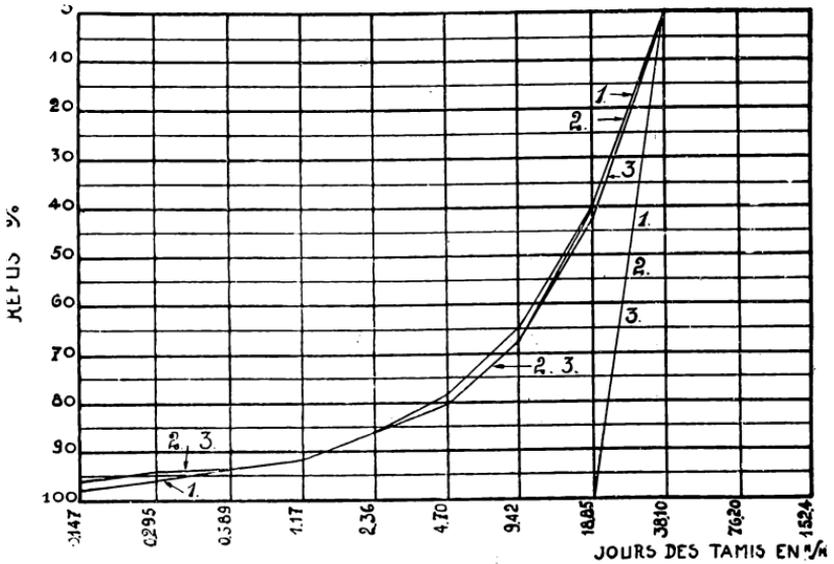


Fig. 3. — Compression statique de ballast D 20/40.
(1 minute sous 40 T.).

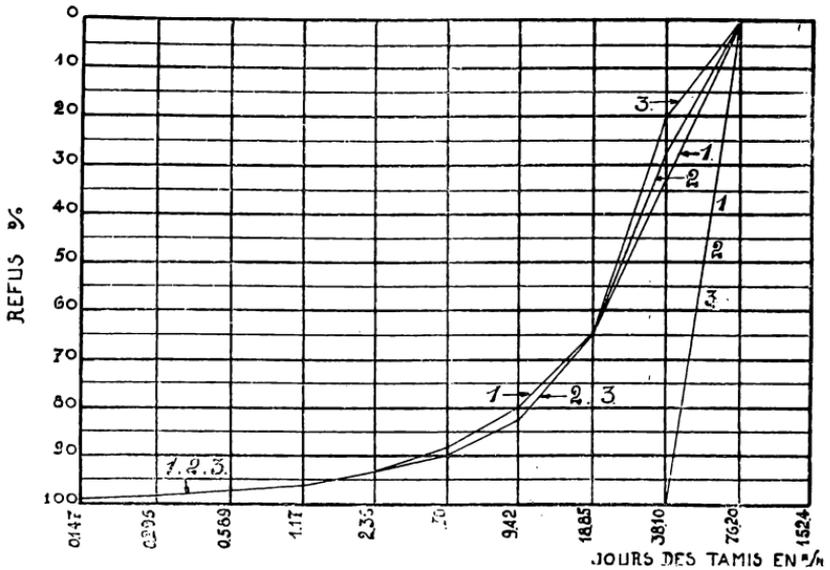


Fig. 4. — Compression statique de ballast A 40/60.
(1 minute sous 40 T.).

charge, mais la courbe granulométrique est devenue beaucoup plus tendue.

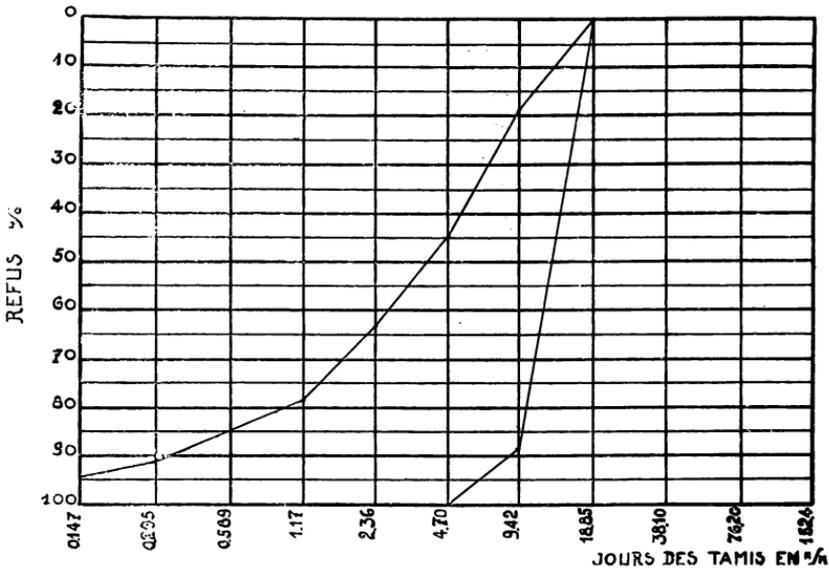


Fig. 5. — Compression statique de ballast A 5/20
(1 minute sous 160 T.).

Il ressort des expériences précitées que les conditions établies par le laboratoire de Berlin-Dalhem donnent des résultats réguliers, comparables et suggestifs. On constate :

1° Que les calibres se classent pour toutes les pierres (sauf D) dans l'ordre 20/40, 5/20 et 40/60 et que, pour toutes les roches indistinctement, le 40/60 est le moins résistant. Peut-être ce calibre est-il désavantagé par le faible poids (3 Kg.) de l'échantillon. Je ne pense pas cependant que ce soit la vraie raison, ainsi qu'il est expliqué plus loin.

2° Que pour les divers calibres, les pierres ne se classent pas dans le même ordre. On a le classement :

5/20	C	A	D	B
20/40	C	A	B	D
40/60	A	C	B	D

Le classement moyen serait C, A, B et D, comme pour l'essai de compression statique sur cubes. En fait, ceci n'a pas de signification absolue et il se peut que non seulement le calibre, mais la forme des pierrailles exercent une influence considérable, qui interfère d'autre part avec l'effet de la résistance intrinsèque de la roche. Il me paraît superflu d'entrer dans une discussion subtile

des résultats ci-dessus comparés aux résultats des essais sur roches et aux granulométries. L'essai de compression statique de ballast semble vraiment interpréter les qualités de mise en œuvre d'une pierraille déterminée, qualités qui dépendent de beaucoup de facteurs non concordants.

Cet essai paraît notamment adéquat pour le ballast de route; il donne une idée de la destruction des pierrailles lors du cylindrage et de l'auto-formation de matière d'agrégation. L'essai est assez facile et rapide; il n'est pas délicat, tout au plus faut-il veiller à appliquer la charge de 40 tonnes en un temps déterminé, pas trop court. Il est intéressant de noter que les résultats des expériences du laboratoire du Génie civil justifient l'emploi du calibre 20/40 pour les empièvements cylindrés.

Compression dynamique du ballast, méthode de Berlin-Dalhem.

— Diamètre du mortier 17 cm. Poids de ballast 3 Kg. 50 coups de mouton de 50 Kg., à panne plate, tombant de 1,50 mètre de hauteur, soit 1.250 Kg. par Kg. de ballast.

Le coefficient de destruction est le rapport de la différence des modules de finesse avant et après l'essai au module initial.

COEFFICIENTS DE DESTRUCTION, en % :

Calibres	Roches :	A	B	C	D
5/20		28.75	23.60	34.90	30.7
		27.05	25.60	33.40	31.6
		28.08	27.40	33.00	31.0
	Moyennes :	27.96	25.53	33.77	31.1
20/40		27.28	32.40	33.55	32.7
		22.10	31.40	33.00	33.8
		22.80	32.80	33.80	30.4
	Moyennes :	24.06	32.20	33.45	32.3
40/60		31.95	36.40	36.60	36.5
		29.25	38.30	38.80	34.4
		34.75	36.00	38.65	34.3
	Moyennes :	31.98	36.90	38.—	35.07

Les figures 6 à 9 reproduisent des courbes granulométriques avant et après l'essai, pour diverses roches et différents calibres. Elles montrent la très grande régularité de l'essai et sa bonne mise au point. La destruction est très forte et il se forme assez bien de poussière. Peut-être la destruction est-elle poussée un peu

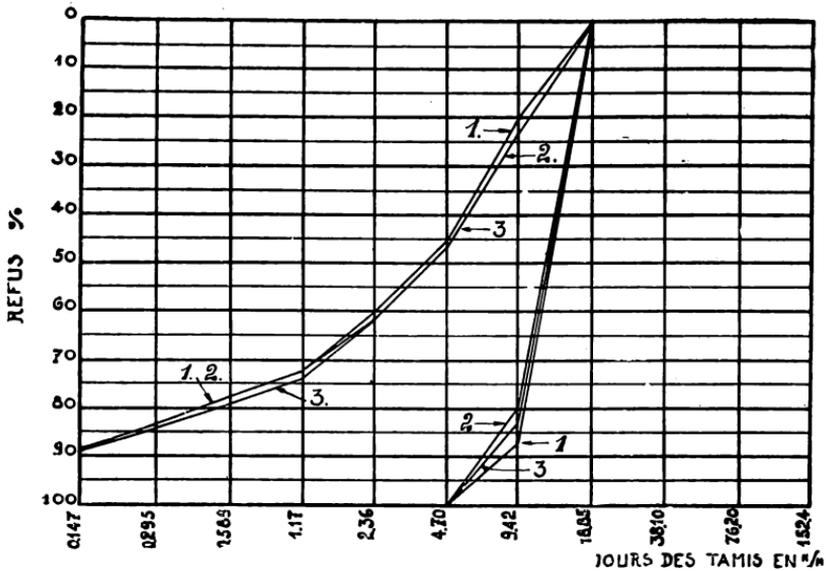


Fig. 6. — Compression dynamique de ballast C 5/20.

loin. Il se confirme que le calibre 40/60 est moins favorable que le 20/40, d'une manière assez nette pour toutes les roches. Pour certaines, le 5/20 a un moindre coefficient de destruction. Pour l'essai dynamique aussi, le classement varie pour les diverses roches d'après le calibre :

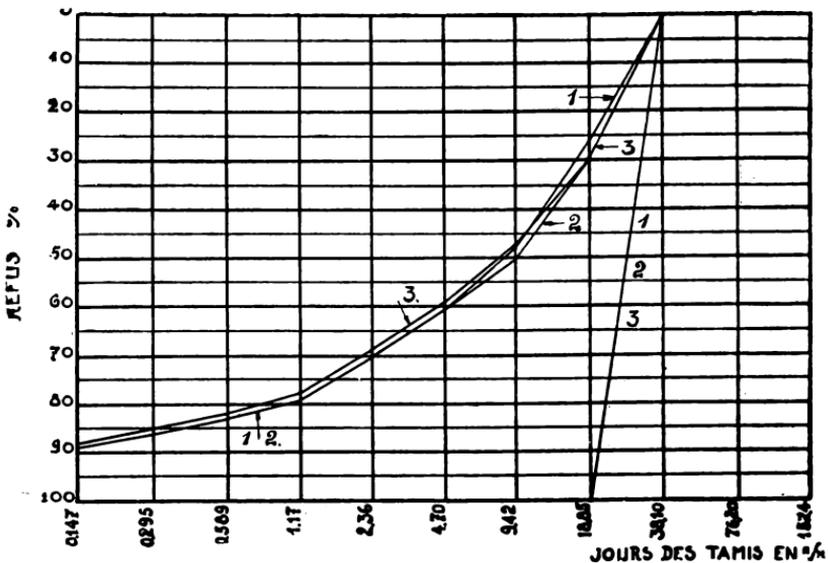


Fig. 7. — Compression dynamique de ballast B 20/40.

5/20	B	A	D	C
20/40	A	B	D	C
40/60	A	D	B	C
Classement moyen	A	B	D	C

Les mêmes remarques s'appliquent à ce classement que pour l'essai statique. La comparaison avec l'essai de choc sur cubes n'est

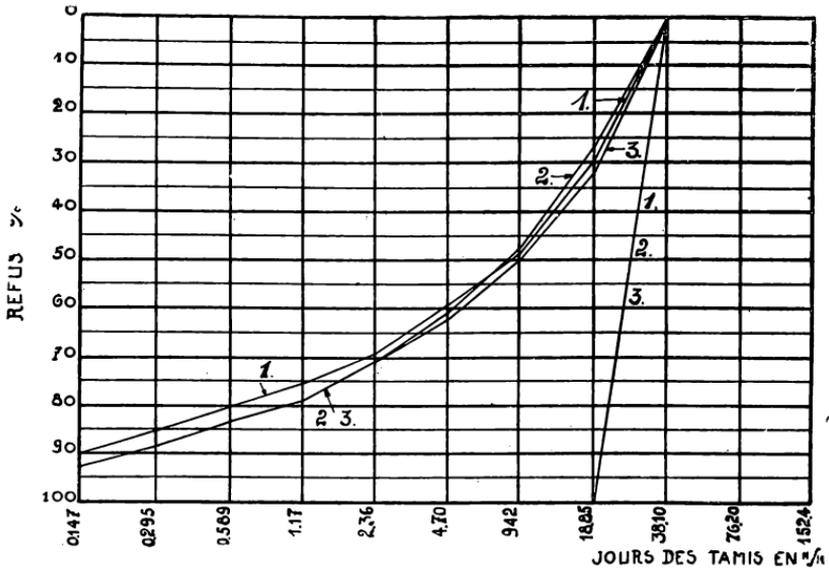


Fig. 8. — Compression dynamique de ballast D 20/40.

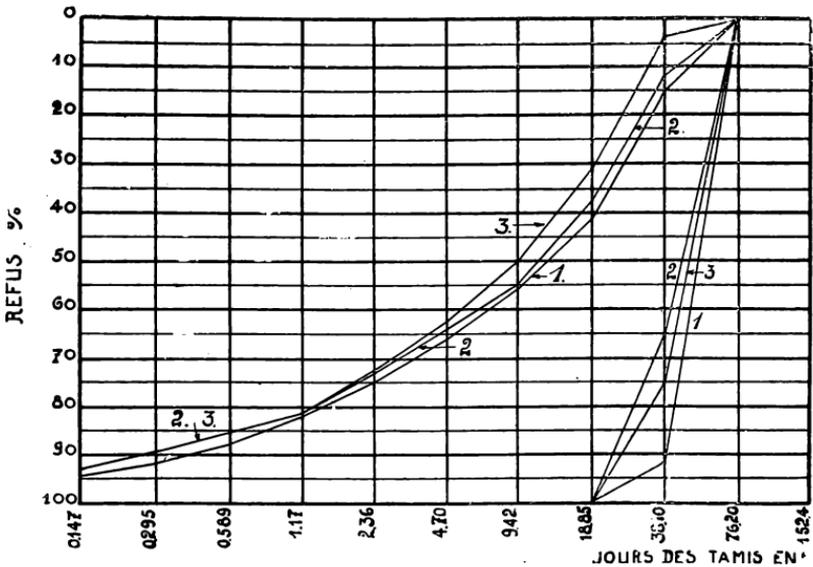


Fig. 9. — Compression dynamique de ballast A 40/60.

guère possible, à cause de l'irrégularité des résultats de ce dernier. Toutefois, je pense que l'essai dynamique éclaire particulièrement sur les qualités de fragilité de certaines roches, qui s'expliquent d'ailleurs par leur texture, et qu'il est d'une manière caractéristique un essai révélateur des qualités de mise en œuvre. L'essai n'est pas délicat, mais assez long et pénible.

Essai de choc sur ballast d'après M. Stübel. — Le mortier a 20 cm. de diamètre; le mouton de 50 Kg. a une panne de 10 cm. de diamètre, portant cinq grosses côtes. Après chaque coup, le mortier subit une rotation de 36°. Le ballast subit 50 coups de mouton de 0,50 m. de hauteur de chute, soit au total 1.250 Kg.

Dans un de ses articles (8), M. Stübel indique qu'il opère sur 3 litres de ballast. Dans un autre (9), il indique 5 litres.

Le dernier mode opératoire de M. Stübel a été adopté pour les raisons suivantes :

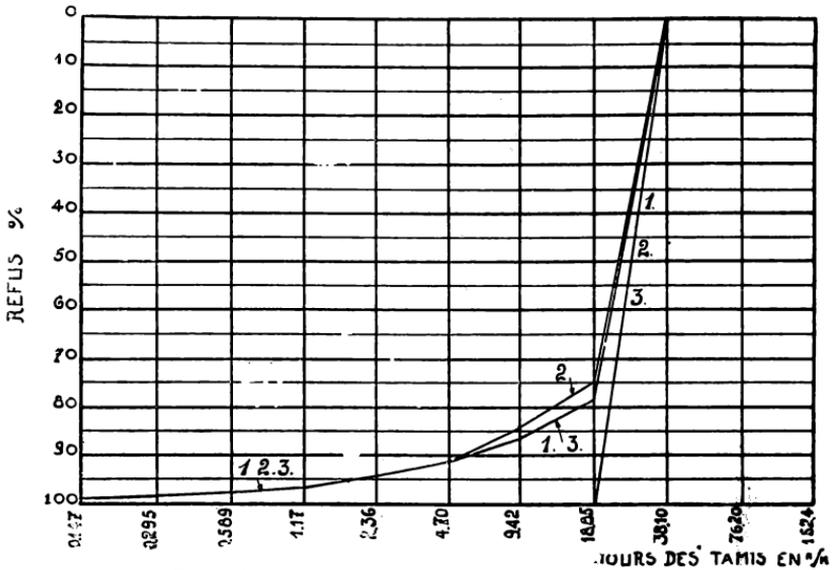


Fig. 10. — Essai de choc sur ballast A 20/40.

Un volume de 3 litres de ballast donne à peine 10 cm. d'épaisseur sur le fond du mortier. Les pierrailles de calibre 40/60 seraient donc soumises presque à l'écrasement direct entre le mouton et le fond. On a préféré 5 litres pour cette raison et on a d'ailleurs transformé, pour chaque nature de ballast, ce volume en poids par la connaissance du poids spécifique apparent. Je pense qu'il vaudrait mieux encore opérer sur un poids constant de 7,5 Kgrs. par exemple, ce qui correspondrait à 166,67 Kgm./Kg. de ballast.

M. Stübel opère sur une granulométrie déterminée qui est sans doute celle du ballast des voies ferrées allemandes. J'ai fait opérer sur les calibres standardisés en Belgique 20/40 et 40/60. Le calibre 5/20 n'entre pas en ligne de compte. M. Stübel se sert, pour apprécier le résultat de l'essai, d'une série de passoires à trous ronds de 30, 15, 7, 3 et 1 mm. de diamètre. Il multiplie les rendus partiels par des coefficients définis précédemment. Il a été jugé préférable, au Laboratoire du Génie Civil, par raison d'uniformité, de se servir pour tous les essais de la série de tamis standard Tyler. Elle permet le tracé des courbes granulométriques (fig. 10 et 11) et la détermination des modules de finesse. Ceux-ci sont très réguliers et constants, de telle sorte que le coefficient de destruction déduit des modules de finesse, paraît très convenable selon les conceptions intrinsèques de l'essai des matériaux.

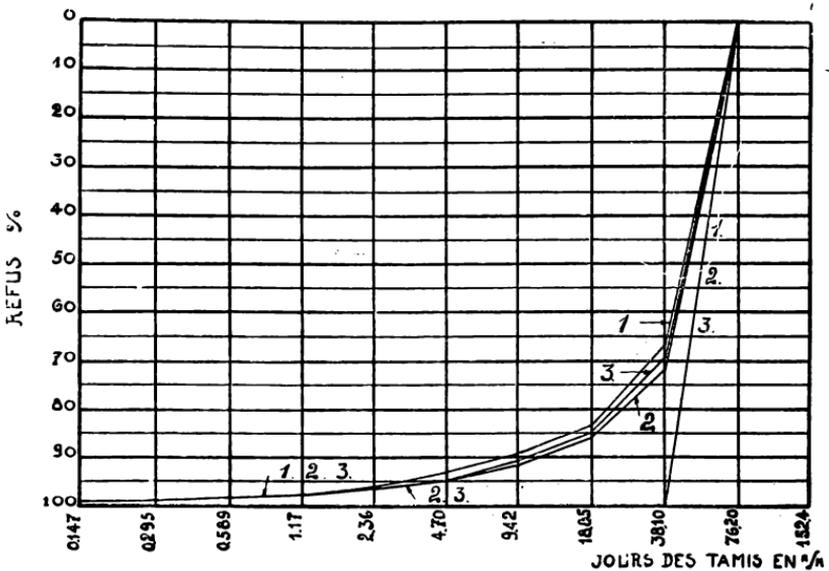


Fig. 11. — Essai de choc sur le ballast B 40/60.

Mais au point de vue de la qualification du ballast pour l'emploi dans les voies ferrées, il me semble que la deuxième des quatre méthodes d'appréciation que j'ai énoncées, est la plus caractéristique. M. Stübel lui-même m'en fournit la meilleure justification car il écrit (8) : « C'est précisément cette qualité (la résistance au choc ou ténacité) qui est caractéristique de la qualification d'une roche pour le ballastage des voies ferrées, car le ballast est tellement affecté par les coups lors du bourrage, que même les pierres les plus dures sont petit à petit détruites. Rien que par un seul

bourrage, les détritns peuvent atteindre 10 % ; donc cinq bourrages successifs peuvent rendre le ballast impropre, car une quantité de 50 % de détritns suffit pour rendre le ballast imperméable. La durée du ballast dépend donc au premier chef de la résistance au choc ». Je crois pouvoir ajouter que lors du renouvellement partiel d'un ballast, on réemploie la partie retenue par la claie de la limite inférieure du calibre ; donc les détritns représentent la quantité de ballast à remplacer par du neuf. Il me semble donc adéquat de proposer comme coefficient de destruction le pourcentage de détritns produit au cours de l'essai. Les raisons ci-dessus constituent en même temps la meilleure critique de la méthode conventionnelle d'appréciation de M. Stübel. Voici les résultats obtenus :

COEFFICIENTS DE DESTRUCTION, en %,
par les modules de finesse :

Calibres	Roches :	A	B	C	D
20/40		7.12	5.75	9.54	8.86
		7.81	6.08	8.00	9.00
		7.25	5.40	8.05	8.40
	Moyennes :	7.39	5.74	8.53	8.82
40/60		11.78	8.60	15.11	11.7
		11.67	7.78	13.70	9.8
		8.89	7.22	14.00	9.55
	Moyennes :	10.78	7.86	14.27	10.7

COEFFICIENTS DE DESTRUCTION, en %,
par les détritns :

Calibres	Roches :	A	B	C	D
20/40		21.50	17.7	28.00	26.00
		25.20	18.5	25.00	28.60
		22.80	17.1	28.00	28.50
	Moyennes	23.16	17.76	27.00	27.70
40/60		59.90	33.30	67.20	44.80
		54.80	28.20	60.10	36.00
		36.10	30.75	59.45	40.50
	Moyennes :	50.26	30.75	62.25	40.43

On constate, par les deux coefficients :

1° que les résultats sont très réguliers pour le 20/40 et le sont moins pour le 40/60 ;

2° que les coefficients de destruction du 40/60 sont sensiblement plus élevés que ceux du 20/40, surtout par la méthode des détritux ;

3° que les deux coefficients de destruction donnent le même classement.

20/40	B	A	C	D
40/60	B	D	A	C
Classement moyen	B	A	D	C

Ce classement est le même que celui qui résulterait des chiffres les plus bas de l'essai de choc sur cubes. Il n'est pas le même que celui obtenu par l'essai de compression dynamique selon Berlin-Dalhem.

Il est remarquable que tous les essais d'écrasement de ballast établissent une supériorité nette du 20/40. Il n'y a donc rien qui milite en faveur de la substitution du 40/60 au 20/40 pour les empièrrements de routes et les essais confirment par là les échecs des tentatives allemandes de « Riesenschotter » (gros empièrrement).

En Belgique, le ballast des voies ferrées est du 40/60. Certes, il peut y avoir des raisons multiples, connues des personnes compétentes, qui militent en faveur de ce calibre. Je n'oserais conclure des essais relatés ci-dessus, malgré leur régularité et leur concordance, que le choix du 40/60 soit sujet à caution. Cependant, si l'on se rapportait au raisonnement de M. Stübel, on pourrait dire que les essais correspondraient, s'ils étaient comparables à la réalité, à une durée d'existence du ballast 20/40, double environ de celle du 40/60. Il ne m'appartient pas de trancher si ces constatations justifient que la question soit posée et mise à l'étude. J'opine rais pour l'affirmative.

Essai d'usure réciproque Deval. — On opère simultanément, dans deux tambours, sur deux échantillons de 5 Kg., contenant de 40 à 45 pierres dont les dimensions sont comprises entre 40 et 60 mm. Les tambours tournent pendant 5 heures, à raison de 2.000 tours à l'heure. On pèse tous les détritux traversant une passoire à trous ronds de 1,6 mm. de diamètre, on dépoussière soigneusement toutes les pierres et on pèse le poids exact des détritux. Il y a une différence systématique entre les deux tambours. Le Laboratoire de la Ville de Paris désigne comme coefficient d'usure réciproque le quotient par 100 du nombre de grammes de détritux (sur 5 Kgr.). On a trouvé :

	A			
	1.03	0.87	1.05	1.60
	1.05	0.92	1.15	1.65
	<hr/>			
Moyennes :	1.04	0.895	1.10	1.625

L'essai est simple, régulier et assez suggestif.

Comme conclusions d'ensemble des essais sur ballast, on peut déclarer :

1° Que tous les essais, statiques, dynamiques et d'usure, dénotent une régularité beaucoup plus grande en général que les essais sur cubes.

C'est là, au point de vue de la possibilité d'établir des spécifications et au point de vue de l'utilisation des résultats, un avantage considérable des essais sur ballast.

2° Que si l'on compare, autant qu'il est possible, les essais sur ballast aux essais sur cubes, il semble que les qualités intrinsèques des matériaux soient encore suffisamment mises en évidence par les résultats des essais sur ballast que pour permettre la comparaison des roches. En tous cas, elles ne sont pas masquées par les particularités propres aux modes d'essai. Les résultats des essais sur ballast constituent donc bien une synthèse des qualités essentielles des pierres.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

Ce qui précède, joint au rapport de M. Dantinne, permet de juger de l'arsenal étendu d'essais dont on dispose pour l'étude et la réception des pierres. Il y en a d'autres encore, dont certains assez hétéroclites, (6) que je passerai sous silence. Je pense que ce qui a été donné est essentiel et suffisant.

C'est déjà trop, même pour des essais de réception. Je conçois l'organisation de la réception des pierres à trois degrés.

Je place au premier degré la connaissance des carrières, de leurs bancs et de leur mode d'exploitation. Le gisement doit être connu géologiquement et pétrographiquement.

L'exploitation doit être inspectée périodiquement.

Ensuite, au second degré, il y a les essais d'agrération des roches, qui comportent toute la gamme des essais possibles ou intéressants, à fixer par les conditions générales d'agrération.

Au troisième degré, les essais de réception des fournitures peuvent consister en essais sommaires (calibre, dureté) et en un petit nombre d'essais réguliers considérés comme caractéristiques en vue de l'usage de la fourniture.

On voit que les éléments du premier et du deuxième degré conduiraient à un véritable inventaire et catalogue scientifiquement établi des carrières de pierres dures du pays, inventaire et catalogue qui pourraient être établis une fois pour toute par la com-

munauté des intéressés et dont certes la plupart des éléments sont déjà connus, mais épars. Sauf à renouveler périodiquement les essais du deuxième degré pour les nouveaux bancs ou changements d'allure des bancs.

Au point de vue du jugement de la qualité des pierres soumises aux essais, je ne procéderai pas à un classement, non parce qu'il m'est interdit, mais parce qu'il serait dépourvu de signification. On constate, en effet, que les pierres se qualifient différemment pour tous les essais. Comme il n'y a pas de critère absolu, il n'est pas possible, ni nécessaire de conclure. On peut dire que notre pays dispose de multiples ressources de pierres dures, ayant des qualités élevées et qui permettent certainement la construction de bonnes routes. Les principaux éléments naturels nécessaires ne nous font donc pas défaut.

Ce qui est plus intéressant, c'est de noter que les essais divers qualifient plus ou moins les roches pour certains usages et qu'ainsi, les matériaux pierreux se distinguent par des aptitudes plus particulières. On pourrait, à titre d'exemple, dire que la roche B convient le mieux pour le ballastage des voies ferrées, suivie de A, D et C dans l'ordre (essai de choc selon M. Stübel). De même que la roche B convient le mieux pour la résistance des empièrrements à l'usure, c'est-à-dire au trafic rapide et relativement léger sur pneumatiques (essai Deval), ensuite viendraient A et C. Par contre, pour les routes empièrrees soumises à de lourdes charges et à des effets d'écrasement par choc (trafic lourd, bandages métalliques), la roche A conviendrait le mieux, puis B, puis C et D (essais de compression statique et dynamique du ballast). Pour les pavages, on voit que les roches A, B et C se qualifient presque également par les essais (essais de compression statique, de choc et d'usure sur cubes). Mais j'ajoute que tout ceci n'est donné qu'à titre d'exemple, pour illustrer ma pensée. D'autres éléments que les essais interviennent pour qualifier les matériaux, surtout dans l'état actuel de la question.

Mais, si l'essai des pierres était plus systématiquement exigé, je pense que l'on tendrait de plus en plus vers un état de choses régulier et que les facteurs imprévus qui peuvent affecter encore le sort des fournitures de pierres, diminueraient à la longue. Je ne crois pas devoir donner au présent rapport de conclusions plus précises. Il constitue une introduction et une contribution à l'établissement des spécifications d'un cahier des charges normal pour la fourniture de pierre dures. On pourrait en tirer parti pour faire

aboutir cette question. S'il reste des essais à faire dans ce but, on est certes orienté à leur sujet.

Pour terminer, en remerciant encore les producteurs qui m'ont permis, par le don de quantités appréciables de matériaux, de faire procéder aux essais relatés, je me permets de leur faire observer que dans ma pensée, les essais de contrôle ne sont pas une organisation qu'ils aient à redouter mais que, selon une conception élevée de l'industrie, ils sont de nature à valoriser leurs produits, à leur assurer le marché national et à les soutenir dans la lutte pour la conservation des marchés étrangers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- (1) F. Campus : « Le Laboratoire d'essais de matériaux pour routes de l'Université de Liège ». Premier Congrès national de la route, Liège 1930.
 - (2) Dr. K. Krüger : « Sur quelques problèmes relatifs aux essais des roches ». Bulletin N° 68 de l'Association Internationale permanente des Congrès de la route. Mars-avril 1930.
 - (3) Premier Congrès national de la route. Liège 1930. Renseignements généraux et compte rendu des travaux.
 - (4) Marcotte : « Evolution dans l'essai des matériaux routiers ». Revue des matériaux de construction, N° 269, février 1932.
 - (5) « Livre du Congrès de Zurich » (6 au 12 septembre 1931). Association internationale pour l'essai des matériaux, pages 526 à 596.
 - (6) Prof. H. Burchartz : « Die Verfahren zur Prüfung von Strassenbau und Gleisbettungstoffen auf Widerstandsfähigkeit gegen statische und dynamische Beanspruchungen ». Livre du Congrès de Zurich, pages 556 à 568.
 - (7) « Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens », n° 19 de 1930.
 - (8) Reichsbahnoberrat Stübel : « Prüfung und Bewertung von Gleisbettungstoffen bei der Gesteinprüfstelle der Reichsbahn ». Der Bahnbau, N° 21 du 24 mai 1931.
 - (9) « Die Reichsbahn », Heft 25 du 17 juin 1931.
-