

Prof. F. CAMPUS, Liège:
(re mémoire Grün)

Les conditions techniques belges de réception du trass rhénan sont assez différentes des « Trassnormen » allemandes et se bornent à l'essai suivant.

Des éprouvettes normales de traction sont confectionnées au moyen d'un mortier composé de:

une partie en poids de chaux grasse éteinte (sèche)

deux parties en poids de trass moulu

trois parties en poids de sable normal (belge)

une partie en poids d'eau.

La finesse de la poudre de trass doit être telle que le refus sur le tamis de 900 mailles par cm^2 soit inférieur à 25 %. La résistance à la traction à (1 + 27) jours doit être supérieure à 15 kg/cm^2 . Cet essai n'est pas nécessaire si la résistance à (1 + 6) jours atteint plus de 7 kg/cm^2 .

Le mortier normal belge est, d'après les prescriptions officielles, gâché manuellement. Les éprouvettes reçoivent 120 coups de 0,25 m de hauteur du marteau de 2 kg de l'appareil de TETMAYER. Le mortier normal de trass défini ci-dessus est très sec, assez adhérent par suite de la chaux grasse, difficile à battre et à dé-mouler.

Les résistances prescrites à (1 + 6) jours en Belgique ne paraissent pouvoir être atteintes qu'exceptionnellement. Aussi l'épreuve n'est-elle qu'éventuelle, non décisive. Mais il semble même que la résistance de 15 kg/cm^2 à (1+27) jours soit difficile à réaliser, ainsi qu'il ressort des chiffres publiés par M. BONNET, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Anvers. Dans une étude très documentée sur le trass rhénan¹⁾, M. BONNET reproduit les résultats d'un grand nombre d'essais de réception systématiques de divers trass, classés d'après leur provenance, effectués sur des fournitures très considérables de trass en roche destinés à la construction de la plus récente grande écluse maritime du port d'Anvers. D'ailleurs, la résistance prescrite par le cahier spécial des charges de ce travail, pour l'essai de traction après (1 + 27) jours sur mortier normal (belge) de trass, avait été abaissée à 12 kg/cm^2 .

Sept essais de trass fourni en poudre pour des fondations d'un institut universitaire en construction à Liège ont donné

¹⁾ L. Bonnet, «Le trass de la région de l'Eifel en Allemagne». La Technique des Travaux, fasc. de février 1927.

des résultats en moyenne plus élevés que ceux cités par M. BONNET, à savoir ceux donnés par le tableau I.

Le refus moyen sur le tamis de 900 mailles a été de 13% pour les cinq premiers échantillons, de 17% pour les deux derniers, les seuls qui satisfaisaient aux résistances prescrites.

Ci-après les analyses chimiques d'un des 5 premiers échantillons et d'un des deux

l'emploi du laitier granulé moulu. Dans un premier essai, un laitier de composition moyenne suivante a été essayé:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
30,10	15,63	45,29	4,61
FeO	MnO	S	Chaux libre
1,29	2,25	1,48	0,059

Il s'agit, selon la classification du Dr. GRÜN, d'un laitier riche en alumine, riche aussi en chaux, mais plutôt trop

Tableau I

No. des essais	1	2	3	4	5	6	7
à (1+ 6) jours	3,6	3,6	3,6	3,4	4,36	4,8	5,0
à (1+27) jours	13,2	14,6	13,6	14,2	12,4	17,0	17,2

Il s'agit des chiffres probables déduits pour chaque essai de cinq éprouvettes

derniers, faites par les soins du laboratoire de chimie industrielle de l'Université de Liège.

Perte au feu	9,63 (> 9,5)	7,57 (7 < 7,57 < 9,5)
Insoluble	58,78 (> 35,96)	58,29 (> 35,96)
Ox. ferrique	4,69	4,61
Alumine	9,11	16,79
Chaux	2,33	1,97
Magnésie	traces	traces
Alcalis non dosés	15,46	10,70

Si l'on compare les chiffres de résistance, les analyses chimiques et les fineses aux indications des tableaux I, II et III du rapport du Dr. GRÜN, on constate des divergences souvent très appréciables, alors que nos résultats sont beaucoup plus concordants avec les nombreux essais cités par M. BONNET. Les différences de méthodes interviennent vraisemblablement dans une large mesure. Les différences dans les analyses chimiques proviennent sans doute davantage du fait qu'il s'agit d'un produit naturel, donc variable.

Les chiffres précités ont été obtenus en partie au cours d'une étude préalable destinée à rechercher la composition du béton à employer pour les fondations dont il a été question plus haut. Au cours de cette étude, en même temps que se faisait l'essai du trass j'ai cherché à y comparer

manganique. Le laitier granulé a été broyé à la finesse de 25% de résidu sur le tamis de 900 mailles et cette poudre a été substituée au trass dans l'essai de traction sur mortier normal décrit précédemment. La quantité d'eau n'ayant pas été changée, le mortier était presque plastique et difficile à battre de ce fait. Il a été constaté que le laitier moulu prend moins d'eau que le trass. Les résultats de l'essai ont été

à (1 + 6) jours	à (1 + 27) jours
7,3 kg/cm ²	14 kg/cm ²

L'essai fut repris plus tard au moyen d'un laitier granulé moulu industriellement, admis par le cahier des charges concurrentement au trass.

L'analyse chimique de ce laitier était (moyenne de 4 analyses de prises prélevées au cours du broyage de 68 tonnes de laitier)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
30,90	15,23	44,31	3,98
FeO	MnO	S	
0,91	2,23	1,23	

Bien que provenant d'une autre usine, ce laitier a à peu près la même composition que le précédent.

Sa mouture était beaucoup plus fine et comparable à celle d'un ciment: refus de 15% sur le tamis de 4900 mailles.

Pour la composition du mortier, le poids d'eau a été diminué à 28% du poids de la chaux et du laitier. Le mortier comportait ainsi:

- 1 partie en poids de chaux grasse éteinte (sèche)
- 2 parties en poids de laitier moulu
- 3 parties en poids de sable normal (belge)

$\frac{7}{8}$ parties en poids d'eau.

Les résultats obtenus dans notre laboratoire ont été:

à (1 + 6) jours	à (1 + 27) jours
20,4 kg/cm ²	33,5 kg/cm ²

Ces chiffres cadrent avec ceux du tableau I du Dr. GRÜN. Ils sont très supérieurs à ceux du trass, ainsi qu'aux résultats de l'essai préalable, ce qui est dû vraisemblablement à l'augmentation de la finesse de mouture et à l'ajustement de la quantité d'eau.

Des essais effectués à l'usine sur la même poudre ont donné:

Traction

à (1 + 6) jours	à (1 + 27) jours
18,15 kg/cm ²	24,8 kg/cm ²

Compression

à (1 + 2) jours	(1 + 6) jours
69 kg/cm ²	104 kg/cm ²
(1 + 27) jours	
231 kg/cm ²	

(A comparer aux chiffres du tableau I du Dr. GRÜN.)

Nous pensons que l'écart entre les résultats de notre laboratoire et ceux du laboratoire de l'usine sont dus à la qualité supérieure de notre chaux grasse éteinte.

Ces résultats nous paraissent intéressants parce qu'ils sont tout à fait comparables à ceux des mortiers normaux du ciment de laitier ordinaire, fabriqué en Belgique par mélange physique et broyage de chaux et de laitier granulé. Seulement, dans notre cas, la chaux et le laitier n'ont pas été broyés ensemble, mais mélangés seulement en cours de gâchage, et sans aucune addition de gypse ou autre matière destinée à régulariser la prise.

Je considère que les essais de réception belges du trass sont trop sommaires et aussi peu pratiques; somme toute, insuffisants. Les inconvénients en sont moindres pour le laitier, produit de composition plus constante et donnant déjà des résistances très appréciables et régulières à (1 + 6) jours.

Nos essais montrent aussi l'influence de la finesse de mouture et de l'ajuste-

ment de la quantité d'eau. Toutefois, la finesse du trass sera généralement moindre et il exige toujours plus d'eau que le laitier.

L'essai de ces produits par le moyen d'un mortier normal de chaux est très caractéristique, puisqu'il met en évidence le degré d'hydraulicité conféré à une chaux grasse. Il est aussi éminemment pratique pour les régions où l'on emploie encore les mortiers de chaux additionnés de pouzzolanes, tant pour les maçonneries que pour les bétons. En Belgique, les compositions officielles des mortiers et bétons de trass bâtard et de trass fort sont tombées en désuétude. Tout au plus a-t-on conservé la pratique très recommandable d'ajouter des matières hydraulisantes (laitier granulé broyé, cendrée, brique pilée) aux mortiers de chaux des maçonneries vulgaires, mais ces substances ne font l'objet d'aucun essai.

Pour les ouvrages importants, le ciment s'est substitué complètement à la chaux. L'opinion du Dr. GRÜN que l'essai des pouzzolanes en mortier normal avec le ciment n'est pas caractéristique peut induire en la conclusion erronée que les matières pouzzolaniques ne présentent plus guère d'intérêt lorsqu'on emploie le ciment. Evidemment, leur rôle est autre et moins essentiel, mais n'en reste pas moins utile, comme le prouvent les rapports du Dr. GRÜN et du prof. J. O. ROOS af HJELMSÅTER (Chemical action of aggressive waters on cement). Ainsi que le fait remarquer le prof. O. GRAF dans son rapport »Über die wichtigsten Eigenschaften des Betons, über ihre praktische Bedeutung und über die Nutzbarmachung der Erkenntnisse«, l'essai normal des ciments ne donne pas toujours une comparaison exacte des qualités des produits. Je tiens que cela est particulièrement vrai pour l'essai des ciments mélangés de matières pouzzolaniques, car l'essai sur mortier normal se rapporte toujours à une *substitution* de matière pouzzolanique au ciment, alors que j'envisage surtout une *addition* de ces matières aux ciments, comme cela se fait précisément pour les bétons spéciaux.

Ces considérations nous ont conduit à fonder notre étude du béton des fondations précitées principalement sur des

essais comparatifs de bétons additionnés de substances hydraulisantes ou autres.

Ces essais ont été effectués sur des cubes moulés de 10 cm de côté²⁾. Les compositions des bétons et les résultats des essais figurent au tableau II et aux figures 1 et 2.

ciment de laitier spécial, ce qui s'explique par son excès de chaux. Donc, la preuve est faite qu'il y a intérêt à additionner des matières hydraulisantes au ciment de laitier, telles que du trass ou de la poudre de laitier granulé.

Les résultats obtenus pour les bétons

Tableau II

Résistances et autres caractéristiques	Composition des bétons													
	800 litres de gravier du Rhin + 350 litres de sable du Rhin + 190 litres d'eau													
	+ 350 kg de ciment de laitier spécial							+ 350 kg de ciment portland A. N.						
	Sans addition	+ 100 litres						Sans addition	+ 100 litres					
		Sables broyés r 900 = 25%	Trass r 900 = 17%	Laitier granulé r 900 = 25%	Laitier coulé r 900 = 25%	Chaux grasse r 4900 = 10%	Ciment de laitier spécial		Sable broyé r 900 = 25%	Trass r 900 = 17%	Laitier granulé r 900 = 25%	Laitier coulé r 900 = 25%	Chaux grasse r 4900 = 10%	Ciment portland A. N.
R (1+ 6) jours	77	81,5	89,5	106	95	79	121	144	150	174	170	189	193,5	267
R (1+13) jours	105	120	120,5	160	127	103,5	144	208	226	250	251	260	277	362
R (1+20) jours	121,5	141	145	189	139	120	160	254	268	295	310	306	323	369,5
R (1+27) jours	136	143	167	196	142	137	173	277	282	324	334	336	354	414
Poids spécifique moyen	2371	2361	2384	2379	2364	2365	2393	2390	2394	2370	2397	2390	2380	2404
Slump test	15	3,5	1	1	1	8	7,5	15	8	3	7	5,5	6,5	9

La quantité d'eau des divers bétons était constante. Le poids spécifique n'a pas varié de plus de 1%, tandis que le slump était assez variable. Au lieu d'additions égales en volumes, il eût été préférable de les exprimer en poids et d'uniformiser les finesses, du moins de diminuer les écarts de finesse.

Néanmoins, les résultats sont bien caractéristiques et intéressants. On voit que le ciment de laitier spécial est indifférent à l'addition de chaux, mais que l'addition de laitier granulé, même pas broyé très fin, est supérieure à l'addition d'un volume égal du ciment même (de finesse beaucoup plus grande r 4900 < 10%). Or le ciment de laitier spécial est un mélange physique de chaux et de laitier granulé broyés ensemble. Il contient donc trop de chaux et trop peu de laitier granulé. Le trass a amélioré le

de ciment portland artificiel normal sont suffisamment nets, bien que très différents des précédents. Il eût été utile peut-être de les approfondir, mais on y a renoncé parce que la décision avait été prise de recourir, pour les bétons de fondations, au ciment de laitier spécial additionné de trass ou de laitier granulé moulu.

M. BONNET (op. cité) avait déjà signalé, d'après des essais sur mortiers nor-

²⁾ Je me réfère aux observations du paragraphe VIII du mémoire du professeur *Graf* et au mémoire du professeur *Vandone* (L'unification mondiale des essais sur les mortiers et bétons de ciment). J'estime que l'on peut sans scrupules effectuer des *essais de comparaison et de contrôle* sur cubes de 10 cm de côté. De très nombreux essais faits sur de tels cubes moulés ou sciés ont donné des résultats très réguliers sans dispersion excessive. Aucun rapport bien défini avec la résistance mesurée sur cubes de 20 cm de côté n'a pu être établi.

maux qu'il avait fait effectuer en Allemagne, que l'addition de trass améliore le ciment de laitier, de 10 à 20 % à 28 jours et jusqu'à 30 % et plus à 90 jours.

L'allure croissante de la résistance pour les âges supérieurs à 28 jours est indiquée par l'inclinaison de la courbe 2 de la fig. 1. L'addition de poudre de laitier granulé n'est pas moins intéressante. Mais les essais sur bétons étaient terminés lorsque nous avons constaté l'influence considérable de la finesse de mouture du laitier et pu obtenir de la poudre industrielle de laitier, à grande finesse. L'emploi de cette poudre, de finesse voisine de celle de la chaux, eût probablement amélioré considérablement les résultats des additions de laitier aux deux catégories de béton. De nouveaux essais seront entrepris à ce sujet.

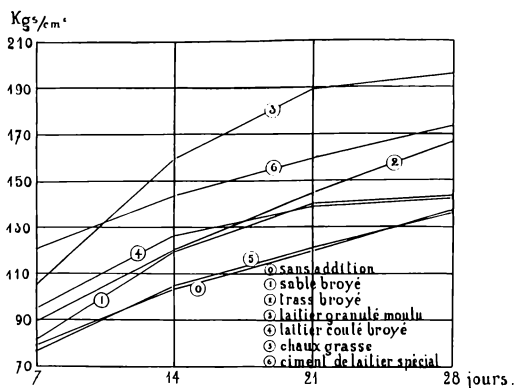


Fig. 1

l'étude préalable. La fig. 3 donne les courbes de fréquence des résistances des deux bétons après 7 jours de durcissement à l'air. Pour les résistances après 28 jours, il convient de noter que les bétons au trass ont été conservés sous l'eau pendant les 21 derniers jours, tandis que les bétons au laitier ont été con-

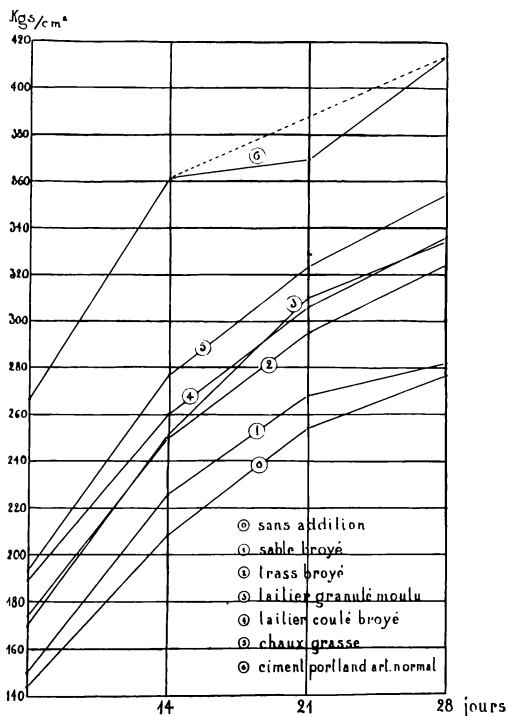


Fig. 2

Pour deux premières entreprises, le béton mis en œuvre a été composé, conformément aux études préalables, de 800 litres de gravier de Meuse 10—30, de 350 litres de sable de Meuse 0—10, de 100 litres de trass et de 350 kg de ciment de laitier spécial. Pour une troisième entreprise, on a substitué la poudre de laitier ($r = 4900 = 14\%$) au trass. Le slump était de 1 à 3 cm. Ce béton était d'ailleurs particulièrement travaillable.

Il a été procédé à d'assez nombreux essais sur des cubes de 20 cm de côté moulés sur le chantier, de même que sur quelques cubes de 10 cm de côté, sciés hors de blocs détachés de la tête des pieux.

Le but était, outre le contrôle, de comparer les résultats du chantier à ceux de

servés simplement dans une cave humide. Les résistances probables après 7 jours ont été plutôt supérieures à celles des essais préalables de laboratoire. Les résistances après 28 jours ont été, au contraire, légèrement inférieures, surtout pour le trass. Le poids spécifique du béton a été compris entre 2,35 et 2,41. Les résistances normales du ciment employé étaient en moyenne:

Sollicitation	1 + 6 jours	1 + 27 jours
Traction	27,6 kg/cm ²	33,2 kg/cm ²
Compression	230 kg/cm ²	306 kg/cm ²

Les cubes découpés hors des blocs provenant du récépage des têtes de pieux ont donné des résultats variables. Par suite de leur provenance, ces blocs étaient

le plus souvent mal constitués et ébranlés.
 Deux bonnes éprouvettes ont donné
 après 112 jours 306 kg/cm²
 après 10 mois 206 kg/cm²
 pour le béton au trass.

Somme toute, les essais effectués sur les bétons mis en œuvre ont montré une

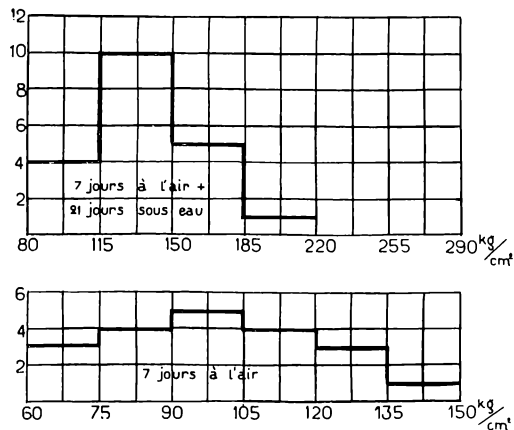


Fig. 3a

Courbes de fréquences

Résistance à la compression des éprouvettes de béton de ciment de laitier spécial + trass prélevées au chantier du Val-Benoît (1^{er} lot de fondations)

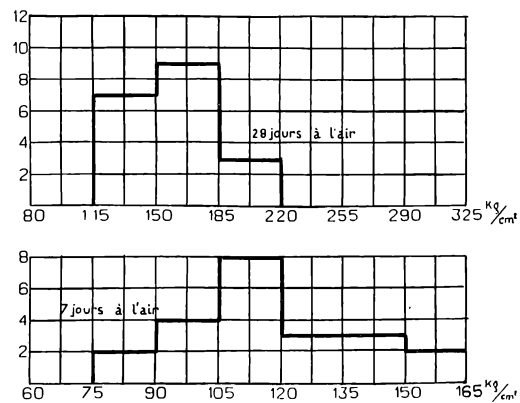


Fig. 3b

Courbes de fréquences

Résistance à la compression des éprouvettes de béton de ciment de laitier spécial additionné de laitier moulu prélevées au chantier du Val-Benoît (2^{me} lot de fondations)

bonne concordance avec les essais pré-alables. Les additions de trass et de laitier en poudre ont donné satisfaction, le dernier produit fournissant en règle générale des résistances supérieures.

En conclusion, je constate:

1° — que les essais de *toutes natures*, tant sur mortier que sur béton et tant au chantier qu'au laboratoire, concordent pour prouver l'avantage d'*additions* bien dosées de matières hydraulisantes aux ciment portland artificiels ordinaires, ainsi que même aux ciments de laitier belges, par suite de l'excès de chaux qu'ils contiennent.

2° — qu'ils concordent aussi pour prouver la prééminence que le Dr. GRÜN reconnaît au laitier granulé en poudre. Ce produit possède l'avantage de procurer un accroissement de résistance qui ne coûte pas plus cher que s'il était dû à une augmentation de ciment, et il évite certains inconvénients d'une addition de ciment.

3° — que, sauf inconvénients d'ordre particulier, il y a intérêt à employer les matières hydraulisantes réduites à la finesse du ciment.

4° — que l'essai à la chaux est certes très caractéristique pour la classification et l'étude des pouzzolanes mais que, comme essai de réception, sa lenteur devient un inconvénient en ce qui concerne les pouzzolanes naturelles, relativement lentes. C'est pourquoi il y aurait lieu d'y ajouter, pour les diverses pouzzolanes, des essais particuliers bien définis, de nature physique ou physico-chimique, susceptibles d'éclairer assez rapidement sur la qualité des produits, d'une manière plus précise que par un examen visuel de la teinte, un certificat d'origine, etc. Par ailleurs, l'essai à la chaux devrait envisager non seulement des essais de traction comme en Belgique, mais aussi des essais de compression, comme dans les Trassnormen allemandes, et normaliser d'une manière adéquate le pourcentage d'eau.

Notre éminent président de section, M. le prof. Dr. M. ROS a, tout à l'heure, posé les questions de savoir quelle est l'influence des matières pouzzolaniques sur la chaleur de prise et sur le retrait. Concernant le dernier point, je ne puis pas actuellement apporter de contribution. Et, quant à la chaleur de prise, je me réfère à la communication de mon collaborateur, M. DANTINE. Les courbes d'élévation de température de

deux ciments qui sont à proprement parler un ciment portland de fer et un ciment de haut fourneau (selon la classification allemande) montrent que l'élévation de température diminue lorsque le pourcentage de laitier augmente et que le moment de l'élévation maximum de température est retardé. Somme toute, au point de vue thermique, le laitier agit sensiblement comme une matière inerte. Ce qui le prouve mieux encore, c'est un essai dont la courbe n'est pas reproduite dans les figures de la communication de M. DANTINE. On a cherché les élévations de température d'une pâte formée d'un mélange de chaux grasse et de la poudre de laitier industrielle très fine que j'ai définie précédemment.

Malgré le durcissement important et assez rapide de cette pâte, aucune élévation de température n'a été constatée.

Cette observation est à rapprocher de la courbe d'élévation de température de la pâte de ciment de laitier spécial, qui est, je le répète, un mélange physique de chaux et de laitier broyés ensemble. Ce ciment manifeste une certaine élévation de température, quoique faible et lente. Ce phénomène est dû probablement à des additions assez fortes de sels destinées à régulariser la prise et à accélérer le durcissement. L'observation des températures de prise des ciments présente en principe quelque intérêt pour la question des ciments purs dont il a été tant discuté dans la séance d'hier.