

RÉSISTANCE
DES
MATÉRIAUX HYDRAULIQUES
A LA MER

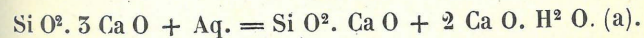
PAR
É. CAMERMAN
Ingénieur-chimiste aux chemins de fer de l'État.

En 1896 je publiai dans les *Annales des Travaux publics* une étude sur la tenue des mortiers hydrauliques dans l'eau de mer suivie d'un important travail sur le même sujet, dont le docteur Michaëlis m'avait confié la traduction. La thèse développée par le savant expérimentateur allemand a subi le contrôle de différents techniciens notamment de « l'Union des fabricants de ciment Portland allemands », du laboratoire de Charlottenbourg (Berlin), du laboratoire de M. Faija, de Westminster; de MM. Stanger et Blount, à Londres; de M. Wortman, ingénieur du « Waterstaat hollandais » de M. Feret, chef du laboratoire des ponts et chaussées de Boulogne-sur-Mer et de M. H. Lechatelier, professeur de l'école des mines de Paris.

Je me propose, aujourd'hui que le problème est presque entièrement résolu, de résumer les diverses expériences et de relater mes propres recherches principalement adaptées aux matériaux de notre pays.

I

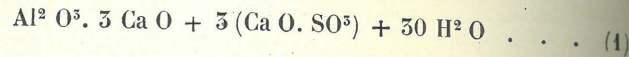
Le phénomène de la prise du ciment est caractérisé par la réaction



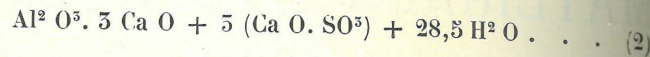
Quoique des doutes existent sur la quantité d'éléments entrant dans la combinaison, tous les expérimentateurs sont d'accord pour dire que

le durcissement des ciments produit toujours la mise en liberté d'une quantité considérable d'hydrate de chaux.

Les sulfates de l'eau de mer agissent sur cette chaux libre pour former du *sulfate de chaux* qui, à son tour, forme avec l'*alumine* du ciment le *sulfo-aluminate de chaux* découvert par Candlot, qui a pour formule d'après M. Michaëlis

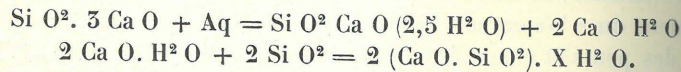


et d'après M. Deval



M. Michaëlis montre que le sulfo-aluminate de chaux engendré dans un ciment Portland normal amène au sein du mortier un volume supplémentaire correspondant à douze fois le poids de l'alumine qui lui a donné naissance; de là des gonflements suivis de décomposition totale.

Si l'on se rapporte à la formule (a) qui traduit la réaction du durcissement, on observe que dans les ciments, c'est la chaux mise en liberté qui se présente comme réactif aux sulfates de l'eau de mer. Michaëlis propose d'enrayer ces réactions en enchainant la chaux libre dans une combinaison stable avec la silice. Celle-ci est ajoutée au ciment sous forme de pouzzolane — de préférence de trass — dont les facteurs hydrauliques n'ont pas seulement pour effet d'enlever à la chaux son rôle nuisible, mais de former avec elle une combinaison utile, un ciment nouveau dont les propriétés s'ajoutent au premier. La réaction est maintenant double.



Dans le fascicule 2, année 1896, des *Annales des Travaux publics*, Michaëlis cite de nombreuses expériences effectuées sur différents mortiers exposés à l'action de diverses solutions salines. Leur durée d'observation était alors forcément limitée ainsi :

A la page 148 on trouve l'expérience effectuée sur 25 mortiers dont quelques-uns renferment des pouzzolanes; ceux-ci seuls étaient restés intacts dans les solutions salines.

(1) Voir *Annales des Travaux publics de Belgique*, année 1896, fasc. 2.

(2) *Bulletins de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale*, janvier et février 1900.

L'auteur me communique actuellement les résultats complémentaires qui suivent :

Au 1^{er} novembre 1900, c'est-à-dire après plus de six ans et demi, les éprouvettes suivantes qui avaient été immergées les unes dans une solution saturée de sulfate de chaux, les autres dans une solution fréquemment renouvelée de sulfate de magnésie à 1 p. c., sont restées parfaitement intactes : 2-3-4-6-8-9-11-15-14-15-16-19-25 (ce sont les mortiers renfermant des pouzzolanes).

* * *

A la page 154 on trouve les résultats d'essais à la traction effectués sur des mortiers formés d'une partie de liant hydraulique et cinq parties de sable.

A = Ciment Portland de Stettin, à 5,8 p. c. d'alumine.

B = — à 9 p. c. d'alumine.

C = Chaux du Teil.

D' = Ciment romain de Bavière (pauvre en chaux).

D = Durcissement en eau douce.

M = — en eau de mer.

Ma = Huit semaines d'exposition à l'air avec aspersion d'eau journalière pour favoriser l'absorption d'acide carbonique; pour CD et CM quatre semaines d'exposition à l'air et pour CMA douze semaines d'exposition à l'air.

Les résultats s'établissent actuellement comme suit :

— 812 —

DURÉE D'IMMERSION.	A D	A M	A Ma	B D	B M	B Ma	C D	C M	C Ma	D D'	D' M	D' Ma
7 jours	Kil. 7.25	Kil. 6.00	Kil. 15.93	Kil. 10.50	Kil. 7.86	Kil. 17.05	Kil. 3.81	Kil. 4.96	Kil. 7.75	Kil. 2.86	Kil. 6.27	Kil. 13.12
28 —	10.09	7.54	15.25	12.68	6.91	17.75	5.17	6.50	6.97	5.11	9.22	13.50
90 —	11.60	10.40	15.28	15.00	9.10	15.89	8.33	10.86	9.89	9.68	11.43	14.66
1 an	16.00	16.00	6.5 à 18	16.70	11.20	2.0 à 15.0	13.25	15.20	12.50	14.43	14.12	15.44
2 ans	16.00	16.50	3.5 à 15	17.00	14.5	détruit.	13.90	14.80	12.80	14.40	13.50	12.60
3 —	17.50	17.20	détruit.	18.20	14.2	—	12.80	14.80	détruit.	13.70	15.00	14.60

— 813 —

OBSERVATIONS. — Au bout de 7 jours, les éprouvettes D'M durcies en eau de mer étaient plus résistantes que les éprouvettes D'D durcies en eau douce.

Au bout de 90 jours, une des éprouvettes BM était entièrement détruite. Au bout d'un an la section de rupture des éprouvettes BM montrait un dépôt salin, qui s'était propagé de l'extérieur vers l'intérieur jusqu'à une profondeur de 5 millimètres; il était formé d'hydrate et de carbonate de magnésie, de sulfate de chaux hydraté $\text{Ca SO}_4 + 2 \text{Aq}$ et de sulfo-aluminate de chaux $\text{Al}^2 \text{O}_3 \cdot 3 \text{Ca O} + 5 \text{Ca O SO}_3$ avec plus de 50 H²O. Les mêmes dépôts s'observent sur les éprouvettes AMa et BMa. Sur CMa la zone blanche s'étendait à 2 millimètres environ de profondeur et sur deux éprouvettes CMa, les arêtes primitivement vives pouvaient s'ébrécher par le frottement du doigt; nous désignerons ce commencement d'altération par « émiettement du sable ». Ainsi les arêtes primitivement vives laissaient après un an d'immersion émietter le sable. Les éprouvettes D'D, D'M et D'Ma (du ciment romain de Bavière) ne montraient à cette époque aucune trace d'action de l'eau de mer.

Après 2 ans l'aspect des éprouvettes était resté le même par toutes les séries de A à D'; le dépôt de sels avait pourtant pénétré un peu plus profondément en A et C'.

Après 5 ans, les éprouvettes AMa et BMa étaient complètement détruites; CM montrait seulement les traces des réactions de l'eau de mer à une profondeur de 3 millimètres; l'aspect extérieur ne montrait encore aucune tendance à la désagrégation, mais en réalité à partir de ce moment les résistances commencent à décliner, — CMa était entièrement détruit — toutes les éprouvettes D'D, D'M, D'Ma étaient restées absolument intactes.

Les parties d'éprouvettes séparées par l'épreuve de rupture et qui présentaient donc chacune une surface tout à fait fraîche, ont été immergées dans une solution de 2 à 3 p. c. de sulfate de magnésie de temps en temps renouvelée.

Voici comment se sont comportées les éprouvettes âgées de 2 ans, brisées, puis immergées dans une solution de 2 p. c. de sulfate de magnésie :

AM totalement détruit jusqu'au centre;

BM — — —

CM et CMa présentaient des exfoliations à la surface ou des gonflements au centre; certaines parties étaient totalement détruites; toutes les éprouvettes présentaient des boursoufflures à la surface.

Parmi les éprouvettes âgées de 5 ans, dont les parties séparées par

l'essai à la rupture avaient séjourné pendant un an dans une solution de 2 à 5 p. c. de sulfate de magnésie : AD, AM, BD, BM étaient totalement détruits; CD, CM et surtout CMa étaient fortement attaqués, tandis que toutes les parties d'éprouvettes D' en ciment romain de Bavière sont restées parfaitement intactes; même après deux ans et demi (elles avaient donc six ans et demi d'âge), tous les échantillons de ce ciment romain étaient en bon état de conservation, alors que tous les autres étaient désagrégés.

* * *

A la page 155 de son travail, M. Michaëlis cite les expériences faites pendant un an avec le ciment A (de Stettin) additionné de trass.

Voici la composition des mortiers :

E	1 p. en poids ciment A	} 1,25 produit hydraulique (1)	} mortier par conséquent un peu plus riche que 1 : 4.
	1 p. » trass		
	4 p. » sable normal		
F	1 p. en poids ciment A	} 1,125 produit hydraulique	} mortier par conséquent un peu plus maigre que 1 : 4.
	0,5 p. » trass		
	4,5 p. » sable normal		

Les résultats s'établissent actuellement comme suit :

(D = immersion en eau douce ; M = immersion en eau de mer.)

AGE DES BRIQUETTES.	E D	E M	F D	F M
—	—	—	—	—
	Kil. par c/c	Kil. par c/c	Kil. par c/c	Kil. par c/c
7 jours	9.80	11.80	11.05	10.10
28 jours	19.80	28.00	16.90	19.55
90 jours	26.70	35.70	21.80	23.65
1 an	30.95	39.50	23.55	24.59
2 ans	35.16	40.50	29.85	25.16
3 ans	36.90	39.20	31.90	25.40

Observations. — Aucune de ces briquettes ne présentait de dépôts

(1) D'après l'analyse, le trass ne renferme que 23 à 25 p. c. de silice et alumine réellement actives.

salins sur la surface de rupture. Les cassures de FM n'étaient pas nettes, mais dentelées.

Les moitiés de briquettes rompues ont été plongées dans la solution de 2 à 5 p. c. de sulfate de magnésie.

1° Les échantillons EM âgés de 2 ans ne montraient aucun dépôt salin après un an de cette nouvelle immersion; sur les échantillons FM les dépôts commençaient à se montrer;

2° Pour les échantillons âgés de 3 ans, EM étaient intacts après 3 1/2 ans d'immersion; [dans FM les dépôts de sels blancs s'étaient encore propagés.

Il ressort de cette expérience qu'une addition d'une partie en poids de trass à deux parties en poids de ciment n'est pas suffisante; le but n'est pas atteint; une partie de la chaux du ciment échappe encore à la réaction.

* * *

A la page 157 de son premier travail, M. Michaëlis cite une autre expérience dont nous pouvons actuellement donner des résultats complets.

G = ciment Portland à 9 p. c. d'alumine + 5 parties de sable normal (en poids).

H = ciment G 1 partie, trass 1 partie, sable normal 6 parties (en poids).

I = ciment G 1 partie, trass 1 partie, sable normal 6.75 parties (en poids).

K = chaux du Teil 1 partie, sable normal 5 parties (en poids).

L = chaux du Teil 1 partie, trass 1 partie, sable normal 5 parties (en poids).

M = chaux du Teil 1 partie, trass 1 partie, sable normal 6 parties (en poids).

H renferme 1 partie produit hydraulique pour 5.5 p. c. de sable.

I	—	—	—	6	—
L	—	—	—	5	—
M	—	—	—	5.6	—

K, L, M ont durci pendant 7 jours dans une atmosphère humide et close.

D = durcissement en eau douce. M en eau de mer, Δ = densité.

DURÉE D'IMMERSION.	G D	G M	H D	H M	I D	I M	K M	L M	M M
28 jours.	8.80	6.55	10.40	21.65	10.10	20.45	2.97	11.75	10.30
Δ	»	»	»	»	»	»	2.162	2.195	2.227
90 jours.	10.25	7.55	16.85	24.55	16.55	24.60	2.39	21.57	20.10
Δ	2.137	2.172	2.26	2.28	2.274	2.292	2.252	2.250	2.250
Un an.	15.95	{ 8.0 à 14.0	24.80	26.20	21.45	25.60	{ 4.6 à 6.5	22.8	22.8
Δ	2.15	2.14	2.27	2.295	2.271	2.31	2.31	2.275	2.288
Deux ans.	18.6	{ 8.0 à 17.5	22.9	30.1	23.44	27.50	{ 5.1 à 7.5	{ 26.5 à 31.5	{ 25.5 à 30.0
Δ	2.169	2.217	2.27	2.322	2.277	2.312	»	»	»
(1)	154	131	340	340	340	265			
Trois ans.	18.85	{ 9.5 à 21	24.8	31.4	21.80	29.62	{ 3.9 à 6.1	{ 27.5 à 33.5	{ 23 à 27
Δ	2.170	2.241	2.285	2.311	2.28	2.310	2.351	2.283	2.302
	163	150	352	335	310	274			
Cinq ans.	17.56	{ 12 à 17	25.8	30.68	22.9	30.06	(2)	{ 15 à 36	{ 13.5 à 27.5
Δ	2.172	2.266	2.288	2.310	2.286	2.33	2.400	2.310	2.318
	168	145	396	352	363	293			

OBSERVATIONS. — *Au bout de 2 ans*, les éprouvettes en mortier de ciment et sable sont déjà fortement attaquées par l'eau de mer, ainsi que le montrent la chute des résistances et l'apparition de précipités blancs dont les dépôts se propagent graduellement de l'extérieur vers l'intérieur de la masse du mortier.

(1) Les chiffres en caractères gras représentent les résistances à la compression obtenues sur les morceaux d'éprouvettes réunies au moyen d'une bande de caoutchouc.

(2) Ces éprouvettes ne présentent aucune résistance; elles se brisent en les assujettissant dans la griffe du dynamomètre.

Au bout de 5 ans, cette action de l'eau de mer a manifesté même dans H et I, ce qui montre que la quantité de trass ajoutée n'était pas encore suffisante. K était fortement attaqué et entièrement désagrégé au bout de cinq ans. L et M commençaient certainement à s'altérer au bout de 5 ans, la proportion de trass ajoutée étant insuffisante, mais extérieurement on n'y apercevait aucune détérioration, même après 6 1/2 ans et un traitement final par la solution à 2 p. c. de sulfate de magnésie.

* * *

Voyons maintenant les résultats obtenus pendant 4 ans avec la dernière série de mortiers (voir *Annales*, fasc. 2, 1897, p. 249) :

N	}	1 partie en poids ciment de Stettin	}	9,5 d'eau pour 100
		4 — sable normal		de matière sèche.
O	}	1 — ciment de Stettin	}	10,1 d'eau pour 100
		1 — trass		de matière sèche.
		6,2 — sable normal		
P	}	1 — ciment de Stettin	}	9,8 d'eau pour 100
		1 — trass		de matière sèche.
		8 — sable normal		
Q	}	1 — ciment de Stettin	}	10 d'eau pour 100
		1 — trass		de matière sèche.
		1 — sable fin de Freienwald		
	}	7 — sable normal	}	
R		}		1 — ciment de Stettin
	1 — sable fin de Freienwald		de matière sèche.	
	7 — sable normal			

DURÉE D'IMMERSION.	N		O		P		Q		R	
	ND	NM	OD	OM	PD	PM	QD	QM	RD	RM
28 jours.	15.6	12.75	18.66	23.41	12.91	18.83	13.25	18.91	5.83	5.50
90 —	21.4	15.42	23.67	29.90	18.83	22.75	19.40	23.40	8.38	7.85
(1)	216	189	260	304	165	179	196	231	61.4	67.4
Δ	2.199	2.242	2.236	2.276	2.177	2.104	2.224	2.244	2.134	2.177
180 jours.	21.78	17.42	27.57	31.64	21.43	26.43	21.7	26.9	9.85	10
	232	203	271	310	183	213	216	246	67	70
Δ	2.191	2.259	2.238	2.287	2.198	2.217	2.24	2.262	2.142	2.187
Un an.	22.64	20.07	27.28	33.14	25.00	23.85	25.00	26.85	11.07	12.14
	274	221	312	326	207	214	263	266	84	82
Δ	2.227	2.307	2.480	2.30	2.194	2.218	2.236	2.270	2.142	2.187
Deux ans.	22.35	22.30	30.40	30.00	24.80	22.80	25.50	26.60	12.50	14.00
	306	255	341	356	252	218	272	254	90	88
Δ	2.226	2.282	2.252	2.316	2.210	2.245	2.253	2.257	2.150	2.202
Trois ans.	23.33	23.40	30.75	35.75	24.50	20.40	27.25	27.75	12.10	15.25
	314	272	377	385	246	231	304	272	98	106
Δ	2.228	2.304	2.259	2.320	2.205	2.256	2.253	2.305	2.142	2.222
Quatre ans.	21.78	21.93	30.78	29.50	24.78	20.80	27.30	25.20	11.80	15.10
	338	261	379	362	261	238	322	285	101	106
Δ	2.240	(2)	2.259	2.328	2.208	2.264	2.256	2.318	2.155	2.268

(1) Les chiffres en caractères gras représentent les résistances à la compression obtenues sur les morceaux d'éprouvettes réunies par une bande de caoutchouc.
 (2) Par suite de l'émiettement du sable la densité exacte ne pouvait plus être déterminée.

Que l'on compare maintenant, conclut M. Michaëlis, les résultats obtenus avec les mélanges V, Q, R. Si, comme l'ont toujours prétendu certains fabricants de ciment Portland, le trass ne constituait qu'un moyen de remplissage, Q serait un mélange dans les proportions de 1:9. Il a sensiblement les mêmes densités que N, et il présente de plus fortes résistances. Celles-ci doivent être attribuées, sans contestation possible, à l'influence du trass, mais la propriété principale de ce dernier produit c'est qu'il rend le mortier réfractaire à l'eau de mer. R au contraire ne constitue qu'un mélange dans la proportion 1:8 et sa résistance atteint à peine la moitié ou même le tiers de Q.

O dépasse N dans toutes les étapes; l'action du trass ne saurait se manifester plus clairement. Au bout de 80 jours RM renfermait déjà des dépôts salins blancs, propagés de l'extérieur vers l'intérieur; au bout de 5 ans, le sable se détachait déjà des arêtes par émiettement. Le même émiettement de sable se manifestait dans NM au bout de 4 ans.

Dans les essais de ciment Portland et de chaux du Teil, on a toujours observé que les éprouvettes qui avaient été abandonnées avant les immersions à 4 ou 8 jours d'exposition à l'air, avec aspersion d'eau et absorption d'acide carbonique, ont été le plus rapidement et le plus complètement détruites par l'action de l'eau de mer. On peut en conclure, que, contrairement aux idées régnantes, on marche à l'encontre du but à atteindre en laissant les blocs de mortier ou de béton durcir longtemps à l'air avant de les immerger dans la mer. Cette pratique repose sur cette notion exacte que l'on a saturé partiellement par l'acide carbonique l'excès de chaux nuisible des ciments, et que les sulfates de l'eau de mer ne réagissent pas sur la chaux carbonatée, mais il faut considérer que maintenant d'autres facteurs entrent en jeu: par le séjour à l'air le mortier se dessèche, perd l'eau nécessaire au gonflement colloïdal; le mortier n'acquiert pas son étanchéité, et devient tellement perméable qu'il livre passage à l'eau de mer jusqu'à l'intérieur de la masse, là où la chaux se trouve encore à l'état libre, de façon que l'altération se propage de l'intérieur vers l'extérieur jusqu'à ébranler toute sa structure et la disloquer. On peut en conclure qu'il est recommandable d'immerger les blocs aussitôt que possible après leur confection dans l'eau douce chargée d'acide carbonique (par exemple chargée de carbonate d'ammoniaque).

II.

Expériences officielles effectuées en Allemagne.

Antérieurement à la publication de la thèse de M. Michaëlis, en 1894, l'Association des fabricants de ciment d'Allemagne avait entrepris avec un subside obtenu du Ministère des Travaux publics de Prusse, une série d'expériences sur les mortiers de ciment et sur les mortiers de trass-chaux à la mer, à Westerland, dans l'île de Sylt. Les résultats tendirent à démontrer la supériorité des mortiers de ciment sur tous les autres, notamment sur les mortiers de trass-chaux. Ces recherches ne s'étaient pas étendues jusqu'aux mortiers de trass-ciment.

Les maîtres de carrières de trass du Rhin qui étaient restés étrangers à ces expériences, attribuèrent l'insuccès (voir *Protocolle der Verhandlungen des Vereins deutscher Portland cement Fabrikanten*, 1895, p. 20; 1894, p. 28; 1895, p. 102; 1896, p. 84; 1897, p. 58) à la façon dont le travail avait été conduit : les opérateurs n'étaient pas suffisamment au courant de la manutention des mortiers de trass.

« Le ciment Portland, disaient-ils, constitue un produit fini que la simple addition d'eau fait durcir sans aucun autre mélange artificiel. Le trass, au contraire, est un produit inerte par lui-même; il n'acquiert son aptitude au durcissement hydraulique que par sa combinaison avec la chaux. On comprend dès lors que si l'on veut obtenir avec les deux mortiers des résultats comparables, il faut opposer au ciment Portland, produit d'un mélange parfait et fini, un mélange de trass et de chaux, également parfait et fini; ce n'est qu'après cette préparation que l'addition de sable peut s'effectuer, etc. »

D'après les maîtres de carrières de trass, la façon dont les expériences avaient été conduites par l'« Association des fabricants de ciment » et les représentants du Ministère des Travaux publics ne pouvait aboutir à des résultats concluants : des exemples séculaires prouvent la bonne tenue à la mer des mortiers de trass et ne pouvaient être contredits par l'expérience relativement courte de l'île de Sylt (*Protocolle der Verhandlungen des Vereins deutscher Portland cement Fabrikanten*, 1897, pp. 68 et suiv.).

En janvier 1897, une commission officielle fut instituée pour reprendre l'étude de l'importante question. Je relate sa composition et les premiers résultats de ses travaux, d'après le rapport que vient de faire paraître M. Gary, ingénieur à l'Institut royal d'épreuves de Charlotten-

bourg : « Bericht über das Verhalten hydraulischer Bindemittel im Seewasser, nach Versuchen der Königlichen technischen Versuchsanstalten zu Berlin, im auftrage der von dem Königlichen Ministerium der öffentlichen arbeiten zu Berlin berufenen Kommission ».

La commission était composée comme suit :

1° Comme représentants du Ministère des Travaux publics :

MM. Lange, Oberbaurath;
Fulcher, Baurath;
Eger, Reg. und Baurath;
Kratz, Baumeister.

2° Comme représentants de l'Institut royal d'épreuves :

Professeur Finkener, Bergrath;
— Martens;
Ingénieur Gary.

3° M. Michaëlis.

4° Comme représentants de l'Union des Fabricants de ciments d'Allemagne :

MM. Delbruch;
Dyckerhoff.
Suppléant : M. Gosslich.

5° Comme représentant des maîtres de carrières de Trass :

M. Herfeldt.
Suppléant : M. Wagner.

Le rapport s'étend en de longues pages sur le programme des travaux et sur les soins minutieux qui furent pris pour rendre les résultats bien comparables entre eux. Je renvoie au mémoire original ceux des lecteurs que ces détails intéresseraient (1).

Comme matériaux à soumettre aux essais on choisit :

A. Un ciment Portland, obtenu par la voie humide, riche en chaux et pauvre en alumine.

(2) C. Un ciment Portland obtenu par la voie sèche, pauvre en chaux et riche en alumine.

D. Un ciment Portland riche en chaux et en alumine.

Ces ciments, qui étaient de fabrication courante et prélevés sur de

(1) Berlin, chez Jules Springer, 1900.

(2) Un ciment B a dû être abandonné au cours des expériences.

grandes fournitures en cours, présentaient la composition suivante :

	A	B	C
Matières insolubles.	0.84 p. c.	0.91 p. c.	0.57 p. c.
Silice	22.68	20.52	21.09
Alumine	4.24	8.52	7.82
Oxyde de fer.	2.05	3.18	2.30
Chaux	65.95	62.17	64.70
Magnésie	1.25	1.95	
Alcalis	1.58	1.52	
Acide sulfurique combiné.	1.48	1.26	
Acide phosphorique.	0.18	0.18	

Résistance du mortier normal à la traction en 7 jours . 20k.p^rc/c. 15.6k.p^rc/c. 20.4k.p^rc/c.
 Id. en 28 jours 27.3 — 23.6 — 23.7 —

Les tableaux suivants donnent les résultats obtenus avec les différents mortiers qui ont été moulés en briquettes et immergés dans la mer à l'île de Sylt avec toutes les précautions nécessaires pour qu'elles ne puissent subir aucune altération d'ordre mécanique :

Ciment A.

MODE	Résistance à la traction en kil. par c/c. après				Résistance à la compression en kil. par c/c. après			
	7 jours.	28 jours.	3 mois.	un an.	7 jours.	22 jours.	3 mois.	un an.
1 ciment + 2 sable normal.								
En eau douce	37.6	41.8	45.5	50.7	354	462	582	621
— de mer	36.8	40.6	36.6	42.9	352	441	553	581
1 ciment + 3 sable normal.								
En eau douce	24.5	27.9	36.0	34.5	210	294	379	441
— de mer	22.8	28.3	30.4	28.9	207	274	337	368
1 ciment + 4 sable normal.								
En eau douce	17.1	21.4	26.9	26.2	144	200	266	304
— de mer	16.6	20.6	24.8	23.6	140	185	235	248
1 liant hydraulique (52 ciment + 48 trass) + 2 sable normal.								
En eau douce	21.7	35.2	41.9	44.5	168	364	467	514
— de mer	23.0	44.9	53.2	54.1	182	387	448	493
1 liant hydraulique (52 ciment + 48 trass) + 3 sable normal.								
En eau douce	15.2	25.1	32.8	36.5	102	230	301	351
— de mer	18.4	34.6	39.6	37.7	110	250	296	329
1 liant hydraulique (52 ciment + 48 trass) + 4 sable normal.								
En eau douce	9.0	18.1	23.5	29.5	58	130	189	241
— de mer	12.3	25.5	30.0	31.3	69	150	186	225
1 liant hydraulique (65 ciment + 35 trass) + 2 sable normal.								
En eau douce	—	39.5	44.0	—	—	438	558	—
— de mer	—	45.0	50.7	—	—	446	487	—
1 liant hydraulique (52 ciment + 48 sable fin) + 2 sable normal.								
En eau douce	25.8	34.1	37.3	43.0	245	332	440	512
— de mer	25.0	35.3	36.9	38.4	244	331	382	426
1 liant hydraulique (52 ciment + 48 sable fin) + sable normal.								
En eau douce	9.6	14.2	16.5	20.7	71	99	133	168
— de mer	9.6	14.3	16.6	20.3	70	96	115	135

Ciment C.

MODE D'IMMERSION.	Résistance à la traction en kil. par c/c. après				Résistance à la compression en kil. par c/c. après			
	7 jours.	28 jours.	3 mois.	un an.	7 jours.	28 jours.	3 mois.	un an.
	1 ciment + 2 sable normal.							
En eau douce.	26.4	30.3	36.5	48.7	243	508	407	510
— de mer.	26.1	26.2	27.2	29.9	231	298	367	402
1 ciment + 3 sable normal.								
En eau douce.	19.2	24.0	29.6	31.0	130	196	262	302
— de mer.	18.0	22.9	22.7	23.7	126	186	230	226
1 ciment + 4 sable normal.								
En eau douce.	13.9	16.8	22.4	27.0	103	145	199	245
— de mer.	12.1	15.5	19.6	21.5	98	138	169	181
1 liant hydraulique (50 ciment + 40 trass) + 2 sable normal.								
En eau douce.	19.4	29.8	35.9	35.5	137	297	445	489
— de mer.	20.8	41.6	42.9	47.8	143	330	424	475
1 liant hydraulique (60 ciment + 40 trass) + 3 sable normal.								
En eau douce.	13.6	23.2	27.6	33.0	82	183	277	318
— de mer.	14.9	33.1	37.7	43.0	83	214	252	295
1 liant hydraulique (60 ciment + 40 trass) + 4 sable normal.								
En eau douce.	8.0	14.6	18.9	25.3	56	113	174	219
— de mer.	10.3	23.0	26.6	28.3	62	134	167	198
1 liant hydraulique (70 ciment + 30 trass) + 2 sable normal.								
En eau douce.	—	33.6	40.7	—	—	519	440	—
— de mer.	—	42.6	44.9	—	—	338	397	—
1 liant hydraulique (60 ciment + 40 sable fin) + 2 sable normal.								
En eau douce.	23.7	27.3	31.5	35.1	179	258	320	394
— de mer.	23.7	26.8	29.9	26.0	185	245	280	303
1 liant hydraulique (60 ciment + 40 sable fin) + 4 sable normal.								
En eau douce.	8.8	12.5	16.2	20.6	60	92	126	164
— de mer.	9.8	13.6	15.0	18.8	62	91	105	127

Ciment D.

MODE D'IMMERSION.	Résistance à la traction en kil. par c/c. après				Résistance à la compression en kil. par c/c. après			
	7 jours.	28 jours.	3 mois.	un an.	7 jours.	28 jours.	3 mois.	un an.
	1 ciment + 2 sable normal.							
En eau douce.	33.7	38.7	41.5	52.4	279	352	420	454
— de mer.	35.1	40.2	38.2	29.3	283	351	383	402
1 ciment + 3 sable normal.								
En eau douce.	23.3	27.2	33.7	36.9	183	243	295	343
— de mer.	25.2	29.2	29.1	24.1	163	229	279	308
1 ciment + 4 sable normal.								
En eau douce.	17.2	19.6	24.9	27.2	112	154	200	226
— de mer.	16.9	20.2	20.8	18.8	117	148	179	(92)
1 liant hydraulique (55 ciment + 45 trass) + 2 sable normal.								
En eau douce.	18.7	32.3	40	36.3	143	291	406	435
— de mer.	19.8	40.8	47.8	50.0	148	281	385	445
1 liant hydraulique (55 ciment + 45 trass) + 3 sable normal.								
En eau douce.	12.7	21.2	27.2	33.5	78	158	261	306
— de mer.	14.2	28.2	36.0	36.2	88	169	241	299
1 liant hydraulique (55 ciment + 45 trass) + 4 sable normal.								
En eau douce.	10.1	15.0	19.2	25.0	61	107	161	219
— de mer.	9.1	20.4	25.0	25.9	51	116	154	196
1 liant hydraulique (67 ciment + 33 trass) + 2 sable normal.								
En eau douce.	—	35.3	46.2	—	—	311	460	—
— de mer.	—	40.2	52.0	—	—	310	422	—
1 liant hydraulique (55 ciment + 45 sable fin) + 2 sable normal.								
En eau douce.	23.3	28.9	35.4	37.4	181	258	353	445
— de mer.	26.2	31.0	36.0	27.3	191	263	312	599
1 liant hydraulique (55 ciment + 45 sable fin) + sable normal.								
En eau douce.	9.6	13.1	17.9	22.7	54	91	123	166
— de mer.	10.1	11.8	14.9	19.1	58	85	99	115

A la suite de ces essais d'un an, la Commission formule les remarques et conclusions suivantes :

1. Comme résistances les trois ciments ne présentent pas des différences notables. Tous les trois sont des ciments Portland de valeur normale. Le ciment A, riche en chaux, se distingue par de hautes résistances à la compression.

Pour tous les essais la progression des résistances en eau douce est régulière; pendant les trois premiers mois ces résistances augmentent fortement; depuis ce moment elles ne croissent plus qu'en faibles limites. Pour quelques séries, la résistance en eau de mer décline après un certain temps, notamment pour les mortiers de ciment pur A et D, dosages 1 : 2 — 1 : 3 et 1 : 4 de sable normal. Cette chute paraît déjà se préparer au bout d'un mois d'âge;

2. Les mortiers riches 1 : 2 ne se maintiennent guère mieux que les mortiers pauvres 1 : 4; abstraction faite naturellement des résistances plus élevées qu'elles atteignent;

5. Le sable tout venant, à grains de dimensions variées et qui renferme, par conséquent, relativement peu de vides produit naturellement pour un même dosage de plus hautes résistances que le sable normal. En eau de mer, les résistances de ce mortier à sable tout venant ne progressent que très faiblement, après une durée d'immersion de trois mois, et malgré la structure serrée des éprouvettes, elles restent bien inférieures aux résistances obtenues en eau douce qui croissent franchement jusqu'à un an. Cette influence se manifeste particulièrement dans les épreuves à la compression. Cette allure fléchissante à l'eau de mer, qui se caractérise surtout au bout d'un certain temps et qui se manifeste aussi bien que dans les mortiers de sable normal est difficilement explicable.

4. A l'eau douce, comme il était à prévoir, le remplacement du ciment par le sable très fin ou le trass, constitue, en général, une cause d'affaiblissement du mortier — à peu près dans la même mesure pour les trois ciments. Il n'y a d'exceptions à cette remarque que pour les mortiers riches à faible addition de trass.

L'addition de fortes proportions de trass exerce une influence d'accroissement remarquable, uniquement dans les épreuves de compression des ciments C et D; au bout d'un an ces résistances se rapprochent de celles qui sont obtenues par le ciment pur. — L'addition de sable fin fait fléchir les résistances, notamment, dans les mortiers 1 : 4; mais l'allure progressive du durcissement reste bonne.

A l'eau de mer la résistance après 7 jours, tant à la traction qu'à la compression, est toujours plus faible pour les mortiers additionnés de

trass que pour les mortiers de ciment pur, mais au bout d'un mois déjà, ils les dépassent en résistance à la traction. Comme résistance à la compression, les mortiers de trass restent en retard sur les mortiers de ciment pur et s'en rapprochent, en général, au bout d'un an.

Cette résistance à la compression des mortiers de trass ne dépasse au bout d'un an que celle du ciment C (c'est-à-dire le ciment pauvre en chaux et riche en alumine).

Les mortiers de sable fin restent sensiblement en retard des mortiers de ciment pur comme résistance absolue, mais l'allure du durcissement progresse avec plus d'énergie;

5. Pour autant qu'on puisse tirer des conclusions des résultats obtenues en trois mois, les faibles additions de trass exercent une action plus favorable que les fortes doses de trass tant en eau de mer qu'en eau douce. Les effets se manifestent d'une manière toute différente sur les résistances de traction que sur les résistances de compression. Pour les mortiers à faible teneur de trass, l'eau douce agit très favorablement sur leur résistance à la traction. Une exception se manifeste pourtant à l'égard des essais de traction du ciment A (le plus riche en chaux) en mortier 1 + 2 et 1 + 4; là les fortes doses de trass agissent plus favorablement que les faibles; cette tendance paraît même se manifester pour les résistances à la compression, mais tardivement.

6. Les mortiers au sable fin montrent, en général, la même progression dans l'allure de leur durcissement que les mortiers de trass, mais leur résistance est tellement inférieure que la différence saute aux yeux et qu'il est inadmissible que l'action des deux substances soit uniquement d'ordre physique.

Des essais chimiques et microscopiques sur les débris des éprouvettes pourront montrer dans quelles proportions la chaux s'est chimiquement combinée aux éléments du trass.

7. A l'eau de mer, l'action favorable des additions de trass se dessine plus énergiquement sur le ciment pauvre en chaux C que sur le ciment riche en chaux A.

Pour le reste, on ne voit guère de différences notables dans la façon dont se comportent les trois ciments.

Il ressort des expériences qui précèdent qu'il est possible de mieux approprier le ciment Portland aux constructions en eau de mer par l'addition de trass.

La Commission compte étendre ses travaux sur des corps d'épreuve de plus grandes dimensions, notamment sur des blocs de béton.

Nous publierons les résultats ultérieurs de ce remarquable travail,

au fur et à mesure qu'ils nous seront transmis. Dès aujourd'hui, on peut remarquer qu'il corrobore d'une manière éclatante les vues énoncées par le docteur Michaëlis.

III.

Expériences effectuées en Angleterre sur les mélanges de ciment et de trass.

M. Faija, l'expérimentateur bien connu du laboratoire de Westminster, a également soumis à l'essai des mélanges de ciment Portland anglais et de trass des bords du Rhin. Dans le rapport original, les résultats sont consignés en livres par pouce carré; je les traduis en kilogramme par centimètre carré.

Essais en eau douce.

DOSAGES EN POIDS.			RÉSISTANCE A LA TRACTION APRES				
sable.	cime nt	trass.	7 jours.	28 jours.	3 mois.	6 mois.	un an.
			Kil.	Kil.	Kil.	Kil.	Kil.
2	1	»	14.41	22.63	34.16	36.41	41.19
3	1	»	12.23	17.01	27.48	27.55	31.21
4	1	»	8.78	10.17	20.12	22.21	23.90
4	1	1	8.01	16.87	28.61	34.86	42.60
5	1	»	6.74	11.75	16.23	18.27	20.45
5	1	1	5.76	17.92	28.96	33.81	38.80

Essais en eau de mer (gâchage à l'eau de mer et immersion dans l'eau de mer).

DOSAGES EN POIDS.			RÉSISTANCE A LA TRACTION APRES				
sable.	ciment.	trass.	7 jours.	28 jours.	3 mois.	6 mois.	un an.
Parties	Partie	Partie.	Kil.	Kil.	Kil.	Kil.	Kil.
2	1	»	10.05	14.69	26.01	28.46	31.77
3	1	»	9.48	15.25	23.54	22.95	29.03
4	1	»	7.00	10.96	17.29	17.71	17.01
4	1	1	9.06	24.60	35.64	40.84	49.21
5	1	»	5.34	10.12	15.74	17.57	16.23
5	1	1	5.41	23.12	34.09	39.92	49.49

IV.

Les expériences effectuées au laboratoire de MM. Stanger et Blount de Londres, fournissent également des résultats qui montrent la grande efficacité des additions de trass au ciment :

Essais à la traction de briquettes gâchées à l'eau de mer et immergées dans l'eau de mer.

Proportions : 1 vol. ciment, 3 vol. sable.	Proportions : 1/2 v. trass, 1/2 v. ciment, 3 v. sable.					Proportions : 2/5 v. ciment, 2/5 v. trass, 3 v. sable.					
	7 jours.	14 jours.	28 jours.	3 mois.	6 mois.	7 jours.	14 jours.	28 jours.	3 mois.	6 mois.	12 mois.
Kil.	8.4	8.4	7.7	8.16		Kil.	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
						Kil.	4.9	5.95	16.1	19.6	19.6
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1
						Kil.	4.2	5.6	14.0	16.1	22.4
						Kil.	4.43	5.72	14.9	17.5	23.3
						Kil.	4.2	5.6	14.7	16.8	23.1

V.

Expériences effectuées en Hollande.

M. Wortman, ingénieur du Waterstaat hollandais, a fait en vue de la construction du port extérieur de Scheveningue des expériences sur des bétons de trass-ciment (1); ces épreuves étaient en partie motivées par les altérations constatées dans les blocs de béton de ciment qui forment les extrémités du port d'Ymuiden. Ces blocs, construits en 1875-1876, au dosage de 1 volume ciment Portland, 3 volumes sable de rivière, 5 volumes gravier ont dû être successivement réparés; la partie extérieure a été démolie et remplacée par un revêtement en maçonnerie de briques.

M. Wortman confectionna trois séries de bétons :

- » I. Un béton de ciment formé de 1 volume ciment, 2 1/2 volumes sable et 6 volumes gravier.
- » II. Un béton de trass-ciment formé de 1 volume ciment, 1 volume trass, 4 volumes sable et 10 volumes gravier.
- » III. Un béton de trass-ciment formé de 1 volume ciment, 1/2 volume trass, 5 volumes sable et 7 1/2 volumes gravier.
- » Comme le poids spécifique du trass n'est que le 2/3 environ du poids spécifique du ciment, les rapports *en poids* des deux derniers dosages, s'établissent à peu près comme suit :

» pour le II. . . . 1 ciment, 2/3 trass.
 » — III. . . . 1 — 1/3 —

» Les dosages furent choisis de telle manière qu'en poids les rapports entre le liant hydraulique et les matières inertes restassent sensiblement les mêmes.

» On choisit le dosage III, parce que, malgré les preuves antérieures de l'efficacité des additions de trass, il n'y a pas lieu d'admettre à priori que le dosage par volumes égaux de trass et de ciment est toujours le meilleur; des recherches sur la proportion la plus favorable étaient tout indiquées.

» Des trois sortes de bétons, on confectionna quatre séries d'éprouvettes; chaque série était formée de 5 cubes de 15 centimètres de côté; c'était la plus forte dimension compatible avec le dynamomètre. »

(1) Voir : *De Ingenieur*, 18 Mei 1901.

1^{re} série, confectionnée au moyen d'eau douce, durcissement à l'air pendant 30 jours.

2^e série, confectionnée au moyen d'eau douce, durcissement à l'air pendant 60 jours.

3^e série, confectionnée au moyen d'eau de mer, durcissement à l'air pendant 30 jours.

4^e série, confectionnée au moyen d'eau de mer, durcissement à l'air pendant 60 jours.

La 2^e et la 4^e série du béton III ont dû être essayées après 47 jours de durcissement; il était nécessaire de connaître les résultats à cette date.

L'emploi de l'eau de mer pour la confection des cubes s'imposait, parce que le temps manquait pour essayer des éprouvettes confectionnées à l'eau douce et durcies à l'eau de mer. L'influence de l'eau saline, doit se manifester plus rapidement, lorsqu'elle est amenée en contact intime avec toutes les particules du mortier.

Le gravier était du gravier lavée du Rhin; la plus forte dimension des gros galets était de 5 centimètres.

Le sable était du sable graveleux de la Lek.

Le trass était du bon trass d'Andernach du commerce (perte au feu 7.5 p. c.).

Le ciment provenait de la Société anonyme Niel-on-Rupel.

Les mélanges furent effectués avec le moins d'eau possible :

Pour le béton I, 1/19 du volume des matériaux secs.

— II, 1/14 — —

— III, 1/18 — —

Tous les cubes durcirent à l'air.

Voici les résultats obtenus au laboratoire de MM. Koning et Bienfait d'Amsterdam :

Résistances à la compression par kilogramme en centimètres carrés.

DÉSIGNATION DU BÉTON.	GACHAGE A L'EAU DOUCE		GACHAGE A L'EAU DE MER	
	après 30 jours.	après 60 jours.	après 30 jours.	après 60 jours.
I.				
	50.6	(58.6)	33.3	69.3
Béton de ciment.	30	90.6	22.2	68.4
1 ciment.	39.7	111.1	39.1	49.3
2 1/2 sable.	35.2	108.0	44.2	75.5
6 gravier.	34.3	108.8	18	(30.0)
	moyenne 38	moyenne 104.6	moyenne 31.6	moyenne 65.4
II.				
Béton de trass cim ^t .	22.6	43.1	53	61.7
1 ciment.	23.3	53.7	33.7	51.1
1 trass.	21.6	47.1	46	74.2
4 sable.	21.6	40.8	40	78.6
10 gravier.	17	47.1	57.7	»
	moyenne 21.2	moyenne 46.3	moyenne 46	moyenne 66.4
III.		(apr. 47 jours.)		(apr. 47 jours.)
Béton de trass cim ^t .	42.2	68.4	48.4	82.2
1 ciment.	52.0	83.5	56.4	71.1
1/2 trass.	37.7	80	66.0	64.8
3 sable.	44.4	88.8	52.8	75.1
7 1/2 gravier.	48.8	82.2	49.5	80.4
	moyenne 45	moyenne 80.6	moyenne 54.6	moyenne 74.7

L'examen des tableaux montre des différences assez sensibles dans les résistances d'une éprouvette à l'autre d'une même série. Ces divergences doivent très probablement être attribuées aux faibles dimensions des cubes qui sont fortement influencés par certaines causes accidentelles, telles que la forme et les dimensions des galets. Des cubes plus grands auraient probablement donné des résultats plus uniformes. Les chiffres entre parenthèses qui présentent des écarts trop considérables ont été négligés dans le calcul des moyennes.

Les résultats moyens suffisent en tous cas pour donner une idée générale sur la résistance des trois sortes de béton.

Lorsque le mortier est gâché à l'eau douce, le béton II, à forte teneur en trass, paraît durcir moins rapidement que le béton I en ciment pur. Même après 3 mois, la résistance à l'écrasement du béton II (46^k.3) n'atteint pas la moitié de celle du béton I (104^k.6).

Si l'on ajoute le trass en quantité moindre comme dans le béton III, la résistance au bout de 2 mois est au moins aussi grande que celle du béton de ciment pur (une résistance de 80^k.6 après un durcissement de 47 jours permet de conclure à une résistance supérieure à 100 kil. au bout de 60 jours). Après un durcissement de 30 jours, la résistance moyenne du béton III paraît franchement supérieure à celle de I; peut-être faut-il l'attribuer à une cause accidentelle, car on ne voit pas de motif qui justifie cette supériorité.

Lorsque le mortier est gâché à l'eau de mer, les résultats sont absolument différents. Le béton de ciment présente des résistances inférieures au béton de trass-ciment, aussi bien après 30 jours qu'après 60 jours. La supériorité du béton III, qui ne renferme que 1/2 volume de trass pour 1 volume de ciment est particulièrement caractéristique.

Il convient de remarquer que le béton de trass-ciment gâché à l'eau de mer est beaucoup plus résistant au bout de 30 jours que le même béton gâché à l'eau douce. Pour le béton II, qui est le plus riche en trass, cet excédent de résistance se marque encore après 60 jours.

On pourrait en conclure que l'addition de trass au mortier de ciment a pour effet, non-seulement d'entraver l'action nuisible de l'eau de mer, mais même d'agir favorablement sur le durcissement du trass, surtout au début; on serait ainsi amené non seulement à tolérer l'usage de l'eau de mer pour le gâchage des mortiers, mais même à le prescrire, s'il n'y avait des difficultés d'ordre pratique d'amener sur les chantiers de l'eau de mer bien propre.

En résumé, on peut déduire des résultats obtenus à Amsterdam que la proportion de 1 volume ciment pour 1/2 volume trass est la meilleure des trois. A l'eau douce elle donne au moins d'aussi bons résultats que

ceux du béton de ciment et à l'eau de mer, elle donne des résultats amplement supérieurs.

VI.

Expériences effectuées en France sur les mélanges de ciment et de pouzzolanes en général.

M. Féret, chef du laboratoire des ponts et chaussées de France, à Boulogne-sur-Mer, a étudié de son côté l'influence de l'addition de diverses pouzzolanes au ciment, dans le but d'augmenter la résistance des mortiers à l'eau de mer. Je détache le passage suivant de sa note présentée au Congrès international des méthodes d'essais des matériaux de construction, tenu à Paris en juillet 1900.

M. Féret a entrepris « des expériences sur une assez grande échelle, » principalement dans les ports de Boulogne et de Calais sur divers » mélanges de ciment avec plusieurs pouzzolanes, parmi lesquelles il » s'est surtout attaché à étudier un produit d'origine française, la gaize » de l'Argonne (silice naturelle soluble) qu'on pourrait au besoin avoir » à peu de frais et en grande abondance.

» Les essais ont porté sur de véritables maçonneries. Celles-ci sont » agées maintenant de deux ans et de un an : jusqu'à présent les résultats sont satisfaisants, mais il manque encore à ces essais la sanction du temps, sans laquelle, surtout en pareille matière, on ne saurait poser de conclusions fermes.

» Le diagramme ci-dessous montre la progression jusqu'à un an des résistances à la compression par centimètre carré des mortiers » ayant servi pour une de ces séries d'essais en grand et employés en » novembre 1898 dans des maçonneries exécutées vers l'extrémité de » l'une des jetées du port de Boulogne. Tous ces mortiers étaient » dosés à raison de 400 kilogrammes de divers liants par mètre cube » de sable employé couramment à Boulogne pour les travaux. Les » échantillons ayant servi pour les essais, ont été prélevés sur le chantier même dans les tas de mortier fabriqués par les maçons; ils ont » été moulés sur place, puis, après la prise faite, apportés au laboratoire, immergés dans l'eau de mer quarante-huit heures après le » gâchage et conservés dans cette eau fréquemment renouvelée. Aucun » ne montre encore, soit à la jetée, soit au laboratoire, des traces » d'altération, mais on constate que les mortiers ou entrent des

» mélanges par parties égales de ciment et de pouzzolanes moulus ensemble, ont après un an des résistances à peu près doubles du » mortier fait avec le ciment sans mélange, quoique ce dernier mortier » contienne, à volume égal, un poids de ciment double des premiers. »

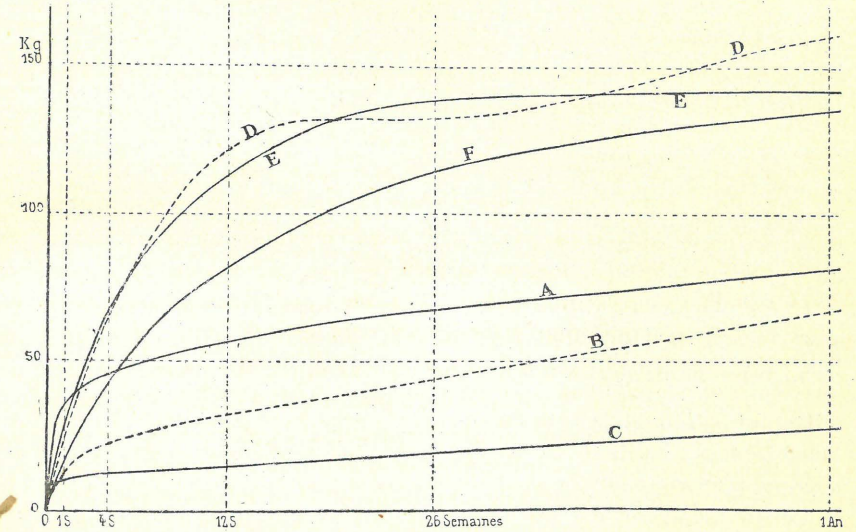


Fig. 1.

Désignation des liants employés.

- A. Ciment Portland (provenant de pâtes dosées à 21 p. c. d'argile).
- B. Autre ciment Portland (provenant de pâtes dosées à 24 p. c. d'argile).
- C. Ciment à prise rapide.
- D. Mélange par poids égaux du ciment A et de pouzzolane de Rome moulus ensemble.
- E. Mélange par poids égaux du ciment A et de trass moulus ensemble.
- F. Mélange par poids égaux du ciment A et de gaize légèrement torréfiée moulus ensemble.

Passant aux conséquences économiques, M. Féret ajoute :

« Il est inutile d'insister sur la grande économie qui résulterait pour » les constructeurs du remplacement de la moitié du ciment par une » matière d'un prix notablement inférieur. Quant aux fabricants de » ciment, nous ne croyons pas qu'ils doivent appréhender une dimi- » nution de vente, car le meilleur marché et l'augmentation de sécu- » rité des maçonneries de ciment, ne pourront que faire prendre à ce » mode de construction un développement plus considérable.

VII.

Études de M. le professeur Le Chatelier.

Dans un très intéressant mémoire présenté au congrès international des méthodes d'essai des matériaux de construction. M. Le Chatelier, ingénieur en chef et professeur à l'école des mines de Paris a repris l'étude de la décomposition des ciments à la mer au point de vue théorique. Ce magnifique travail, qui serait à citer en entier, élucide complètement le mécanisme de la désagrégation des ciments à la mer. Il confirme et complète le mémoire de 1897 du docteur Michaelis.

Nous tâcherons de résumer la thèse en ces quelques lignes.

I. La réaction du sulfate de chaux sur l'aluminat de chaux hydraté produit bien le sulfo-aluminat de chaux découvert par Candlot ; ce dernier a pour formule $Al^2 O^3 3 CaO + 5 CaOSO^3 + 50 H^2O$.

La formation et la constitution du corps sont décrites dans le mémoire très détaillé de M. Deval publié dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, janvier et février 1900, le travail de M. Deval a été effectué sous l'inspiration de M. Le Chatelier.

II. Le sulfate de chaux joue un rôle prépondérant dans la décomposition des ciments par l'eau de mer.

En effet.

a) Tous les sels, autres que les sulfates, contenus dans l'eau de mer, essayés séparément sur des pâtes de ciment peu compactes, laissent ces ciments indemnes.

b) Le sulfate de magnésie, le sulfate d'ammoniaque, le sulfate de chaux essayés séparément sur ces mêmes pâtes de ciment, les décomposent ; leur action de désagrégation est en tout point comparable à celle produite par l'eau de mer.

c) Au contact du ciment, le sulfate de magnésie et le sulfate d'ammoniaque ne peuvent subsister, ils se transforment immédiatement en sulfate de chaux.

C'est donc à l'état de sulfate de chaux que les sels de l'eau de mer exercent leur action.

d) L'auteur cite l'exemple d'un tunnel en maçonnerie de ciment très soignée, dont les joints se sont complètement désagrégés et sortaient

entre les pierres en formant de gros champignons très friables ; la maçonnerie avait subi l'infiltration des eaux chargées du sulfate de chaux de la plâtrière de Montreuil.

II. La décomposition du ciment causée par le sulfate de chaux est due finalement à la formation de sulfoaluminat de chaux.

a) Un ciment artificiellement formé de silice et de chaux hydratée (donc exempt d'alumine) exposé à l'état de pâte peu compacte à l'action du sulfate de magnésie, du sulfate d'ammoniaque et du sulfate de chaux reste inaltéré — pas trace de gonflement.

b) Un ciment formé d'alumine et de chaux hydratée, traité dans les mêmes conditions est brisé en quelques jours.

c) Étant donné qu'il est impossible de fabriquer industriellement du ciment par voie de cuisson, sans l'intervention de l'alumine ou du moins d'un autre sesquioxyde, l'auteur fabrique une série de ciments avec doses variables d'alumine et d'autres où l'alumine est remplacée par le sesquioxyde de fer, de chrome, de manganèse et de cobalt.

Les briquettes de ces ciments durcies pendant 48 jours, puis débitées à la scie pour mettre à nu des surfaces vierges ont été plongées dans trois solutions salines.

Le tableau suivant donne la date d'apparition des premières fentes et la date de désagrégation totale :

NATURE DES CIMENTS.	SULFATE DE CHAUX.		SULFATE DE MAGNÉSIE, 6 p.c.		EAU DE MER.	
	Premières fentes	Désagrégation.	Premières fentes	Désagrégation.	Premières fentes	Désagrégation.
10 SiO ² . Al ² O ³ . 32 CaO (4.1 p.c. d'alumine)	40	Brisé.	45	65	45	35
5 SiO ² . Al ² O ³ . 17 CaO (7.5	40		3	20	3	25
2 SiO ² . Al ² O ³ . 9 CaO (14	40	400 jours.	3	15	3	25
2 SiO ² . Al ² O ³ . 8 CaO (15.2	8	25	3	20	8	37
2 SiO ² . Al ² O ³ . 7 CaO (16.5	»	Intact.	»	Intact.	»	Intact.
5 SiO ² . Fe ² O ³ . 17 CaO	»	Intact.	40	Fentes douteuses.	»	Intact.
5 SiO ² . Mn ² O ³ . 17 CaO	»	Intact.	31	Assez altéré.	35	Petite fente.
5 SiO ² . Co ² O ³ . 17 CaO	40	Fentes douteuses.	»	Intact.	»	Intact.
5 OSi ² . Cr ² O ³ . 17 CaO	25	Une petite fente.				

« Pour les briquettes existant encore, on en indique leur état actuel, » qui correspond à trois mois d'immersion.

« Les expériences montrent d'une façon absolument nette le rôle » prépondérant de l'alumine; les ciments à 15 % d'alumine se sont » détruits avec une rapidité extrême dans toutes les dissolutions. A la » teneur de 4, 5 % d'alumine la décomposition est encore complète ... » Les ciments exempts d'alumine, surtout ceux à base de fer et de » chrome, se comportent d'une façon extrêmement remarquable.

» L'ensemble de tous ces faits permet d'affirmer, sans aucune hésitation, que l'alumine est la cause prédominante de la décomposition » des ciments à la mer. »

IV. Les gonflements et désagréments du ciment étant dus à la formation de sulfoaluminate de chaux, l'alumine pour être dangereuse doit se trouver en présence d'une quantité de chaux correspondante à trois équivalents de cette base pour une d'alumine (aluminat tricalcique).

« Cette condition est toujours remplie dans les ciments Portland » qui renferment après hydratation un excès de chaux libre provenant » du dédoublement du silicate tricalcique. »

M. Le Châtelier cite l'exemple d'un ciment spécial fabriqué par Vicat, en 1858, en vue de résister à l'eau de mer. Un bloc de ce ciment immergé dans le port de la Rochelle résiste encore aujourd'hui sans altération. En voici l'analyse :

Silice	21.7	} = 27.6.
Alumine	5.4	
Oxyde de fer	2.5	
Chaux	52.6	
Magnésie	3.7	
Chlorure de Sodium	0.6	
Acide sulfurique	1.2	
Acide carbonique	7.4	
Eau	26.7	

Pour 27.6 parties de silice, alumine, oxyde de fer, le ciment ne renferme donc que 52.6 parties de chaux, alors que les ciments actuels renferment pour 30 à 35 parties de silice, alumine, oxyde de fer, 65 à 65 parties de chaux.

Il est vraisemblable que la résistance chimique à l'eau de mer, du ciment de Vicat est due à l'insuffisance de la quantité de chaux.

« Pour contrôler cette hypothèse, des fragments du bloc de la » Rochelle furent réduits en poudre fine, puis mêlés à du sulfate de

» chaux avec ou sans addition de chaux éteinte; ces mélanges furent agglomérés par pression et leur gonflement mesuré de jour en jour.

	Mélange. 2/5 ciment Vicat 1/5 SO ₄ Ca, H ₂ O	Mélange. 1/5 ciment Vicat 1/5 Ca O, H ₂ O 1/5 SO ₄ Ca. 2H ₂ O.
1 jour.	1.5 ‰.	1.5 ‰.
2 jours.	2.1 »	5.5 »
5 »	5.3 »	5.4 »
4 »	5.6 »	8.1 »
9 »	4.2 »	12.0 »
18 »	4.8 »	47.4 »

« Il y a donc un excès de gonflement pour le mélange renfermant de la chaux, bien que la dose en ciment fut moitié plus faible que dans le premier mélange, le tiers au lieu de deux tiers. »

En comparant des aluminates plus au moins riches en chaux, préparés au laboratoire, les indications obtenues ne sont pas moins précises.

V. A cet excès de chaux libre qui paraît une condition indispensable à l'altération des ciments par l'eau de mer, on peut remédier par l'addition de pouzzolanes qui fixent la chaux.

« Pour vérifier ce fait, une nouvelle série d'expériences a été instituée dans lesquelles on a mêlé à des ciments très décomposables provenant d'une fabrication au laboratoire ou dans les usines un poids égal soit de silice précipitée calcinée soit d'argile déshydratée à 600° ou torréfiée à 800°.

« Les briquettes après 15 jours de durcissement furent immergées comme précédemment dans trois solutions salines.

» Le tableau indique l'état des briquettes après 2 mois d'immersion.

NATURE DES PATES.	Sulfate de CaO.	Sulfate de MgO.	Eau de mer.
2SiO ₂ . 2Al ₂ O ₃ . 9CaO + SiO ₂ calciné. Ciment de Boulogne à excès de chaux + SiO ₂ .	Intact.	Intact.	Intact.
Ciment de Boulogne à excès d'argile + SiO ₂ .	—	—	—
Ciment de Dèvres bien cuit + SiO ₂ .	—	—	—
Ciment de Dèvres peu cuit + SiO ₂ .	—	Petite fente.	Petite fente.

Les mêmes ciments mélangés additionnés d'argile déshydratée à 600° se sont fort altérés dans les trois solutions, mais, mélangés aux mêmes argiles cuites à 800°, ils sont restés intacts.

Cette différence dans la manière de se comporter des deux argiles paraît due à la plus grande solubilité de l'alumine lorsqu'elle est déshydratée à basse température.

* * *

La conclusion du mémoire de M. Le Chatelier sur l'efficacité des additions de pouzzolanes au ciment est donc nettement conforme à celle qui ressort des diverses études qui précèdent.

VIII.

Comme on le voit, les recherches de M. Le Chatelier ont été effectuées par des méthodes chimiques, la décomposition des ciments étant un phénomène d'ordre purement chimique.

Dans certaines séries d'expériences il mesure les gonflements produits par les solutions salines, dans d'autres il détermine la durée nécessaire pour les altérations. Les autres expérimentateurs ont généralement comparé des résistances en partant de cette idée exacte que les chutes de résistances ne sont que la traduction des gonflements ou autres lésions produites au sein des mortiers. Il n'en est pas moins vrai que les méthodes chimiques montrent avec une plus grande netteté le mécanisme de la désagrégation et nous initient à toutes ses causes.

Les essais de résistance en eau de mer des mortiers formés par le mélange de ciment et de trass me paraissant suffisamment nombreuses, et cette pouzzolane n'ayant pas été particulièrement étudiée dans les travaux de M. Le Chatelier, j'ai soumis les mortiers de trass à quelques unes des méthodes utilisées avec tant de succès par le savant professeur.

Première série. Au lieu d'étudier les déformations sur des pâtes de ciment en voie de durcissement et dans lesquelles les résistances croissantes s'opposent naturellement aux tensions de désagrégation, on opère sur des pâtes âgées de 6 mois et dont le durcissement est à peu près achevé; on les broye, la poudre est gâchée avec une faible quantité d'eau; la pâte très consistante est moulée en baguettes d'environ un centimètre carré de section et de 12 à 15 centimètres de longueur. Celles-ci sont immergées dans la solution de sulfate de magnésie à 6 grammes par litre.

Voici les résultats obtenus :

DURÉE D'IMMERSION	0,5 kil. trass, 4 kil. chaux grasse éteinte.	1	2 kil. trass, 4 kil. chaux grasse éteinte.	2	2 kil. trass, 4 kil. chaux grasse éteinte.	3	Ciment naturel.	4	Ciment artificiel.	5	4 kil. trass, 4 kil. ciment naturel.	6	4 kil. trass, 4 kil. ciment artificiel.	7
	1 jour	Intact.	Intact.	Intact.	Intact.	Courbé, fissuré	Intact.	Intact.	Intact.	Intact.	Intact.	Intact.	Intact.	Intact.
3 jours	Fendu.	Fendu.	Fendu.	Fendu.	Fendu.	Fendu.	—	—	—	—	—	—	—	—
10 —	Entièrement brisé.	Entièrement brisé.	Entièrement brisé.	Entièrement brisé.	Entièrement brisé.	Entièrement brisé.	—	—	Fendu, courbé	—	—	—	—	—
13 —))))))	Fendu, courbé	De plus en plus fendu et courbé	—	—	—	—	—	—
21 —))))))	Entièrement brisé.	Entièrement brisé.	—	—	—	—	—	—
8 mois))))))))))))))

Voici la composition chimique des trois mélanges chaux-trass :

	1	2	3
Eau hygroscopique	1.90 p. c.	2.63 p. c.	2.70 p. c.
Perte au feu	24.85 —	20.92 —	17.85 —
Silice	19.50 —	28.54 —	38.40 —
Alumine	6.69 —	9.37 —	12.26 —
Oxyde de fer	1.66 —	2.25 —	2.95 —
Chaux	43.97 —	32.85 —	21.82 —
Magnésie	0.07 —	0.03 —	Traces.
Acide sulfurique	0.15 —	0.07 —	Traces.
Alcalis et divers	1.21 —	3.34 —	4.32 p. c.
	100.00	100.00	100.00

Ces résultats, notamment la date de la dislocation totale, ne sont qu'approximatifs ; ils ne sont pas non plus absolument comparables entre eux, car le degré de compacité des pâtes n'est pas mathématiquement égal malgré les soins apportés à travailler pour chaque cas dans les mêmes conditions.

Pour l'observateur il ressort toutefois à l'évidence que les mélanges de chaux et trass sont beaucoup plus altérables que les autres échantillons, même et surtout lorsque la proportion de trass relativement à la chaux devient considérable comme dans le n° 3.

Les résultats s'expliquent si l'on se rapporte à l'analyse du trass figurant dans le travail de M. Michaëlis (*Annales des Travaux publics*, pp. 154 et 156). L'auteur y montre que dans le trass, un tiers à peine de la silice et de l'alumine est apte aux combinaisons avec la chaux. Dans l'échantillon n° 3 nous aurions ainsi environ 10.60 parties de silice capables de fixer 11.80 parties de chaux à l'état de SiO_2, CaO et environ 4 parties d'alumine fixant 5.25 parties de chaux soit en total 15,05 parties de chaux ; il en reste donc $21.82 - 15.05 = 6.77$ parties aptes à la formation de sulfate de chaux qui, à son tour, réagit sur la quantité relativement considérable d'aluminate pour former le sel expansif auquel on attribue toutes les désagréations.

L'innocuité des mortiers de trass et de chaux grasse dont il y a tant

et de si anciens exemples dans les constructions maritimes n'est donc pas due aux propriétés chimiques de ses parties constituantes. La bonne tenue de ces mortiers doit être attribuée à leur imperméabilité absolue. On sait, en effet, que dans tous les mortiers de trass usuels le volume des matériaux agglomérants pleins est fort supérieur au volume du vide laissé entre les grains de sable. Ainsi dans le mortier formé en volume d'une partie de trass, une partie pâte de chaux, une partie de sable, le rapport $\frac{\text{volume des matières agglomérantes}}{\text{volume du vide}} = \frac{4.40}{1}$;

dans le mortier 1 ciment, 3 sable le rapport = $\frac{0.93}{1.00}$.

Deuxième série d'essais. — 100 parties en poids du ciment, ou du mélange trass-ciment, sont gâchées avec 60 à 70 parties d'eau; la pâte fluide est coulée dans des boîtes en carton; après durcissement elle est immergée dans l'eau où elle séjourne trois semaines; les galettes cylindriques de 5 centimètres de diamètre et de 5 à 6 millimètres de hauteur sont rapées à la lime de manière à mettre à nu des surfaces non carbonatées. La grande quantité d'eau utilisée dans cette expérience a pour but de produire des pâtes peu compactes facilement accessibles aux solutions salines.

Analyse des ciments essayés :

	A	B	C
Matières insolubles	0.60 p. c.	0.55 p. c.	1.50 p. c.
Silice soluble	24.50	24.80	22.65
Oxyde de fer	2.02	2.20	0.90
Alumine	7.95	6.57	7.46
Chaux	60.70	64.05	65.45
Magnésie	1.60	0.17	0.27
Acide sulfurique combiné.	1.00	1.16	0.82
Pertes au feu	1.20	0.75	1.75
Divers	0.45	0.00	1.20
	<u>100.00</u>	<u>100.03</u>	<u>100.00</u>

Résultats obtenus par l'immersion des galettes dans une solution de 6 gr. de sulfate de magnésie par litre.

	Apparition des premières fentes.	Destruction.	État au bout de 8 mois et demi
Ciment A	Au bout de 21 jours.	Au bout de 48 à 52 jours.	—
60 parties ciment A, 40 parties trass.	Intact.	Intact.	Intact.
50 — 50 —	»	»	—
40 — 60 —	»	»	—
Ciment B	Au bout de 37 jours.	Au bout de 68 à 70 jours.	—
60 parties ciment B, 40 parties trass.	Intact.	Intact.	Intact.
50 — 50 —	»	»	—
40 — 60 —	»	»	—
Ciment C	Au bout de 18 jours.	Au bout de 41 à 43 jours.	—
60 parties ciment C, 40 parties trass.	Intact.	Intact.	Intact.
50 — 50 —	»	»	—

IX.

Propriétés du trass.

Le trass est, comme on sait, un produit d'éruption volcanique que l'on trouve en grande abondance dans la vallée de la Nette (Nettethal) affluent du Rhin. On en trouve aussi dans la vallée de la Brohl à quelques kilomètres de la Nette.

Voyez ci-après quelques analyses de bon trass de la vallée de la Nette.

	Michaëlis.	Laboratoire de Charlottenbourg.	Laboratoire de M. Faya (Westminster).	Laboratoire de Malines.
	P. c.	P. c.	P. c.	P. c.
Eau hygroscopique	4.141	4.17	9.83	40.53
Eau de combinaison	6.899	6.32		
Perte à 900°.	0.202			
Silice.	53.383	54.85	55.16	54.10
Alumine	19.008	15.83	21.43	18.20
Oxyde de manganèse	0.115	»	»	»
Oxyde de fer	4.193	4.22	3.03	4.13
Chaux	1.736	2.21	2.87	1.53
Magnésie	1.652	1.50	1.76	1.62
Potasse.	4.147	4.59	5.86	7.95
Soude	4.242	4.85		
Bitasse, chlore, acide phosphorique	»	0.59	»	»
Acide sulfurique combiné .	0.407	0.43	»	»

Abstraction faite de l'eau et des alcalis, le trass se présente donc, au point de vue de sa composition chimique, comme une argile, substance formée également de silice, d'alumine, d'oxyde de fer, alliés à des traces d'impuretés diverses.

Contrairement au trass, les argiles ne possèdent pas la propriété de faire prise avec la chaux, à moins d'avoir été chauffées à une température supérieure à celle qui correspond à la perte de l'eau de combinaison.

Ainsi que je le disais dans une étude parue en 1887 pour expliquer la propriété pouzzolanique des laitiers : aux hautes températures qui règnent dans les hauts fourneaux qui produisent le laitier, dans les volcans qui produisent la lave, dans les fours à argile, le silicate d'alumine est dissocié en silice et alumine libres. Si le produit est fondu, liquéfié comme le laitier, ses molécules restent dissociées aux

hautes températures, mais si le refroidissement s'opère lentement et graduellement, elles se recombinaient exactement au moment où elles repassent à la température de dissociation. Ces laitiers lentement refroidis ne possèdent jamais la propriété d'entrer en combinaison, c'est-à-dire de faire prise avec la chaux. Mais si le laitier fondu et dissocié aux hautes températures est rapidement plongé dans l'eau froide, c'est-à-dire, si la température de dissociation ou de recombinaison est brusquement franchie de manière à ce que les éléments n'aient pu se recombinaier, la silice et l'alumine restent dissociées, libres ou aptes à de nouvelles combinaisons avec la chaux.

Le phénomène est identique à celui de la *trempe* des métaux.

Si l'on chauffe graduellement de l'acier caractérisé par la présence de carbure de fer, on remarque que vers 800° une dissociation s'accomplit. (L'aiguille d'un pyromètre Le Chatelier, marque un arrêt dans son allure ascendante.) Après avoir élevé encore la température, on laisse refroidir graduellement et on constate qu'en repassant à la même température voisine de 800°, l'aiguille marque un dégagement de chaleur, preuve d'une recombinaison. Après refroidissement total, l'analyse retrouve le carbone à l'état de carbure de fer. Si, au contraire, au lieu de refroidir lentement l'acier chauffé au-dessus de 800°, on le refroidit brusquement par *trempe* dans l'eau, la recombinaison n'a pu se produire, le carbone reste dissocié, l'analyse le retrouve sous forme de graphite. A cette modification dans la composition chimique correspondent les changements de propriétés physiques et mécaniques bien connus de l'acier trempé.

La réaction est absolument la même pour les laitiers et les laves volcaniques. Celles qui se seront refroidies brusquement par leur chute dans les eaux environnantes, comme les produits d'éruption qui ont formé en partie l'île de Santorin, les Açores, les pouzzolanes tombées dans la baie de la mer de Naples, les trass tombées dans les lacs des bords du Rhin auront conservé plus de silice et d'alumine dissociés, libres, que d'autres produits volcaniques tombés sur la terre ou sur des amas secs formés par des éruptions précédentes.

Dans ce cas particulier, la dissociation ne sera jamais maintenue aussi parfaite que lorsque la trempe est exécutée artificiellement sur une quantité de produits limitée avec toutes les précautions nécessaires. La recombinaison ne sera non plus jamais parfaite, notamment, parce que les molécules sont partiellement séparées comme dans les cendres volcaniques (1).

(1) Cette recombinaison ne se fait bien que dans les vraies laves lentement refroidies. Celles-ci ne possèdent pas plus de propriétés pouzzolaniques que les laitiers non étonnés, lentement refroidis en bloc.

Dans les exploitation de tufs volcaniques des bords du Rhin on constate que tous les produits recueillis au-dessus de la surface du sol sont de médiocre quantité.

Michaëlis, qui explique également les propriétés pouzzolaniques par une dissociation de silice et d'alumine, a remarqué, il y a plus de vingt ans, que les bons trass des bords du Rhin renferment plus de 7 p. c. d'eau de combinaison, à l'état d'hydrate de silice et d'alumine. Il a basé sur cette remarque un moyen de vérifier la quantité du trass.

Sans attribuer à cette eau de combinaison des propriétés intrinsèques (un échantillon de trass hydraté produit une prise plus rapide que le même trass déshydraté au feu; mais la résistance finale du mortier n'est guère supérieure) on peut la considérer comme un témoin de la trempe subie par les produits volcaniques et à ce titre sa recherche a de la valeur.

Pour mettre son rôle en évidence, je citerai les expériences que j'ai effectuées sur la plupart des produits des bords du Rhin connus par les exploitants sous divers noms locaux.

Résistance à la traction de divers échantillons de produits de falsification du trass. — Mortier normal. — Finesse de mouture du trass : 25 à 25 p. c. de résidu sur le tamis de 900 mailles. — Température de 15° à 18° centigr.

	TRASS SAUVAGE.		VARIÉTÉS de Knuppen et Pfeiffen.		TAUCHEN.	WEBERSTEIN (tuf leucite).	BACKOFENSTEIN de Bell.
	2.5 kil. par c/c	44 kil. par c/c	6.5 k. par c/c	2.5 kil. par c/c			
Résistance au bout de 1 + 13 jours	2	10.5	6.5	2	2	2	5
	2	12.5	6	2	1.5	4.5	4.5
	2	11.5	5.5	2	1	4.5	4.5
Résistance au bout de 1 + 27 jours	4	15	6.5	2.5	4	4	6.5
	4	17	9	3	4	4	8
	3.5	16.5	9.5	3	3	3	6.5
Eau de combinaison	4	14	10.5	2.5	3	3	6.5
	3.14 p. c.	5.66 p. c.	3.60 p. c.	2.68 p. c.	6 p. c.	6.72 p. c.	

* *
* *

Nouvelle série d'échantillons destinés à servir de contrôle aux expériences précédentes.

	Eau de combinaison.
Trass sauvage (vallée de la Brohl)	5.46 p. c.
Knuppen (vallée de la Brohl)	5.55
Tauchartige Knuppen (id.)	3.16
Tauchen (vallée de la Nette)	3.45
Weiberstein (tuf leucite)	4.47
Backofenstein de Bell	4.47
Kleurgoed	6.83

Voici quelques résultats obtenus sur des trass de provenance inconnue.

	A	B	C
	—	—	—
	9 kil. par c/c	2 kil. par c/c	»
Résistances du mortier normal après 1 + 13 jours (traction).	7.7 —	2 —	»
	7.5 —	2.4 —	»
	7.8 —	2.8 —	»
Résistances du mortier normal après 1 + 27 jours.	14 —	7.5 —	12.3 kil. par c/c
	14.3 —	7.7 —	11.9 —
	14 —	7.0 —	14.6 —
	13.3 —	7.3 —	13.7 —
Eau de combinaison	5.10 p. c.	5.40 p. c.	6.25 p. c.

Dans les nombreux essais effectués au laboratoire de Malines, on remarque que les trass renfermant de 7 à 9 p. c. d'eau de combinaison donnent de fortes résistances, après 28 jours, en mortier normal (17 à 22 kilog. par centimètre carré).

Il m'est arrivé exceptionnellement de rencontrer des produits d'éruption volcanique des bords du Rhin à faible teneurs d'eau de combinaison et à fortes résistances. La texture de ces roches ne présentait pas l'aspect bien connu du vrai trass. Les praticiens allemands prétendent

que ces produits douteux n'offrent aucune garantie de durabilité. Je n'ai pu vérifier cette opinion.

Quoiqu'il en soit, nous possédons actuellement sur la valeur du trass des données plus précises et plus certaines que celles qui servaient aux anciens cahiers des charges et qui ne reposaient que sur la durée de prise.

La recherche de l'eau de combinaison du trass présente quelques difficultés, en ce sens qu'il faut prendre des précautions pour ne pas la confondre avec l'eau hygroscopique. On admet que celle-ci s'évapore en totalité à une température de 98-99° centigrades, et que celle que l'on ne peut séparer qu'à une température plus élevée est de l'eau chimiquement combinée. On obtient des résultats différents selon que, pour chasser l'eau hygroscopique on observe la température de 98-99° ou que l'on chauffe entre 100 et 110°.

Voici dans tous les détails comment la méthode a été mise à point au laboratoire de l'institut d'épreuves de Charlottenbourg. L'expérience montre que toutes les précautions qui y sont recommandées doivent être observées :

a) *Préparation des essais.* — Sur l'échantillon de trass à essayer on prélève un échantillon d'environ 20 grammes, que l'on broye jusqu'à ce que tout passe par un tamis de 5000 mailles par centimètre carré. Il va de soi que l'échantillon doit être pris de façon à représenter le plus fidèlement possible la moyenne de la fourniture.

b) *Perte par dessiccation.* — Pour déterminer la teneur en eau hygroscopique, on pèse de la quantité préparée 10 grammes que l'on introduit dans un flacon dont le col et le bouchon sont rodés à l'éméri et dont le fond plat mesure au moins 4 centimètres de diamètre. Le flacon ouvert est placé dans une étuve à dessiccation à double paroi; l'intervalle entre les deux parois est rempli d'eau; on pose le bouchon sur le flacon en travers du goulot, et on chauffe pendant 3 heures à une température uniforme de 98° centigrades environ. Pendant cette opération, il convient d'éviter que la flamme dépasse le fond et vienne lécher la porte de l'étuve, ce qui aurait pour conséquence d'amener la paroi intérieure de celle-ci à une température supérieure à celle qui correspond à l'eau bouillante; de plus aucune vapeur d'eau ne peut pénétrer dans la chambre de dessiccation. On ferme ensuite le flacon à l'aide du bouchon et on laisse refroidir dans un dessiccateur. La diminution de poids que l'on constate après refroidissement est considérée comme teneur en eau hygroscopique.

En vue de la détermination exacte de la teneur en eau de combinaison

il conviendrait de continuer le chauffage à 98° centigrades, jusqu'à ce que deux pesées consécutives montrent que le poids reste constant; toutefois, en pratique, il suffit de 3 heures de dessiccation, car après ce laps de temps la diminution de poids ne comporte plus que des dixièmes pour cent.

c) *Détermination de la perte au feu.* — Pour cette opération on pèse encore 10 grammes de l'échantillon, soit le restant de la quantité préparée, et on les chauffe au rouge dans un creuset en platine ou en porcelaine pendant 30 minutes, ou pendant 40 minutes suivant que l'on se sert du chalumeau ou du four à moufle. L'élévation de la température ne peut se produire que lentement de manière à n'arriver au rouge qu'au bout de 5 à 10 minutes; si on chauffait trop brusquement l'eau et l'air qui s'échappent de la masse pourraient entraîner des particules de trass ce qui fausserait les résultats.

On enlève ensuite le creuset au moyen d'une pince préalablement chauffée et on le laisse refroidir sous un dessiccateur.

Après refroidissement on constate la diminution de poids. On déduit ensuite la *perte à l'étuve de dessiccation de la perte au feu*, la différence donne la *teneur en eau de combinaison* que l'on calcule en pour cent proportionnellement au poids du trass dépourvu d'eau hygroscopique.

Pour terminer, je citerai un récent cahier des charges régissant une fourniture de trass, élaboré par MM. les ingénieurs de la ville d'Anvers. Il est basé sur l'examen de la structure des moellons de trass, sur la teneur en eau de combinaison et sur la résistance que doit présenter le mortier de trass normal; il s'enquiert aussi de la situation de la carrière dont le produit est extrait, ainsi qu'on le fait fréquemment pour la provenance de certaines pierres à bâtir où l'on détermine parfois même les bancs dont les matériaux doivent être tirés. Ce cahier des charges renferme les clauses qui, à ma connaissance, sont les plus efficaces pour s'assurer du trass de bonne qualité.

Clauses extraites du cahier des charges de la ville d'Anvers relatif à la construction de piles en rivière (4 septembre 1900).

« Le trass (tuffstein) proviendra des meilleures carrières des abords » du Rhin; il sera fourni en roche.

» L'entrepreneur sera tenu d'en justifier la provenance par un certificat dûment légalisé et spécifiant la situation exacte de la carrière » ainsi que le nom du propriétaire.

» Le trass sera fourni en moellons durs, poreux, à arêtes vives, » exempts de mélanges et pesant environ 7 kilogrammes; au surplus

» il sera conforme aux échantillons types déposés au bureau des travaux.

» Ne seront pas admis: les matériaux connus dans les carrières » sous le nom de Pfeiffen, Knuppen, Tauchen, Bergtrass, cendrées » noires de Tuff (Kleurgoed), leucites, Backofenstein, pierres de Wier- » bern, et toutes autres matières plus ou moins terreuses.

» La teneur en eau de combinaison sera au moins de 7 p. c. en » poids, après déduction de la teneur en eau hygrométrique.

» Le trass devra aussi satisfaire aux épreuves de la traction pres- » crites par le cahier des charges de l'État belge (1).

» Les essais tant pour la détermination de la teneur en eau de com- » binaison que pour la résistance à la traction, se feront au banc » d'épreuves de l'État à Malines » (2).

(1) Ce cahier des charges est conçu comme suit:

« Un mortier composé d'une partie de chaux grasse éteinte, deux parties en poids de trass en poudre (refus de 25 p. c. au tamis de 900 mailles) trois parties en poids de sable normal et une partie en poids d'eau, devra présenter à la traction, après un jour d'exposition à l'air humide et 27 jours d'immersion dans l'eau, à une température comprise entre 15 et 18°, une résistance de 15 kilogrammes par mètre carré au minimum. Les trass qui, dans les mêmes conditions présenteraient une résistance de 7 kilogrammes par mètre carré après 1 + 6 jours, sont exemptés de l'essai après 1 + 27 jours.

(2) Voir *Annales des Travaux publics de Belgique*, février 1901, p. 13.