

» tance de 7 kil, par cm<sup>2</sup> après 1 + 6 jours sont exemptés de l'essai  
 » après 1 + 27 jours (1). »

INSTRUCTIONS PRATIQUES. — 1<sup>o</sup> *Échantillonnage.* — Lorsque le trass est fourni en roches, on prendra au hasard et dans différentes parties du tas 300 à 500 kil. de trass suivant l'importance de la fourniture. On en fera une mouture grossière au moyen du broyeur à mortier qui se trouve dans tous les chantiers où on utilise le trass en roches. Sur ce trass moulu on prélève la partie nécessaire aux essais. Celle-ci est encore broyée jusqu'à ce que 75 p. c. passent par le tamis de 900 mailles par cm<sup>2</sup>. Dans cette opération on ne peut procéder en écartant les morceaux les plus gros et gardant les parties les plus fines jusqu'à atteindre la proportion de 75 p. c. Si après un premier broyage la finesse est jugée insuffisante, il faut rebroyer ensemble la partie qui est restée sur le tamis et celle qui a passé, jusqu'à atteindre la finesse voulue.

2<sup>o</sup> *Confection du mortier.* — Dans 150 gr. d'eau, on verse 150 gr. de chaux grasse éteinte, on laisse reposer une heure environ, puis on y ajoute 300 gr. de trass en poudre. On mélange intimement les deux produits au moyen d'une spatule en forme de cuiller jusqu'à ce qu'on ne distingue plus de points blancs dans la masse; on additionne ensuite cette dernière de 450 gr. de sable normal, on gâche pendant 5 minutes et avec le mortier obtenu on confectionne six briquettes au moyen de la machine à pilonner.

Il est important de ne pas mélanger tous les matériaux à la fois, mais d'opérer dans l'ordre indiqué, en outre, de ne pas travailler sur des quantités plus considérables. En négligeant ces précautions on arriverait à des mélanges imparfaits qui compromettraient les résultats de résistances.

(1) Théoriquement l'épreuve à 1 + 6 jours est suffisante pour juger un trass. Mais l'expérience est trop délicate pour servir de base aux importantes décisions à prendre sur les fournitures. Avec des produits durcissant aussi lentement que le trass et la chaux grasse, il suffit d'une légère imperfection dans les mélanges, du refroidissement de la température à 10° environ pendant 24 heures, pour que les résistances tombent à 6 ou 6,5 kil. au lieu des 7 à 8,5 kil. qu'on est en droit d'attendre. Au bout de 28 jours ces légers accidents n'ont plus d'influence appréciable.

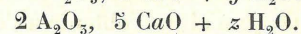
## RÉSISTANCE

DES

## MATÉRIAUX HYDRAULIQUES

### A L'EAU DE MER

Si on laisse réagir sur l'acide silicique, sur l'oxyde de fer et sur l'alumine hydratés une solution de chaux (eau de chaux) maintenue constamment au maximum de concentration, on remarque que les plus hauts degrés de saturation que les combinaisons atteignent sont représentés par les formules



Les valeurs de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ne sont pas déterminées avec certitude, je les estime respectivement à 6, 7 et 8. Le plus faible degré d'hydratation correspond à un équivalent d' $\text{H}_2\text{O}$  pour un équivalent de  $\text{CaO}$ .

Aussi longtemps qu'on ne pourra démontrer d'une façon positive que dans le phénomène du durcissement d'autres combinaisons peuvent prendre naissance par l'action de l'eau sur les produits hydrauliques à haute teneur en chaux, il faut admettre que les réactions s'accomplissent suivant les formules que je viens de citer et que la chaux en excès se sépare à l'état d'hydrate, ainsi que le montre d'ailleurs l'examen du ciment Portland durci où les cristaux d'hydrate de chaux se décèlent à l'évidence.

M. Le Chatelier envisage l'hydrosilicate stable comme une combinaison cristallisée répondant à la formule  $2 \text{CaO}, \text{SiO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O}$ , l'hydroaluminate serait représenté par  $\text{Al}_2\text{O}_3, 5 \text{CaO} + 12 \text{H}_2\text{O}$ . La forme que peut revêtir l'hydrosilicate qui se produit au cours du durcissement est entièrement indépendante des considérations qui vont suivre, il est donc sans intérêt à ce point de vue de déterminer si l'hydrosili-

cate cristallise, ou si, comme je l'admets à cause de son insolubilité absolue (1) — il est incristallisable et se présente sous la forme colloïde.

Il est reconnu que la combinaison  $Al_2O_3, 3 CaO$  subit une grande augmentation de volume sous l'influence de l'eau; mais je n'admets pas que cette combinaison soit prédominante dans un ciment Portland normal.

M. Le Chatelier ne donne aucune indication concernant l'hydroferrite de chaux si aisément dissociable par l'eau; on n'a donc proposé aucune autre formule que celle donnée plus haut.

Je suis d'accord avec M. Candlot pour assigner au sulfo-aluminate de chaux cristallisé la formule  $2 (Al_2O_3, 3 CaO) + 5 (CaO, SO_3) + 80 H_2O$  (après dessiccation sur acide sulfurique). M. Candlot trouve  $120 H_2O$  pour le cristal séché à l'air. Mais j'ai aussi observé la combinaison  $Al_2O_3, 3 CaO + 3 CaO SO_3 + 30 H_2O$  après dessiccation sur acide sulfurique (2).

Dans l'étude qui va suivre, nous admettrons pour les calculs la 2<sup>me</sup> combinaison qui cristallise avec 30 équivalents d'eau, soit une quantité plus faible que celle qui doit se produire dans la pratique.

Chaque molécule d'alumine engagée dans la combinaison d'hydroaluminat de chaux est capable de donner naissance à 12 fois son poids de sel double sulfo-aluminate de chaux.

La combinaison avec l'hydroferrite de chaux se comporte absolument de la même manière.

D'après mes déterminations sa formule correspond à  $Fe_2 O_3, CaO + 2 CaO SO_3 + x H_2O$ ; je n'ai pu l'obtenir à l'état cristallisé, et n'en tiendrai pas compte dans les développements qui vont suivre, mais il convient de ne pas perdre de vue qu'elle agit dans le même sens que le sel double d'alumine.

1 partie en poids $Al_2O_3$	produit 3,062 parties en poids $2 Al_2O_3, 5 CaO + 8 H_2O$
1 — $Al_2O_3$	— 3.7 — $Al_2O_3, 3 CaO + 6 H_2O$
1 — $Al_2O_3$	— 4.735 — $Al_2O_3, 3 CaO + 12 H_2O$
1 — $Al_2O_3$	— 11.856 — parties en poids sulfo-aluminate de chaux.

(1) Par insolubilité il faut entendre qu'en présence de la chaux la silice est absolument insoluble dans l'eau; l'hydrosilicate de chaux est simplement dissocié par l'eau et non dissous, la chaux seule entre en solution.

(2) La combinaison séchée à l'air:

$2 Al_2O_3, 3 CaO + 5 CaO SO_3 + 80 H_2O$   
 donnait après dessiccation sur acidesulfurique  $22 H_2O$   
 [probablement  $2 (Al_2O_3, 3 CaO + 6 H_2O) + 5 (CaO SO_3 + 2 H_2O)$ ]  
 après dessiccation à  $100^\circ$  . . . . .  $16 H_2O$   
 au rouge sombre le sel était entièrement déshydraté.  
 Le sel double anhydre se dissout dans 2214 parties d'eau à  $18^\circ$ .

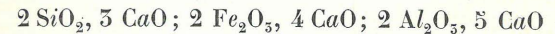
1 partie en poids $Al_2O_3, 3 CaO + 6 H_2O$	produit 3.2175 parties en poids sulfoaluminate de chaux
	ou 4.4636 — poids du sel double de Candlot avec $120 H_2O$
1 — $CaO, SO_3$	produit environ 3 parties en poids sulfoaluminate de chaux
1 — $CaO, H_2O$	— 2.3243 — $CaO, SO_3 + 2 H_2O$ .

Les vrais *ciments romains* qui contiennent pour 1 poids d'éléments de l'argile [silice, alumine, oxyde de fer (oxyde de manganèse)] 1 et 1,1 jusqu'à 1,2 poids de chaux sont, au point de vue chimique, les mortiers les plus résistants à l'eau, puisque la réaction du durcissement produit les combinaisons les plus stables, exemptes de chaux libre.

Supposons un ciment romain présentant la composition :

Silice . . . . .	24.00 p. c.	ou en équivalents	0,400	} 0,65
Alumine . . . . .	10.28 —	—	0,200	
Oxyde de fer . . . . .	4.80 —	—	0,050	
Chaux . . . . .	49.00 —	—	0,875	
Acide sulfurique . . . . .	5.20 —	—	0,040	
Magnésie . . . . .	} 5.00 —			
Alcalis . . . . .				
Divers . . . . .	5.72 —			
	<hr/>		100.00 —	

En admettant que la réaction hydraulique ait produit les combinaisons les plus riches en chaux :



on trouve :

$$0,4 \times \frac{5}{2} + 0,2 \times \frac{5}{2} + 0,05 \times 2 + 0,04 = 1,2 \text{ équivalents ou } 67,2 \text{ parties en poids de chaux.}$$

Les 0,65 équivalents de  $SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3$  ne se trouvent en présence que de 0,875 équivalents de chaux, ils ne peuvent donc engendrer des sels riches en chaux, mais bien des combinaisons à teneur en chaux faible, c'est-à-dire plus stables, à savoir :  $SiO_2 CaO; 2 Al_2O_3, 3 CaO; 2 Fe_2O_3, 3 CaO$  qui exigent seulement 0,785 équivalents ou 45,96 parties en poids de chaux. Les 5,04 parties de chaux qui restent, entrent dans des combinaisons à plus haute teneur en chaux, mais aucune partie de chaux ne reste libre ou apte à des réactions ultérieures.

Un mortier hydraulique ainsi composé réunit toutes les conditions requises.

Abstraction faite du double sulfo-aluminate de chaux  $Al_2O_3, 3 CaO + 3 CaO SO_3 + 30 H_2O$ , ce ciment romain ne donne lieu pendant la prise qu'aux combinaisons suivantes :

Hydrosilicate de chaux	avec 1 à 1,5 CaO pour 1 SiO <sub>2</sub>
Hydroaluminate de chaux	» 3 CaO » 2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hydroferrite de chaux	» 3 CaO » 2 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

du sulfate de chaux, de l'hydrate de magnésie, des hydrates alcalins; ces deux dernières bases restent seules libres, mais elles ne peuvent exercer aucune action nuisible, les sels qu'elles engendrent par leur combinaison avec l'acide sulfurique étant très solubles.

Comme le ciment romain est obtenu par cuisson à une température relativement peu élevée, insuffisante pour produire le rapprochement des molécules, il ne constitue, en envisageant uniquement ses propriétés physiques, qu'un produit hydraulique peu compact; les combinaisons qu'il contracte par l'action de l'eau conservent cette structure peu serrée, aussi les mortiers obtenus avec les ciments romains sèchent-ils facilement à l'air et se désagrègent-ils, par suite de la déperdition de l'eau qui n'est pas entrée en combinaison.

La *chaux hydraulique* représentée particulièrement par la chaux du Teil (France, département de l'Ardèche) se rapproche au point de vue des propriétés physiques des ciments romains; la structure est même moins compacte, surtout lorsqu'il s'agit de chaux faiblement hydrauliques.

Prenons comme exemple une chaux de Teil présentant, après calcination, la composition suivante :

Silice.	. . . . .	22,80 p. c. ou en équivalents	0,380
Alumine.	. . . . .	2,57 — —	0,025
Oxyde de fer	. . . . .	0,88 — —	0,0055
Acide sulfurique	. . . . .	0,64 — —	0,008
Chaux	. . . . .	68,60 — —	1,225
Magnésie	. . . . .	1,60 — —	

et admettons que la prise hydraulique ait donné naissance aux combinaisons les plus riches en chaux; elles exigeraient  $0,58 \times \frac{5}{2} + 0,025$

$\times \frac{5}{2} + 0,0055 \times 2 + 0,008 = 0,6515$  équivalents ou 36,48 parties (en poids) de chaux. Il reste donc 32,12 parties de chaux et en outre 1,6 parties de magnésie libres, c'est-à-dire qui ne sont entrées dans aucune combinaison.

Le *ciment Portland* est fort supérieur au ciment romain et aux chaux hydrauliques en ce qui concerne les propriétés physiques; ses particules, déjà rapprochées par suite de la cuisson très intense, se resserrent encore davantage en augmentant d'ampleur par l'hydratation; sa structure est donc très serrée. Son poids spécifique moyen, comparé à celui du ciment romain, est représenté par le rapport 5 : 3; comparé aux chaux hydrauliques, il va jusque 5 : 2,5 et 5 : 2. Le mortier est beaucoup plus compact, plus serré, quoique pourtant le ciment romain et la chaux hydraulique puissent donner une masse parfaitement close.

Au point de vue chimique, le ciment Portland présente moins d'avantages, car après la réaction du durcissement, il retient aussi bien que la chaux hydraulique, une notable partie de chaux exposée à des réactions ultérieures.

Considérons par exemple deux ciments Portland l'un *a*) caractérisé par une teneur en chaux minima, l'autre *b*) par une teneur en chaux maxima, soit respectivement pour une partie d'éléments de l'argile, 1,7 et 2,52 parties de chaux.

Si *a* présente la composition :

Silice.	. . . . .	22,50 p. c. ou en équivalents	0,3750
Alumine.	. . . . .	8,99 — —	0,0875
Oxyde de fer	. . . . .	4,00 — —	0,0250
Acide sulfurique	. . . . .	1,00 — —	0,0125
Chaux	. . . . .	61,04 — —	1,0900
Magnésie	. . . . .	} 2,47 — —	
Alcalis, etc..	. . . . .		
			100,00

On trouvera que les combinaisons hydrauliques les plus riches en chaux exigent 0,84375 équivalents ou 47,25 parties de chaux. En dehors de toute combinaison, il nous reste donc au moins 13,79 parties de chaux non saturées, sans compter la magnésie et les alcalis.

Dans le ciment *b*, riche en chaux qui présente, par exemple, la composition :

Silice.	. . . . .	20,778 p. c. ou en équivalents	0,3463
Alumine.	. . . . .	5,819 — —	0,0566
Oxyde de fer	. . . . .	2,720 — —	0,0170
Acide sulfurique	. . . . .	0,520 — —	0,0065
Chaux	. . . . .	68,579 — —	1,2210
Magnésie	. . . . .	} 1,784 »	
Alcalis, etc.	. . . . .		

il reste 1,221 — 0,70145 équivalents ou 29,1 parties de chaux en poids en admettant toujours que dans la réaction hydraulique les composés les plus riches en chaux aient pris naissance.

Un ciment Portland de composition moyenne renfermant une partie des éléments de l'argile pour 2 parties de chaux, abandonnera après le gâchage 25 p. c. de chaux correspondant à 33 p. c. d'hydrate de chaux. Cet hydrate de chaux se trouve sous forme de cristaux aisément reconnaissables dans tout mortier de ciment Portland, aussi longtemps qu'il est préservé de la transformation en carbonate de chaux.

On conçoit aisément qu'un produit renfermant une proportion aussi considérable de chaux libre, élément doué d'une affinité extrêmement puissante, ne peut pas être considéré, au point de vue chimique, comme une combinaison stable. La chaux libre doit réagir et travailler aussi longtemps qu'elle parviendra à être saturée par l'une ou l'autre réaction. Ce cas se présente notamment à la surface des mortiers par absorption d'acide carbonique, lorsqu'ils sont exposés à l'air ou immergés dans l'eau renfermant de l'acide carbonique; à l'eau de mer, les sulfates solubles sont les principaux agents de réaction avec la chaux; la première réaction s'accomplit sur la chaux entièrement libre, lorsqu'elle passe à l'état de carbonate ou de sulfate, ensuite sur celle qui se trouve sous la forme instable d'une combinaison avec l'oxyde de fer, puis commence l'attaque de l'aluminate de chaux et finalement celle du silicate.

La simple formation de sulfate de chaux à 2 équivalents d'eau produit une augmentation de volume sensible qui tend à ébranler la structure engendrée par le durcissement hydraulique. Mais en même temps que le sulfate, apparaît toujours le sulfo-aluminate de chaux, dont la présence occasionne une augmentation de volume beaucoup plus considérable entraînant la destruction totale de la masse; comme le sel double cristallise au moins avec 30 et probablement avec 60 équivalents, il tend à disloquer grain par grain avec une violence irrésistible le mortier le plus résistant jusqu'à le réduire en une masse désagrégée, inconsistante, dans laquelle certaines parties conservent seules quelque cohésion grâce à l'action préservatrice du carbonate de chaux formé.

Si l'on étudie les ciments romains, les chaux hydrauliques et les ciments Portland au point de vue du sulfate de chaux et du sulfoaluminate de chaux qui peuvent y prendre naissance et si l'on prend pour types les produits dont la composition a été donnée plus haut, on voit que dans le *ciment romain* toute la chaux est combinée et n'a plus de tendance à réagir avec le sulfate de magnésie. Les 5,44 parties (en poids) de sulfate de chaux peuvent pourtant former avec l'aluminate de chaux

en présence 16 parties (en poids) de sel double et produire ainsi une masse solide supplémentaire correspondant à 41 parties (en poids); mais il est probable que ces composés peuvent aisément trouver place dans les cavités ou pores du mortier. D'après mes observations et d'après les expériences effectuées ailleurs, le bon ciment romain résiste particulièrement bien à l'eau de mer.

Dans la *mise en œuvre de la chaux hydraulique du Teil*, la majeure partie de la chaux libre est presque toujours transformée en carbonate de chaux, parce que généralement on laisse le durcissement s'accomplir par un assez long séjour à l'air avant l'immersion dans l'eau de mer; le mortier est ainsi soustrait à la formation de sulfate de chaux. Mais s'il arrive que la chaux n'a subi qu'une carbonation restreinte ou négligeable, on se trouvera en présence d'environ 30 parties (en poids) de chaux, exposées à la formation du gypse. Ces 30 parties représentent 39,643 parties (en poids) d'hydrate de chaux capables d'engendrer 92,144 parties en poids de gypse (sulfate de chaux), quantité amplement suffisante pour produire des lésions dans le mortier; en outre, il faut y ajouter le sel double formé par les 5,97 parties d'aluminate de chaux qui se combinent avec une certaine partie de ce gypse pour donner 30 parties de sulfo-aluminate; l'intérieur de la masse reçoit ainsi un dépôt supplémentaire de matières solides correspondant à 60 parties en poids, à savoir 30 parties de sel double + 92 parties de gypse, dont il faut retrancher 39,6 parties hydrate de chaux, 9,25 parties d'hydroaluminate de chaux préexistants et 13 parties de gypse entrées dans la combinaison du sel double [30 + 92 — (39,6 + 9,25 + 13) = 60,15].

On voit que la formation de gypse joue le rôle principal dans le phénomène d'expansion. Elle contribue pour 52,5 parties (en poids) dans l'augmentation de volume; le sel double exerce une influence plus faible parce que la chaux hydraulique ne renferme que peu d'alumine et se compose principalement de chaux et de silice; mais il n'en est pas moins vrai qu'à quantités égales le sel double a un plus grand pouvoir de cristallisation, et exerce ainsi des effets destructeurs plus redoutables.

Le *ciment Portland* de composition moyenne, formé de 64 p. c. de chaux, 7,4 d'alumine et 0,8 d'acide sulfurique renferme, comme nous l'avons vu, après gâchage 25 p. c. CaO correspondant à 33 parties d'hydrate de chaux  $CaH_2O_2$  qui forment avec le sulfate de magnésie 74,5 parties en poids de gypse, amenant ainsi dans le milieu une masse additionnelle de 41,5 parties en poids. Les 7,2 parties d'alumine forment 26,64 parties d'hydroaluminate de chaux qui réagissant sur le gypse forment au moins 85 parties de sel double. La quantité de matière qui vient s'ajouter à la masse primitive comporte ici 74,5 parties de gypse

+ 85 parties sel double — (55 Ca H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> + 26,64 hydroaluminat de chaux préexistants + 56 de gypse entré dans le sel double) = en chiffres ronds 64 parties en poids. Si l'on considère que cette énorme quantité de produits de décomposition se développe au sein d'une masse pesant environ 125, on concevra qu'elle devra la faire éclater infailliblement, à moins que des circonstances favorables toutes particulières ne viennent entraver ou affaiblir l'action du sulfate de magnésie contenu dans l'eau de mer. Ces circonstances peuvent être d'ordre chimique ou physique.

Le carbonate de chaux n'est pas décomposé par les sulfates à la température ordinaire. Le mode de préservation le plus efficace des mortiers hydrauliques consiste dans la transformation la plus complète possible de l'hydrate de chaux libre en carbonate de chaux, et comme les chaux hydrauliques mises en œuvre pour les constructions à la mer sont, à raison de leur prise relativement lente, longtemps abandonnées à l'air avant l'immersion, c'est-à-dire avant l'action de l'eau de mer, elles ont pu absorber abondamment l'acide carbonique de l'atmosphère. Ainsi s'explique, par exemple, que la chaux du Teil a souvent mieux résisté à l'eau de mer que le ciment Portland.

On trouve dans ce qui précède la justification d'une pratique rationnelle — que j'ai eu notamment l'occasion d'observer à Boulogne-sur-Mer — qui consiste à laisser durcir longtemps à l'air les blocs de béton de ciment Portland, avant leur immersion. Ils se couvrent ainsi d'une couche préservatrice résultant de la transformation de la chaux libre en carbonate de chaux.

Si toutefois l'eau de mer peut s'infiltrer dans la partie centrale où l'acide carbonique n'a pas eu accès — (en général ce cas ne se présente que sur des parties localisées de dimensions insignifiantes) — les réactions de décomposition entrent en jeu et les efforts d'expansion font crever irrésistiblement la croûte extérieure carbonatée et la détachent, mettant à nu la masse centrale qui dès lors s'achemine à son tour vers la destruction.

Le silicate de chaux résiste assez longtemps à la transformation en carbonate de chaux au moins en totalité; l'acide carbonique suit une marche parallèle à celle de l'eau. La chaux entrant pour plus d'1 équivalent dans les combinaisons est la plus aisément soluble dans l'eau et aussi la plus apte à se carbonater. Plus une combinaison est pauvre en chaux, plus elle est stable, et plus elle résiste à l'attaque de l'acide carbonique. Il est très difficile, même dans de petites briquettes de mortier de 50 cm<sup>3</sup> à 100 cm<sup>3</sup>, de transformer entièrement la chaux en carbonate, même dans une atmosphère d'acide carbonique pur, maintenue humide.

L'aluminat de chaux se transforme déjà plus facilement et la combinaison de chaux avec l'oxyde de fer se décompose complètement par l'acide carbonique.

J'ai institué les expériences suivantes concernant l'influence de l'acide carbonique, l'action qu'il exerce sur la résistance des ciments Portland aux efforts dynamiques et à l'attaque par l'eau de mer :

Je confectionne 10 éprouvettes destinées à la traction avec 1 partie en poids de ciment de Stettin (Stern) et 5 parties en poids de sable normal, en outre 10 éprouvettes avec 1 partie de ciment et 5 parties de sable normal. Les briquettes ont durci pendant les vingt-quatre premières heures dans l'air humide parfaitement exempt d'acide carbonique (sous cloche), puis elles ont séjourné pendant 56 jours dans un flacon hermétiquement fermé et renfermant de l'eau distillée bouillie. Ensuite, la moitié des éprouvettes a été exposée pendant cinq semaines sous cloche à une atmosphère d'acide carbonique humide. Finalement, cette moitié a été remise pendant quatre semaines sous eau avec la première série.

Les briquettes avaient donc cent vingt jours d'âge lorsqu'elles ont été soumises aux épreuves de traction et de compression qui vont suivre. (Les deux parties des briquettes séparées par l'essai d'arrachement ont été réunies, maintenues accolées par une bande en caoutchouc et ainsi soumises à l'épreuve de compression.)

Voici les résultats trouvés en kilogrammes par cm<sup>2</sup> :

MORTIERS 1 : 3				MORTIERS 1 : 5			
a) A L'ABRI DE L'ACIDE CARBONIQUE.		b) TRAITÉS PAR L'ACIDE CARBONIQUE.		c) A L'ABRI DE L'ACIDE CARBONIQUE.		d) TRAITÉS PAR L'ACIDE CARBONIQUE.	
Traction.	Compression.	Traction.	Compression.	Traction.	Compression.	Traction.	Compression.
26.5	301	27.5	336	13.5	115	15.5	139
25.5	323	30.0	364	13.5	115	20.0	150
28.0	330	28.5	374	14.0	96	16.5	130
28.0	357	29.0	322	14.5	105	15.5	138
26.0	237	27.5	298	14.5	132	16.5	133
Moyennes 26.9	309	28.5	338	14.0	112	16.8	138

Le tableau suivant montre :

La quantité de chaux transformée en carbonate dans les séries *b* et *d*, en outre :

La teneur en eau après dessiccation sur acide sulfurique pour les briquettes abritées contre l'acide carbonique et pour celles qui ont été traitées par cet acide.

1 : 3 <i>a</i> ) Acide carbonique. . . . .	0.565 p. c.
Eau chimiquement combinée . . . . .	3.046 —
1 : 3 <i>b</i> ) Acide carbonique. . . . .	4.506 —
Eau chimiquement combinée . . . . .	3.150 —
1 : 5 <i>c</i> ) Acide carbonique. . . . .	0.483 —
Eau chimiquement combinée . . . . .	2.336 —
1 : 5 <i>d</i> ) Acide carbonique. . . . .	1.954 —
Eau chimiquement combinée . . . . .	1.896 —

Quantité de chaux transformée en carbonate :

Dans le mortier 1 : 3 il existait 14,583 p. c. de chaux, dans le mortier 1 : 5, 10 p. c. ; dans le mortier *b* il n'y avait donc que 13.3 p. c. de la chaux totale transformée en carbonate, et dans le mortier *d* 24.86 p. c.

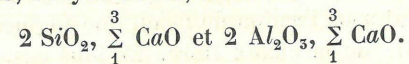
Ainsi, dans des pièces d'aussi faibles dimensions que les briquettes destinées à la traction (environ 70 cm<sup>3</sup> avec 22 m/m. de hauteur), l'absorption de l'acide carbonique pur et humide est très lente et très incomplète; la décomposition des silicates et des aluminates exige un temps extrêmement long. On conçoit donc qu'un séjour à l'air, même prolongé, ne produise dans les blocs de béton qu'une carbonatation superficielle.

Cette pratique ne constitue donc pas un remède infaillible contre l'action destructive de l'eau de mer.

En laissant réagir longtemps l'acide carbonique sur le ciment grossièrement moulu, la carbonatation de la chaux devient complète; nous y voyons encore la preuve que l'action progressive de l'acide carbonique est comparable à celle de l'eau. Plus les silicates et les aluminates sont appauvris en chaux, plus ils se montrent réfractaires à la décomposition par les deux réactifs.

Quelques-unes des demi-briquettes provenant de la rupture des échantillons soumis à l'arrachement ont été immergées dans l'eau de mer et dans une solution de sulfate de magnésie à 2 p. c. Celles qui avaient été préservées du contact de l'acide carbonique ont été rapidement désagrégées; toutefois, celles qui avaient subi l'action de l'acide carbonique étaient également fort attaquées, et l'altération était visiblement la plus prononcée dans le mortier le plus poreux 1 : 5, malgré qu'il avait absorbé le plus d'acide carbonique.

Les mortiers mis en œuvre au bord de la mer devront donc renfermer les combinaisons les plus stables que la chaux puisse contracter avec la silice, l'alumine, l'oxyde de fer, à savoir :



Dans l'eau douce, la situation des mortiers est beaucoup plus favorable. Ici la chaux libre peut seulement être ou dissoute ou transformée en carbonate. Plus il y a de chaux dissoute par l'eau, et plus difficilement la chaux restante en combinaison avec la silice et l'alumine devient soluble, ainsi que l'a déjà montré M. Le Chatelier, et comme d'ailleurs mes expériences l'ont confirmé sur de petites briquettes de ciment Portland pur complètement durcies; le mortier devient, à la vérité, plus poreux, mais jamais la réaction n'aboutit à une dissolution totale de la chaux. En opérant sur de petites quantités de mortier de ciment Portland — lorsqu'il a été préservé du contact de l'acide carbonique — on peut dissoudre la totalité de la chaux dans l'eau distillée bouillie ainsi que je l'ai démontré depuis longtemps, de manière à obtenir uniquement de l'acide silicique, de l'alumine, de l'oxyde de fer comme résidu, mais lorsqu'il s'agit de morceaux atteignant seulement un volume de quelques centimètres cubes, il faut des lavages abondants, prolongés pendant des années pour arriver à une dissolution de chaux totale.

Dans l'eau douce les effets s'exercent donc à peu près en sens inverse; la chaux s'échappe en partie du mortier et rend ce dernier plus poreux, mais jamais — dans un ciment de fabrication irréprochable — on ne constatera le développement de tensions ultérieures capables de désagréger la masse sous leurs efforts d'expansion. Pendant le durcissement sous l'eau, d'un ciment Portland à 64 p. c. jusque 66 p. c. de chaux, ou d'un ciment de meilleur mélange et cuisson à 70 p. c. de chaux (ciment fondu), la force de cohésion engendrée par la prise des hydrates formés est supérieure aux efforts contraires des expansifs, pour autant que la chaux se trouve uniformément répartie dans la masse. Si cette condition est réalisée, la chaux n'occasionne pas une plus grande augmentation de volume, qu'on n'en constate lorsque la chaux vive très finement pulvérisée, préalablement mélangée avec du sable sec, est gâchée avec de l'eau. Les volumes croissants qui se développent dans ce cas paraissent pouvoir trouver place dans les pores plus ou moins spacieux, et toute la masse acquiert une structure plus serrée, ainsi que l'aspect le montre à l'évidence. Mais il n'en est plus ainsi lorsque le ciment provient de la cuisson de mélanges non homogènes; dans ces conditions, le ciment renferme après cuisson de la chaux vive sous forme

de grains relativement gros, des silicates, aluminates, ferrites, à teneur en chaux trop élevée, notamment des combinaisons à 5 ou plus de 3 équivalents de chaux pour 1 équivalent de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui, comme on sait, produisent sous l'action de l'eau, une augmentation de volume comparable à celle de la chaux libre. En tous cas, j'ai eu la preuve, que du ciment fondu donne un Portland parfaitement stable, c'est-à-dire exempt de tout changement de volume avec une composition correspondant à une partie d'éléments de l'argile [silice, alumine, oxyde de fer (oxyde de manganèse)] pour 2,4 parties de chaux, ou, d'après les calculs usités en France, avec un indice d'hydraulicité représenté par 0,416.

Il va de soi qu'une structure serrée, produisant l'imperméabilité du mortier constitue un préservatif très efficace.

La magnésie, élément tant critiqué, qui se précipite par la réaction de l'eau de mer sur les mortiers hydrauliques, et à laquelle on a attribué à tort les désagréments produites, constitue au contraire un moyen de préservation. Le précipité d'hydrate de magnésie insoluble qui se dépose par la réaction du sulfate de magnésie sur l'hydrate de chaux, contribue à obstruer les cavités et à assurer l'imperméabilité.

Il y a donc lieu d'abandonner la théorie qui consiste à assigner aux sels de magnésie une influence néfaste, et de préciser en disant que l'acide sulfurique à l'état de sulfate soluble exerce seul une action nuisible.

Le sulfate de magnésie est toujours celui dont le rôle est prédominant dans l'eau de mer, mais le sulfate de chaux, les sulfates alcalins et en général tous les sulfates solubles, réagissent de la même manière néfaste, mais non avec la même énergie.

Parmi les moyens de préservation de nature mécanique nous pouvons citer les incrustations d'origine animale ou végétale ou les crasses qui tapissent les surfaces et les protègent contre l'infiltration des eaux salines.

Mes expériences ont démontré qu'abstraction faite des propriétés physiques, les matériaux hydrauliques les plus riches en chaux sont ceux qui résistent le moins bien à l'eau de mer et qu'il n'y a rien de plus illogique que d'ajouter encore de la pâte de chaux à de pareils mortiers. Le fait que les mortiers de ciment Portland et de chaux hydraulique se comportent moins bien à la mer que les mortiers de ciment romain, malgré la haute teneur en alumine de ces derniers, démontre d'une manière toute particulière que la chaux libre, c'est-à-dire la chaux mise en liberté, est la cause principale des altérations occasionnées par les eaux salines. Plus il y a de chaux dans un ciment Portland, plus il

reste d'hydrate de chaux libre exposée à se saturer, et plus intense sera l'accroissement de volume par formation de gypse. On a observé avec raison que les ciments de nos jours qui se distinguent par de hautes résistances, se comportent beaucoup plus mal à l'eau de mer que les ciments de jadis renfermant beaucoup moins de chaux. Le ciment qui a été cité plus haut comme exemple et dont la teneur en chaux atteint la limite supérieure admissible en pratique, doit recevoir un volumineux dépôt de matière supplémentaire, malgré qu'il ne peut former une forte proportion de sel double. Cette masse additionnelle s'élève à 70 parties en poids sur 125 parties en poids de ciment durci; elle est engendrée par la transformation simultanée de la chaux mise en liberté en sulfate de chaux, et de l'hydroaluminat en sel double : sulfoaluminat de chaux cristallisant avec 30 équivalents d'eau.

Un mortier hydraulique renfermant de la chaux vive libre est aussi peu stable au point de vue physique qu'au point de vue chimique. A chaque absorption d'eau, même d'eau hygroscopique, la masse durcie devient le siège d'expansions, c'est-à-dire de tensions considérables, accompagnées de changements dans la constitution moléculaire. Tout d'abord les alcalis sont mis en liberté; ils attirent avidement l'eau et l'acide carbonique pour céder ce dernier à l'hydrate de chaux. — On sait que la chaux vive ne peut absorber l'acide carbonique qu'en présence de l'eau; l'acide carbonique sec n'agit pas sur l'hydrate de chaux sec. — Par les dessiccations la masse éprouve des retraits, c'est-à-dire des tensions en sens contraire des précédentes, qui produisent des fendillements réticulaires, car la perte d'eau occasionne une véritable contraction. Il est certain que la chaux ne se présente pas sous forme d'un hydrate unique, mais qu'on doit admettre l'existence d'hydrates avec cinq jusque huit équivalents d'eau, malgré qu'il soit difficile de le démontrer avec certitude. Il existe sans aucun doute un hydrate calcique gélatineux, pour lequel j'ai obtenu par précipitations avec l'alcool absolu, la formule  $\text{CaO} + 5 \text{H}_2\text{O}$ ; il est très probable qu'il existe de plus hauts degrés d'hydratation.

Toutes ces raisons expliquent que l'on peut voir pendant des années et même des dizaines d'années des mortiers de ciment travailler, se fendiller, crevasser, jusqu'à tomber en miettes, car chaque infiltration d'eau produit une dilatation, chaque dessiccation occasionne un retrait, chaque absorption d'acide carbonique engendre l'une ou l'autre de ces deux tensions — suivant qu'il agit sur l'hydrate le plus simple ou sur les hydrates à nombreux équivalents d'eau. — Si l'on considère que tous ces efforts s'exercent sur un corps doué d'une aussi faible élasticité

que le mortier de ciment, on conçoit que sa résistance ne saurait être en règle générale de longue durée.

Le dicton populaire exprime par une image assez juste le travail progressif et continu qui s'exerce au sein du mortier de ciment, en disant que le ciment n'est jamais mort; c'est là, pour les fabricants de matériaux en ciment, une propriété fatale, rendant le produit impropre à beaucoup d'usages.

Tous ces inconvénients peuvent être amoindris dans une notable mesure, en fixant la chaux libre ou mise en liberté au cours du durcissement, en présentant à son activité de la silice hydraulique et de l'alumine avec lesquels elle peut contracter les combinaisons les plus stables possibles.

Ce moyen ne peut porter aucun remède aux réactions des alcalis caustiques, mais ces éléments existent en proportions si restreintes et sont tellement solubles que leur influence peut être négligée; jamais les alcalis caustiques ne menacent la bonne tenue des mortiers. Par l'immersion dans l'eau, ils sont simplement délavés; dans les mortiers durcissant à l'air, ils se montrent par des efflorescences superficielles qui ne sont que passagères puisqu'elles se délavent par l'eau; — il faut en excepter toutefois les efflorescences calcaires.

Il ressort de tout ceci, que dans la pratique ou emploie un remède diamétralement opposé au but que l'on veut atteindre, en ajoutant encore de la chaux en pâte à un produit hydraulique qui, comme le ciment Portland, renferme déjà de la chaux en excès. Ce moyen ne peut aboutir qu'à accélérer la destruction du mortier. Mes expériences ont clairement démontré que cette méthode mise en œuvre pour les mortiers immergés dans l'eau douce ne donnait de bons résultats qu'en apparence; qu'en réalité les effets étaient nuisibles, car la chaux ajoutée se dissout beaucoup plus facilement que celle qui fait partie constituante du ciment, elle se laisse expulser du mortier qui devient ainsi plus poreux et plus accessible aux agents de décomposition. Au bout de deux à trois ans on constate déjà une chute de résistance très sensible dans ces mortiers de ciment et de chaux ou mortiers bâtards. J'ai démontré depuis longtemps que cette pratique n'était justifiée que pour la mise en œuvre de mortiers maigres, exposés à l'air, et auxquels on veut communiquer des propriétés plastiques.

Déjà en 1882 (n° 53 de la *Deutschen Topfer und Ziegler Zeitung*) j'exposai clairement la question de la chaux en excès dans le ciment quand je disais :

« Lorsque le ciment Portland est gâché avec l'eau et fait prise, la masse devient le siège de modifications moléculaires qui s'accomplis-

sent au fur et à mesure de l'hydratation. Dans l'eau qui se charge ainsi progressivement d'alcalis — beaucoup de ciments renferment de l'alcali libre contribuant à accélérer la prise — l'hydrate calcique se sépare à l'état cristallisé, en quantité correspondant approximativement au tiers de la chaux totale contenue dans le ciment. Cette chaux séparée ainsi à l'état cristallisé agit dans une très faible mesure comme agglomérant, elle manifeste plutôt une tendance à désagréger la masse en voie de solidification, mais dans les bons ciments elle ne peut aboutir à ce résultat désastreux, la cohésion étant devenue trop grande et la chaux en voie de dissolution étant trop uniformément répartie.

» En pesant toutes ces considérations, on peut conclure a priori que lorsqu'on met en contact avec cette chaux mise en liberté des pouzzolanes, c'est-à-dire des produits capables de former du ciment avec l'hydrate de chaux, la quantité de ciment effectif formé peut s'élever à de telles proportions qu'il ne peut plus se déposer de chaux à l'état cristallisé, mais que tout l'hydrate de chaux, qui doit passer par l'état de dissolution avant de pouvoir cristalliser, est transformé en hydro-silicate et hydroalumine. »

La commission du « *Deutsche Cement Fabrikanten Verein* » attaqua ces conclusions dans un mémoire adressé au ministre des travaux publics de Prusse en 1882, en présentant les considérations suivantes :

« Le ciment Portland de fabrication normale n'a pas besoin de l'addition de ces matériaux soi-disant de nature à améliorer ses qualités; ils agissent au contraire en produisant une diminution de résistance qui est proportionnelle aux quantités ajoutées »; et plus loin : « La commission est malheureusement convaincue que les moyens de contrainte dont disposent les fabriques qui veulent continuer à fournir comme par le passé des produits non frelatés, ne sont d'aucune efficacité pour aller à l'encontre des agissements que nous décrivons, d'autant moins que l'esprit de lucre, qui est ici le seul mobile, s'abrite sous le couvert d'une prétendue science... »

Dans ma lettre ouverte adressée en 1884 à la « *Deutsche Cement Fabrikanten Verein* » pour protester contre ces insinuations offensantes, j'apportai encore la preuve complète de mes idées théoriques concernant le durcissement en eau douce.

Le Laboratoire royal d'épreuve des matériaux de construction de Berlin ne put produire d'autres résultats que la confirmation incontestable de mes données, et M. le professeur Tetmayer de l'Institut d'épreuves de Zurich publia dans le n° 24 de la « *Schweizerschen Bauzeitung* » de la même année ses observations sur l'influence de certains

produits qui, ajoutés au ciment Portland, ont pour effet d'augmenter ses résistances à la traction et à la compression, malgré qu'ils diminuent sa densité (3, 4). A la suite de ces travaux l'amélioration effective des ciments Portland par l'addition de certains produits appropriés était clairement démontrée.

Il était facile de voir que l'amélioration des mortiers hydrauliques à excès de chaux libre devait être très considérable par l'intervention de gangues siliceuses hydrauliques lorsque ces mortiers sont destinés à résister à l'eau de mer, car l'étude de la résistance des constructions maritimes m'avait donné la conviction que la chaux libre est le principal agent de leur détérioration.

Par l'adjonction de matériaux bien appropriés la chaux libre peut être fixée et le mortier peut être ainsi prémuni contre les réactions ultérieures. Ces résultats doivent se manifester par des accroissements non seulement de stabilité mais aussi de résistance. L'essai de la bonne ou mauvaise tenue à l'eau de mer des matériaux hydrauliques mélangés doit constituer ainsi l'épreuve la plus rigoureuse de ma théorie, et offrir le plus grand intérêt au point de vue économique.

J'ai été également amené à effectuer les expériences qui vont suivre par l'institution d'une commission spéciale au sein de « l'Association internationale pour l'unification des méthodes d'essai des matériaux de construction », commission qui avait pour but de rechercher les moyens de reconnaître l'influence de l'eau de mer sur les différents matériaux destinés à la confection des mortiers hydrauliques.

L'action de l'eau de mer sur ces matériaux est principalement de nature chimique. Pour arriver à des résultats rapides dans cet ordre d'idées, il convenait d'écarter toutes les influences accidentelles qui sont de nature à entraver l'action de l'eau de mer; c'est ainsi que nous aurions marché à l'encontre du but à atteindre en opérant sur des mortiers imperméables, ou sur des mortiers dont la surface extérieure eût été préservée par l'absorption de l'acide carbonique; les mortiers devaient, au contraire, être franchement poreux et traités de manière que rien ne vienne faire obstacle à l'échange du liquide salin avec celui du mortier, sinon les résultats auraient été faussés et la méthode n'eût pu aboutir à des conclusions bien tranchées.

Voici les solutions qui ont servi à ces expériences :

1. Eau de mer artificielle présentant la composition suivante par litre :  
50 grammes de chlorure de soude;
- 12 — sulfate de magnésie avec 7 d'eau;
- 3 — chlorure de magnésie ( $MgCl_2$ );
- 1 — sulfate de chaux avec 2 d'eau (gypse).

Les carbonates alcalins ont été intentionnellement écartés, car il n'y a aucun intérêt à affaiblir la réaction de l'eau de mer; mais pour maintenir constante la teneur en sulfates, comme c'est le cas dans la mer, j'ai suspendu dans le bain un nouet en toile renfermant des morceaux de gypse. Au début, l'eau était renouvelée tous les jours, puis toutes les semaines, après trois mois on l'a renouvelé mensuellement, mais tous les jours elle était complètement renouvelée.

2. Une solution saturée de sulfate de chaux avec des morceaux de gypse suspendus dans le bain.

3. Une solution de 1 p. c. de sulfate de magnésie cristallisé.

4. Une solution de 2 p. c. de sulfate de magnésie cristallisé.

5. Une solution de 3 p. c. de sulfate de magnésie cristallisé.

6. Une solution de 1,3 de sulfate de soude cristallisé (sel de Glauber).

Vicat avait déjà reconnu l'action nuisible de solutions de sulfate de soude sur les ciments.

Il y a quinze ans, j'ai remarqué qu'une solution de sulfate de chaux renfermant seulement 0,127 p. c. d'acide sulfurique était capable de désagréger un ciment Portland (Stern) gâché pur, c'est-à-dire complètement imperméable. J'y vis la démonstration que c'était uniquement l'acide sulfurique combiné et non la magnésie qui, dans l'eau de mer, exerçait l'influence nuisible sur les mortiers hydrauliques, que la magnésie, bien que sa présence soit un signe visible accompagnant les désagréments, n'en est la cause qu'en apparence, qu'au contraire, elle constitue un élément utile, préservatif, en bouchant les pores par sa précipitation à l'état solide.

Il est facile à concevoir pourtant que le sulfate de magnésie exerce une action plus énergique que le sulfate de chaux; ce dernier ne peut donner lieu qu'à la formation du sulfo-aluminate de chaux, tandis que le premier transforme en gypse non seulement l'hydrate de chaux libre, mais aussi les combinaisons riches en chaux aisément dissociables; rien d'étonnant à obtenir ainsi des augmentations de volumes considérables et les dislocations dont le ciment Portland à l'eau de mer donne si fréquemment l'exemple.

Le sulfate de chaux exerce particulièrement son action sur les ciments Portland riches en alumine, et ce n'est que par suite de circonstances accidentelles favorables — telles que l'imperméabilité, l'absorption d'acide carbonique, les incrustations et l'obstruction des pores qui en résulte — que la plupart des travaux maritimes exécutés avec ces matériaux riches en chaux ont pu être préservés d'une ruine rapide et complète.

Les considérations qui précèdent étaient destinées à être présentées

déjà le 25 octobre 1893 à « l'Institution of Civil Engineers London », pour être insérées dans ses « Minutes of proceedings » comme deuxième partie de mon travail « On the behaviour of Portland Cement in Sea-Water » (Paper, n° 2592, vol. GVII, session 1891-92).

Comme l'étude ne pouvait paraître dans la session 1893-94, je la retirai pour en élargir le cadre et la compléter par d'autres résultats expérimentaux qu'on lira plus loin. J'ai institué deux séries d'expériences, la première est exécutée avec des mortiers riches correspondant à une partie en poids de produit hydraulique pour 2,5 p. en poids de sable quartzeux à grains différemment calibrés ; on y trouve en outre quelques expériences sur mortiers composés d'une partie en poids de produit hydraulique pour 4 parties en poids de sable normal ; la deuxième série se rapporte à des mortiers poreux, principalement 1 : 5.

En vue de la première série, j'ai confectionné des éprouvettes de Bauschinger de 10 cent. de longueur sur 5 cent.<sup>2</sup> de section avec les mélanges suivants :

- |    |   |   |
|----|---|---|
| 1) | { | 4 parties en poids ciment Portland « Stern » renfermant moins de 6 p. c. d'alumine. |
|    | { | 10 — — sable quartzeux.   |
| 2) | { | 2 — — même ciment.  |
|    | { | 2 — — trass (1).  |
|    | { | 10 — — sable quartzeux.   |
| 3) | { | 4 — — même ciment.  |
|    | { | 1,2 — — silice hydratée (séchée à l'air).   |
|    | { | 15 — — sable quartzeux.   |
| 4) | { | 4 — — même ciment.  |
|    | { | 1,1 — — kaolin de Zettlitz chauffé au rouge.  |
|    | { | 12,7 — — sable quartzeux.   |
| 5) | { | 4 — — de ciment Portland à 9 p. c. d'alumine (préparation par voie humide).         |
|    | { | 10 — — sable quartzeux.   |
| 6) | { | 2 — — du ciment précédent.  |
|    | { | 2 — — trass.  |
|    | { | 10 — — sable quartzeux.   |
| 7) | { | 4 — — du ciment précédent.  |
|    | { | 16 — — sable normal.  |

(1) Pour tous les mortiers au trass, j'ai utilisé le vrai trass du Rhin, provenant de la vallée de la Nette.

- |     |   |  |
|-----|---|--|
| 8)  | { | 4 parties en poids du ciment précédent.                                    |
|     | { | 1,2 — — silice hydratée, comme au n° 3.                                    |
|     | { | 15 — — sable quartzeux.  |
| 9)  | { | 4 — — du ciment précédent.   |
|     | { | 1,1 — — kaolin chauffé au rouge, comme au n° 4.                            |
|     | { | 12,7 — — sable quartzeux.  |
| 10) | { | 4 — — de ciment Portland à 9 p. c. d'alumine (préparation par voie sèche). |
|     | { | 10 — — sable quartzeux.  |
| 11) | { | 2 — — du ciment précédent.   |
|     | { | 2 — — trass.   |
|     | { | 10 — — sable quartzeux.  |
| 12) | { | 4 — — du ciment précédent.   |
|     | { | 16 — — sable normal.   |
| 13) | { | 4 — — du ciment précédent.   |
|     | { | 1,2 — — silice hydratée, comme aux nos 3 et 8.                             |
|     | { | 15 — — sable quartzeux.  |
| 14) | { | 4 — — du ciment précédent.   |
|     | { | 1,1 — — kaolin chauffé au rouge, comme aux nos 4 et 9.                     |
|     | { | 12,7 — — sable quartzeux.  |
| 15) | { | 100 — — ciment romain de Bavière.  |
|     | { | 36 — — eau.  |
| 16) | { | 4 — — de ce ciment romain, 15 parties eau.                                 |
|     | { | 10 — — sable quartzeux, —  |
| 17) | { | 100 — — ciment romain de Bosnie.   |
|     | { | 36 — — eau.  |
| 18) | { | 4 — — de ce ciment romain, 15 parties eau.                                 |
|     | { | 10 — — sable quartzeux, —  |
| 19) | { | 4 — — chaux du Teil.   |
|     | { | 12 — — sable normal.   |
| 20) | { | 4 — — chaux du Teil.   |
|     | { | 20 — — sable normal.   |
| 21) | { | 5 — — silice hydratée, comme pour nos 3, 8 et 13.                          |
|     | { | 12,5 — — pâte de chaux pure (laissant au feu 52 p. c.).                    |
|     | { | 20 — — sable quartzeux.  |

- 22) { 6 parties en poids kaolin chauffé au rouge, comme 4,9 ou 14.  
 16,5 — — — — — pâte de chaux pure, comme pour 21.  
 28,5 — — — — — sable quartzeux.
- 23) { 4 — — — — — anhydride silicique (silice hydraulique  
 chauffée à blanc).  
 19 — — — — — pâte de chaux pure, comme pour 21 et 22.

Toutes les éprouvettes confectionnées avec ces mortiers ont durci pendant les vingt-quatre premières heures, à l'air humide, mais exempt d'acide carbonique; ensuite, une moitié fut placée dans des bocaux hermétiquement fermés, renfermant une solution de gypse maintenue continuellement en état de saturation; l'autre moitié fut placée dans des bocaux semblables renfermant une solution à 1 p. c. de sulfate de magnésie. Les quatorze premiers jours, cette solution fut renouvelée journellement; pendant les trois mois suivants, elle fut renouvelée toutes les semaines, puis mensuellement.

Dans la solution de gypse, on constate :

Le commencement de l'altération :

L'altération totale :

Au n° 1 en 6 mois	en 1 an
— 5 — 6 —	en 1 —
— 7 — 3 —	en 6 mois
— 10 — 3 —	en 9 —
— 12 — 3 —	en 6 —
— 20 — 1 an	
— 22 — 14 jours	en 1 —

Toutes les autres éprouvettes sont encore complètement intactes après deux ans.

Dans la solution à 1 p. c. de sulfate de magnésie, on constate :

Le commencement de l'altération :

L'altération totale :

Au n° 1 après 6 mois	après 1 an
— 5 — 6 —	— 9 mois
— 7 — 4 —	— 6 —
— 10 — 3 —	— 9 —
— 12 — 3 —	— 6 —
— 17 — 18 —	
— 20 — 12 —	
— 22 — 8 jours	— 1 —

Ces résultats nous montrent que le mortier 22 en kaolin et pâte de chaux se désagrège rapidement aussi bien dans une solution de gypse que dans une solution de sulfate de magnésie, alors qu'il se comporte parfaitement à l'eau douce. Ces faits s'expliquent par deux raisons; d'abord le kaolin qui a subi l'action du feu constitue une pouzzolane très poreuse et forme ainsi un mortier qui, quoique imperméable, est très peu serré; en second lieu, le kaolin est une pouzzolane très riche en alumine, car sa composition correspond à environ 55 p. c. de silice pour 42 p. c. d'alumine.

Le mélange formé de 6 parties en poids de kaolin 16,5 de pâte de chaux pure renfermait donc :

3,50 parties en poids de silice ou en équivalents	550
2,50 — — — — — d'alumine	244
5,28 — — — — — de chaux	945

de façon qu'il pouvait parfaitement former  $\text{SiO}_2, \text{CaO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3, 5\text{CaO}$ ; l'aluminate est ici la seule cause de la désagrégation. Sa prompt formation s'explique par la haute teneur en alumine. Nous avons dit plus haut qu'une partie en poids d'alumine peut former douze fois son poids de sulfoaluminate de chaux avec 30 équivalents d'eau. Comme le mélange de kaolin et de pâte de chaux renferme 22,7 p. c. d'alumine, il peut donner naissance à 270 parties en poids de sel double.

Les trois mortiers formés de ciment Portland et de kaolin — encore conservés — se sont bien comportés jusqu'ici (deux ans), ce qui est certainement attribuable à la combinaison de la chaux libre avec cette pouzzolane.

Les mortiers de ciment Portland sans mélange, sont rapidement tombés en ruine, et les deux variétés à 9 p. c. d'alumine plus promptement que le ciment de « Stern » ne renfermant que 5 à 6 p. c. d'alumine. La chaux du Teil s'est bien comportée jusqu'ici; le mortier poreux 1 : 5, bien abrité du contact de l'acide carbonique montre un commencement d'altération aux endroits les plus exposés, notamment aux coins.

Le ciment romain de Bavière s'est très bien maintenu jusqu'ici, aussi bien à l'état pur qu'à l'état de mélange 1 : 5. Au ciment romain de Bosnie pur on constate après dix-huit mois un commencement d'altération à l'un des coins, dans la solution de sulfate de magnésie; le mortier de sable confectionné avec ce ciment est jusqu'ici parfaitement intact.

Voici la composition de ces deux ciments après récalcination :

Sable et argile. . . . .	6,581 p. c.	2,920 p. c.
Silice . . . . .	25,881 —	50,180 —
Alumine. . . . .	9,709 —	9,056 —
Oxyde de fer . . . . .	4,052 —	5,669 —
Chaux . . . . .	47,229 —	49,000 —
Magnésie . . . . .	5,992 —	2,215 —
Acide sulfurique combiné . .	4,257 —	2,109 —
Manganèse. . . . .	non dosés	non dosés
Alcalis . . . . .	—	—
	99,481 p. c.	99,129 p. c.

Comme il est dit à la page 5, aucun de ces deux ciments ne peut engendrer au cours de la prise hydraulique les combinaisons à teneur en chaux maxima. Si l'on adopte la formule  $2 R_2 O_3, 5 Ca O$  il reste pour le ciment de Bavière 1,5 équivalents de chaux pour la combinaison avec la silice, soit donc  $2 Si O_2, 5 Ca O$ , et pour le ciment de Bosnie 1,55 équivalent de chaux, soit  $5 Si O_2, 4 Ca O$ . Ceci explique pourquoi ces ciments romains résistent si bien à l'action de l'eau de mer.

Bien avant l'apparition des signes visibles d'altération à l'eau de mer, les essais de résistance comparés à l'eau de mer et à l'eau douce, pourront décèler la présence ou l'absence de réactions nuisibles au sein des mortiers. Ainsi se trouvera résolue la méthode d'épreuve de l'influence de l'eau de mer sur les mortiers.

Les éprouvettes les mieux appropriées pour ce genre d'essais, sont celles qui présentent la plus grande surface extérieure relativement à la section de rupture; ce seront donc des barres à essayer à la flexion; je leur donne les dimensions suivantes :  $l = 50 \text{ cm}^2$ ;  $e = 4 \text{ cm}$ ;  $h = 2 \text{ cm}$ ; distance des appuis  $21,55 \text{ cm}$ .; la tension minima en kilgr. par  $\text{cm}^2 = 2 P$ ; ainsi la charge de rupture doublée donne la résistance à la flexion par  $\text{cm}^2$ ; l'appareil normal de traction avec système de levier double  $1 : 10 \times 1 : 5 = 1 : 50$  est utilisé pour ces expériences. On peut aussi très bien opérer avec les briquettes d'épreuve à la traction en forme de huit, ayant  $5 \text{ cm}^2$  de section de rupture (forme normale de Fahnehjelm et Michaëlis).

Après rupture à la traction, ces briquettes peuvent encore être essayées à la compression en réunissant les morceaux séparés au moyen d'une bande de caoutchouc. Comme il a été dit plus haut, il est illogique d'essayer l'influence de l'eau de mer sur les matériaux hydrauliques à l'aide de mortiers imperméables. Ce moyen aboutit uniquement à retarder les résultats, la méthode devient aussi très difficile

à exécuter et perd notablement de sa valeur. Les procédés d'essai sont évidemment d'autant plus à recommander qu'ils conduisent plus rapidement aux résultats. Dans cet ordre d'idées, les mortiers composés de 1 partie en poids de produit hydraulique pour 5 parties en poids de sable sont préférables au mortier 1 : 5; ils ont été employés dans la 2<sup>me</sup> série d'essais que j'ai entreprise et qui n'est pas encore complètement terminée.

Les matériaux mis en œuvre sont les mêmes que ceux qui ont servi à la première série, à savoir : *A* le même ciment de Stettin, *B* le même ciment fabriqué par voie sèche à 9 p. c. d'alumine, *C* la même chaux du Teil, *D* le même ciment romain de Bavière. Voici le résultat d'analyse de ces produits après récalcination :

	A	B	C	D
Silice . . . . .	21.712 p. c.	21.331 p. c.	23.88 p. c.	23.881 p. c.
Alumine . . . . .	5.805 »	8.918 »	2.57 »	9.709 »
Oxyde de fer . . . . .	2.949 »	2.695 »	0.88 »	4.052 »
Chaux . . . . .	64.851 »	63.776 »	69.15 »	44.263 »
Magnésie. . . . .	1.030 »	0.805 »	1.60 »	3.992 »
Potasse . . . . .	0.748 »	0.777 »	0.14 »	»
Soude . . . . .	0.160 »	0.101 »	0.07 »	»
Acide sulfurique combiné.	2.468 »	1.631 »	1.09 »	7.203 »
Divers. . . . .	0.357 »	0.123 »	»	6.381 »
	100.080 »	100.157 »	99.38 »	99.481 »

Avec les mortiers 1 : 5 obtenus au moyen de ces produits, j'ai confectionné les briquettes normales pour essais à la traction.

Comme eau de mer, j'ai employé la composition artificielle donnée au n° 1 page 16. Les briquettes, qui ne portent aucune observation particulière, ont durci pendant les 24 premières heures dans une atmosphère saturée d'humidité. Celles qui portent la lettre *M* ont été placées debout dans l'eau de mer, celles qui portent la lettre *D* ont été placées dans l'eau douce. Celles qui portent la lettre *Ma* ont été conservées pendant huit semaines à l'air et journellement aspergées d'eau pour absorber de l'acide carbonique.

Les briquettes en chaux du Teil ont durci d'abord pendant vingt-huit

jours dans une caisse fermée dont l'atmosphère était saturée d'humidité, puis pendant huit semaines à l'air libre avec des aspersions journalières d'eau pour favoriser l'absorption de l'acide carbonique. La durée des expériences est comptée depuis le jour de l'immersion dans l'eau, ainsi pour les briquettes marquées Ma, l'immersion n'est faite qu'au bout de huit semaines, pour les briquettes CD au bout de quatre semaines, pour les briquettes CDa au bout de douze semaines. Les briquettes sont en traitement depuis vingt mois.

Les chiffres mentionnés dans le tableau suivant expriment des kilogr. par cm<sup>2</sup> et forment la moyenne de dix essais :

DURÉE D'IMMERSION.	A D	A M	AMa	B D	B M	B Ma	C D	C M	C Ma	DD	DM	DM
7 jours . . .	7 23	6.00	15.93	10.50	7.86	17 05	3.81	4.96	7.75	2.86	6.27	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 38	10 86	9 89	9 68	11.43	14.66
Un an . . . .	16.00	16.00	{ 6.5 à 18.00	16.70	11.20	{ 2 à 15	13.25	15.20	12.50	14.43	14.12	15.44

Ensuite, j'ai mélangé le ciment A d'une quantité de trass qui a été déterminée en tenant compte de la composition suivante — qui a servi également de base pour la composition des mortiers de la première série.

100 parties de trass renferment :

- 10 à 12 parties d'eau (et perte au feu);
- 20 à 50 parties de silice et alumine hydrauliques;
- 60 à 65 parties de matières inertes agissant comme sable.

Le trass utilisé laissait 41 p.c. de résidu sur le tamis de 2,500 mailles et présentait la composition suivante :

Eau hygroscopique. . . . .	4,141 p. c.
Eau de combinaison . . . . .	6,899 —
Perte à 900°. . . . .	0,202 —
Silice . . . . .	55,585 —
Alumine . . . . .	19,008 —
Oxyde de manganèse . . . . .	0,115 —

Oxyde de fer (1). . . . .	4,195 —
Chaux. . . . .	1,736 —
Magnésie. . . . .	1,652 —
Potasse . . . . .	4,147 —
Soude . . . . .	4,242 —
Titane, chlore et acide phosphorique . . .	non dosés.
Acide sulfurique combiné. . . . .	0,107 —
	<hr/>
	100,025

Traité par la soude caustique, ce trass donne :

a) Après 10 heures de digestion au bain-marie :

Silice hydraulique . . . . .	16,545 p. c.
Alumine — . . . . .	4,810 —

b) Après 24 heures de digestion au bain-marie :

Silice hydraulique . . . . .	16,708 p. c.
Alumine — . . . . .	6,045 —

J'ai formé deux mortiers dans les proportions suivantes :

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

Nous désignerons encore par D les briquettes qui ont séjourné dans l'eau douce et par M les briquettes qui ont séjourné dans l'eau de mer. Les chiffres représentent des kilogr. par cm<sup>2</sup> et forment la moyenne de 10 essais.

AGE DES BRIQUETTES.	E D	E M	F D	F M
7 jours . . . . .	9 80	11.80	11.05	10.10
28 — . . . . .	19.80	28 00	16.90	19.55
90 — . . . . .	26.70	35.70	21.80	23.65
1 an . . . . .	30 95	39.50	27.55	24.59

(1) Le fer et la manganèse sont calculés en peroxyde, quoiqu'il y ait également ces métaux sous forme de protoxyde.

Comme il a été dit, 100 parties en poids de ciment Portland de teneur en chaux moyenne renferment environ 25 parties de CaO correspondant à 35 parties de Ca H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> libre; par l'addition de 100 parties de trass renfermant par exemple 16,5 parties de silice et 5,14 parties d'alumine ajoutée aux combinaisons hydrauliques, on fixe à l'état de Si O<sub>2</sub> Ca O 15,4 parties en poids de CaO et à l'état de 2 Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, 5 CaO, 4,2 parties en poids de CaO, soit en total 19,6 CaO. Il y a donc encore matière pour la formation d'un silicate plus riche en chaux que le silicate monocalcique; il est donc fort probable qu'il serait à conseiller d'ajouter 125 au lieu de 100 parties de trass et même davantage; ainsi pourraient se produire des combinaisons à 2 Si O<sub>2</sub> pour 1 à 2 Ca O qui jouissent à un très haut degré de la propriété de faire prise, et sont certainement encore plus stables que le silicate monocalcique. Dans tous les cas, l'addition de trass devra être d'autant plus importante que le ciment est plus riche en chaux; la même recommandation s'applique aux chaux hydrauliques.

Les résultats obtenus au bout d'un an avec le mortier FM montrent que ces briquettes ne sont pas encore à l'abri de l'influence néfaste de l'eau de mer; ce mélange de 100 parties ciment avec 50 parties trass est seulement capable de fixer 10 parties de chaux de manière que 15 parties restent encore exposées aux réactions ultérieures; même si les réactions donnaient naissance au silicate 2 Si O<sub>2</sub>, 5 Ca O et à l'aluminate 2 Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, 5 CaO il resterait encore 10 parties de chaux libres et capables de former des combinaisons avec les sulfates de l'eau de mer.

Voici de nouvelles expériences entreprises en octobre 1895 concernant des mélanges formés de ciments ou de chaux hydrauliques avec le trass, mais en telle proportion que l'addition de trass rendit le mortier non pas plus gras, mais plus maigre, c'est-à-dire plus poreux que celui qui sert comme terme de comparaison. Voici la composition de ces mortiers :

- G. — Ciment Portland à 9 p. c. d'alumine (comme B décrit plus haut) 1 : 5 sable normal de Berlin.
- H. — Du même ciment 1 partie en poids, trass 1 partie en poids, sable normal de Berlin 6 parties en poids.
- I. — Du même ciment 1 parties en poids, trass 1 partie en poids, sable normal de Berlin 6,75 parties en poids.
- K. — Chaux du Teil (comme C décrit plus haut) 1 : 5 sable normal de Berlin.
- L. — De la même chaux 1 partie en poids, trass 1 partie en poids, sable normal de Berlin 5 parties en poids.

M. — De la même chaux 1 partie en poids, trass 1 partie en poids, sable normal de Berlin 6 parties en poids.

H renferme 1 partie produit hydraulique pour 5,3 parties sable.

I	—	—	—	—	6	»	—
L	—	—	—	—	5	»	—
M	—	—	—	—	5,6	»	—

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

Les essais E jusque M seront continués pendant trois ans. Au bout d'un an, les briquettes cassées seront plongées en partie dans une solution à 2 p. c. de sulfate de magnésie, en partie dans une solution à 5 p. c. de magnésie, l'attaque sera ainsi beaucoup plus énergique que celle de l'eau de mer la plus concentrée.

Le tableau suivant montre les résistances obtenues jusqu'ici; chaque chiffre représente encore des kilogrammes par cm<sup>2</sup> et forme la moyenne de dix essais. Δ désigne la densité du mortier avant la rupture. D et M désignent les durcissements en eau douce et en eau de mer.

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	6.35	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

L'examen de ces résultats montre que dans tous les mortiers renfermant de la chaux libre, l'action de l'eau de mer entrave les réactions qui produisent les accroissements continus de résistance; les mortiers deviennent le siège de réactions de deux ordres différents: d'une part, on assiste à la marche progressive des réactions qui déterminent le durcissement hydraulique; d'autre part, on constate l'envahissement des cristallisations, et en règle générale, cette dernière influence sort victorieuse de la lutte, elle finit par amener la dislocation totale de la masse que les réactions hydrauliques avaient préalablement agglomérée.

(\*) A l'épreuve après 90 jours, les briquettes de chaux du Teil sans mélange de pouzzolane montraient des signes d'altération très apparents.

L'une des éprouvettes B M montrait, après nonante jours, des signes visibles d'altération, elle était tellement attaquée et crevassée, qu'elle s'est rompue en l'assujettissant dans la griffe du dynamomètre; la cassure montrait des dépôts d'hydrate de magnésie à quelques millimètres de profondeur.

Dans l'essai après un an, on put remarquer qu'à l'intérieur de toutes les éprouvettes, à l'exception d'une seule, les dépôts de magnésie s'étaient propagés jusqu'à une profondeur de 5 m/m. Les briquettes B M donnèrent lieu aux mêmes constatations. Il paraît étrange que les mortiers exposés à l'acide carbonique s'acheminent plus rapidement vers la destruction que les autres (1), ainsi que le montrent les croûtes carbonatées qui se détachent après un an des briquettes A M<sup>a</sup> et C M<sup>a</sup>, contrairement à ce qui se passe dans les briquettes A M et C M. Les briquettes D M<sup>a</sup> (au ciment romain), forment seules exception, elles étaient toutes parfaitement intactes, et ne montraient pas le moindre dépôt de magnésie sur leur section de rupture.

Les chiffres parlent d'eux-mêmes; l'addition de trass (et en général des pouzzolanes actives) à des matériaux hydrauliques surchargés de chaux, tels que les ciments Portland et les chaux hydrauliques, a pour effet de doubler et de tripler la résistance des mortiers confectionnés avec ces produits, et d'assurer leur bonne tenue à l'eau de mer. L'accroissement des résistances saute aux yeux; les meilleurs pouzzolanes possèdent au moins autant de facteurs hydrauliques actifs que les meilleurs ciments Portland; il n'y a donc rien d'étonnant que la réunion de ces facteurs conduise à des mortiers de résistance double, puisque le ciment Portland renferme suffisamment de chaux en excès pour donner un champ à l'activité de la pouzzolane.

Il est bien entendu que les pouzzolanes les plus riches en silice et les plus pauvres en alumine hydraulique sont les plus appropriées à ces mélanges, et que notamment, l'addition de kaolin est à déconseiller pour les constructions maritimes.

Il est donc établi, aussi bien par les considérations théoriques que par les expériences pratiques, que les matériaux hydrauliques renfermant plus de chaux qu'il n'en faut pour engendrer les hydrosilicates et aluminates stables — et ceux-là seuls sont stables qui sont pauvres en

(1) Ce fait s'explique peut-être par la porosité que le mortier acquiert en absorbant de l'acide carbonique et par la facilité avec laquelle l'eau salée peut ainsi se frayer un passage jusqu'à l'intérieur de la masse. L'hydrosilicate de chaux se trouve sous forme colloïdale; il est transformé en carbonate de chaux cristallisé et en acide silicique amorphe. Cette carbonatation continue remplaçant l'état colloïdal doit évidemment donner au mortier une structure moins serrée.

chaux; moins il y a de chaux, plus le produit acquiert de stabilité — ne peuvent être employés pour les travaux exécutés à la mer.

Comme le mélange des produits que je préconise donne, non seulement des mortiers plus stables et plus résistants, mais aussi moins coûteux, il est d'intérêt public d'étendre leur emploi et, maintenant que la cause des altérations est connue, de ne jamais mettre en œuvre pour les travaux maritimes des matériaux hydrauliques à excès de chaux, sans leur adjoindre des substances additionnelles de nature à les améliorer.

La solution du problème est des plus faciles et se présente dans les conditions les plus favorables que l'on puisse désirer; elle consiste simplement dans l'emploi judicieux des plus anciens et des plus précieux de nos facteurs hydrauliques, les vraies pouzzolanes, parmi lesquelles le trass de bonne qualité occupe le premier rang. Par trass de bonne qualité, j'entends le vrai trass obtenu par la mouture des pierres de tuf ou pierres de trass, sans aucun mélange de cendres de tuf ou d'autres substances. Comme les pouzzolanes sont employées ici en mélange avec le ciment Portland à prise extrêmement énergique, on peut en employer également d'autres douées de propriétés moins actives au point de vue du durcissement hydraulique.

Le calcul théorique, aussi bien que des expériences pratiques d'une exécution rapide indiquent facilement les proportions de mélanges à employer.

De tous les mélanges, celui qui présente le plus d'avantages sous tous les rapports, est le ciment Portland avec le trass ou une pouzzolane équivalente au trass. Aucun mortier ne le surpasse comme prix de revient, résistance, énergie de prise, et bonne tenue à l'eau de mer.

Inutile de démontrer que ces mélanges ne peuvent porter aucun préjudice à l'industrie du ciment. Cette crainte serait aussi peu justifiée que celle qui naguère prévoyait la ruine des voituriers par suite de l'extension des chemins de fer. C'est le résultat contraire qu'on obtient.

L'amélioration que j'avais attendue *à priori* de l'adjonction de gangues hydrauliques aux matériaux trop riches en chaux, s'était déjà confirmée par les accroissements de résistance en eau douce, mais les résultats obtenus en eau de mer donnent à ma théorie une confirmation éclatante, ils mettent entièrement à néant le rapport erroné adressé en 1882 par la « Deutsche Cement Fabrikanten Verein » au ministre des travaux publics de Prusse.

Il ne m'appartient pas de préconiser les moyens que les consommateurs doivent employer pour réaliser les mélanges, quoique je persiste toujours à croire que c'est le fabricant qui est le mieux en mesure de

les appropriier à la composition particulière de son produit et de les obtenir d'une manière homogène et parfaite, grâce à ses installations spéciales ; car il ne faut pas perdre de vue que chaque ciment ou chaque chaux exige différentes proportions de gangue additionnelle ; leur rapport dépend, d'une part, de la quantité de chaux renfermée dans le ciment et, d'autre part, de la quantité de facteurs hydrauliques actifs renfermés dans la gangue. Les consommateurs, directeurs de travaux, techniciens, etc., peuvent eux-mêmes résoudre ces cas.

Il est certain que ce travail aurait pu acquérir beaucoup plus de valeur, si j'avais encore mis quelques années à le compléter ; mais j'ai été amené à hâter la publication de mes résultats, d'abord, en considération de mon âge, ensuite, par l'approche des constructions maritimes colossales projetées par plusieurs États et qui vont absorber des centaines de millions de capitaux. Les hommes de science et de pratique reprendront mes travaux, les soumettront aux vérifications les plus sévères et m'aideront à les compléter.

Dans le premier travail concernant l'influence de l'eau de mer sur le ciment Portland que j'eus l'honneur de présenter à l'« Institution of Civil Engineers » (Paper n° 2592, vol. CVII, session 1891-1892, part. 1), je conclusais en recommandant de colmater le plus complètement possible les pores des parties extérieures du mortier directement exposées à l'eau de mer, c'est-à-dire, de les remplir avec des substances saturées, incapables de se laisser attaquer par les sulfates ou du moins de se laisser transformer en produits capables de cristalliser avec augmentation de volume. Ce remède a certainement sa valeur, mais son application n'est pas toujours facile et sûre.

Mon étude actuelle attaque le mal dans sa racine, puisque la chaux libre qui constituait l'élément nuisible est maintenant préalablement enchaînée dans des combinaisons qui la transforment en élément utile. L'étude est basée sur les faits que j'ai énoncés depuis longtemps, à savoir que les ciments Portland et les chaux hydrauliques surchargés de chaux sont améliorés et appropriés à l'action de l'eau de mer par l'addition — soit à l'usine soit sur le chantier — de substances capables de former un nouveau mortier hydraulique avec la chaux en excès ou mise en liberté pendant le durcissement ; ces substances, connues sous le nom général de pouzzolanes, sont : le trass, la terre de santorin, puis le verre pulvérisé, les ardoises argileuses cuites, le kaolin, etc.

De toutes ces gangues, la plus active est le vrai trass, par suite de sa haute teneur en facteurs hydrauliques et les qualités de ces parties constitutives agissant comme sable. La méthode d'épreuve des matériaux hydrauliques ainsi constitués résulte de l'ensemble de toute l'étude qui précède.

Ma proposition pour l'essai des matériaux destinés à l'eau de mer, présentée à la commission spéciale instituée par l'association internationale pour l'unification des procédés d'épreuve des matériaux de construction, est conçue comme suit :

La résistance des matériaux hydrauliques à l'eau de mer est essayée sur des mortiers poreux 1 : 5 à la traction, à la compression ou à la flexion, après immersion dans une eau de mer naturelle ou artificielle, qui pendant les vingt-huit premiers jours sera à renouveler journalièrement, puis toutes les semaines, mais qui sera remuée tous les jours.

Comme eau de mer artificielle, on emploiera une solution renfermant par litre :

30	grammes	chlorure	de	soude	;
3	—	—	de	magnésie	(calculé à l'état anhydre) ;
3	—	—	sulfate	de	magnésie — —
1,25	—	—	—	de	calcium — —

Les bicarbonates sont exclus, pour ne pas affaiblir l'action de l'eau saline. On plongera dans l'eau de mer artificielle un nouet renfermant des morceaux de gypse dans le but de conserver la teneur en sulfate constante comme dans l'eau de mer.

*Exposé des motifs :* L'action de l'eau de mer sur les matériaux hydrauliques consiste principalement en une réaction chimique progressive des sulfates solubles sur la chaux libre ou la chaux mise en liberté pendant le durcissement, sur le ferrite de chaux, l'aluminate de chaux, surtout sur ces dernières combinaisons riches en chaux.

Cette réaction s'exerce le plus promptement sur les mortiers poreux et ses effets se manifestent dans les résultats donnés par les essais de résistance. Dans cet ordre d'idées, la préférence est à accorder aux mortiers 1 : 5 et aux éprouvettes présentant une grande surface relativement à la section de rupture. Les essais de résistance à la traction et à la flexion sont donc préférables aux essais à la compression.

Les essais comparatifs en eau douce et en eau de mer donnent rapidement des indications sur l'influence de cette dernière.

Une solution à 2 p. c. de sulfate de magnésie conduit encore plus rapidement au but.

Je ne m'étendrai pas plus longtemps sur le rôle des sels de magnésie, car la magnésie n'exerce aucune action nuisible, elle agit plutôt favorablement en colmatant les pores. Elle se dépose sous forme d'hydrate floconneux, incapable d'occasionner des tensions, et insoluble dans l'eau ; elle se maintient ainsi sans modifications comme elle s'est déposée. L'acide sulfurique seul exerce une action désagrégeante ; tous les

sulfat es agissent de la même manière, mais avec une énergie différente, soit qu'ils se présentent sous forme de sulfate de soude (Vicat), de sulfate de chaux (Michaëlis), ou de sulfate de magnésie.

Par ma théorie de 1882, j'ai semé une graine, qui par le temps, et à travers bien des vicissitudes, est devenue un arbrisseau portant actuellement des fruits. J'espère que l'arbre croitra dorénavant sans entraves et étendra ses ramifications pour la plus grande prospérité des générations futures. Pour moi, je trouverai une récompense suffisante dans la conviction d'avoir contribué à la solution de cette question si importante des constructions maritimes, en indiquant une ligne de conduite capable de procurer un surcroît de sécurité et de bien-être aux populations.

Berlin, décembre 1895.

Dr WILHELM MICHAËLIS.

## RAPPORTS

DE LA

COMMISSION CHARGÉE D'Étudier LES AMÉLIORATIONS A APPORTER  
AU CANAL DE LOUVAIN A LA DYLE (1).

# LE RHIN.

NOTICE RÉDIGÉE PAR M. A. DUFOURNY,

Ingenieur en chef Directeur des Ponts et Chaussées.

### SOMMAIRE.

Importance du trafic. — Le bassin rhénan et sa puissance. — La zone d'action du Rhin. — Ses ports, leur destination et leur trafic. — Dépenses faites pour l'amélioration du fleuve en Allemagne et dans les Pays-Bas. — Plans des travaux réalisés. — Les épis et les digues longitudinales. — But à atteindre. — Programme à réaliser. — Résultats obtenus. — Progrès de la navigation. — Remorquage et touage. — Les firmes d'exploitation. — Services rapides. — Services des marchandises pondéreuses. — Frets. — Bon marché des transports obtenus par une navigation intérieure bien organisée. — Politique protectionniste. — Opposition au Rhin. — Brème et Hambourg en concurrence avec Anvers et Rotterdam. — Les tarifs de chemins de fer. — Leur influence sur l'étendue des marchés dévolus aux ports maritimes. — Les tarifs de faveur. — Les tarifs du Levant. — Les tarifs directs. — Projets de travaux laissés en suspens, pour ne point accroître le bassin rhénan. — Cologne et Dusseldorf ports de mer. — Les lignes maritimes déjà créées. — Leur trafic.

(1) Ces rapports ont été rédigés à la suite d'un voyage de mission fait en Allemagne par une délégation de la commission précitée instituée par arrêté ministériel du 12 octobre 1895.

Cette commission est composée comme suit :

MM. BODART, président de la Commission des installations maritimes.

BOELS, conseiller communal de Louvain.

CAPELEN, député permanent du Brabant.

DE COSTER, échevin de la ville de Louvain.

DE NEEF, conseiller provincial du Brabant.

DE PAEPE, ingénieur en chef, directeur du service des chemins de fer de l'État.

DE TROOZ, membre de la Chambre des Représentants.

DUFOURNY, ingénieur en chef directeur des ponts et chaussées.

FRISCHE, ingénieur-architecte de la ville de Louvain.

MAILLIET, inspecteur général des ponts et chaussées.

PEEMANS, président de la Chambre de commerce de Louvain.

PIERRET, ingénieur en chef du service provincial du Brabant.

PIERROT, ingénieur en chef directeur des ponts et chaussées.

ROGER, directeur du service du pilotage.

VAN GANSBERGHE, ingénieur principal des ponts et chaussées.

M. de Trooz remplit au sein de la Commission les fonctions de président et MM. Pierret et Peemans, celles de secrétaires.