

de quelques éprouvettes de 3 mailles chacune, laminées en fer de diverses provenances et qualités.

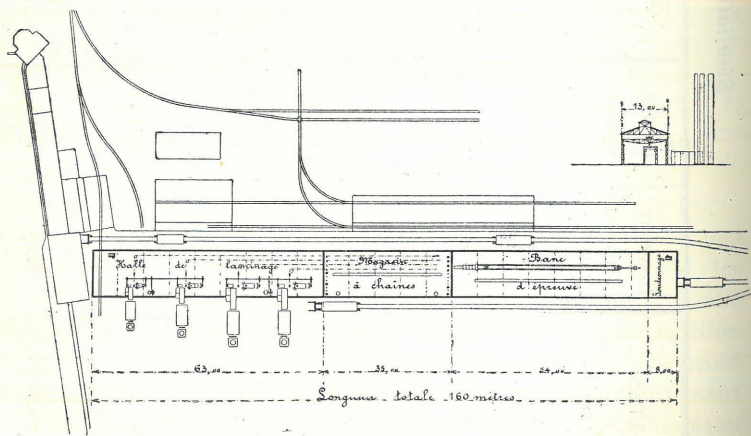
Si on ouvre un maillon laminé et si on redresse le fer de manière à reconstituer une barre droite, on constate, après avoir étiré cette barre jusqu'au déchirement, que le métal a gagné en résistance et en ductilité.

*
* *

Après avoir accompli une mise au point aussi complète de son procédé, la Société put s'occuper de la négociation de ses brevets étrangers. En même temps qu'elle livrait sa première chaîne, la Société passait avec la firme Borsig, de Berlin, un contrat d'association pour l'exploitation en Allemagne du monopole de la fabrication des chaînes sans soudure par le procédé du laminage annulaire. Depuis lors, un contrat analogue a été passé en France avec la Société anonyme des Établissements Alfred Maguin.

La Société va prochainement installer un outillage pour chaînes de 19 à 34 millimètres et elle va mettre à l'étude un outillage pour chaînes jusque 90 millimètres.

La figure ci-dessous fait voir l'usine à laminier les chaînes en cours de construction à Borsigwerk (Haute-Silésie). Elle sera capable d'une production annuelle de 5,000 tonnes.



RÉSISTANCE

DES

MORTIERS HYDRAULIQUES A LA MER

PAR

Émile CAMERMAN

Ingénieur, chimiste des Chemins de fer de l'État belge.

Dans le fascicule 2, année 1896 des *Annales des Travaux publics*, j'ai décrit les réactions auxquelles il fallait attribuer la décomposition des mortiers par l'eau de mer. Cette interprétation des faits, qui n'était pas neuve, consistait à montrer que l'eau de mer dissout la chaux des ciments plus énergiquement que l'eau douce, qu'elle pénètre dans les pores du mortier et que par osmose des échanges s'effectuent entre la partie interne du mortier et l'eau d'immersion, c'est-à-dire que la chaux dissoute se diffuse en dehors; l'eau de mer appauvrit le mortier en chaux, elle a pour effet de ronger le squelette solide agglomérant et de déposer dans les cavités des produits de décomposition dont les uns, tels que la magnésie, sont inoffensifs, dont les autres se dilatent en cristallisant, comme le sulfate de chaux.

Je montrai à quel point les mortiers appauvris en chaux par le passage de l'eau perdent leur résistance initiale et j'attribuai la bonne tenue des mortiers de trass, dans les anciennes constructions maritimes de Hollande, à leur imperméabilité et à leur haute teneur en silice et alumine inattaquables par l'eau de mer.

Dans le même fascicule ainsi que dans le fascicule V de 1901 des *Annales des Travaux publics*, je résumai les études de divers expérimentateurs, notamment de MM. Michaëlis et H. Le Chatelier; celles-ci aboutissaient à la conclusion que les

combinaisons de l'alumine et de la chaux des ciments avec les sulfates de l'eau de mer forment le sulfoaluminate de chaux cristallisant avec 28.5 molécules d'eau d'hydratation et, provoquant des augmentations de volume considérables. Cette réaction était envisagée comme la cause principale de l'altération des mortiers. L'addition de matières siliceuses pouzzolaniques telles que le trass, la gaize de l'Argonne, capables de saturer la chaux, était indiquée comme remède à ces décompositions.

Les expériences sur lesquelles est basée cette nouvelle théorie, avaient été effectuées *en laboratoire* avec de l'eau de mer naturelle ou artificielle. Celles que j'ai moi-même entreprises et relatées avaient été accomplies dans les mêmes conditions; elles aboutissaient à des résultats analogues. Je fus donc amené à admettre l'exactitude de la nouvelle théorie; pourtant elle n'expliquait pas la bonne conservation des mortiers de chaux et trass que l'on observe notamment dans d'anciennes constructions maritimes de Hollande (*voir fascicule V de 1901, p. 844*). Je l'attribuai, comme dans ma première étude, à leur haut degré d'imperméabilité.

En face de ces deux théories dont la première attribue les décompositions des mortiers à la dissolution de la chaux avec désordres accessoires dus aux sulfates, et dont la seconde explique les désagrégations par la production de sulfoaluminate de chaux, nous avons à exposer les vues de M. Rebuffat, professeur à l'Ecole des Ingénieurs de Naples, et de M. Maynard, chef du laboratoire d'essais de La Rochelle.

Études de M. le professeur Rebuffat.

Au Congrès international des méthodes d'essais des matériaux de construction tenu à Paris en 1900, M. Rebuffat relata les expériences suivantes :

« Dans le but de rechercher la façon dont les pouzzolanes se comportent à l'eau de mer, je fis l'analyse de deux mortiers, l'un de l'époque romaine, l'autre moderne. Le mortier romain fut pris à l'un des piliers qui, aujourd'hui encore sont en par fait état dans le port de Pozzuoli; enlevé au pic, par un plongeur, à 11^m.50 de profondeur, *il était d'une cohérence parfaite*. Le mortier moderne fut pris à l'un des blocs de béton du môle St-Vincent, dans le port de Naples, à quelques mètres de profondeur; sa cohérence était également parfaite.

» La pouzzolane des deux mortiers était de la pouzzolane trachytique des environs de Baïa (1).
 » Ces mortiers desséchés sur la chaux vive ont donné à l'analyse les résultats suivants :

» *Partie insoluble dans l'acide chlorhydrique normal.*

» Mortier romain. 33.68 p. c.
 » Mortier moderne 52.10 »

« *Composition de la partie soluble dans l'acide chlorhydrique normal.*

	Mortier romain.	Mortier moderne.
» Eau	17.03 p. c.	20.56 p. c.
» Acide carbonique	1.11	1.48 »
» Silice	33.64 »	32.60 »
» Alumine	32.61 »	28.38 »
» Oxyde de fer	1.68 »	4.23 »
» Chaux	5.66 »	6.67 »
» Magnésie	3.56 »	2.35 »
» Potasse	5.15 »	2.86 »
» Soude		1.82 »

» Ces données analytiques nous fournissent la preuve cherchée. Elles nous font voir que, dans un laps de temps relativement court, un bon mortier de pouzzolane est (sans perdre sa cohérence) réduit par les sels de l'eau de mer à une com-

(1) La pouzzolane de Baïa présente une composition fort rapprochée de celle du trass d'Andernach, ainsi que le montrent les analyses suivantes :

	Pouzzolane de Baïa	Trass d'Andernach..
Eau hygroscopique.		2.90
Perte au feu	7.25	7.63
Silice	52.77	54.10
Alumine	17.00	18.20
Oxyde de fer	4.84	4.13
Chaux	3.28	1.53
Magnésie	1.35	1.62
Potasse	7.65	7.95
Soude	4.94	

» position chimique limite, qu'il conserve dès lors à travers les
» siècles. »

A la suite de ces constatations précises, M. Rebuffat relate des expériences de laboratoire tendant à montrer comment on pouvait par l'action d'une solution de chlorure de sodium, de sulfate de magnésium et d'anhydride carbonique reproduire, en un temps relativement court, le phénomène de l'appauvrissement en chaux de ces ciments de pouzzolane. A la fin de la séance du Congrès où M. Rebuffat développa ses intéressantes recherches, je contestai les conclusions que l'on pouvait tirer de cette dernière expérience, la dissolution de la chaux pouvant à bon droit être attribuée à l'acide carbonique et non aux sels de l'eau de mer. Nous n'en tiendrons donc pas compte et retiendrons le fait important et non contesté de *mortiers de chaux et de pouzzolane résistant convenablement à la mer depuis environ 2,000 ans, tout en ayant subi dans leur composition chimique une modification profonde, consistant dans la disparition de la majeure partie de la chaux.*

Du sulfoaluminate de chaux, il n'est pas question.

Bien plus, dans une note subséquente intitulée *I sulfoaluminati di calcio e la decomposizione delli costruzioni maritime eseguite in cemento Portland*. Palermo, tipografia « La Statuto », 1901. M. Rebuffat cite les résultats d'expériences suivantes que je fais précéder d'une analyse de l'eau de la mer du Nord, afin que le lecteur saisisse le degré d'importance de chacun des réactifs.

Eau de la mer du Nord.

Chlorure de sodium	25.513	grammes par litre.
Bromure de sodium	0.373	—
Sulfate de potassium	1.529	—
— de calcium	1.622	—
— de magnésium	0.706	—
Chlorure de magnésium	4.641	—

« La solution de chlorure de magnésium, concentrée ou diluée, dit M. Rebuffat, attaque rapidement les sulfoaluminates en laissant un résidu floconneux formé d'hydrate d'alumine et d'hydrate de magnésie, avec traces de chaux, tandis que l'acide sulfurique et la chaux passent dans la solution.

- » La solution saturée de sulfate de magnésium attaque les sulfo-aluminates avec une extrême lenteur, à cause de l'insolubilité du sulfate de chaux dans la même solution.
 - » Les solutions diluées de sulfate de magnésium attaquent les sulfo-aluminates et les décomposent de la même manière que la solution de chlorure de magnésium, mais beaucoup plus lentement.
 - » Les solutions mixtes de sulfate de magnésium et de chlorure de sodium décomposent les sulfoaluminates de la même façon que le chlorure de magnésium.
 - » La solution à 30 pour mille de chlorure de sodium attaque énergiquement les sulfoaluminates. En faisant réagir 200 grammes de la solution sur 1 gramme de sulfo-aluminate pendant 12 heures, le liquide acquiert une réaction fortement alcaline et renferme une petite quantité d'acide sulfurique et de chaux.
 - » L'eau de mer décompose presque instantanément les sulfoaluminates. En mettant un gramme de substance dans 200 centimètres cubes d'eau de mer, il ne reste après quelques heures qu'une petite quantité de substance floconneuse formée d'hydrate d'alumine et d'hydrate de magnésie avec de petites quantités de chaux et d'acide sulfurique. »
- M. Rebuffat conclut nettement que dans les mortiers immergés dans l'eau de mer, le sulfo-aluminate ne peut prendre naissance que d'une façon transitoire et en faible quantité (insuffisante pour qu'on puisse lui attribuer la désagrégation du mortier); ses essais mettent en pleine lumière un fait des plus importants, totalement négligé jusqu'ici, à savoir l'action désagrégeante du chlorure de sodium sur les aluminates et les sulfo-aluminates.

Études de M. Maynard, chef du laboratoire des ponts et chaussées de la Rochelle.

M. Maynard explique de la manière suivante la décomposition des mortiers par l'eau de mer :

Pendant la prise du ciment, il se forme de la chaux libre hydratée; l'hydratation de la chaux, comme de tous les produits hydrauliques à base de chaux, crée un vide à l'intérieur du mortier et l'eau de mer y a toujours accès.

La chaux libre hydratée entre en dissolution et sort du mor-

	Proportion d'eau.	Pénétration du sulfure.
» Ciments divers bien cuits		
» et pouzzolane grise . .	60 p. c.	Totale.
» Ciments divers bien cuits		
» et pouzzolane jaune . .	56 p. c.	0.5 m/m.
» Ciments divers peu cuits		
» avec pouzzolane grise .	54 p. c.	5 millimètres.
» Ciments divers peu cuits		
» avec pouzzolane jaune .	60 p. c.	0.8 m/m.
» Ciment de Boulogne à excès		
» d'argile avec pouzzolane		
» grise	51 p. c.	Totale.
» Ciment de Boulogne à excès		
» d'argile avec pouzzolane		
» jaune	55 p. c.	1.5 m/m.
» Ciment de Boulogne à excès		
» de chaux avec pouzzolane		
» grise	48 p. c.	0.5 m/m.
» Ciment de Boulogne à excès		
» de chaux avec pouzzolane		
» jaune	55 p. c.	3 millimètres.

» Enfin un mélange de chaux grasse et trass a été incomplètement pénétré.

» Ce tableau se rapporte à des mélanges de chaux et ciments avec des pouzzolanes d'Italie : une variété jaune et une variété grise que je dois à l'obligeance de M. Rebuffat. Sauf pour le mélange avec la chaux grasse, où elles ont été employées à l'état naturel, elles ont été broyées comme les ciments. »

» Le mélange avec les ciments a été fait à poids égal; pour la chaux, dans la proportion de quatre parties de pouzzolane pour une de chaux.

» On voit donc que, même avec une proportion d'eau relativement considérable : 50 p. c., il existe des liants hydrauliques pouvant arriver à former une masse absolument imperméable.

» *Le résultat le plus net de ces recherches préliminaires est L'INFLUENCE FAVORABLE EXERCÉE PAR L'ADDITION DE POUZZOLANES AU CIMENT; ce résultat est bien d'accord avec les moindres décompositions que les mêmes mortiers ont présentées dans les expériences de décomposition faites à l'eau de mer. Il semble*

» bien que ce facteur de la perméabilité plus ou moins grande des mortiers à la pénétration par diffusion des sels, ait une importance au moins aussi grande pour la conservation des mortiers à la mer, que la différence des propriétés chimiques des ciments employés.

Diffusion de l'hydrate de chaux. — La disparition d'une certaine quantité de chaux résulte clairement des résultats d'analyse suivants empruntés au mémoire de M. Maynard; ils se rapportent à divers états de décomposition de blocs de ciment pur, marque White Brothers, immergés depuis 1857.

Voici maintenant des renseignements sur un mortier maigre de 350 kilogrammes de ciment anglais de Wouldham par mètre cube de sable fin; ce mortier utilisé dans un pertuis de chasse et de navigation à la Perrotine (île d'Oléron), fut détruit par gonflement en dix années (les désordres s'y manifestèrent au bout de cinq ans).

Analyse du ciment faite en 1882 :

Silice	23.80	} 35.20
Alumine et oxyde de fer	11.40	
Chaux	60.25	} 60.25
Acide sulfurique	1.45	
Eau et acide carbonique	2.26	
Non dosé	0.84	

En juin 1892, on préleva un échantillon de mortier décomposé qui, analysé, avait la composition suivante :

Sable	45.75	
Silice combinée	6.55	} 14.00
Alumine	4.62	
Oxyde de fer	2.83	} 16.60
Chaux	16.60	
Magnésie	1.80	
Acide sulfurique	0.51	
Chlorure	1.55	
Eau et acide carbonique	18.92	
Non dosé	0.87	

J'ai personnellement pu me convaincre que dans les maçonneries exécutées sur nos côtes au moyen de ciment romain — notamment celles des brise-lames — les altérations se produisent avec les mêmes modifications de composition que dans les mortiers décrits par M. Maynard.

On ne trouve guère de mortier décomposé à la partie supérieure de ces brise-lames, probablement parce que, découverts à marée basse, c'est-à-dire pendant une grande partie de la journée, la chaux se transforme en carbonate par l'absorption de l'acide carbonique de l'air.

Voici les analyses de deux mortiers de briques prélevés dans le bas de brise-lames près du sable de la plage. Le premier présentait encore une certaine résistance, le second était très mou et s'écrasait sous la pression du doigt.

DÉSIGNATION.	Décomposition exclusivement chimique sans variation notable du volume apparent.				Décomposition exclusivement chimique avec gonflement et désagrégation du mortier.	
	Ciment gris de l'intérieur du bloc non décomposé.	Ciment dans la période de coloration rose.	Ciment totalement rose au terme final de la décomposition.	Ciment gonflé et désagrégé, sans coésion dont la couleur est restée grise.	Ciment gonflé et décomposé.	
Perte de 0 à 50°	23.70	23.70	20.50	20.00	28.00	
Perte de 50 à 100°	12.30	12.30	11.60	6.88	3.90	
Perte de 100° au rouge	14.68	14.68	0.70	0.95	20.08	
Humidité (perte à 120°)	13.30	13.30	17.70	15.15		
Perte de 120° au rouge	7.57	7.57	6.77	7.92		
Silice à l'état de sable	0.85	0.85	4.43	2.28		
Silice combinée	16.45	16.45	7.50	32.00	13.82	
Alumine	5.66	4.25	2.37	5.28	4.91	20.82
Oxyde de fer	2.64	4.50	2.90	1.84	2.08	
Chaux	47.03	24.44	Traces.	0.57		
Acide sulfurique	4.37	2.19	20.60	2.88	7.84	
Chlorure de sodium	2.53	4.40	3.50	4.38	Non dosé.	
Chlorure de calcium						
Magnésie	0.30	0.82				
Acide carbonique	2.20	Non dosé.				

DÉSIGNATION.	Mortier partiellement dé- composé.	Mortier totalement décom- posé.
Perte au feu	9.80 p. c.	22.23 p. c.
Sable	66.30 »	46.05 »
Silice (soluble dans la potasse)	7.30 »	11.94 »
Alumine	1.26 »	2.20 »
Oxyde de fer	0.49 »	0.50 »
Chaux	9.45 » 9.45	4.24 » 4.24
Magnésie	2.00 »	8.14 »
Acide sulfurique combiné	1.53 »	2.36 »
Divers non dosés	0.83 »	2.24 »
	100.00	100.00

Pour se représenter la quantité de chaux disparue dans un ciment, il faut se rappeler que les ciments Portland actuels ont comme composition moyenne :

Silice + alumine + oxyde de fer 32 p. c.
Chaux 64 »

La proportion des éléments sensiblement fixes à l'élément variable chaux est donc de $\frac{1}{2}$.

Dans les ciments fabriqués depuis plus de 25 ans, cette proportion était un peu plus forte : environ $\frac{34}{62}$.

Les analyses montrent d'une manière très frappante combien cette proportion a varié par élimination de chaux. En outre, la présence de fortes proportions de magnésie ne se remarque que dans les mortiers totalement décomposés.

Voici comment M. Maynard l'explique au moyen de la diffusion :

Étant admis qu'un vide est toujours créé à l'intérieur de la masse des mortiers par la formation des hydrates, notamment

l'hydrate de chaux, « l'eau doit pénétrer ces mortiers sous l'influence de la pression atmosphérique et en chasser les bulles d'air. Simultanément à ces actions, l'hydrate de chaux dissous se diffuse en dehors du mortier (1) et va réagir sur les sels de la mer jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'une quantité de chaux suffisante pour saturer à un équivalent les matières acides du liant (2). Ce n'est donc pas l'eau de mer, comme on le croit généralement, qui pénètre dans le mortier pendant cette période, mais bien la chaux du mortier qui va réagir en dehors sur cette eau; ce n'est que lors de la disparition de la dernière quantité de chaux, alors que la porosité dépasse 2/3, que l'eau de mer arrive à pénétrer en quantité notable à l'intérieur du bloc, parce qu'en ce moment l'eau qui sature le mortier devient moins dense et est remplacée peu à peu par de l'eau de mer nouvelle; il y a alors précipitation d'hydrate de magnésie à l'intérieur du mortier. »
Cette interprétation me paraît bien exacte et conforme à la réalité des faits.

Les réactions chlorure de magnésium + chaux hydratée = chlorure de calcium soluble + magnésie précipitée.

Sulfate de magnésium + chaux hydratée = sulfate de calcium + magnésie précipitée, ne se forment pas à l'intérieur du mortier, mais en dehors de celui-ci, dans la mer.

En examinant les résultats d'analyse des mortiers en voie de décomposition, on voit immédiatement que la quantité de chaux disparue n'est pas remplacée par son équivalent de magnésie. Les grandes quantités de magnésie ne se montrent que dans les mortiers totalement décomposés.

M. Le Chatelier a vérifié, par une méthode indépendante de l'analyse chimique, le fait que les sels de magnésium et les sulfates ne pénètrent pas dans les mortiers de ciment tant que la totalité de leur chaux libre ne s'est pas diffusée à l'extérieur.

« Pour cela, il a étudié la diffusion des sels donnant avec la chaux un précipité coloré comme le font l'azotate d'argent ou le bichlorure de mercure. L'oxyde noir d'argent ou l'oxyde jaune de mercure sont très facilement visibles sur le

(1) Ce mouvement de diffusion qui porte l'hydrate de chaux à la surface externe du mortier est le même que celui qui amène la chaux sur la surface des dalles en ciment, où elle apparaît sous forme d'efflorescences.

(2) C'est-à-dire jusqu'à ce que $SiO_2, 3CaO$ soit devenu SiO_2, CaO .

» fond blanc d'une briquette de ciment. J'ai reconnu, dit
» M. Le Chatelier, que, conformément à l'observation de
» M. Maynard, la pénétration de ces sels solubles reste com-
» plètement nulle pendant un temps très long. Des briquettes
» de chaux hydrauliques et de ciment très poreuses, que les
» sulfures solubles pénètrent à bloc en huit jours, ne se sont pas
» laissé, après trois mois, pénétrer d'une fraction appréciable
» de millimètre par les deux sels plus haut mentionnés. Les
» briquettes sont recouvertes extérieurement d'une couche fon-
» cée de l'oxyde métallique et sur la cassure cette couche colo-
» rée ne pénètre pas en profondeur à une fraction de milli-
» mètre. »

L'augmentation de la porosité des mortiers s'explique suffi-
samment par la disparition de la chaux.

L'hydratation des mortiers et les gonflements qui peuvent
en certains cas en provenir, trouvent leur explication dans le
fait que, lorsque le mortier est devenu très poreux par dispari-
tion de la majeure partie de la chaux, la dissolution de ce der-
nier élément se ralentit; l'eau d'imbibition devient moins dense
que l'eau de mer : cette dernière pénètre dans le mortier en
formant divers sels *hydratés*, dont la présence est attestée par
la grande perte au feu des mortiers desséchés. Ces hydrates
sont des produits de réactions diverses avec un nombre de mo-
lécules d'eau de cristallisation tel que leur volume est fort supé-
rieur à celui des sels qui leur ont donné naissance; quelquefois,
il se forme ainsi du sulfoaluminate de chaux, avec 28 à 30 mo-
lécules d'eau de combinaison; on conçoit que des gonflements
se produisent par cet accroissement de volume considérable.

CONCLUSION.

*Les études de MM. Rebuffat et Maynard, basées sur des mor-
tiers immergés en mer, aboutissent donc à cette conclusion que
la cause première et dominante des décompositions réside dans
la dissolution de la chaux; les gonflements que l'on constate
parfois sont subséquents, ils ne se produisent pas toujours;
souvent ils sont d'importance accessoire.*

Des diverses recherches de laboratoire que j'ai résumées
dans mes précédents articles, il ressortait au contraire que le
gonflement dû à l'hydratation des sulfates et sulfoaluminates de

chaux était la cause prépondérante des altérations du mortier
en eau de mer.

La divergence entre les deux résultats provient de ce qu'en
laboratoire les corps d'épreuve sont immergés dans une quan-
tité d'eau de mer limitée. Au bout de quelques heures, elle est
saturée de chaux (elle présente une réaction franchement alcali-
ne au bout de quelques minutes). En outre, en vue d'abrèger
la durée des expériences, les expérimentateurs ont souvent tra-
vaillé sur des mortiers poreux (pâtes gâchées avec plus de
50 p. c. d'eau, de M. Lechatelier; mortiers formés d'une par-
tie de ciment + 5 parties de sable, de M. Michaëlis). Dans ces
conditions, l'eau de mer saturée de chaux peut devenir plus
dense que l'eau d'imbibition des mortiers; elle peut pénétrer
dans les pores relativement spacieux et produire au sein du
mortier des réactions formant le sulfate et le sulfoaluminate de
chaux. En pleine eau de mer, celui-ci serait dissous aussitôt
formé, mais en eau de mer saturée de chaux, comme celle des
laboratoires, le sulfoaluminate ne se dissout pas et exerce libre-
ment ses effets d'expansion.

Influence des additions de pouzzolanes au ciment.

Ainsi que nous l'avons dit, M. Maynard relate que de tous
les mortiers tenus en observation à la Rochelle depuis 1854,
aucun n'a résisté à des décompositions plus ou moins pronon-
cées par l'eau de mer.

Examinant les conclusions des recherches de MM. Michaë-
lis, Le Chatelier, Feret, etc., qui préconisaient l'addition de
pouzzolanes au ciment comme remède aux altérations, M. May-
nard admet l'efficacité partielle de ces ajoutes, mais l'amélio-
ration que l'on obtient ainsi serait loin d'être absolue.

Voici les objections qu'il formule :

1° Vicat a démontré que la silice hydratée, c'est-à-dire la
plus active, n'agit que lentement sur la chaux. Dans ses expé-
riences, il a fallu six mois pour saturer la silice de 76 p. c. de
chaux;

2° Quand un Portland est immergé en eau de mer, l'hydrate
de chaux ne se forme que peu à peu et il entre ensuite en dis-
solution pour se diffuser en dehors du bloc. L'expérience ap-
prend que toute la chaux d'un ciment arrive ainsi à disparaître;

3° Les mortiers constitués avec de la pouzzolane d'Italie,

qui contient de la silice soluble, sont décomposés par l'eau de mer; la chaux, après avoir été dissoute, se diffuse en dehors du mortier sans qu'elle soit remplacée par une quantité notable de magnésie.

« Cela posé, dit M. Maynard, si la silice mélangée au ciment » est à l'état gélatineux, ou si elle a été desséchée, sa combinaison avec la chaux mise en liberté pourra se produire, mais » avec lenteur, comme l'a démontré Vicat, et partiellement, » car les cristaux d'hydrate qui existent dans tout mortier ne » pourront évidemment pas se combiner instantanément et en » entier à la silice; après cette première action, la dissolution » et la diffusion de la chaux se continueront dans le mortier et » l'eau dont il sera imprégné sera sans cesse saturée d'hydrate » de chaux, toujours en mouvement très lent, vers l'intérieur » du bloc. Il peut se faire qu'après un certain temps, une portion de la chaux réussisse à se combiner à la silice, parce » que cette dernière sera particulièrement apte à entrer en » combinaison.

» Si, au lieu de silice gélatineuse ou desséchée, on ajoute au » ciment une autre matière dont la silice soit à un état différent, la combinaison de ce corps avec la chaux se produira » avec une lenteur plus grande encore, si toutefois elle a lieu.

» *La chaux du ciment aura donc le temps de disparaître par dissolution, puis diffusion ou exosmose, jusqu'à ce qu'il ne » reste plus qu'une quantité de chaux suffisante pour saturer » à un équivalent les matières acides constitutives du ciment.* »

Ce passage résume toutes les objections concernant l'efficacité des additions de pouzzolane.

Examinons si effectivement la chaux d'un ciment a le temps de disparaître par diffusion avant qu'elle ne soit combinée à la silice des pouzzolanes.

Les expériences suivantes de M. Maynard nous donnent des renseignements intéressants sur la diffusion de la chaux pendant la première année d'immersion :

Ciment Portland marque « Couronne » de Dannes (Pas-de-Calais) immergé sous forme de cube de 0^m.06 de côté.

DÉSIGNATION.	Ciment en poudre.	Ciment gâché avec 23 p. c. d'eau immergé dans la même eau pendant				
		24 heures.	30 jours.	3 mois.	6 mois.	1 an.
	P. C.	P. C.	P. C.	P. C.	P. C.	P. C.
Silice	20.82	20.50	20.60	20.00	19.60	19.00
Alumine.	9.48	8.95	8.25	7.23	7.13	10.01
Oxyde de fer	2.50	2.15	1.93	2.07	2.07	2.70
Chaux	65.15	61.60	61.97	60.00	52.92	46.10
Magnésie	0.14	0.15	0.13	0.43	0.07	0.57
Acide sulfurique	0.75	0.89	0.85	0.82	1.05	4.28
Chlorure de sodium	»	0.26	0.32	1.40	2.82	2.93
Perte de 120° au rouge.	0.30	5.10	5.80	7.60	13.50	13.80
Acide carbonique et non dosés.	10.60	0.40	0.15	0.45	0.84	0.62
Chaux libre sur le ciment desséché	6.02	8.15	12.52	12.87	12.27	10.20
Chaux éliminée par diffusion	»	Rien.	Rien.	1.60	8.70	15.50

A la suite de ces données précises sur le processus de la formation de la chaux libre dans le ciment et sa diffusion dans l'eau de mer, examinons les résultats d'expériences que nous possédons sur le temps exigé pour la combinaison du trass avec la chaux.

Les essais pour cette détermination consistent à immerger un poids connu de trass dans une solution saturée de chaux de titre connu et à déterminer à différentes époques la quantité de chaux disparue ou entrée en combinaison avec le trass; c'est la méthode adoptée par M. Feret, chef du laboratoire de Boulogne-sur-Mer. On peut aussi prélever des échantillons moyens sur la pouzzolane et y doser la chaux, en tenant compte de la quantité de chaux renfermée dans l'eau d'imbibition et de celle

que la pouzzolane renferme naturellement; c'est la méthode que j'ai adoptée dans le but de pouvoir conserver toujours l'eau de chaux en état de complète saturation. A cet effet, un sachet en papier filtre fort, rempli de chaux éteinte, était suspendu dans le bain; cette chaux se dissolvait au fur et à mesure que le bain tendait à s'appauvrir.

Mes expériences ont été effectuées avec de l'eau distillée renfermant 1^{er}.30 de chaux anhydre par litre et aussi avec de l'eau salée saturée de chaux (25 gr. de chlorure de sodium par litre, quantité se rapprochant de celle de l'eau de la mer du Nord). Elle renfermait 1.60 de chaux anhydre par litre. C'est à ce pouvoir dissolvant relativement considérable de l'eau de mer ainsi qu'à son action sur la silice que l'on doit attribuer les grandes résistances qu'acquièrent les mortiers de trass à l'eau de mer comparativement à l'eau douce.

Mes expériences ont commencé en hiver sur le trass immergé en eau salée; la température doit avoir oscillé entre + 5 et + 20°; la moyenne n'a certainement pas dépassé 15° centigrades.

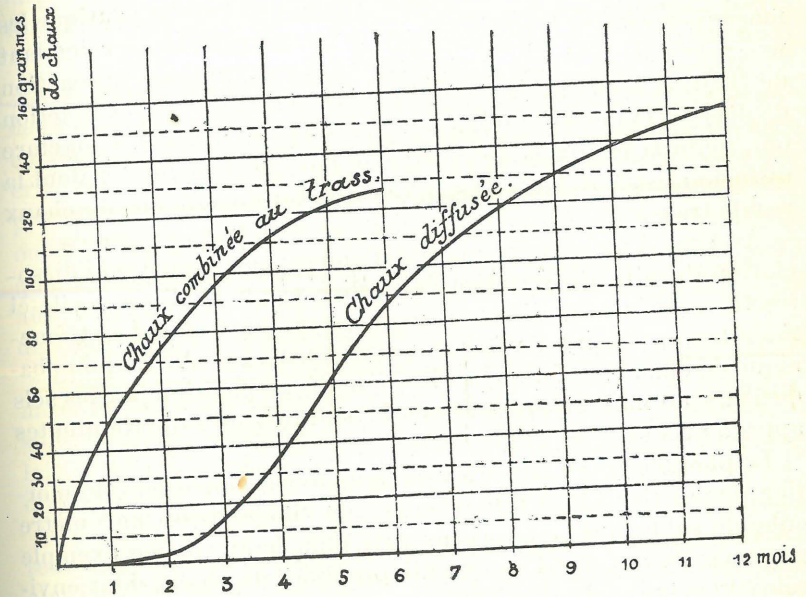
Observateurs.	Composition du liquide.	Poids de chaux absorbé par un poids 100 de trass après					
		1 semaine.	4 semaines.	10 semaines.	3 mois.	4 mois.	6 mois.
MM. Feret	1 gr. de CaO par litre d'eau	1.7	5.8	»	»	»	12.1
Camerman	1.30 de CaO par litre d'eau	1.85	»	6.55	»	»	»
Camerman	25 gr. de NaCl et 1.60 p. c. de CaO par litre d'eau	»	6.9	»	13.5	16.1	17.6

Considérons maintenant un mortier de ciment-trass formé de :
 Ciment : 1 volume ou 350 kilogrammes ou 1 kilogramme.
 Trass : 1 — 250 — — 0.71 —
 Sable : 4 — 1 mètre cube.

En se rapportant aux analyses du ciment « Couronne » au bout du premier mois, sur le kilogramme de ciment, 125 grammes de chaux sont mis en liberté; d'après mes résultats

69 gr. \times 0.71 = 49 grammes de chaux sont combinés au trass; rien n'est encore diffusé. Au bout du troisième mois, 128 grammes de chaux par kilogramme de ciment sont mis en liberté, 16 grammes ont disparu par diffusion, total 144 grammes; pendant la même période, $1.35 \times 0.71 = 96$ grammes de chaux ont pu se combiner au trass; nous voyons ainsi qu'au moment où la diffusion peut commencer, il ne reste dans le mortier qu'une faible quantité de chaux libre (49 grammes) apte à se dissoudre et à se diffuser.

La courbe ci-dessous montre combien l'allure des combinaisons l'emporterait sur celle des diffusions dans un mortier formé de 1 vol. ciment Couronne et 1 vol. Trass.



Il est à noter que le ciment « Couronne » que je cite comme exemple est à haute teneur en chaux; de tous les ciments dont M. Maynard donne l'analyse, c'est celui qui dans les périodes considérées présente le plus de chaux libre et le plus de chaux éliminée par diffusion; ainsi dans le ciment couramment fourni par la Société de Boulogne-sur-Mer à l'administration des Ponts et Chaussées, il n'y a au bout de six mois que 77^{gr}.3 de chaux libre et 45^{gr}.6 de chaux diffusée, soit un total de 122^{gr}.9

de chaux par kilogramme de ciment exposé à la diffusion; or, nous avons montré que dans le mortier ciment-trass, le trass pouvait fixer $176 \times 0.71 = 125$ grammes de chaux pendant cette période.

En d'autres termes, si la fixation de la chaux par la silice du trass est lente, la dissolution et la diffusion de la chaux sont lentes également; les chiffres qui représentent l'importance des fixations de chaux sont de même ordre que ceux qui représentent les quantités graduelles des dissolutions et disparitions.

Retenons aussi qu'il ressort des expériences de M. Le Chatelier sur l'imperméabilité que les mélanges de ciment et de pouzzolanes sont beaucoup moins poreux que les pâtes de ciment pur.

Si nous ajoutons à ces constatations que dans la pratique les maçonneries sont le plus souvent préservées de la mer pendant une partie de la durée des constructions et qu'ainsi la réaction de fixation a une avance de plusieurs semaines sur la réaction de dissolution et de diffusion, nous sommes amenés à conclure que toute la chaux mise en liberté dans les ciments et dont la diffusion est à redouter est fixée à l'état de silicate de chaux par le trass.

Au bout d'un certain nombre d'années commencera la dissociation du silicate de chaux en silice et chaux libre; celle-ci tendra encore à se diffuser, mais cette réaction est extrêmement lente. Comme l'a fait observer Vicat, ce silicate monobasique de chaux ne donne pas lieu à la décomposition par les sels de l'eau de mer et production de sulfates et sulfoaluminates aptes à produire les gonflements.

Le phénomène se réduira à un appauvrissement lent du mortier; le mortier à 600 kilogrammes de ciment-trass par mètre cube de sable que nous avons pris plus haut comme exemple renferme $350 \times 0.64 = 224$ kilogrammes de chaux dont environ 200 peuvent disparaître, soit un tiers du liant en poids; les deux tiers soit 66 à 67 p. c. de l'agglomérant, restent fixes et stables; le mortier a perdu une partie de sa résistance, mais dans la plupart des cas la stabilité de la construction n'est pas compromise.

Dans le cas d'un dosage de 600 kilogrammes de ciment par mètre cube de mortier, on se trouve en présence de $600 \times 0.64 = 384$ de chaux dont environ 360 ou 60 p. c. peuvent disparaître. Il ne reste que 40 p. c. de l'agglomérant et son

affaiblissement est accompagné des désordres provoqués par l'apparition des sels à expansion.

En résumé le rôle des pouzzolanes comme matières additives du ciment consiste à enrichir l'agglomérant en matières siliceuses, ce qui revient à l'appauvrir en chaux, élément dangereux parce que soluble et éliminable. D'après les considérations que précèdent, moins un mortier renfermera de matières éliminables et moins il deviendra poreux, plus il conservera sa cohésion.

L'emploi du ciment à la mer ne nous paraît donc plus à redouter comme jadis; les additions de trass ou d'autres matières pouzzolaniques choisies sont de nature à corriger dans une très large mesure les défauts résultant de ses éléments constitutifs.

Ces lignes étaient écrites, lorsque je reçus de M. Maynard deux travaux manuscrits, dont l'esprit confirme absolument les conclusions qui viennent d'être formulées: le premier manuscrit, intitulé « Note sur la détermination rapide de la tenue des produits hydrauliques à la mer par leur allure de décomposition ou de dissociation », est basé surtout sur la recherche de la quantité de chaux éliminable par diffusion au bout d'un ou deux ans; c'est donc bien là le critérium de l'aptitude de résistance de l'agglomérant hydraulique à la mer.

Dans le second, « Étude sur le ciment de laitier... », M. Maynard recherche l'agglomérant qui renfermerait le moins possible de chaux dissociable et fixe son choix sur un ciment de laitier ne renfermant que 11 p. c. de chaux additive, c'est-à-dire dissociable.

Le fait que les constatations et les études d'un expérimentateur aussi documenté que M. Maynard aboutissent en dernière analyse à la recherche d'un mélange de pouzzolane et de chaux aussi riche en pouzzolane que possible, nous paraît très intéressant, en ce sens qu'il dénote la tendance au retour vers nos plus anciens mortiers.

Qu'était en effet le mortier de 2,000 ans d'âge, cité par M. Rebuffat? Un mélange de deux parties en volume de pouzzolane et d'une partie de chaux grasse en pâte; le calcul montre qu'il devait renfermer environ 20 p. c. de chaux en poids.

Le mortier de trass fort, tant employé jadis avec succès par notre administration des Ponts et Chaussées, composé de deux

volumes de trass et de trois volumes de chaux hydraulique, renferme environ 30 p. c. de chaux en poids (1).

Enfin le mortier employé vers 1874 aux quatre cales sèches de Kiel se composait de : trass, 1.5 volum. ; chaux, 1 volum. ; sable, 0.5 vol.

Traduit approximativement en matériaux de notre pays, il se présente comme suit :

Trass	1.5 vol. = 1,500 kil.
Chaux hydraul. de Tournay, 1 vol. =	800 kil.:
Sable des dunes	0.5 vol. = 700 kil.

L'agglomérant se décompose comme suit :

Trass	1,500 kil.	} 800
Silice, et alumine	160 »	
Chaux pure	560 »	
Eau et divers	80 »	

Il renferme 24 p. c. de chaux en poids.

Voici les résistances à la traction obtenues avec ce mortier (éprouvettes à la pilonneuse comme pour les essais normaux de ciment, immersion dans l'eau de mer, température moyenne 15°.5 centigr.).

Après 14 jours.	Après 28 jours.	Après 1 an.
15.84 kg. par c/c.	21.32 kg. par c/c.	26.53 kg. par c/c.

Ces résistances sont sensiblement les mêmes que ceux d'un mortier de 500 kil. de ciment par mètre cube de sable de dunes.

Tout fait prévoir qu'on retournera à de semblables mortiers avec dose de pouzzolane encore renforcée.

Mai 1904.

(1) En réalité, la différence entre le mortier romain et le mortier de trass fort est moins grande que ce chiffre ne le ferait croire, car la mouture des pouzzolanes d'Italie est si grossière qu'on peut considérer les deux volumes de pouzzolane du mortier romain comme valant tout au plus 1.5 volume de trass et 0.5 volume de matières inertes jouant le rôle de sable.

HOTEL DES POSTES ET TÉLÉGRAPHES

DE GAND

NOTE

DE
M. CLOQUET
Architecte.

Pl. XXIII.

M. J. Van den Peereboom, alors ministre des chemins de fer, ayant à ériger d'importants bâtiments pour le service des Postes et Télégraphes dans quelques-unes de nos vieilles cités, eut l'intéressante idée d'en faire en quelque sorte des échantillons des styles traditionnels locaux et de contribuer ainsi à remettre en honneur les formes diverses de notre art national. Il demanda les plans de plusieurs de ces constructions à des architectes privés, connus pour pratiquer avec prédilection le style ancien de la région; il s'adressa à feu de Wulf pour Ostende, à M. P. Langerock pour Courtrai, à M. Jamaer pour Liège; il nous fit l'honneur, à M. Et. Mortier et à moi, de nous confier les plans du nouveau bâtiment des Postes et Télégraphes qu'il avait entrepris d'élever au Marché-aux-Grains, à Gand.

Cet édifice, qui sera bientôt sous toit, occupe un terrain en forme de quadrilatère irrégulier, isolé des quatre côtés; dans son emplacement est comprise la célèbre *Maison des Bateliers*, qui sera utilisée comme local de l'Inspection du Télégraphe, et dont la restauration se fait sous la direction de MM. Et. Mor-