

levant de Halsted street à Chicago. — Préservation des ouvrages métalliques contre la rouille. — Cales sèches en bois. — La résistance du bois de charpente. — Balayeuse universelle . . . . . 268

ANGLETERRE. — Nouveau tracé de parabole. — Nouveau cargo-boat à deux hélices . . . . . 279

BELGIQUE — Reconstruction du pont du Val-Benoit, à Liège, par MM. JACQUEMIN et CHRISTOPHE, Ingénieurs des ponts et chaussées. — Le confort des voyages modernes. — Port d'Anvers : les nouveaux droits maritimes — Port d'Ostende : les nouveaux droits de bassin . . . . . 282

FRANCE. — Commerce de la France en 1895. — Ports français : réduction des péages pour les escales. — Les grands voiliers français. — Siphon de la Concorde. — Les appareils de chasse pour l'application du « tout à l'égout » par M. DANTIN . . . . . 289

PAYS-BAS. — Le dessèchement du Zuiderzee . . . . . 294

DIVERS. — Air comprimé. — Fondation à grande profondeur. — Expériences faites par M. HERSENT. . . . . 296

III. Comptes rendus :

ALLEMAGNE. — *Centralblatt der Bauverwaltung*. — L'ascenseur du canal de Dortmund à l'Ems, à Henrichenberg . . . . . 301

AMÉRIQUE. — *American society of civil ingénieurs*. — Effet des incrustations sur le mouvement de l'eau dans les conduites . . . . . 311

ANGLETERRE. — *Minutes of proceedings of the Institution of civil engineers*. — Kidderpur docks. . . . . 311

FRANCE. — *Annales des Ponts et Chaussées*. — Construction du troisième bassin à flot de Rochefort. Note de M. CRAHAY DE FRANCHIMONT, Ing. en chef des ponts et chaussées. — Construction des grands réservoirs d'eau. Note de M. DUTOIT, Insp. des irrigations de la ville de Paris. — Limite de la résistance à la rupture. Note de M. DURAND-CLAYE, Inspect. gén. des ponts et chauss. — Arcs articulés et arcs encastés. — Note de M. SOULEYRE, Ing. des ponts et chauss. — Méthode de deux surcharges continues pour le calcul des ponts métalliques à poutre droite. — Note de M. COLLIGNON, Insp. des ponts et chaussées. — Assainissement de Berlin. Note de M. LAUNAY. *Annales des chemins vicinaux*. — Pont suspendu semi-rigide de Cannes (Écluse). — Rupture des ponts métalliques . . . . . 316

*Annales de l'Institut Pasteur*. — Stérilisation de l'eau par l'ozone . . . . . 327

PAYS-BAS. — *De Ingénieur*. — Considérations sur les travaux de défense des côtes hollandaises par M. DE RYKE . . . . . 332

IV. Bibliographie :

Recherches expérimentales sur le matériel de la batellerie par M. DE MAS, Ing. en chef des ponts et chauss. . . . . 336

Vue du pont du Val-Benoît, à Liège.  
Planches IX à XX.

# INFLUENCE

## DE LA

# NATURE DES MORTIERS

SUR LEUR CONSERVATION A L'EAU DE MER (1)

PAR

ÉMILE CAMERMAN

Ingénieur chimiste au chemin de fer de l'État.

*Perméabilité.* — En étudiant l'influence des eaux sur les mortiers plus ou moins compacts, il importe d'établir une distinction bien nette entre les notions de *porosité* et de *perméabilité*.

La propriété que possèdent certains corps de se laisser traverser par les liquides n'est pas proportionnelle au volume des vides que l'on peut déceler dans leur structure. Tous les *pores* ne sont pas de nature à livrer passage aux fluides. On connaît, en effet, des corps creusés d'une multitude de cavités comparables à des alvéoles, entre lesquelles il n'existe aucune communication ; ils sont très poreux et imperméables.

Généralement, dans les mortiers employés en maçonnerie, les vides communiquent entre eux sans obstacle absolu à la filtration des liquides. Lorsque les cavités sont peu abondantes, mais relativement spacieuses et reliées par de larges canaux, la matière pourra être peu poreuse et très perméable. Inversément, si des vides extrêmement petits, mis en communication par de minces fissures, se rencontrent en

(1) Cette étude était terminée vers le milieu de l'année 1894, et n'a été communiquée qu'à un petit nombre d'ingénieurs s'intéressant spécialement à la question des matériaux hydrauliques. Sa publication a toujours été retardée parce qu'elle est loin d'être complète : plusieurs points restaient à élucider, la conclusion notamment manquait de netteté.

Aujourd'hui que M. Michaëlis m'a confié la traduction de l'important travail qu'on

quantités innombrables, la matière pourra être très poreuse, tandis que sa perméabilité pourra être très faible.

Dans ce dernier cas, la diminution de la perméabilité mesurée par l'écoulement du liquide est due à la résistance qu'oppose le frottement de ce liquide contre les parois multipliées à l'infini.

Si l'on applique ces données aux matériaux hydrauliques, on voit qu'avec une même quantité de ciment et des volumes égaux de sables de différents calibres (volumes pleins), on peut former des mortiers également poreux, c'est-à-dire renfermant le même volume de matière solide. Le mortier formé de gros sable, immergé dans l'eau, absorbera autant de liquide que le mortier de sable fin, puisqu'ils renferment le même volume de vides, mais soumis à une pression d'eau extérieure, le premier se laissera traverser en l'unité de temps par une proportion d'eau bien supérieure à celle que laissera passer le second.

## CHAPITRE PREMIER.

### MORTIERS DE CIMENT.

*Action chimique de l'eau douce sur les ciments.* — Quelle que soit la théorie qu'on admette sur la composition chimique des ciments Portland, un fait doit être soustrait à la discussion, c'est que dans les ciments toute la chaux est soluble dans l'eau pure, ainsi qu'on peut le montrer par l'expérience suivante :

Une faible quantité d'un excellent ciment Portland artificiel est broyée jusqu'à ce que tout passe par un tamis de 12,000 mailles par

va lire, je me décide à publier le résultat de mes recherches, persuadé que la lecture de ces quelques pages formera une préparation utile à l'étude de l'ouvrage allemand, pour les techniciens peu habitués à envisager le rôle chimique des eaux salines dans les constructions maritimes. On y trouvera en effet, des notions élémentaires et un exposé de l'état de la question, dont la connaissance est presque indispensable pour suivre le raisonnement par lequel le docteur Michaëlis arrive à préconiser un remède contre la mauvaise tenue de la plupart de nos mortiers à l'eau de mer. Le rôle de l'eau de mer est assez exactement indiqué dans ces quelques pages préliminaires, mais dans le travail du savant allemand, l'observation des phénomènes est serrée de plus près, les réactions sont décrites avec plus de précision, les causes d'altération sont plus clairement mises à nu, et la conclusion est plus nettement énoncée sous forme de remède à appliquer.

centimètre carré; par cette mouture on augmente les surfaces de contact avec le dissolvant. Le ciment est récalciné afin d'éliminer l'acide carbonique et l'eau d'hydratation qu'il pourrait avoir absorbé — un demi-gramme de ce ciment est versé dans un flacon renfermant une grande quantité d'eau distillée froide; on bouche rapidement afin de mettre la dissolution à l'abri de l'acide carbonique qui précipiterait la chaux dissoute.

On filtre, et dans le filtrat on précipite la chaux par l'ammoniaque et l'oxalate d'ammoniaque.

La partie non dissoute par l'eau et restée sur le filtre, est reçue dans un petit mortier au moyen de la pissette, broyée, puis versée dans 300 à 400 c. c. d'eau pure. On agite fréquemment, et, après quelques heures on filtre de nouveau. On constate que l'ammoniaque et l'oxalate d'ammoniaque précipitent une nouvelle quantité de chaux qui est jointe à la première. On répète ces opérations jusqu'à ce que l'ammoniaque et l'oxalate d'ammoniaque ne précipitent plus rien dans le filtrat. On rassemble alors les précipités d'oxalate de chaux et on y détermine la chaux à la manière ordinaire (1).

Le ciment sur lequel nous avons opéré présentait la composition suivante :

Perte à 400° . . . . .	0.18 p. c.
Matières insolubles. . . . .	1.06 —
Silice soluble (dans la potasse) . . . . .	21.59 —
Alumine . . . . .	6.27 —
Oxyde de fer. . . . .	2.25 —
Chaux . . . . .	64.24 —
Magnésie . . . . .	0.55 —
Acide sulfurique combiné. . . . .	0.64 —
Acide carbonique combiné . . . . .	0.55 —
Perte au feu . . . . .	1.09 —
Divers. . . . .	1.80 —
	100.00 p. c.

Une briquette de ce ciment durcie depuis 6 semaines, éprouvait une perte au feu de 19,80 p. c., dans laquelle l'acide carbonique entrait pour 3,50 p. c.

(1) On peut aussi dans les filtrats partiellement évaporés, doser la chaux par alcalimétrie.

Voici les résultats obtenus en traitant un demi-gramme de ce ciment par l'eau dans les conditions que nous venons d'exposer.

	CIMENT conforme à l'analyse.	CIMENT de la briquette après récalcination.	CIMENT de la briquette rebroyée.
Quantités de chaux dissoutes :	Grammes.	Grammes.	Grammes.
Après le 1 <sup>er</sup> traitement par l'eau . . .	0.1747	0.1655	0.1225
Après les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> traitements . . . . .	0.0650	0.0680	0.0480
Après les 4 <sup>e</sup> et 5 <sup>e</sup> traitements . . . . .	0.0550	0.0455	0.0257
Après les 6 <sup>e</sup> , 7 <sup>e</sup> et 8 <sup>e</sup> traitements. . . . .	0.0290	0.0515	0.0285
Après les 9 <sup>e</sup> , 10 <sup>e</sup> et 11 <sup>e</sup> traitements. . .	0.0165	0.0150	0.0295
Quantité totale dissoute . . . . .	0.3182	0.5195	0.2567
Quantité dissoute par gramme. . . . .	0.6564	0.6590	0.5134

Le ciment de la briquette qui avait déjà fait prise, avait absorbé 9.80 p. c. d'eau et d'acide carbonique. Un gramme de ce ciment provenait donc de 1<sup>er</sup>.000 — 0<sup>gr</sup>.098 = 0<sup>gr</sup>.9020 de ciment frais.

Comme un gramme de ciment frais renferme 64.24 p. c. de chaux, 0<sup>gr</sup>.9020 en renfermeront 0<sup>gr</sup>.6420 × 0<sup>gr</sup>.9020 = 0<sup>gr</sup>.5794.

Un gramme du ciment renferme 0<sup>gr</sup>.053 d'acide carbonique combiné à 0.044 de chaux qui est insoluble dans l'eau. Il ne restait donc que 0<sup>gr</sup>.5794 — 0<sup>gr</sup>.0440 = 0<sup>gr</sup>.5354 de chaux exposé aux recherches de solubilité.

On voit par ces résultats qu'on a sensiblement dissous toute la chaux non seulement du ciment en poudre, mais aussi du ciment gâché qui avait fait prise depuis plusieurs semaines.

La quantité de chaux dissoute qui est très abondante à la suite de la première addition d'eau, devient de plus en plus faible dans les opérations subséquentes, jusqu'à épuisement total de la matière.

\* \*

Dans les mortiers, la dissolution de la chaux est d'autant plus rapide que les surfaces de contact avec le liquide sont plus grandes et plus fréquemment renouvelées.

*Action de l'eau douce sur les mortiers continuellement immergés.* — Lorsque les mortiers hydrauliques restent immergés dans l'eau douce en repos, on ne constate aucune diminution dans leur résistance. L'équilibre de pression s'établit rapidement entre l'eau extérieure et celle qui est contenue dans les pores du mortier; celle-ci est rapidement saturée de chaux. Par osmose, des échanges tendent à s'opérer entre l'eau alcaline et l'eau douce qui baigne le mortier; cette dernière renferme toujours du bicarbonate de chaux et la surface du mortier devient le siège d'une réaction qui a pour effet de précipiter du carbonate de chaux insoluble (1).  $CaO (CO_2)^2 + CaO H_2O = 2 (CaO CO_2) + H_2O$ .

Au bout de quelque temps les pores du mortier paraissent bouchés par le carbonate de chaux qui a pris naissance, et l'échange des deux liquides est interrompu.

\* \*

*Action de l'eau douce sur les mortiers tantôt immergés et tantôt mis à découvert.* — Lorsque les maçonneries sont alternativement immergées et découvertes, comme, par exemple, dans les écluses des canaux, les mortiers sont traversés par des courants d'eau successivement dirigés en sens contraire. Lorsque le niveau des eaux est élevé, la pression des couches supérieures fait infiltrer l'eau dans les pores du mortier en comprimant l'air emprisonné dans les cavités. Lorsque le niveau de l'eau baisse, c'est-à-dire lorsque la pression extérieure diminue, l'eau est expulsée du mortier et en sort presque en totalité au moment où la partie considérée est mise à nu.

Pour étudier l'influence du passage de l'eau à travers les mortiers, les ingénieurs du laboratoire des Ponts et Chaussées de France ont institué des expériences d'un très haut intérêt (2). En général, dans ces essais, on confectionne des cubes de mortier analogues à ceux qui servent pour les essais de résistance à l'écrasement. Au lieu de les comprimer par 150 coups d'un pilon de 5 kil. tombant d'une hauteur de 0.50 m., nous les soumettons seulement à 25 coups du même pilon, tombant de la même hauteur. La compacité du mortier se rapproche

(1) Cette réaction est mise à profit, dans l'épuration des eaux industrielles au moyen d'eau de chaux.

Le composé appelé bicarbonate de chaux, n'est probablement que du carbonate de chaux neutre maintenu en dissolution à la faveur de l'acide carbonique libre dans les eaux douces.

(2) Voir les remarquables études de M. Féret, sur la compacité des mortiers. Paris, Vve Ch. Dunod, éditeur, 1892.

ainsi davantage de celle qu'il présenterait lors de la mise en œuvre dans une maçonnerie. Après huit jours de durcissement dans une atmosphère humide, ces cubes sont surmontés de tubes en verre de même hauteur et scellés sur leur face supérieure au moyen d'une pâte de ciment pur. Les tubes sont remplis d'eau.

Dans la généralité des cas, l'eau ne tarde pas à se frayer un passage par les pores du mortier ; le courant qui traverse les cubes est continu, alors que dans la pratique il est alternativement dirigé en sens contraire ; mais il semble que les effets mécaniques et chimiques qu'il exerce sur les agglomérants doivent représenter assez fidèlement ceux qu'il y a lieu d'attendre dans les constructions.

Les résultats que l'on obtient dans ces épreuves dépendent évidemment de la pression que le liquide exerce sur le mortier, de la constance ou de la variabilité de cette pression.

En gâchant des mortiers avec le même sable, mais avec des quantités différentes d'un même ciment, on voit que les mortiers les plus sableux sont en même temps les plus perméables.

En opérant dans les mêmes conditions sur des mortiers de ciment de même richesse (1 poids de ciment 4 poids de sable) mais dont le premier, A, est formé de gros sable (du Rhin) et le second, B, de sable fin (de la Campine ou des dunes), on constate que la perméabilité augmente avec la grosseur du sable ; au début, l'écoulement d'eau à travers les mortiers A est beaucoup plus abondant que pour les mortiers B.

Dans les deux cas, la perméabilité diminue rapidement au début et lentement après cinq ou six jours.

Ce ralentissement dans le débit du liquide provient évidemment de ce que les pores du mortier sont graduellement fermés par la formation de carbonate de chaux suivant la réaction citée précédemment. Les parties extérieures des cubes se colmatent le plus rapidement ; sur ces faces, l'eau, chargée du maximum de carbonate de chaux qu'elle peut tenir en solution, vient perler et suinter en filets infiniment divisés, que l'air évapore abondamment. Le liquide condensé laisse précipiter le carbonate dont il est surchargé, et qui finit par former, sur toute la paroi, un dépôt insoluble assez compact de la même nature que les stalactites.

Pour déterminer l'influence de la filtration d'eau douce sur la résistance et la conservation des mortiers, nous avons procédé de la manière suivante :

Des cubes de 50 c/m<sup>2</sup> de face, de différents mortiers sont confectionnés de la manière déjà décrite. Ils séjournent pendant huit jours

dans une atmosphère saturée d'humidité, puis une moitié de chaque série est immergée dans l'eau douce ; les cubes de l'autre moitié reçoivent chacun sur la face qui a subi directement le choc du pilon un tube de 20 m/m de diamètre et de 20 c/m de hauteur qui est rempli d'eau douce. Dans le cas de certains mortiers maigres, composés, par exemple, de 1 poids de ciment et 4 poids de sable normal, tout le contenu du tube de 62 centimètres cubes traverse le mortier en moins d'une minute ; à mesure qu'il se vide, on le remplit, bientôt le débit diminue ; au bout d'un jour on se contente de remplir les tubes trois fois par jour. Après dix jours d'immersion pour la première moitié des tubes et dix jours de filtration pour la deuxième moitié, les mortiers sont soumis à des essais de résistance à l'écrasement en faisant agir l'effort perpendiculairement à la direction des coups de pilon que l'éprouvette avait reçus lors de sa confection.

Voici les résultats obtenus :

Mortier. { 1 ciment. 4 sable normal.		Mortier. { 1 ciment. 3 sable normal.		Mortier. { 1 ciment. 5 sable des dunes.	
Briques immergées.	Briques soumises à la filtration.	Briques immergées.	Briques soumises à la filtration.	Briques immergées.	Briques soumises à la filtration.
75 kil. par c/c.	59 kil. par c/c.	81 kil. par c/c	45 kil. par c/c.	69 kil. par c/c	50 kil par c/c
70 »	42 »	85 »	54 »	65 »	51 »
70 »	45 »	82 »	50 »	66 »	52 »
72 »	58 »	82 »	47 »	66 »	50 »
Moyenne : 71 7 k.	Moyenne : 40 5 k.	Moyenne : 82.5 k.	Moyenne : 49 k.	Moyenne : 66 k.	50.7 kil. par c/c.
Diminution : 45.50 %.		Diminution : 40 %.		Diminution : 25.50 %.	

On voit par ces chiffres que la circulation de l'eau à travers les mortiers, qui se traduit par un délavage de la chaux, détermine une forte diminution de résistance. Comme nous l'avons déjà fait observer, le mortier avec trois parties de sable des dunes est moins perméable que celui qui renferme trois parties de sable normal ; celui-ci à son tour, est moins perméable que le mortier à quatre parties de sable normal.

Le tableau montre nettement que les résistances fléchissent à mesure que la perméabilité augmente.

Dans aucun cas pourtant, les mortiers ne se désagrègent. Lorsque, par suite du colmatage des pores de la surface, l'écoulement de l'eau est interrompu, les résistances cessent de décroître, parfois même elles reprennent légèrement. Ceci provient de la légère quantité d'eau saturée de chaux qui reste dans les cavités après la fermeture des pores extérieurs, et qui réagit sur le squelette siliceux et alumineux fonctionnant comme une pouzzolane.

\* \* \*

*Action chimique de l'eau de mer sur les ciments.* — Voici des résultats d'analyse qui donneront une idée suffisamment exacte de la composition des eaux de mer :

	GRAND OcéAN.	OcéAN ATLANTIQUE	MER DU NORD.
	Grammes par litre.	Grammes par litre.	Grammes par litre.
Chlorure de sodium. . .	24.877	27.558	25.513
Bromure de sodium. . .	0.410	0.526	0.373
Sulfate de potassium . . .	1.589	1.715	1.529
Sulfate de calcium . . .	1.662	2.046	1.622
Sulfate de magnésium . . .	1.104	0.614	0.706
Chlorure de magnésium . .	4.545	5.260	4.641

On sait que ces compositions sont très variables suivant l'état des marées, suivant la distance des côtes, etc. L'eau de mer en venant en contact avec les ciments, dissout la chaux, ainsi que nous l'avons montré pour l'eau douce; la solution de chaux réagit sur le chlorure de magnésie pour précipiter de la magnésie et former du chlorure de calcium soluble; elle agit aussi sur le sulfate de magnésie, avec lequel elle forme de la magnésie insoluble et du sulfate de chaux soluble; avec le sulfate de potassium, elle forme également du sulfate de chaux et de la potasse solubles.

Voici comment il convient d'envisager le phénomène qui s'accomplit dans chacune des cavités du mortier : l'eau de mer dissout la chaux du ciment, et l'eau de chaux produite est transformée en sulfate au fur et à mesure de sa formation, de façon que le liquide tend à se charger continuellement de sulfate de chaux soluble. Si l'on songe qu'outre plusieurs sels, l'eau de mer renferme déjà une notable quantité de sulfate de chaux, on conçoit qu'elle sera rapidement saturée de celui qui se forme par les réactions décrites. A ce moment de *saturation*, il y a encore production continue d'eau de chaux formant, avec le sulfate de

potasse ou de magnésie, de nouvelles quantités de sulfate de chaux; le liquide en est alors *sursaturé*, et au bout de quelques instants il laisse précipiter des cristaux de sulfate de chaux augmentant de volume, à la façon du plâtre.

On peut se faire une idée de ces cristallisations par sursaturation dans une expérience de laboratoire qui consiste à agiter du plâtre (sulfate de chaux) avec de l'eau de chaux. Au bout de quelques minutes, on obtient l'état de *saturation* qui doit exister dans les cavités des mortiers. On filtre la solution saturée, et dans le liquide clair on projette de fins cristaux de sulfate de potassium; ils se dissolvent en formant du sulfate de calcium dissous, dont le liquide est alors *sursaturé*. Quelques minutes après, d'abondants cristaux se déposent au fond du récipient.

\* \* \*

*Action de l'eau de mer sur les mortiers continuellement immergés.* — *Influence du sable.* — C'est sur les mortiers pauvres, se laissant pénétrer par une quantité abondante d'eau de mer, que les réactions des sels sur le ciment pourront s'exercer sur une assez grande échelle. Au point de vue théorique, ils se prêteront mieux que les autres à l'étude que nous avons en vue.

Si l'on immerge dans l'eau de mer en repos, renouvelée chaque semaine, des cubes de mortier formés d'un même ciment et d'une même quantité de sable (1 kilogr. ciment, 4 litres sable ou 250 kilogr. de ciment par mètre cube de sable), mais en faisant varier pour chaque série de cubes la grosseur du sable, de telle manière que les plus gros grains soient représentés par le sable normal, les plus fins grains par le sable des dunes, et les grains intermédiaires par des mélanges de ces deux sables, on remarque après cinq mois d'immersion que presque tous les mortiers au sable normal sont lézardés de crevasses plus ou moins profondes, les mortiers au sable fin sont tous intacts, quelques mortiers formés d'un mélange de deux sables présentent un caractère douteux représenté par l'apparition de stries blanches qu'on peut à peine envisager comme des lésions. Ces altérations sont surtout remarquables lorsque le mortier est fabriqué avec du ciment de médiocre qualité. Avec du ciment Portland de très bonne qualité, les mortiers pauvres composés de gros sable résistent plus longtemps à l'action de l'eau de mer, sans toutefois rester à l'abri des décompositions. Les mortiers renfermant 400 kilogr. et plus de ciment par mètre cube de sable, restent inaltérés.

M. Féret, chef du laboratoire des ponts et chaussées de Boulogne-

sur-Mer, auquel j'emprunte ces procédés d'expériences et qui a effectué ces épreuves sur une plus vaste échelle, a constaté que les mortiers de sable fin ne présentaient aucune trace de décomposition après une durée d'immersion de trois ans.

Lorsque les mortiers sont immergés dans l'eau de mer en repos, cette dernière pénètre dans leurs pores ouverts, et bientôt toute la texture de la masse, divisée à l'infini par des parties creuses, devient le siège des réactions déjà décrites, qui ont pour effet de ronger le squelette solide agglomérant et de déposer dans les cavités des produits de décomposition doués de la propriété de cristalliser avec augmentation de volume, à la façon du plâtre.

Si l'eau ne se renouvelait pas à l'intérieur des cubes, la réaction s'arrêterait avec la décomposition des sels de potasse et de magnésie contenus dans l'eau de mer; mais par osmose, des échanges s'effectuent entre la partie interne du mortier et l'eau d'immersion. Si longtemps que le phénomène de diffusion se poursuit sans entraves, la réaction continue et les produits de décomposition actifs s'accumulent jusqu'à engorger les cavités, se dilatent jusqu'à presser et disloquer les parois aux dépens desquelles ils se sont formés.

Notons toutefois que les mêmes réactions s'opèrent à la surface du mortier en contact avec l'eau d'immersion. Sur toute la paroi exposée à l'eau de mer se dépose la magnésie avec tendance à colmater les embouchures des canaux qui permettent l'entrée de l'eau d'endosmose.

Si, à dosage égal, le mortier est très perméable par suite de la grosseur du sable, en d'autres termes, si le mortier est traversé par des vaisseaux d'assez grande capacité, le courant d'eau diffusé sera relativement puissant et parviendra à vaincre longtemps les obstructions des embouchures d'ailleurs trop spacieuses pour se colmater aisément; la réaction pourra se poursuivre jusqu'à ce que les cristaux accumulés fassent éclater les parois des cavités où ils sont logés.

Si, au contraire, le mortier de même dosage que le précédent est formé de sable très fin, sa structure sera très serrée, le mouvement de diffusion s'accomplira avec lenteur à cause des pertes de pression le long des parois du fin réseau capillaire; l'eau de mer qui aura déterminé les premières réactions à l'intérieur du mortier aura été à peine remplacée par une faible quantité d'eau nouvelle, que déjà les ouvertures d'entrée très étroites auront été colmatées. La réaction aura été arrêtée avant que les produits de décomposition fussent assez abondants pour ébranler la structure du mortier.

\* \* \*

*Action de l'eau de mer sur les mortiers tantôt immergés et tantôt mis*

*à découvert.* — *Influence du sable.* — Si maintenant nous recherchons l'action de l'eau de mer sur les mortiers alternativement immergés et découverts, comme ceux des maçonneries exposées au flux et au retrait des marées, à l'oscillation continue des lames, au déferlement de la crête des vagues, nous ferons comme dans le cas des mortiers exposés à l'eau douce, traverser les cubes d'essai par un courant d'eau de mer, en envisageant encore l'action de ce courant comme comparable, dans ses effets, à l'action des courants dont le sens est alternativement renversé.

Reprenons la même série de mortiers que celle qui a servi pour rechercher l'influence de l'eau de mer en repos sur les maçonneries : dosage 1 kilogr. ciment, 4 litres sable, en opérant avec du sable normal, du sable fin de Campine et des mélanges des deux sables.

Sous une même pression d'eau, la perméabilité des mortiers à gros sable est beaucoup plus considérable que dans le cas du sable fin.

Après avoir subi pendant cinq mois l'infiltration sous la pression d'une colonne d'eau de 1<sup>m</sup>.50 de hauteur, tous les mortiers au sable de Campine pur étaient fissurés de crevasses plus ou moins profondes, tous les mortiers au sable normal étaient intacts, un des mortiers où la proportion de sable fin relativement au sable normal était considérable, portait la trace de veines légèrement ouvertes.

Les expériences effectuées au moyen d'eau de mer sur des mortiers de ciment pauvres à sable différemment calibrés, donnent ainsi des résultats diamétralement opposés, suivant que les mortiers restent plongés dans une eau tranquille ou qu'ils sont traversés par des courants d'eau sous pression; dans le premier cas, les mortiers à gros sable très perméables se détraquent, tandis que les mortiers à sable fin peu perméables restent inaltérés; dans le second cas, les résultats se manifestent en sens inverse.

L'immunité dont paraissent jouir les cubes très perméables, à cavités spacieuses, lorsqu'ils sont traversés par des courants d'eau relativement rapides, trouve son explication dans la marche des réactions chimiques qui s'accomplissent. On conçoit, en effet, que l'eau qui passe par les mortiers très perméables, peut à peine, à raison de son contact peu prolongé, se saturer d'eau de chaux et se sursaturer de sulfate de chaux soluble. Lors même que la sursaturation s'effectue, le courant est assez rapide pour entraîner les produits de décomposition solubles avant qu'ils n'aient eu le temps de cristalliser.

Dans les mortiers au sable fin, les pores sont extrêmement nombreux, l'agglomérant solide attaqué est divisé à l'infini, l'eau reste longtemps en contact avec lui; la formation de sulfate de chaux sera

done très abondante, et la cristallisation aura le temps de s'accomplir dans ce milieu où les liquides se renouvellent avec lenteur. Quoique l'écoulement soit lent, il suffit que le débit soit continu pour qu'on puisse concevoir un état où les produits de décomposition aient acquis un volume supérieur à celui des pores du mortier et les fassent éclater. La continuité du débit est le caractère qui différencie les dernières expériences de celles où un mortier de sable fin était continuellement dans l'eau tranquille. Dans le cas des mortiers dont l'eau de mer sous pression s'écoule à l'air libre, les embouchures ne sont guère colmatées par des dépôts insolubles et la réaction n'est entravée que par des obstructions prenant naissance dans l'intérieur de la masse.

\* \* \*

*Influence de la richesse des mortiers.* — Lorsqu'au lieu d'opérer sur des mortiers de même composition, on adopte des dosages avec des sables de même nature, mais en proportion différente, on constate que la perméabilité décroît avec la richesse des mortiers.

Des mortiers de ciment et de sable normal confectionnés dans les rapports de 200 gr., 250 gr., 300 gr., 350 gr., 400 gr., 450 gr., 500 gr. et 550 gr. de ciment par litre de sable étant soumis à des expériences de filtration d'eau de mer dans les conditions déjà exposées, se comportent relativement bien; quelques cubes d'un dosage de 350 gr. et 400 gr. de ciment par litre de sable présentent des veines non ouvertes.

Des mortiers de ciment et de sable de Campine ont été dosés et essayés dans les mêmes conditions; le mortier très pauvre à 200 gr. de ciment par litre de sable est resté intact, les mortiers relativement riches renfermant plus de 400 grammes de ciment par litre de sable ont présenté des veines plus ou moins accentuées; les mortiers de dosage intermédiaire renferment de 250 à 400 grammes de ciment par litre de sable se sont presque tous crevassés.

Ces résultats doivent s'interpréter de la manière suivante :

Les mortiers au sable normal riches sont traversés par une quantité d'eau trop faible pour produire des dépôts dont l'abondance puisse causer des désagréments dans la masse. Ces mortiers sont probablement colmatés avant que le volume des dépôts devienne dangereux.

Les mortiers au sable normal très pauvres sont le siège de réactions peu intenses par suite de la faible quantité de chaux qu'ils renferment, en outre ils laissent écouler les produits de décomposition avec l'eau de filtration.

Les mortiers de richesse intermédiaire laissent passer assez d'eau

de mer et renferment assez de chaux pour donner lieu à des cristallisations d'un volume excessif, mais une certaine partie de produits de décomposition peut s'évacuer par les pores suffisamment spacieux, les résultats sont douteux.

Les mortiers au sable fin d'un dosage relativement riche laissent passer peu d'eau, les sulfates nuisibles se forment donc en faible quantité, mais ils ne sont pas éliminés. Les désagréments ne sont pas absolument évités, mais l'apparition des fissures peut être fort retardé.

Les mortiers de sable fin de dosage pauvre produisent peu de dépôts par suite de la faible quantité de chaux; ils sont suffisamment poreux pour laisser échapper avec l'eau les sulfates formés.

Enfin les mortiers de sable fin de dosage moyen renferment une proportion de ciment suffisante pour qu'une notable quantité de chaux puisse se dissoudre, leur perméabilité relative assure un débit d'eau de mer assez considérable pour produire des cristallisations volumineuses. Par suite de la finesse du grain, l'évacuation des précipités est entravée, ils doivent s'accumuler et les crevasses deviennent inévitables.

\* \* \*

Si on embrasse d'un coup-d'œil d'ensemble ces diverses expériences théoriques pour en tirer une déduction au profit de la pratique des constructions baignées par l'eau de mer, on est d'abord frappé de la différence des résultats qu'on obtient suivant la richesse du mortier et la nature du sable, suivant que l'on se trouve en présence des courants d'eau continus ou de l'eau tranquille; en d'autres termes les résultats varient considérablement suivant les conditions de l'expérience.

On est ensuite amené à se demander quelle valeur on peut attribuer à ces recherches :

1° Pris séparément, on peut considérer les résultats comme exacts; ils sont d'ailleurs confirmés par des travaux antérieurs exécutés au laboratoire des Ponts et chaussées de France;

2° Il est certain que les conditions des expériences auraient pu être variées davantage; mais ces changements dans les modes d'essais n'auraient fait qu'accentuer le caractère de divergence auquel aboutissent les conclusions;

3° L'action de la mer avec ses mouvements alternatifs de marée haute et de marée basse, la montée et le recul des vagues n'est pas exactement représentée par l'expérience qui consiste à faire circuler dans les mortiers un courant d'eau de mer continu et toujours dirigé dans le même sens.

En effet, à la marée montante, lorsque le mortier vient d'être immergé dans l'eau de mer, celle-ci pénètre dans ses pores et y séjourne jusqu'à ce que la marée descendante remette à nu la partie de maçonnerie considérée. Les échanges de liquide qui pendant ce temps s'opèrent entre l'eau enfermée dans le mortier et l'extérieur sont comparables à ceux qui s'opèrent en eau tranquille, c'est-à-dire qu'ils sont lents, que les réactions ont le temps de s'accomplir, que les cristaux peuvent se rassembler et se tasser dans les pores du mortier.

Ces mortiers se trouvent donc pendant un certain laps de temps dans une situation comparable à celle des mortiers immergés en eau tranquille, et pendant une autre période ils sont traversés par des courants d'eau.

On n'oserait donc conseiller de construire au bord de la mer avec des mortiers pauvres formés de sable à gros grain, malgré que cette déduction découlât nettement de l'expérience théorique effectuée avec des courants d'eau continus.

D'autres considérations imposent encore la circonspection dans les conclusions à tirer; outre que ces mortiers pauvres à gros grain présentent aux efforts de compression une résistance relativement faible et qui décroît sans cesse par les délavages, ils doivent leur avantage non seulement à la faible quantité de chaux qu'ils renferment, mais surtout à cette grande perméabilité qui leur permet de rejeter les agrégats nuisibles lors de la décroissance des pressions extérieures; mais à la longue leurs canaux s'obstruent et ils peuvent rentrer dans la catégorie des mortiers de perméabilité moyenne qui ne présentent pas une immunité absolue contre l'action des courants.

*Ces motifs nous poussent à déconseiller, en général, les mortiers pauvres, même lorsqu'on se trouve dans le cas avantageux d'avoir à sa disposition du sable à gros grain.*

Les mortiers de dosage moyen doivent toujours être déconseillés ainsi qu'il ressort nettement des résultats d'expériences.

Il ne reste qu'à recourir aux mortiers très riches; mais pour déterminer leur composition, il faut étudier chaque cas particulier.

La donnée fondamentale du problème consiste dans la connaissance des pressions d'eau que le mortier est appelé à supporter.

On essaiera différents cubes de mortiers surmontés d'une colonne d'eau au moins égale à celle qui pressera le mortier en pratique, et on examinera les résultats que donnent les essais de filtration d'eau de mer. Ce sont les seuls importants car les mortiers riches résistent tous à l'action des eaux tranquilles.

Dans le choix des mortiers on ne perdra pas de vue que les ciments

de première qualité résistent beaucoup mieux à l'action de l'eau de mer que les ciments de qualité médiocre, que généralement le sable à gros grain donnera les meilleurs résultats, en outre qu'un des écueils des mortiers riches c'est leur forte teneur en chaux (1). On conçoit que l'eau de mer qui les imprègne en soit abondamment chargée; en d'autres termes les mortiers riches laissent pénétrer peu d'eau, mais celle qui est introduite dans leurs pores constitue un réactif concentré et redoutable.

Cette dernière considération explique en partie les succès que les ingénieurs hollandais ont obtenus dans leurs travaux maritimes par l'emploi des mortiers de trass.

On obtient, en effet, des résistances amplement suffisantes avec des mortiers se rapprochant de la composition suivante :

2 parties en poids trass . . . .	}	ciment	}	5
1 — — chaux grasse . . . .		de trass		
3 — — sable . . . .		sable		5

Le bas prix du trass et de la chaux comparativement au ciment rend ce mortier très abordable. La haute dose du ciment de trass, rendu très liant par la chaux grasse, communique au mortier un haut degré d'imperméabilité.

En outre, le ciment de trass qui remplit les vides du sable est formé sensiblement de 25 à 50 parties de chaux et 70 à 75 parties de silice et alumine et autres matières inattaquables qui tendent à envelopper la chaux d'une gangue protectrice contre l'action de l'eau.

Dans le ciment Portland renfermant sensiblement 64 p. c. de chaux et 52 p. c. de silice et alumine, la chaux est non seulement plus abondante, mais surtout moins bien protégée contre l'action dissolvante de l'eau.

L'influence bienfaisante que j'attribue aux faibles teneurs en chaux trouve sa confirmation dans la bonne tenue des ciments de laitier à l'eau de mer. Ces ciments se composent approximativement de 78 à 80 parties de laitier pour 20 à 22 parties en poids d'hydrate de chaux correspondant à 16.47 et 18.10 p. de chaux anhydre CaO.

J'ai eu l'occasion d'effectuer sur les mortiers de ciment de laitier

(1) On sait que les chaux hydrauliques renferment de 65 à 75 p. c. de chaux, les ciments Portland environ 64 p. c. de chaux, dont la totalité est soluble.

avec sable normal des essais de résistance à la traction qui ont donné les résultats suivants après vingt-huit jours :

Mortier 1 : 3		Mortier 1 : 3.5	
à l'eau douce.	à l'eau de mer.	à l'eau douce.	à l'eau de mer.
16 k. par cm <sup>2</sup>	28 k. par cm <sup>2</sup>	14 k. par cm <sup>2</sup>	20 k. par cm <sup>2</sup>
17 —	27.5 —	15 —	20 —
18 —	50 —	12.5 —	18 —

Il serait intéressant de faire ces expériences sur une plus grande échelle.

Jusqu'ici je n'ai pu travailler que sur les mortiers de trass à la demande de quelques collègues désireux de voir vérifier l'opinion des praticiens sur la bonne conservation de ces mortiers tant à l'eau de mer qu'à l'eau douce. Cette étude fait l'objet du chapitre II.

## CHAPITRE II.

### MORTIER DE TRASS.

*Trass.* — Voici la composition de deux trass de bonne qualité :

Perte à 100° . . . . .	5.50 p. c.	5.80 p. c.
Matières insolubles . . . . .	26.00 —	24.20 —
Silice soluble (dans la potasse) . . . . .	40.58 —	40.50 —
Alumine . . . . .	12.25 —	12.21 —
Oxyde de fer . . . . .	5.25 —	5.06 —
Chaux . . . . .	0.55 —	0.50 —
Perte au feu . . . . .	7.20 —	7.10 —
Magnésie, alcalis et divers . . . . .	6.89 —	6.45 —
	<hr/> 100.00 p. c.	<hr/> 100.00 p. c.

Si l'on traite le trass par une forte quantité d'eau pure, on constate qu'il reste inaltéré. Le trass recueilli après décantation ou filtration n'a perdu aucune de ses propriétés hydrauliques.

*Ciment de trass.* — J'appelle *ciment de trass* le mélange intime de chaux grasse et de trass, exempt de sable.

Si l'on prend un mélange de :

- 1 volume de trass en poudre,
- 1 volume de chaux grasse éteinte,

qu'on le gâche à consistance normale, la pâte ne tarde pas à faire prise.

Après deux mois de durcissement à l'air libre, elle présentait la composition suivante :

Perte à 110° . . . . .	3.21 p. c.
Silice . . . . .	42.50 —
Alumine . . . . .	8.09 —
Oxyde de fer . . . . .	2.16 —
Chaux . . . . .	21.52 —
Magnésie . . . . .	0.50 —
Acide carbonique . . . . .	4.50 —
Perte au feu . . . . .	12.37 —
Alcalis et divers . . . . .	5.55 —
	<hr/> 100.00 p. c.

\* \* \*

*Action de l'eau douce sur le ciment de trass.* — Pour déterminer la solubilité de la chaux dans cette briquette de ciment de trass durcie, nous opérons exactement comme pour le ciment Portland.

Sur un gramme de matière nous trouvons :

#### Quantités de chaux dissoutes :

Après le 1 <sup>er</sup> traitement par l'eau . . . . .	0gr.0817
— 2 <sup>me</sup> — — . . . . .	0gr.0204
— 3 <sup>me</sup> — — . . . . .	0gr.0178
— 4 <sup>me</sup> — — . . . . .	0gr.0176
— 5 <sup>me</sup> — — . . . . .	0gr.0163
— 6 <sup>me</sup> — — . . . . .	0gr.0152
— 7 <sup>me</sup> — — . . . . .	0gr.0152
— 8 <sup>me</sup> — — . . . . .	0gr.0125
— 9 <sup>me</sup> — — . . . . .	traces
	<hr/> 0gr.1947

Nous voyons, comme pour le ciment Portland, que toute la chaux est soluble dans l'eau, mais les premiers filtrats sont beaucoup moins chargés de chaux que dans le cas des ciments.

\* \* \*

*Mortiers de trass. — Compacité.* — Les mortiers soumis aux expériences qui vont suivre présentaient la composition suivante :

	Mortier A.	Mortier B.	Mortier C.
Trass en poudre . . . .	1 vol.	1 vol.	1 vol.
Chaux grasse en poudre . . . .	1 »	1.5 »	2 »
Sable des dunes . . . .	1 »	2 »	3 »
Eau de gâchage . . . .	0.550 vol.	0.700 vol.	0.840 vol.

Ces mortiers sont confectionnés en cubes de 50 cm<sup>2</sup> de face de la manière déjà décrite, c'est-à-dire qu'ils sont comprimés par 25 coups d'un pilon de 3 kilogrammes tombant d'une hauteur de 50 c/m.

La quantité d'eau est jugée suffisante lorsqu'aux trois derniers coups, elle suinte entre la face inférieure du cube et la plaque qui la supporte.

Ces mortiers renferment un peu plus d'eau que ceux qui servent aux essais ordinaires de résistance. Là, l'eau est jugée suffisante lorsqu'elle suinte entre le 120<sup>me</sup> et le 150<sup>me</sup> coup. Ils se rapprochent donc davantage des conditions de la pratique.

Pour qu'un mortier puisse être appelé *compact*, il faut que les vides laissés entre les grains de sable soient remplis par les parties pleines des matériaux agglomérants.

Pour déterminer les volumes vides et les volumes pleins, on procède de la manière suivante :

Après avoir rempli un litre de sable sans le tasser, on constate, par exemple, que l'on peut encore verser 435 c/m<sup>3</sup> d'eau dans la jauge sans la faire déborder.

Un litre de ce sable renferme donc 435 c/m<sup>3</sup> de vides.

De la même manière on trouve que :

Un litre de trass renferme 520 c/m<sup>3</sup> de vides et 480 c/m<sup>3</sup> de volumes pleins.

Les parties pleines de la chaux forment avec l'eau de gâchage la pâte de chaux.

Pour le mortier A nous trouvons ainsi :

Vide d'un litre de sable . . . . .	435 cm <sup>3</sup>
à remplir par :	
Parties pleines d'un litre de trass. . . . .	480 cm <sup>3</sup>
— — chaux . . . . .	270 cm <sup>3</sup>
— de l'eau de gâchage . . . . .	550 —
— de la pâte de chaux . . . . .	820 cm <sup>3</sup> 820 —

Total des parties pleines . . . . . 1,300 cm<sup>3</sup>

Soit 1300 volumes pleins pour remplir 435 volumes de vide.

Pour le mortier C :

Vides de 3 litres de sable 435 × 3 = . . . . .	1,305 cm <sup>3</sup>
Parties pleines d'un litre de trass . . . . .	480 cm <sup>3</sup>
— de deux litres de chaux 270 × 2 = . . . . .	540 cm <sup>3</sup>
— de l'eau de gâchage . . . . .	840 —
— de la pâte de chaux 1,380 cm <sup>3</sup> 1,380 —	

Total des parties pleines. . . . . 1,860 cm<sup>3</sup>

Soit 1860 volumes pleins pour remplir 1305 volumes de vide.

On voit par ces exemples que pour obtenir des mortiers de trass très perméables, c'est-à-dire laissant un vide sensible entre le sable et les matériaux agglomérants, on devrait adopter des mélanges à très fortes proportions de sable absolument inusités dans la pratique et présentant une trop faible cohésion surtout au début.

Les mortiers très-perméables, sur lesquels l'eau de mer exerce une action intense et qui par conséquent forment un milieu très-favorable aux observations, n'ont pu être essayés avec le trass. Les constatations auraient été viciées par un manque de résistance — surtout au début — attribuable à la composition du mortier.

\* \* \*

*Action de l'eau de mer sur les mortiers de trass continuellement immergés.* — Après avoir séjourné pendant 8 jours dans une atmosphère saturée d'humidité, les cubes de la composition A, B, C sont plongés dans l'eau de mer. Que l'on confectionne les mortiers avec gros sable (sable normal) ou avec sable fin (sable des dunes), on remarque qu'après 8 mois d'immersion aucun cube n'est endommagé. Ils ne présentent aucun signe d'altération, ni veines ni fissures.

Le tableau suivant, extrait d'un rapport très-intéressant de MM. Koning et Bienfait, expérimentateurs à Amsterdam, adressé à l'Institut royal des Ingénieurs hollandais(1), montre également la bonne tenue des cubes de mortier de trass lorsqu'ils sont plongés dans l'eau de mer.

Les cubes durcis sous l'eau de mer ont séjourné pendant toute la durée de l'expérience dans la mer à Ymmiden :

COMPOSITION DU MORTIER.	EAU de gâchage.	EAU d'immersion.	RÉSISTANCES A L'ÉCRASEMENT	
			après 1 + 27 jours.	après 1 + 181 jours.
1 poids ciment Portland artificiel.	Eau douce.	Eau douce.	216 kil. par cm <sup>2</sup> .	281 kil. par c <sup>2</sup> .
	Eau douce.	Eau de mer.	174 "	254 "
3 " sable . . . . .	Eau de mer.	Eau de mer.	146 "	192 "
1 " ciment Portland artificiel.	Eau douce.	Eau douce.	187.2 "	300 "
0.5 " chaux . . . . .	Eau douce.	Eau de mer.	188.2 "	254 "
3 " sable . . . . .	Eau de mer.	Eau de mer.	178.2 "	216 "
1 " ciment Portland artificiel.	Eau douce.	Eau douce.	162.8 "	240.5 "
0.5 " chaux . . . . .	Eau douce.	Eau de mer.	155 "	208 "
4 " sable . . . . .	Eau de mer.	Eau de mer.	130.7 "	166 "
1 " trass . . . . .	Eau douce.	Eau douce.	62.5 "	133 2 "
0.6 " chaux . . . . .	Eau douce.	Eau de mer.	59.5 "	107.9 "
1.4 " sable . . . . .	Eau de mer.	Eau de mer.	50.7 "	119 "

On voit par ce tableau que les trois mortiers de ciment gâchés et immergés à l'eau de mer ont perdu après cent quatre-vingt-un jours environ 50 p. c. de la résistance que présentaient les mortiers gâchés et immergés à l'eau douce.

Pour les mortiers de trass la même chute de résistance se réduit à environ 10 p. c.

\* \* \*

*Action de l'eau de mer sur les mortiers de trass alternativement immergés et découverts.* — Des cubes formés de mortier de la composition A, B, C, sont abandonnés pendant huit jours à l'air humide, puis surmontés de tubes de 1<sup>m</sup>,50 de hauteur et scellés sur la face supérieure de la manière déjà décrite.

(1) Verhandelingen van het Koninklyk Instituut van Ingénieurs 1893-1894, (pages 110 à 114).

Après avoir rempli les tubes d'eau de mer, on constate immédiatement la faible perméabilité des mortiers. Ceux qui sont formés de sable à grain fin (sable des dunes) ne laissent infiltrer que 5 à 10 cm<sup>3</sup> d'eau pendant les vingt-quatre premières heures; les mortiers formés avec sable normal sont à peine plus perméables; le débit varie entre 10 et 18 cm<sup>3</sup> pendant les vingt-quatre premières heures. L'infiltration ralentit rapidement; au bout de quelques jours les faces des cubes restent sèches. Après huit mois d'infiltration tous les cubes sont restés parfaitement intacts.

Cette grande résistance à l'eau de mer que l'on constate dans les mortiers de trass doit être attribuée en grande partie à leur imperméabilité. Mesurée par la quantité de liquide écoulé, la perméabilité paraît très sensiblement la même pour les trois mortiers essayés, malgré que la quantité de sable relativement à la quantité d'agglomérant (trass et chaux) soit notablement plus grande pour le mortier C que pour le mortier A. Ceci provient de ce que les vides laissés entre le sable sont dans chaque cas surabondamment remplis par les parties pleines du trass et de la chaux.

Pour déterminer l'influence des infiltrations d'eau de mer avec plus de précision que par l'aspect des cubes essayés, j'ai institué l'expérience suivante :

Reprenons les mortiers essayés précédemment :

	Mortier A.	Mortier B.	Mortier C.
Trass en poudre . . . . .	1 vol.	1 vol.	1 vol.
Chaux grasse en poudre . . . . .	1 —	1.5 —	2 —
Sable des dunes . . . . .	1 —	2 —	3 —
Eau de gâchage . . . . .	0.550 vol.	0.700 vol.	0.840 vol.

De chaque mortier j'ai confectionné 18 cubes de 50 cm<sup>2</sup> de face, comprimés par 25 coups d'un pilon de 5 kil. tombant d'une hauteur de 50 cm. Ils ont tous séjourné pendant huit jours dans une atmosphère saturée d'humidité.

La 1<sup>re</sup> série de 6 cubes est restée immergée dans l'eau douce.

La 2<sup>me</sup> série de 6 cubes a été soumise aux essais d'infiltration d'eau douce sous une colonne d'eau de 1<sup>m</sup>,50 de hauteur.

La 3<sup>me</sup> série a été soumise aux essais d'infiltration d'eau de mer sous la même colonne d'eau de 1<sup>m</sup>,50 de hauteur.

Au bout de deux mois d'immersion ou d'infiltration tous les cubes ont été soumis à des essais d'écrasement en faisant agir l'effort perpendiculairement au sens du pilonnage des briquettes.

Voici les résistances obtenues en kil. par cm<sup>2</sup> :

Briques immergées			Briques soumises à la filtration d'eau douce.			Briques soumises à la filtration d'eau de mer.					
Mortier A	Mortier B	Mortier C	Mortier A	Mortier B	Mortier C	Mortier A	Mortier B	Mortier C			
77	63	63	62	59	60	60	59	56			
73	64	60	57	55	54	64	60	63			
75	67	61	62	56	53	63	57	55			
74	66	58	58	56	49	61	56	63			
73	63	56	55	50	43	58	52	54			
71	60	56	49	48	44	58	50	50			
Moynne des quatre meilleurs résultats			74.75	65	60.50	59.75	56.50	54	62	58	59.25

Si l'on tient compte de la colonne d'eau exerçant la pression sur les cubes et de la durée d'infiltration, on peut conclure de ce tableau que les mortiers de trass souffrent peu de l'action de l'eau douce sous pression. La constatation la plus digne de remarque, c'est que les mortiers traversés par l'eau de mer ont présenté une résistance supérieure à ceux qui ont livré passage à l'eau douce. Ce fait, qui vient à l'encontre des prévisions et dont à première vue on hésite à tirer argument, est pourtant bien réel, on peut trouver sa confirmation dans le tableau résumant les travaux de MM. Koninget Bienfait : le deuxième mortier de trass gâché à l'eau douce et immergé dans la mer s'est laissé pénétrer par une très faible quantité d'eau saline, par suite de sa compacité faisant obstacle aux échanges d'eau par osmose. Le troisième mortier, gâché à l'eau de mer, a durci moins rapidement que le précédent, mais on remarque qu'après six mois il l'a dépassé en résistance.

D'après M. Herfeldt (Voir *Mittheilungen uber Trass-mortel*, Andernach, 1887, p. 32), des mortiers de trass composés de :

- 1 volume trass ;
- 1,5 — chaux grasse en poudre ;
- 2 — sable

ont donné après immersion dans l'eau de mer des résistances supérieures de 52 p. c. à celles qu'ils présentaient dans l'eau douce.

M. Van der Kloes, professeur à l'école polytechnique de Delft arrive à des résultats analogues (Voir *Ambachtsman*, 1886, n° 51).

La structure des mortiers ayant subi l'infiltration de l'eau de mer n'a donc souffert d'aucune désorganisation ; elle s'est, au contraire, raffermie, et l'on est, me semble-t-il, autorisé d'en conclure qu'ils auraient indéfiniment supporté la pression extérieure des eaux salines. En effet, après les deux mois d'expérience, les pores du mortier étaient à peu près colmatés, l'absorption d'eau par vingt-quatre heures était devenue inappréciable ; il est certain que si l'eau de mer avait agi sur le ciment de trass de façon à laisser dans le mortier des produits de décomposition capables de disloquer les cubes à la longue, des lésions auraient déjà commencé à se produire : quelques faibles qu'on se les représente elles se seraient produites par une diminution de résistance.

\* \* \*

L'étude qui précède, ainsi que celle de M. Michaëlis qui suit, concluent à l'utilité de l'emploi du trass, mais les résultats favorables ne s'obtiennent qu'avec du trass de première qualité, or, *nul produit hydraulique n'est plus frelaté*, et aucun des moyens de contrôle préconisés jusqu'ici (perte au feu, durée de prise) n'est capable de différencier le bon trass des variétés inertes ou nuisibles connues sur les lieux d'extraction sous les noms de bergtrass, wilde trass, knuppen, tau-chen, pfeiffen, tuf leucite, etc.

Il est donc de la dernière importance d'avoir pour ces pouzzolanes une méthode d'épreuve précise, pratique et efficace. Les clauses suivantes régissant une fourniture de trass sont de nature à écarter tous les produits médiocres.

« Le trass en poudre sera d'une finesse telle que 50 p. c. au maximum restent sur le tamis de 900 mailles par cm<sup>2</sup>.

» Un mortier composé de :

- » 1 partie en poids de chaux grasse éteinte ;
- » 2 — — de trass en poudre (refus de 25 p. c. au tamis de 900 mailles) ;
- » 5 parties en poids de sable normal ;
- » 1 — — d'eau,
- » devra présenter à la traction, après un jour d'exposition à l'air humide et vingt-sept jours d'immersion dans l'eau, à une température comprise entre 15° et 18°, une résistance de 15 kil. par c/c au maximum.

» Les trass qui, dans les mêmes conditions, présenteraient une résis-

» 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° *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° *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.

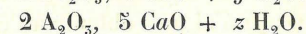
## RÉSISTANCE

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'hydroaluminat serait représenté par  $\text{Al}_2\text{O}_3, 3 \text{CaO} + 12 \text{H}_2\text{O}$ . 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-