

Essais sur la résistance des mortiers et bétons
à l'eau de mer.

Synthèse des résultats de 1934 à 1945.

F. CAMPUS,

Professeur à l'Université de Liège,
Directeur des Laboratoires d'Essais des Constructions
du Génie Civil et d'Hydraulique Fluviale.

Pl. XI à XVI.

Une première publication sur les essais entrepris à l'initiative de l'Administration des Ponts et Chaussées a paru dans le fascicule 3 de juin 1945 des *Annales des Travaux Publics de Belgique* (1). Elle rendait compte des résultats des essais de 1934 à 1938. Nous rappellerons sommairement les éléments essentiels de cette communication.

Le 20 septembre 1934, on a immergé dans la mer du Nord, dans le chenal d'accès au port de pêche d'Ostende, au niveau de mi-marée, 840 éprouvettes de mortier de $4 \times 4 \times 16$ cm. et 189 cubes de béton de 16 cm. de côté. Le lendemain, les mêmes nombres d'éprouvettes étaient immergées au Laboratoire d'essais des constructions du génie civil de l'Université de Liège, respectivement dans l'eau potable et dans une solution de sulfate de magnésie cristallisé à 15 gr./litre.

Ces éprouvettes étaient confectionnées au moyen de dix ciments différents, prélevés par les soins de l'Administration ou du Laboratoire

(1) F. Campus, R. Dantinne, E. Verschoore, J. Dooms et J. Verschave : « *Constata-tions récentes et précautions nouvelles à l'égard de la décomposition des mortiers et bétons dans l'eau de mer.* »

Le texte de cette communication avait été établi en 1939 pour servir de rapport au Congrès International de la Navigation qui devait avoir lieu à Berlin en 1940. Ce congrès n'ayant pas été tenu, la publication du texte fut retardée jusqu'en 1945.

dans des fournitures approvisionnées pour des travaux publics. Ces ciments appartenait tous à des catégories différentes, selon les définitions établies par la Commission des liants hydrauliques de l'Association belge pour l'essai des matériaux (A.B.E.M.). Ce sont, dans l'ordre de leurs numéros distinctifs :

- I) Ciment P.A.D.R. (portland artificiel à durcissement rapide) ;
- II) Ciment P.A.N. (portland artificiel normal) ;
- III) Ciment trass. (2/3 P.A.N. + 1/3 de trass., constitué par mélange de deux parties en poids du ciment P.A.N. précédent et d'une partie de trass moulu contrôlé) ;
- IV) Ciment H.F.H.R. (de haut fourneau à haute résistance) ;
- V) Ciment H.F.N. (de haut fourneau normal) ;
- VI) Ciment Permet. N. (permétallurgique normal) ;
- VII) Ciment sursulfaté ;
- VIII) Ciment fondu Lafarge ;
- IX) Ciment marin (ciment métallurgique spécial) ;
- X) Trasszement 50/50.

Les mortiers étaient composés de 1.500 kg. de sable du Rhin sec et respectivement de 300, 450 et 600 kg. de ciment. La quantité d'eau de gâchage était de 11 % du poids des matières sèches, sauf pour le ciment X (Trasszement), qui a exigé 13,1 % d'eau du poids des matières sèches en vue de réaliser la même consistance du mortier que celle obtenue pour les autres ciments.

Toutes les éprouvettes de mortier correspondant à un liant et à un dosage ont été confectionnées le même jour en quatre gâchées, au moyen de 100 moules, groupés par dizaines. Le mode de confection était généralement conforme aux normes suisses pour l'essai des ciments en mortier plastique.

L'opération a duré 30 jours. Tous les ciments ont fait l'objet des essais normaux de réception en mortier battu en vigueur en Belgique (traction et compression). En outre, les divers mortiers ont été essayés à la flexion et à la compression à 28 jours et le lendemain de l'immersion dans la mer. Le nombre total d'éprouvettes de mortier à essayer était d'au moins 2760, correspondant à $4 \times 3 \times 10 (7 \times 3 + 2)$, produit dans lequel :

- 4 = nombre d'éprouvettes par essai ;
- 3 = nombre de dosages ;
- 10 = nombre de liants ;
- 7 = nombre de délais de conservation ;
- 3 = nombre de milieux de conservation ;
- 2 = essai à 28 jours et essai de départ.

En réalité, il en a été confectionné 3000, afin d'avoir des réserves pour parer aux bris. Quelques éprouvettes se sont rompues au démoulage des mortiers à 300 kg. de ciment à durcissement relativement lent, mais les réserves ont toujours été suffisantes. Les éprouvettes, démoulées après 24 heures, étaient conservées dans du sable fin humide jusqu'au 28^e jour après la confection de la dernière série.

Les éprouvettes de béton avaient la composition suivante :

gravier de Meuse 5/20	1.250 kg.
sable du Rhin 0/2	630 kg.
ciment	350 kg.
eau	158 kg.

On a utilisé tous les ciments, sauf le X. Compte tenu des essais de compression effectués à 28 jours et le lendemain de l'immersion, on devait confectionner au minimum

$$3 \times 9 (3 \times 7 + 2) = 621 \text{ éprouvettes.}$$

On en a exécuté en réalité 648 et l'essai de départ a été effectué sur 6 éprouvettes.

Les 72 éprouvettes cubiques pour chaque ciment étaient confectionnées à raison de 24 par jour. Pour les 9 ciments, l'opération a duré 27 jours.

En même temps que les éprouvettes cubiques de béton, on a confectionné pour chaque ciment 6 éprouvettes cylindriques standard américaines (diamètre 6 pouces, hauteur 12 pouces) de béton armées de 4 barres en acier de 10 mm. de diamètre, recouvertes respectivement de 1, 2, 3 et 5 cm. de béton.

Les éprouvettes de mortier, de béton et de béton armé ont été placées dans de solides caisses à claire voie et immergées toutes ensembles dans la mer aux environs de la cote zéro, sauf une caisse de béton armé immergée sous le niveau de plus basse mer près de l'écluse d'entrée du bassin de la Marine et une autre caisse de béton armé exposée à l'air marin au-dessus du niveau de plus haute marée.

La répartition dans les caisses des diverses éprouvettes était telle que tous les ciments étaient placés dans des conditions identiques, chaque caisse contenant des jeux complets d'éprouvettes de tous les ciments (sauf pour les IX et X ajoutés en supplément au programme primitif et groupés dans des caisses spéciales). A chaque prélèvement, il suffit donc de détacher un certain nombre de caisses, toujours le même. Pour les mortiers, la disposition dans les caisses était telle que les mortiers à 300 kg. de ciment se trouvaient le plus à l'intérieur des caisses, donc protégés le plus possible, puis venaient les mortiers à

450 kg., enfin ceux à 600 kg. étaient vers l'extérieur et les plus exposés.

Les éprouvettes ont été immergées à des âges différents, en raison de la durée de leur confection. L'ordre de leur confection est celui de la numérotation de I à VIII, qui a été adopté dans la présomption qu'il correspond au classement des résistances croissantes à l'action de l'eau de mer. Les ciments présumés les moins résistants étaient donc favorisés. Les plus défavorisés étaient les ciments IV, V, VI et VII, à durcissement relativement lent, ce dont témoignent les résistances de départ déterminées le lendemain de l'immersion. Les ciments IX et X ont été ajoutés à la série et n'ont été immergés que le 5 octobre 1934. Le programme primitif prévoyait un prélèvement après 5 mois d'immersion (1935), après 11 mois (1935), après 23 mois (1936), après 47 mois (1938) et après 71 mois (1940). Deux séries supplémentaires d'éprouvettes étaient réservées pour être prélevées à des dates à déterminer d'après les résultats des prélèvements précités. L'opération de 1940 n'a pu avoir lieu en raison de la guerre et a été postposée jusqu'en octobre 1945, après onze années d'immersion. Les caisses ont été retrouvées en bon état, en dépit des destructions importantes subies par les installations portuaires d'Ostende. Elles ont été inspectées et consolidées à l'occasion du prélèvement de 1945 et les deux séries restantes peuvent encore rester immergées pendant de longues années. Les éprouvettes conservées au laboratoire dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée sont aussi intactes, bien que les laboratoires aient été gravement endommagés par les bombardements aériens. L'expérience peut donc être poursuivie et la guerre, en la prolongeant, aura eu pour effet d'augmenter son intérêt et son efficacité. Les tableaux qui suivent ajoutent les résultats des prélèvements de 1945 à ceux qui avaient été effectués conformément au programme avant 1940; on remarquera que les résultats nouveaux sont beaucoup plus caractéristiques que les précédents.

Selon le programme, lors de chaque prélèvement, on procède à l'essai de flexion et de compression des mortiers et à l'essai de compression des bétons. Les cylindres de béton armé ne font l'objet d'aucun essai, mais seulement d'un examen visuel. Des cylindres identiques sont conservés au laboratoire dans du sable humecté d'eau potable et dans du sable humecté d'eau sulfatée, enfin une série à l'air libre.

Il a été en outre effectué sur les divers ciments en 1934 et 1935 un programme assez large d'essais fondamentaux en rapport présumé avec la tenue à la mer: analyse chimique; essai d'Anstett de résistance au sulfate de calcium; filtration d'eaux diverses, notamment sulfatées;

retrait; dégagement de chaleur de prise et de durcissement, etc., en plus des essais normaux de réception.

Nous croyons utile de reproduire ici le tableau de l'analyse chimique des divers ciments figurant à la publication précitée.

TABLEAU I. — Analyse chimique.

Ciments	Perte au feu	% Ca O	% Si O ₂	% R ₂ O ₃	% Mg O	% S O ₃	% S
I. P. A. D. R. . . .	2,53	65,40	21,05	8,46	1,08	2,46	—
II. P. A. N. . . .	5,2	61,40	19,55	12,2	0,44	1,78	—
III. 2/3 P. A. N. + 1/3 Trass	6,8	41,40	30,62	17,88	0,55	1,2	—
IV. H. F. H. R. . . .	3,92	51,90	22,40	16,25	1,39	2,35	1,60
V. H. F. N.	2,50	41,70	23,80	25,20	2,11	2,38	1,85
VI. Permét. N. . . .	3,42	46,30	23,95	18,10	2,81	2,93	1,95
VII. Sursulfaté . . .	8,80	38,90	24,40	16,50	2,94	6,67	2,42
VIII. C. fondu Lafarge	0,6	40,15	6,08	51,70	0,20	1,30	—
IX. C. Marin. . . .	4,68	40,50	25,50	20,40	2,40	2,95	2,49
X. Trasszem. 50/50.	9,37	38,60	32,40	16,38	1,12	2,37	—
Trass.	10,06	2,01	52,68	29,99	0,8	—	—
		Alcalis					
Trass.	3,2	2,01	—	—	—	—	—

Résultats des essais mécaniques.

Les tableaux 2 à 7 (Pl. XI et XII) résument les résultats des essais de flexion et de compression effectués sur les divers mortiers jusqu'à l'âge de 11 ans; le tableau 8 (Pl. XIII) rassemble les résultats des essais de compression sur les bétons. Ils diffèrent des tableaux correspondants de la publication précédente en ce sens que l'on a pris comme point de comparaison les essais de départ, effectués le lendemain de l'immersion, donc à des âges variables:

- de 52 à 50 jours pour les mortiers et le béton de ciment I
- de 49 à 47 jours pour les mortiers et le béton de ciment II
- de 46 à 44 jours pour les mortiers et le béton de ciment III
- de 43 à 41 jours pour les mortiers et le béton de ciment IV
- de 40 à 38 jours pour les mortiers et le béton de ciment V
- de 37 à 35 jours pour les mortiers et le béton de ciment VI
- de 34 à 32 jours pour les mortiers et le béton de ciment VII
- de 31 à 29 jours pour les mortiers et le béton de ciment VIII
- de 34 à 32 jours pour les mortiers et le béton de ciment IX
- de 31 à 20 jours pour les mortiers de ciment X

Le tableau 9 (Pl. XIII) groupe les valeurs des quotients des résistances des éprouvettes conservées dans l'eau de mer à celles des éprou-

vettes conservées dans l'eau potable à l'âge de 11 ans, pour les divers ciments.

Résumé des observations faites sur les éprouvettes prélevées à l'âge de 11 ans.

Les éprouvettes de mortier à 300 kg. de ciment par m³ de sable ont été généralement retirées des caisses immergées à la mer à l'état de débris. Des éprouvettes 11 et 31 (ciments I et III), il n'a même pas été possible de retirer des débris caractéristiques pour l'analyse chimique. Dans tous les autres cas, on a toujours retrouvé assez intactes les extrémités des éprouvettes engagées dans les alvéoles des caisses, ce qui met en évidence l'action mécanique de l'eau de la mer et celle des intempéries. D'autres éprouvettes (51, ciment V) étaient transformées en fuseau très aminci au milieu ou rompu par le milieu (101, ciment X et d'autres). Les éprouvettes 41 (ciment IV) étaient moins corrodées, elles conservaient encore une certaine résistance. Mais leur forme était cependant si altérée que la résistance à la flexion et surtout la résistance à la compression n'avaient plus beaucoup de sens, en raison de l'irrégularité géométrique.

Les éprouvettes 81 (ciment VIII) étaient apparemment intactes, mais leur rupture révélait une résistance médiocre et l'aspect des cassures une altération déjà prononcée.

Les mortiers au dosage de 450 kg. de ciment par m³ de sable présentaient une meilleure tenue dans l'ensemble, mais la plupart étaient cependant assez corrodées. Les éprouvettes 12 (ciment I), 32 (ciment III), 102 (ciment X) et 22 (ciment II) étaient rompues ou avaient une résistance nulle ou quasi nulle. Les plus corrodées étaient ensuite 42 (ciment IV), 62 (ciment VI) et 72 (ciment VII), dont les arêtes étaient émoussées et même les faces légèrement attaquées, surtout la face de lissage de l'éprouvette (face supérieure libre du moule). Les essais de flexion de ces éprouvettes ont encore quelque signification; les essais de compression beaucoup moins en raison de l'irrégularité géométrique: 52 (ciment V) est légèrement corrodé aux arêtes; 82 (ciment VIII) et 92 (ciment IX) paraissent intacts; il y a cependant une certaine perte de résistance en flexion ou en compression.

Les mortiers au dosage de 600 kg. de ciment par m³ donnent les meilleurs résultats. Cependant, l'aspect encore relativement entier des éprouvettes 13, 33 et 103 (ciments I, III et X) n'empêche pas une résistance pratiquement nulle et une altération totale du mortier. 23, très attaqué aux arêtes, à une résistance réduite. 43, apparemment intact, est déjà altéré et a une résistance réduite mais encore notable.

83 aussi est apparemment intact, mais d'aspect altéré dans la cassure; les résistances sont encore très notables. 53, 63, 73 et 93 sont intacts et très résistants. Les diminutions de résistances à la compression par rapport à la conservation dans l'eau potable décèlent probablement une légère altération géométrique superficielle, cependant que les augmentations de résistance à la flexion suggèrent la formation de croûtes superficielles cohérentes et résistantes, signalées par H. Le Châtelier (1).

Les cubes de béton sont généralement intacts, sauf ceux des ciments I, II et III, nettement corrodés à la face de lissage. Les pertes de volume sont évaluées à 3,65 % pour le ciment I, 2,70 % pour les ciments II et 2,90 % pour le ciment III.

Les cylindres de béton armé présentaient des altérations marquées pour certains ciments, principalement sur la surface cylindrique et surtout pour les ciments I, II et III, pour lesquels l'altération atteint jusque 5 à 8 mm. de profondeur. Les altérations sont les plus marquées du côté extérieur des caisses, aux parties directement exposées à l'action des vagues. Le gravier est mis en relief, le mortier est friable. Cependant il n'y a pas de fissures, non plus à l'endroit des barres, et aucune barre n'est dénudée, pas même celles recouvertes seulement de 1 cm. de béton.

Pour le ciment IV, le mortier de surface est légèrement friable sur 1 à 2 mm. de profondeur.

Le ciment VI semble affecté d'une légère dénudation du gravier en surface; les faces cylindriques de VII et de IX sont légèrement rugueuses, celles de V et VIII lisses. Pour tous ces ciments les surfaces sont dures.

Ces cylindres sont fortement couverts de coquillages, sauf VII, VIII et IX, qui sont le moins tapissés de mollusques. I, II et III sont le plus couverts, puis IV, V et VI un peu moins. Les abouts des barres qui dépassaient des faces terminales du béton sont quasi détruits; leur corrosion importante avait été déjà observée en 1938; elle s'arrête au ras du béton, sans altération de ce dernier.

Lors du prélèvement précédent de 1938, les mortiers avaient déjà subi des altérations, mais beaucoup moins accusées qu'en 1945, ainsi qu'il ressort des tableaux 2 à 7. Les bétons en cubes ne montraient

(1) *Observations préliminaires au sujet de la décomposition des ciments à la mer.* Dunod, éd., Paris, 1904. Seulement H. Le Châtelier envisage surtout la formation de ces croûtes dans le cas des ciments attaqués et leur assigne un rôle dans la décomposition des ciments. Ici, nous présumons l'existence de ces croûtes au contraire dans le cas des ciments qui résistent à l'action marine; la différence est d'importance.

pas encore d'altérations de forme et les résistances à la compression permettaient seulement de présumer un commencement d'attaque des bétons I, II et III, un peu moins de IV. Les cylindres de béton armé ne montraient aucune altération. La période supplémentaire de 7 années a nettement accusé l'évolution à peine indiquée dans la publication de 1945 fondée sur les résultats obtenus jusqu'en 1938. Les éprouvettes de béton armé immergées en permanence dans la mer et celles exposées à l'air marin sont inaltérées.

Les éprouvettes témoins de mortier conservées dans l'eau potable sont intactes.

Celles conservées dans l'eau sulfatée sont très attaquées en ce qui concerne les ciments I, II, III et IV, dans l'ordre. Mais l'aspect est tout différent de celui des dégradations dans l'eau de mer : il y a déformation par gonflement avec fissuration éventuelle. Les autres éprouvettes de mortier sont intactes, ainsi que les cubes de béton et les cylindres de béton armé, sauf les cubes de béton marqués 10, confectionnés avec du ciment II et dans lesquels 25 % de sable du Rhin a été remplacé par du sable fin des dunes. Ces bétons sont très attaqués par l'eau sulfatée, ce qui ne peut être dû qu'à la substitution de sable fin au sable grossier. Voici les résultats de cette série :

Résistance à 28 jours : 360 kg./cm².

Résistance en cas de conservation dans l'eau potable :

5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans
433	455	471	532	312

Résistance en cas de conservation dans l'eau sulfatée :

404	443	363	217	250
-----	-----	-----	-----	-----

Les résultats à 11 ans sont assez surprenants et difficiles à interpréter. Nous pensons depuis longtemps que ces substitutions de sable fin sont contre-indiquées (1). Les photos 1 à 7 reproduisent quelques aspects qui illustrent les observations précédentes.

Interprétation des résultats.

Alors qu'après les essais de 1938, on pouvait à peine envisager une interprétation de résultats très peu accusés, après les constatations de

(1) Cfr. R. Féret dans : *Chimie appliquée à l'Art de l'Ingénieur*, par Ch. Durand-Claye. Paris, éd. Baudry, 1897.

Pratique de la Construction en Béton et Mortier de Ciment, par Taylor et Thomson. Traduction française. Paris, éd. Dunod, 1924.

1945 on se trouve en présence de résultats nettement plus marqués et de différences de comportement notables. Néanmoins, il faut se méfier de conclusions trop globales ou sommaires ou, du moins, il est nécessaire de faire précéder ces conclusions d'un ensemble de réserves destinées à bien mettre en évidence leur signification. On a, en effet, affaire à des phénomènes et à des expériences très complexes, où il est difficile de déceler exactement les causes et les effets. Les essais mécaniques ont l'avantage de procurer des chiffres objectifs, mais on peut se demander s'ils sont bien caractéristiques.

D'abord il est nécessaire de rappeler le fait cependant bien connu que les essais mécaniques de mortiers et de bétons, mêmes les mieux exécutés, par exemple pour les réceptions, donnent lieu à des écarts notables de résultats.

Encore dans une étude récente, M. M. Prot (1) analyse toutes les causes d'écarts dans ces essais. A propos de séries d'essais de compression et de flexion effectuées avec soin et avec le souci de réduire les écarts au minimum, il constate des écarts maxima de l'ordre de 23 et même 32 % ; des écarts moyens de 8, 10 et 12 %. Ceci n'étonne pas les personnes familières avec les essais de ciment. Nous ne pourrions supposer que les très nombreuses éprouvettes confectionnées en série pour l'essai à la mer, au moyen d'un matériel convenable certes, mais exécuté spécialement pour cet essai et de caractère plutôt industriel, c'est-à-dire nullement calibré avec une très grande précision, pourraient présenter des écarts maxima et moyens moindres

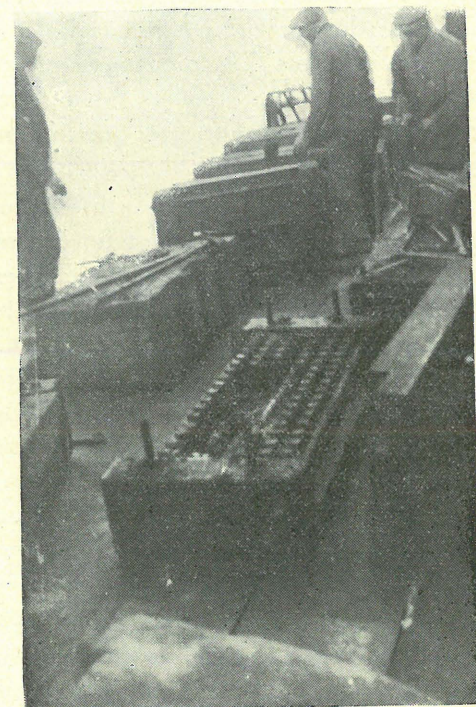


Photo 1. — Prélèvement d'octobre 1945 à Ostende. Aspect général des caisses de mortiers.

(1) Recherches sur les essais de ciments. Circulaire série F, n° 35, de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. Paris, janvier 1947.

que ceux des essais courants de laboratoires. Ce que nous pouvons affirmer, c'est que les écarts entre les diverses éprouvettes de chaque série ont généralement été modérés. Néanmoins, les tableaux des résultats moyens 2 à 8 contiennent certaines anomalies.

On sait que les résultats des essais mécaniques des mortiers et bétons dépendent beaucoup de la correction des formes des éprouvettes, surtout du parallélisme et de la planéité des faces. A supposer que ces dispositions soient convenablement réalisées par le moulage, encore faut-il qu'elles soient maintenues dans le milieu de conservation. On peut admettre que c'est le cas dans l'eau potable, mais pas dans l'eau sulfatée ou dans l'eau de mer pour les éprouvettes qui sont attaquées. On peut donner à cette remarque plusieurs interprétations. On peut récuser les essais mécaniques comme critères d'altération, pour les raisons qu'il n'est pas prouvé qu'ils ne sont pas uniquement influencés par les changements de forme et que la diminution de résistance intrinsèque ou vraie de la matière n'est pas établie.

Il paraît plus raisonnable et il est plus conforme aux faits d'admettre que l'altération de forme est un critère valable de corrosion, mais on peut penser que l'essai mécanique en est un indice trop sensible, pessimiste. Pour cette raison, on pourrait préférer envisager comme critère la perte de volume en %, par exemple.

Selon les résultats de toutes nos observations, surtout de celles de 1945, cet indice est insuffisant. Il est nettement apparu que les éprouvettes les plus déformées étaient aussi les plus altérées dans l'intégrité physico-chimique de la matière restante. L'altération est plus importante que ce qu'exprime la diminution de volume et d'ailleurs, certaines éprouvettes sans déformations sensibles ont montré des diminutions considérables de résistance mécanique, indice d'altération corroboré par les analyses chimiques exposées plus loin.

Comme conclusion de ces considérations critiques, nous pensons pouvoir dire que, bien qu'il paraisse paradoxal de vouloir caractériser des degrés d'altération par des essais de flexion et surtout par des essais de compression d'éprouvettes déformées, par ce que ces essais postulent des éprouvettes de formes parfaite, il semble cependant que ce moyen soit le plus caractéristique, le plus objectif, le plus pratique et le plus sensible. Seulement il importe d'apprécier les réserves raisonnables qu'il y a lieu d'y faire et de considérer qu'il ne faut pas attacher aux résultats une valeur absolue, mais plutôt comparative. Naturellement ces réserves s'atténuent dans la mesure où les éprouvettes sont moins ou pas du tout altérées. La méthode est donc certes valable pour les mortiers et bétons qui résistent bien à l'action de l'eau de mer. On peut

penser qu'elle est dans certains cas un indicateur trop sensible pour ceux qui résistent moins bien. C'est là une question d'appréciation qui dépend du but poursuivi : si l'on désire une grande sécurité, on ne peut incriminer une trop grande sensibilité.

Les auteurs de la première communication de 1945 concluaient déjà, sur la base des résultats de 1938, que « les dispositions expérimentales

adoptées peuvent être considérées comme satisfaisantes et propres à mettre en évidence la complexité des influences qui interviennent dans le phénomène de l'attaque des mortiers et bétons par l'eau de mer ». Les résultats de 1945 et l'évolution de la tenue des divers ciments qu'elle révèle donnent de cette appréciation une justification encore plus grande. Des études théoriques et de caractère exclusivement ou principalement chimique ont pour effet d'entretenir, dans beaucoup d'esprits, l'opinion que la question de la tenue des mortiers et bétons à la mer est essentiellement dépendante de la nature chimique des ciments. Les spécialistes des constructions maritimes savent que ce n'est là qu'un aspect de la question, certes important, mais nullement exclusif, à tel point qu'il serait dangereux de le considérer seul en négligeant les autres facteurs de l'action marine. C'est ce que les essais sur mortiers aux dosages de 300, 450 et 600 kg. de ciment par m³ de sable montrent bien et ce qui les justifie entièrement.

Les mortiers à 300 kg. de ciment sont nécessairement poreux, donc spécialement vulnérables à toutes les actions, y compris l'attaque chimique. La comparaison des effets de l'immersion marine et de la conservation dans une solution sulfatée concentrée montre :

1° que les ciments rapidement décomposés par l'eau sulfatée (I, II

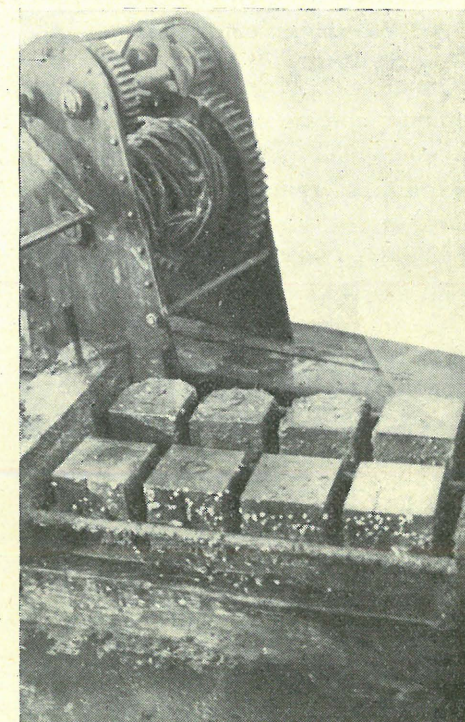


Photo 2. — Prélèvement d'octobre 1945 à Ostende. Aspect général d'une caisse de bétons.

et IV) l'ont été beaucoup moins rapidement par l'eau de mer, l'un d'eux (IV) est même le seul de tous les ciments qui possède encore, avec le VIII (ciment fondu), une résistance appréciable après 11 ans;

2° que les ciments insensibles à l'action de l'eau sulfatée ou qui même s'y renforcent sont tous, après 11 ans, décomposés par l'eau marine. Le VIII seul fait exception, mais il confirme la règle en ce sens que ses résistances sont fortement inférieures à celles des éprouvettes-témoins conservées dans l'eau sulfatée.

Donc, l'action des sulfates n'est nullement exclusive ni même prédominante, comme on serait tenté de le croire à la lecture des principaux travaux sur la matière (1). Les résultats observés sous 1° et 2° ci-dessus s'expliquent principalement par les actions mécaniques du jeu de la marée et des vagues, des courants, des alluvions, des organismes marins et des éléments atmosphériques, surtout des variations thermiques (gel et insolation).

Les mortiers à 450 kg. de ciment, moins poreux, et les mortiers à 600 kg. de ciment, compacts, confirment les observations précédentes. On constate notamment d'une manière générale, sauf pour le mortier 12 (450 kg. de ciment I) et sous réserve d'un petit nombre d'anomalies pour les mortiers à 450 kg. (qui peuvent s'expliquer en partie par les réserves générales précédentes concernant les critères mécaniques), que la décomposition par immersion marine est plus rapide et plus accusée pour ces mortiers que par conservation dans l'eau sulfatée immobile, aussi bien pour les ciments réputés vulnérables au sulfate que pour les autres. Le dosage de 450 kg./m³, qui n'a rien de riche, et bien davantage celui à 600 kg./m³, qui est bien compact, ont suffi pour ralentir fortement et dans de nombreux cas pour surmonter à 11 ans les effets d'une solution concentrée de sulfate (par exemple les mortiers 32, 42, 33). Cependant, presque tous ces mortiers ont subi quelque préjudice de l'action marine; les plus vulnérables à l'action des sulfates (I, III, X, aussi II, dans une moindre mesure IV) sont entièrement détruits ou fortement décomposés. L'influence des facteurs d'action marine autres que l'attaque chimique du sulfate de magnésie est donc nettement établie, ainsi que leur combinaison avec cette attaque.

La tenue des bétons (tableau 8) confirme ces conclusions d'une manière probante. La compacité de ces bétons bien composés suffit pour les rendre tous, quelle que soit la nature du ciment, quasi invul-

(1) Cfr. W. Eitel : *Physikalische Chemie der Silikate*, ainsi que la brochure de H. Le Châtelier.

nérables à la solution concentrée de sulfate de magnésie. (L'anomalie du ciment VIII à 11 ans, qui se retrouve dans les éprouvettes témoins conservées à l'eau potable, doit être attribuée à un phénomène connu, celui de la « maladie du ciment fondu ».) Par contre, les ciments les plus vulnérables aux sulfates (I, II et III, dans une très faible mesure IV) ont donné lieu à des corrosions et des pertes de résistance importantes ou appréciables en immersion marine. La combinaison de l'attaque séléniteuse et des autres actions marines est donc bien caractérisée; elle l'est aussi par les altérations observées sur les cylindres de béton armé immergés à mi-marée. La contre-épreuve est fournie :

1° par l'excellente tenue des cubes de béton et des cylindres de béton armé immergés à mi-marée composés des ciments les plus résistants

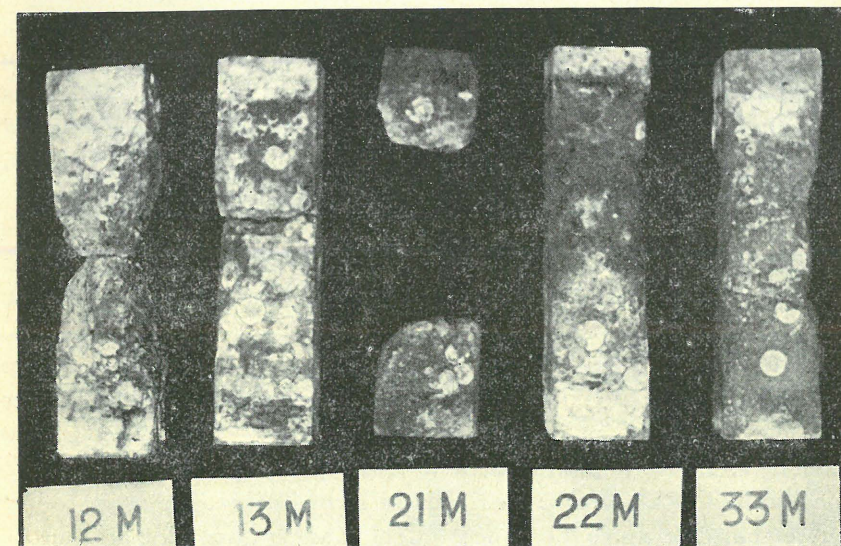


Photo 3. — Aspect d'éprouvettes retirées de la mer en octobre 1945.

aux sulfates (V à IX). Les cubes sont tous plus résistants que ceux conservés à l'eau potable; la rétrogradation du ciment fondu est à peine marquée et incertaine, en raison d'une légère corrosion superficielle possible des éprouvettes;

2° par l'absence d'altération de tous les cylindres-témoins de béton armé immergés en permanence sous le niveau de marée basse et de ceux exposés à l'air marin. (Les cylindres constamment immergés sont cependant soumis à l'action des courants, des alluvions et des organismes marins).

En introduction à son mémoire précité, H. Le Châtelier postulait :

« 1° Tous les liants hydrauliques mis en contact *intime* avec l'eau de mer sont, au bout d'un temps plus ou moins long, totalement décomposés *par l'action chimique des sels de magnésie*;

2° Les mortiers sont décomposés d'autant plus lentement qu'ils sont plus compacts;

3° Ils sont décomposés d'autant plus lentement que l'indice d'hydraulicité est plus élevé, en comptant dans cet indice la silice et l'alumine combinées à la chaux soit pendant la cuisson, soit, dans le cas d'additions pouzzolaniques, pendant le durcissement. »

Nos expériences confirment le point 1° par les résultats fournis par les éprouvettes de mortier, dont les liants peuvent être considérés comme mis en contact plus ou moins *intime* avec l'eau de mer selon le dosage, mais la comparaison avec les éprouvettes-témoins immergées dans l'eau sulfatée concentrée montre que *dans l'eau de mer, l'action chimique des sels de magnésie n'est ni exclusive ni même prédominante; elle est combinée avec les autres actions marines: jeu des marées, courants, vagues, alluvions, organismes marins, actions atmosphériques.*

Nos expériences confirment aussi le 2° et le 3° sauf en ce qui concerne les additions de trass, qui aussi bien pour les mortiers que pour les bétons se sont avérées inefficaces à la mer. Nous ne concluons pas au sujet d'autres pouzzolanes, ne les ayant pas employées dans ces essais.

Si l'on examine (tableaux 2 à 7) la tenue au cours des temps des mortiers 31, 32, 33, 101, 102 et 103 contenant du trass, on constate que s'ils sont invariablement détruits à la mer, dans l'eau sulfatée ils ont fluctué pendant les 4 premières années, le plus souvent dans le sens d'une diminution de résistance, pour se redresser généralement d'une manière marquée après 11 années. Ceci montre la grande lenteur de l'action chimique de certaines pouzzolanes, dont le trass, lenteur que nous avons déjà mise en évidence précédemment (1). Nous avons souvent observé dans les phénomènes de corrosion et de décomposition des mortiers et bétons une lutte entre deux facteurs antagonistes: le durcissement croissant avec le temps d'une part, l'altération chimique agissant de même d'autre part. L'un ou l'autre élément l'em-

(1) Cfr. F. Campus : *Observations au rapport du professeur R. Grün (Dusseldorf) concernant les substances pouzzolaniques, notamment l'emploi des poudres de trass et de laitier.* Livre du Congrès International d'Essais des Matériaux. Zurich, 1931.

R. Jacquemin : *Recherches sur l'hydratation des liants hydrauliques.* Thèse pour le doctorat des sciences appliquées à l'Université de Liège, 1944.

porte. Le trass agit chimiquement avec une extrême lenteur et n'atténue donc pas la vitesse de décomposition initiale des ciments vulnérables; par contre il ralentit considérablement leur durcissement. C'est ce qui explique les résultats désastreux des essais à la mer ou un durcissement assez soutenu est utile non seulement pour résister à l'action chimique, mais surtout aux autres actions marines. Dans l'eau sulfatée concentrée, où l'action chimique agit seule, et sous une plus grande concentration, l'activité chimique du trass, cependant très lente, finit par l'emporter après 11 ans.

Les postulats généralement pessimistes de H. Le Châtelier, assez exacts probablement du point de vue purement chimique, doivent, selon les résultats des expériences, recevoir de sérieux amendements

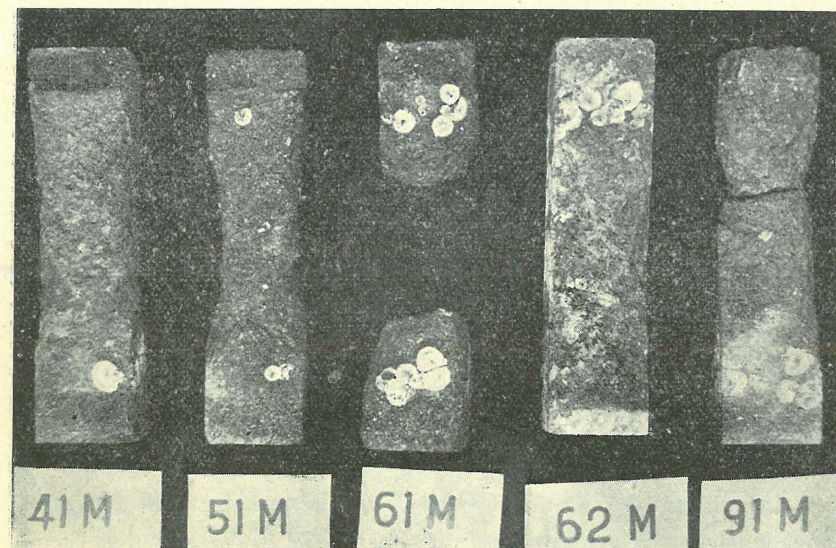


Photo 4. — Aspect d'éprouvettes retirées de la mer en octobre 1945.

pratiques. Dans la gamme des ciments essayés, les essais opèrent un classement très net :

1° le groupe des ciments I et II qui, même associés avec le trass (III), ont une faible résistance à l'action marine, non seulement en mortiers, mais même en béton compact à 350 kg. de ciment par m³. Ce sont les ciments riches en Ca O (plus de 60 %). Nous avons indiqué les raisons de l'incapacité du trass à leur conférer des qualités marines;

2° le ciment IV, d'une autre catégorie, contient cependant trop de Ca O (plus de 50 %), sa tenue est médiocre en mortier, douteuse en béton;

3° les ciments V à IX contenant moins de 50 % de Ca O, la plupart moins de 45 % et certains guère plus ou même moins de 40 %, qui résistent le mieux en mortiers, même bien dans les mortiers assez compacts, et tout à fait bien dans les bétons compacts. Il est somme toute plus simple, suffisant et tout à fait équivalent d'indiquer une teneur limite supérieure en Ca O, plutôt que de fixer une valeur inférieure à l'indice d'hydraulicité $\frac{\text{Si O}^2 + \text{Al}^2 \text{O}^3}{\text{Ca O}}$.

Ce groupe 3° réunit des ciments de catégories diverses, dont le VIII est totalement différent des 4 autres. C'est un ciment à durcissement rapide et à grand dégagement de chaleur; son comportement aux âges un peu élevés (11 années) est capricieux et incertain selon les résultats condensés dans les tableaux 2 à 8, ce qui cadre avec les faits constatés dans la pratique (1).

Les autres ciments du groupe sont à base de laitier de haut fourneau basique granulé. L'un d'eux (VII) ne contient presque que du laitier, très peu de clinker et est le plus pauvre en Ca O. Ces ciments ont des caractéristiques très spéciales : un durcissement plus lent mais soutenu et conduisant à de hautes résistances finales et un faible dégagement de chaleur. Conjuguées avec la faible teneur en Ca O, dont elles sont d'ailleurs les conséquences, ces caractéristiques rendent ces ciments propres à tous les emplois pour les ouvrages hydrauliques massifs, notamment les grands barrages, ainsi donc que pour les ouvrages maritimes. La bonne tenue à la mer des ciments contenant beaucoup de laitier et peu de clinker provient de ce que le laitier granulé agit à la fois comme un ciment lent et une pouzzolane très active (cfr. références précitées F. Campus 1931 — R. Jacquemin 1944). L'attaque chimique du laitier est relativement lente et la vitesse de durcissement est suffisante pour l'emporter durablement, d'autant plus qu'elle est soutenue.

En outre, les résultats des essais confirment l'ensemble des règles généralement admises actuellement pour les bétonnages à la mer.

1° Nécessité d'un dosage assez riche et d'une bonne granulométrie, susceptible de réaliser un conglomérat compact et étanche.

Pour les mortiers, il semble utile de ne pas descendre en dessous de 600 kg. de ciment par m³ de sable grossier, bien gradué; le sable fin

(1) R. Cavenel : Réparation du pont de la Corde sur la Penzé près de Carantec (Finistère). *Annales des Ponts et Chaussées*, Paris, mars-avril 1944.

est contre-indiqué. Pour les bétons, on recommande généralement 400 à 450 kg. de ciment par m³ (1). Selon les expériences, 350 kg. suffisent dans un béton bien compact. Il s'agit il est vrai d'un béton de laboratoire; les éprouvettes étaient cependant défavorisées par les petites dimensions et le grand nombre de faces, d'arêtes et de sommets.

2° Nécessité d'une mise en place soignée, assurant une grande compacité et une parfaite étanchéité pratique; utilité de surfaces bien pleines, compactes et étanches. L'usage des coffrages métalliques, de

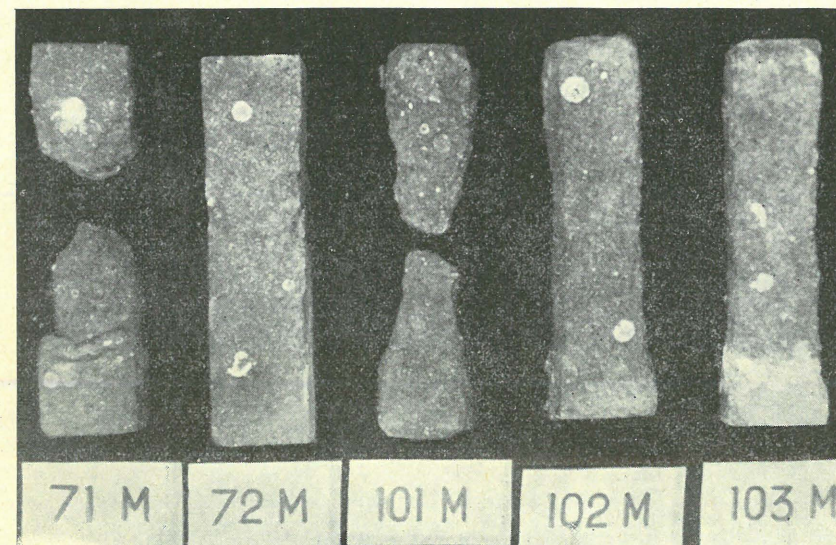


Photo 5. — Aspect d'éprouvettes retirées de la mer en octobre 1945.

la pervibration et de la vibration des coffrages est certes recommandable.

3° Il est certain qu'il est utile de soumettre les bétonnages à la mer à un contrôle et à une surveillance attentives. Outre une réception correcte des matériaux constitutifs du béton, le contrôle de leur qualité sera réalisé par les moyens ordinaires. L'Administration belge des Ponts et Chaussées a souvent prescrit depuis quelques années un contrôle de la compacité des bétons des ouvrages hydrauliques, par des essais d'imbibition à l'eau chaude en autoclave. Cet essai serait au moins aussi adéquat pour les ouvrages maritimes.

(1) Cfr. A. Coyne : *Le Génie Civil*, 4 octobre 1930.

Investigations spéciales préalables.

Outre l'analyse chimique des ciments frais, dont les résultats figurent au tableau I, de nombreuses investigations spéciales ont été faites sur ces ciments en 1934 et 1935. Parmi celles-ci, l'essai Le Châtelier-Anstett retenait particulièrement l'attention à l'époque.

Inspiré d'expériences de caractère plutôt démonstratif relatées dans la brochure de H. Le Châtelier plusieurs fois mentionnée plus haut, plus ou moins adapté en forme d'épreuve de réception par M. Anstett, cet essai avait été invoqué par le ciment alumineux fondu comme preuve de son indécomposabilité par les sulfates. Le ciment sursulfaté avait ultérieurement fait état de la même capacité.

Il a été rendu compte dans la première publication de 1945 des résultats de l'essai Le Châtelier-Anstett appliqué aux ciments I à IX, selon les modalités d'application mises au point dans nos laboratoires. Le classement obtenu est le suivant :

- Résistance parfaite : VII et VIII;
- Résistance médiocre : IX;
- Résistance faible : I, II et III;
- Résistance très faible : IV, V et VI.

On voit que ce classement ne concorde pas avec celui de la résistance à l'eau marine, notamment pour IV et surtout pour V, VI et IX.

A notre avis, cet essai permet d'apprécier l'indécomposabilité absolue par l'attaque de l'ion SO_3 , en vue d'applications très spéciales, mais n'a pas de rapports avec la tenue des ciments à la mer.

Des essais de filtration sous pression ont été effectués sur des mortiers maigres et poreux confectionnés au moyen des ciments I à IX, en se servant d'eau potable, d'eau distillée et d'eau sulfatée. La solution initialement prévue de 15 gr. par litre de sulfate de magnésie a colmaté immédiatement toutes les éprouvettes. Une solution de 3 gr. par litre a entraîné un colmatage moins rapide. On a analysé le filtrat et constaté que les ciments I, II et III perdaient beaucoup plus de Ca O que les autres et retenaient beaucoup moins de SO_3 . Cet essai est difficile à mettre au point et n'a pas été pleinement exploité; nous y reviendrons plus loin.

L'essai de dégagement de chaleur de prise et de durcissement est plutôt un indice d'activité du ciment; il est surtout intéressant pour les massifs de grands barrages et le paraît moins pour les ouvrages maritimes. Cependant, pour les ouvrages maritimes très massifs ou les très gros blocs artificiels, la question d'éventuelles différenciations ther-



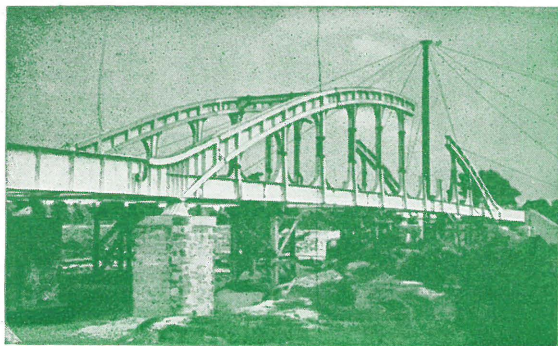
Bétonnière *ROLL*



La Bétonnière Roll assure un mélange homogène par la forme spéciale de ses cuves et une vidange instantanée

BÉTONNIÈRES - VIBROFINISSEURS - GRUES A TOUR ET DERRICK - TREUILS
MONTE-CHARGES - DISTRIBUTEURS ET MATS A BÉTON
VIBRATEURS ET VIBRATEURS INTERNES DE BÉTON - PRESSES A DALLES

Société Générale de Matériel d'Entrepreneurs



S. A. des Chaudronneries
A.-F. SMULDERS
à Grâce-Berleur-Liége

CHAUDIÈRES
PONTS & CHARPENTES
GROSSE MÉCANIQUE

403 93

19422

USINES DE BRAINE-LE-COMTE

Société Anonyme à Braine-le-Comte
Adr. télégr.: Usines Braine-le-Comte
-- Téléphone: Braine-le-Comte n° 7 --



Pont de Wandre sur le Canal Albert -- Portée 59 m. 400 -- Poids 618 T.
(Ministère des Travaux Publics et de la Résorption du Chômage)

SPÉCIALITÉS :

Voitures -- Wagons -- Automotrices -- Tenders -- Ponts
Charpentes et appareils de Voie -- Mécanique -- Pièce de forge.

402/61

19422

miques n'est pas dénuée d'intérêt, du point de vue des fissurations qu'elle peut entraîner avec la conséquence d'une pénétration profonde de l'eau de mer dans l'ouvrage.

Si les ouvrages réels présentent par rapport à nos petites éprouvettes l'avantage considérable de grandes dimensions, elles sont par contre exposées au danger des malfaçons, cavités et fissures, qui donnent accès à l'eau de mer. Or, le premier principe de sécurité des mortiers et bétons à la mer, comme de sécurité en toutes choses, est de maintenir l'ennemi à l'extérieur. A égalité de résistance à l'action marine, pour des constructions maritimes massives, on préférera les ciments dégageant peu de chaleur (dans l'ordre VII, IX, V et VI, moins de 45 calories par gramme de ciment en pâte pure dégagées en 72 heu-

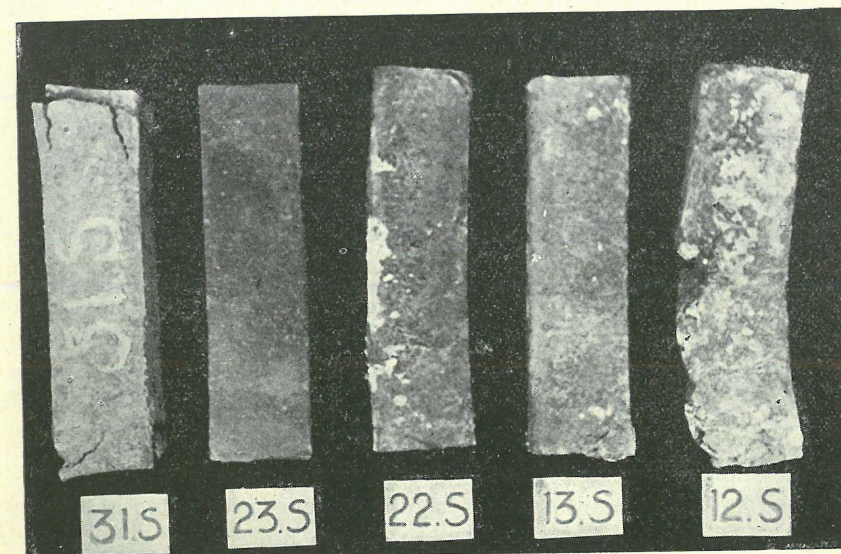


Photo 6. — Aspect d'éprouvettes retirées de l'eau sulfatée en octobre 1945.

res). Le ciment fondu IX est, on le sait, un des ciments les plus prompts et à dégagement de chaleur maximum; on sait aussi que cela impose des précautions spéciales pour son emploi, surtout en grandes masses. Ces précautions n'ont pas toujours été suffisantes pour empêcher des déboires (voir référence précitée).

Une série assez développée de mesures de retrait sur pâte pure, sur mortier et sur béton, en cas de conservation à l'air, à l'eau potable et à l'eau sulfatée (15 gr. SO^4 Mg par litre) a été effectuée. Elle part du même principe que l'étude précédente et se réfère aussi à un aspect technique de la question de la résistance des mortiers et bétons à l'eau marine plutôt qu'à un aspect chimique et théorique. Le retrait est

la cause principale des fissures dans les mortiers et bétons, aussi dans les bétons armés. Dans les éléments en béton armé, le retrait peut produire des fissures dans le béton tout le long des armatures (1).

Ce phénomène est particulièrement dangereux pour l'intégrité des ouvrages en béton armé exposés à l'action de l'eau de mer; il n'est pas nécessaire d'insister sur ce point.

Les essais ont indiqué que tous les bétons confectionnés au moyen des ciments I à IX produisent un léger gonflement en cas de conservation dans l'eau, légèrement supérieur dans l'eau sulfatée à ce qu'il est dans l'eau potable. Le plus grand gonflement correspond au ciment VII et est assez notable pour que l'on puisse presque parler d'expansion (0,25 mm. par mètre dans l'eau sulfatée à 1 an). La plupart des mortiers ont du retrait, sauf ceux des ciments VIII et surtout VII (2,15 mm. par mètre dans l'eau sulfatée, à 1 an, donc très expansif).

Donc, en général, le danger de retrait par fissuration n'existe pas pour les bétons immergés en permanence dans l'eau de mer et on peut admettre la même chose pour les bétons soumis au jeu de la marée. Par contre, les parties des ouvrages en dehors de l'eau sont exposées au retrait (moyenne 0,3 mm. par mètre pour la plupart des ciments, 0,5 mm. pour le IX, 0,1 mm. par mètre pour le VII). Le danger de fissuration du béton armé en élévation n'est pas négligeable, en raison de la grande activité corrosive de l'air marin sur l'acier et aussi de la possibilité de pénétration accidentelle de l'eau de mer dans les fissures lors des marées-tempêtes exceptionnelles. Nous pensons utile d'attirer spécialement l'attention des ingénieurs des services de constructions maritimes sur ces phénomènes de retrait et de fissuration et nous pensons que, le cas échéant, pour des fournitures importantes et des travaux délicats en béton armé, le contrôle du ciment au point de vue retrait ne serait pas dénué d'intérêt. Les essais sur cylindres de béton armé conservés des diverses manières qui ont été décrites, avec des recouvrements d'armatures de 1, 2, 3 et 5 cm., avaient précisément pour but d'observer la capacité de protection des armatures par le béton. Nous avons indiqué plus haut que, jusqu'à l'âge de 11 ans, toutes les armatures sont intactes. Ces résultats sont en contradiction

(1) Cfr. F. Campus : a) Effets élastiques d'inclusions hétérogènes dans un milieu subissant un retrait. 4th International Congress for applied mechanics, Cambridge, 1934.

b) Dégradation des pieux en béton armé par le battage. *Annales des Travaux Publics de Belgique*, février 1935.

c) Tensions produites dans le béton et le béton armé par suite des variations de volume. *Hormigón y Acero*, Madrid, 1935; *Revue Universelle des Mines*, Liège, janvier 1936.

avec ceux des essais britanniques de Sheerness (1). Des colonnes en béton armé de 5 pouces en carré sur 60 pouces de long, contenant des armatures couvertes de 1 ou 2 pouces de béton ont été immergées dans un réservoir en communication avec la mer. Après 5 ans, il y avait des fissures et des attaques d'armatures. Le rapport concluait à l'utilité d'un recouvrement des armatures par 2 pouces de béton (5 cm.) et à la nécessité d'un béton superficiellement très étanche. Nous ne pouvons expliquer la différence de comportement de nos éprouvettes; leur invariable bonne tenue jusqu'à 11 années nous surprend.

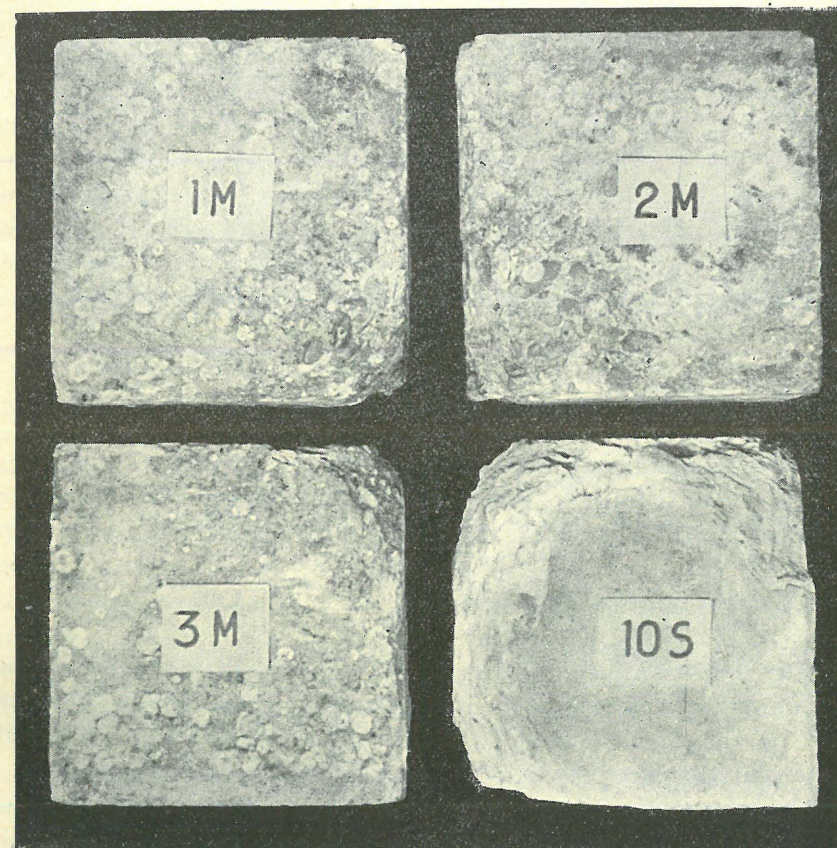


Photo 7. — Aspect de cubes de béton retirés de la mer (M) et de l'eau sulfatée (S) en octobre 1945.

(1) Cfr. F. Campus : Compte rendu de « Institution of Civil Engineers — Détérioration des constructions en bois, métal ou béton, exposées à l'action de l'eau de mer. Quinzième rapport du Comité spécial ». *Annales des Travaux Publics de Belgique*, juin 1936, pp. 483 et suivantes.

Peut-être que les colonnettes carrées de Sheerness se rapprochaient plus des conditions de la pratique que nos cylindres à vrai dire moulés à la perfection. Nous sommes d'avis sur ce point que les praticiens s'inspireront avec prudence des résultats moins favorables de Sheerness, tout en reconnaissant une fois de plus, d'après les résultats de nos propres essais, l'importance de loin prédominante du soin de l'exécution, qui constitue la règle d'or de tous les travaux en béton et en béton armé.

Investigations théoriques après 11 ans.

Les considérations précédentes peuvent paraître assez nettes et suffisantes pour la technique. Néanmoins, nous pensons qu'il est utile pour les ingénieurs d'être informés des causes des phénomènes et de fonder leurs applications sur des bases théoriques dans la mesure du possible. Il nous paraît donc opportun de tenter de tirer des essais importants entrepris à Ostende une contribution à la théorie de l'attaque des ciments par l'eau marine. Conformément à une suggestion qui nous avait été faite antérieurement (1) nous avons proposé à l'Administration des Ponts et Chaussées d'effectuer sur les éprouvettes de mortier prélevées en 1945 dans les divers milieux de conservation :

- une analyse chimique ;
- une mesure de densité et de compacité ;
- une mesure de la quantité d'eau d'interposition (non liée).

Les analyses chimiques ont été faites par les mêmes méthodes que pour les ciments frais, toutefois la détermination du CO_2 n'a pu être faite parce que la verrerie du laboratoire a été détruite par les bombardements et parce que, malgré tous nos efforts, nous n'avons pu encore obtenir en Belgique ou à l'étranger, depuis plus d'un an, l'appareillage nécessaire.

La densité apparente et la compacité ont été déterminées sur une demi-épreuve. Le volume a été déterminé à la balance hydrostatique. La densité a d'ailleurs été établie après dessiccation jusqu'à poids constant à 110°C à l'étuve.

Ces essais volumétriques et gravimétriques ne sont pas assez sensibles ; ils ne sont pas caractéristiques. Ils indiquent en général, un certain départ de matière, mais on ne peut rien en conclure quant à la tenue à la mer.

Les résultats des analyses chimiques sont reproduits ci-après dans

(1) V. Sevieri : *Bacini di prova per la resistenza chimica dei cementi all' acqua di mare. Il cemento armato. Le Industrie del Cemento*, n° 8, 1936, Milano.

les tableaux 10 (Pl. XIV). On y a ajouté pour les mortiers conservés à l'eau potable une analyse chimique *calculée* d'après l'analyse chimique initiale des ciments frais et le dosage des mortiers. Ce calcul, tout à fait conventionnel, est basé sur les hypothèses suivantes :

- 1° le sable et l'eau n'interviennent pas dans les éléments dosés ;
- 2° on admet 25 % d'eau fixée par tous les ciments, sauf le ciment-trass III, pour lequel l'eau fixée est admise à $\frac{2}{3} \times 25 = 16,67 \%$, le

trass étant supposé ne pas fixer d'eau. Ces suppositions, assez arbitraires, sont nécessaires parce que l'analyse des mortiers a été faite sur échantillons desséchés à l'étuve à 130°C jusqu'à poids constant, température au delà de laquelle il ne subsiste dans le ciment hydraté que l'eau *fixée* (1).

En dépit du caractère très précaire de ces hypothèses, le calcul comparatif a paru utile à titre de contrôle grossier, d'autant plus que, en raison des graves dégâts subis par nos laboratoires, nos conditions de travail en 1945 et 1946, pour une recherche aussi importante et délicate, étaient loin d'idéales. Grosso-modo, ce contrôle est satisfaisant ; il révèle quelques anomalies difficilement explicables à première vue. Nous n'en ferons pas ici la discussion ; nous nous bornerons actuellement à livrer ces résultats à la critique et à l'examen publics, meilleure voie nous semble-t-il pour en tirer tout ce qui est possible. Nous pensons d'ailleurs que cette recherche a surtout une signification préliminaire à des tentatives ultérieures mieux préparées.

Il semble ressortir de l'analyse chimique que la décomposition des ciments à la mer se fait principalement par élimination de Ca O , dans une moindre mesure de Si O_2 . La théorie de M. Maynard de l'élimination de la chaux par diffusion paraît la plus probable (2). Il apparaît clairement que les ciments contenant plus de 40 à 50 % de Ca O sont ceux qui perdent le plus de leurs constituants. L'action dissolvante de l'eau marine sur les calcaires et la chaux est bien connue.

Les réactions chimiques éventuelles accompagnant cette élimination ne peuvent être aisément déduites de nos essais. Observons cependant qu'il n'y a aucune commune mesure ni dans les résultats des analyses chimiques, ni dans les apparences des éprouvettes, entre l'action de l'eau marine et celle de la solution concentrée de $\text{SO}_4 \text{ Mg}$. Les actions

(1) Voir thèse précitée de M. R. Jacquemin.

(2) Cfr. H. Le Châtelier, *op. cit.*

expansives, dues à la formation de sulfo-aluminates ou ultimement de plâtre, d'argile et de magnésie (1), semblent bien se manifester dans les solutions au repos de sulfate de magnésie, mais pas dans la mer, où toutes les éprouvettes corrodées présentent des aspects caractéristiques d'érosion, non de gonflement, de crevassement ou de déformation. De même, la formation de la croûte imperméable, à laquelle H. Le Châtelier attribue un rôle important dans la décomposition des ciments à la mer (*op. cit.*) n'a pas été observée au cours d'aucun examen de nos éprouvettes, sous réserve de ce qui a été remarqué plus haut au sujet de la résistance à la flexion des éprouvettes non attaquées.

Il semble donc que les très nombreuses considérations théoriques sur l'attaque marine des ciments, qui ont fait l'objet de nombreuses publications, demandent une sérieuse coordination et mise au point, qui devrait s'inspirer surtout des observations faites *in situ*.

Nous pensons que la voie la plus indiquée pour de nouvelles recherches réside dans les études de dissolution des ciments frais et hydratés dans l'eau marine artificielle ou naturelle, voie déjà souvent suivie pour l'eau distillée. Les essais de filtration sous pression d'eau marine, éventuellement diluée, à travers des mortiers très maigres pourraient aussi, après mise au point convenable, être examinés d'une manière plus approfondie.

Mais il ne s'agit là, répétons le, que de l'aspect chimique du problème, qui n'est pas le seul ni le plus important. Les analyses indiquées ci-dessus confirment entièrement la conclusion déduite des essais mécaniques qu'il est convenable de limiter à une proportion comprise entre 40 et 50 %, en moyenne 45 %, la quantité de Ca O du ciment, sans addition pouzzolanique éventuelle.

Cette prescription ne permettra aucune dérogation aux bonnes règles de mise en œuvre des mortiers et des bétons à la mer énumérées au cours de cet exposé.

Les recherches entreprises sous les auspices de l'Administration des Ponts et Chaussées de Belgique, qui ne sont pas terminées, nous paraissent d'ores et déjà avoir fait faire à la connaissance de la question des progrès importants par rapport aux conclusions du 15^e Congrès international de navigation à Venise en 1931.

(1) Cfr. Eitel, *op. cit.*

G. Batta et E. Leclerc : *Chimie des Matériaux techniques*, 1944.

NOTE ANNEXE.

Quelques remarques sur l'analyse chimique des mortiers.

A. — Pour le calcul de comparaison, effectué à partir de l'analyse chimique des ciments frais, nous avons admis :

1° que tout l'insoluble provient du sable;

2° qu'il n'y a pas de dissolution du ciment dans l'eau potable ni aucune fixation de substances étrangères autre que du CO².

Ces hypothèses sont très approximativement vérifiées, sauf pour les ciments III et X, qui contenaient à l'état frais une proportion notable d'insoluble due au trass et comprise dans la teneur en Si O² de l'analyse du ciment frais. C'est la raison pour laquelle la quantité de silice dosée pour les mortiers de ces ciments est notablement moindre que celle calculée, parce qu'une partie de la silice du liant est comprise dans l'insoluble. Le calcul de comparaison a donc peu de signification pour ces deux ciments. Pour les autres ciments, si l'on exprime pour les mortiers conservés à l'eau potable les proportions d'insoluble en % de la somme des matières dosées par l'analyse, c'est-à-dire : insoluble + Si O² + R² O³ + Ca O + SO³, on trouve les résultats suivants, qui peuvent être comparés aux quantités de sable qui ont servi à la confection des mortiers.

Dosages à 300 kg.

$$\text{Quantité d'insoluble théorique : } \frac{1500}{1500 + 300} \times 100 = 83,33 \%$$

Quantités trouvées par l'analyse des mortiers conservés dans l'eau potable :

Mortier :	11	21	41	51	61	71	81	91
Insoluble :	82,61	83,30	83,18	83,43	82,65	84,18	82,60	83,57
Moyenne pour les 8 mortiers :	83,19 %							
Ecart de la moyenne :	0,14 %							
Ecart maximum :	0,85 % (mortier 71).							

Dosages à 450 kg.

$$\text{Quantité d'insoluble théorique : } \frac{1500}{1500 + 450} \times 100 = 76,92 \%$$

Quantités trouvées par l'analyse :

Mortier :	12	22	42	52	62	72	82	92
Insoluble :	76,21	76,24	77,57	76,40	76,72	77,20	76,26	77,16
Moyenne pour les 8 mortiers :	76,78 %							
Ecart de la moyenne :	0,20 %							
Ecart maximum :	0,71 % (mortier 12).							

Dosages à 600 kg.

$$\text{Quantité théorique d'insoluble : } \frac{1500}{1500 \times 600} \times 100 = 71,42 \%$$

Quantités trouvées par l'analyse :

Mortier :	13	23	43	53	63	73	83	93
Insoluble :	71,90	71,98	72,12	71,67	72,22	72,04	71,29	71,13
Moyenne pour les 8 mortiers :	71,79 %							
Ecart de la moyenne :	0,37 %							
Ecart maximum :	0,80 (mortier 63).							

Les écarts, de sens variable, sont imputables à de petites erreurs de pesée ou à de petites irrégularités de mélange lors de la confection des éprouvettes, également aux erreurs de l'analyse chimique. Mais leur importance très modérée constitue une vérification globale de la précision satisfaisante de l'ensemble des opérations depuis la confection des mortiers jusqu'à leur analyse chimique après 11 années de conservation. Les faibles valeurs de ces écarts montrent aussi que les effets d'une dissolution éventuelle du ciment dans l'eau potable ou d'une fixation de substance étrangère autre que du CO² sont entièrement masqués par les effets de ces erreurs et sont donc négligeables.

B. — En supposant nulle la fixation de CO², la proportion d'eau fixée par le ciment, en % du poids du ciment anhydre, s'exprime par

$$\frac{p}{100 - i - p} \times 100 \quad (1)$$

p étant la perte au feu en % ;
i l'insoluble en %.

On pourrait appliquer cette formule au cas de la conservation dans l'eau potable par exemple. En fait, cette formule donne, en % du poids du ciment, le total de l'eau et du CO² fixés. La quantité de CO² fixé paraît devoir être variable d'un échantillon à l'autre. Un point qui rend l'emploi de cette formule délicat est qu'il y a certainement eu fixation de CO² au cours des opérations d'analyse, notamment pendant la dessiccation des échantillons, qui a eu lieu dans une étuve ventilée située dans une atmosphère chargée de CO² (brûleurs sans cheminée). Dans ces conditions, le dosage du CO² constitue une correction nécessaire à la perte au feu plutôt qu'un élément caractéristique de l'analyse chimique.

Par ailleurs, le principe de la formule (1) doit être considéré comme satisfaisant, car l'insoluble et la perte au feu sont deux éléments relativement simples à déterminer par l'analyse chimique et dont la précision peut être convenable.

On améliorerait la formule en corrigeant la perte au feu de la teneur en CO², exprimée par *a* en %. La proportion d'eau en % du poids du ciment anhydre fixée par ce dernier s'exprimerait alors par

$$\frac{p - a}{100 - i - p} \times 100 \quad (2)$$

Ainsi qu'il a été indiqué, la teneur en CO² n'a pas été déterminée jusqu'à présent et la quantité d'eau fixée par le ciment n'a pas été calculée pour chaque mortier. Nous avons, comme il a été signalé, adopté une valeur commune pour tous les ciments, sauf le III, qui a donné des résultats suffisants eu égard aux réserves majeures énoncées à ce calcul de comparaison. Comme, en toute hypothèse, les quantités calculées seraient restées proportionnelles, il est clair que la concordance avec les résultats des analyses réelles ne pouvait être améliorée sensiblement.

Une autre méthode peut être suivie pour déterminer la quantité d'eau fixée en poids du ciment anhydre, basée sur la seule détermination de l'insoluble. Tous les mortiers contiennent 1.500 kg. de sable et C kg. de ciment sec. En négligeant le CO² et en supposant toujours que le sable soit entièrement et seul insoluble (ce qui exclut le cas des ciments III et X), la quantité d'eau fixée est

$$100 \left[\frac{1500}{C} \left(\frac{1 - i}{i} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

Pour le mortier 11 P, la formule (1) donne 29,6 % ; la formule (3) 36,5 %. On doit en déduire que le résultat est faussé par le CO² ; les deux valeurs obtenues sont excessives. Pour le mortier 13 P, la formule (1) donne 24,3 %, la formule (3) 24,5 %. La concordance est bonne dans ce cas ; il y a apparemment peu de carbonatation de ce mortier.

Par la formule (2), on pourrait déterminer la proportion d'eau fixée par le ciment anhydre pour les divers modes de conservation.

C. — Dans le cas d'attaque du mortier par l'immersion marine, en admettant toujours que tout l'insoluble provienne du sable et qu'il n'y ait aucune perte de substance par diffusion dans le cas de conservation dans l'eau potable, ni aucune fixation de substance par carbonatation ou autre modification chimique, aussi bien dans la mer que dans l'eau potable, la proportion en % de *ciment hydraté* dissoute par l'eau de mer est

$$\frac{100}{im} \left(\frac{im - ip}{100 - ip} \right) 100 \quad (4)$$

im étant en % l'insoluble en cas d'immersion marine ;
ip idem dans l'eau potable.

Le tableau 11 (Pl. XV) indique les résultats d'application de cette formule d'après les analyses chimiques. Pour déterminer la proportion en % de *ciment anhydre* dissoute, qui est plus caractéristique, il faut tenir compte de la perte au feu. On obtient ainsi la formule

$$\frac{im (100 - p_p) - ip (100 - p_m)}{im (100 - ip - p_p)} \times 100 \quad (5)$$

p_m et p_p étant les pertes au feu en % en cas d'immersion marine ou dans l'eau potable.

Les résultats des formules (4) et (5) sont soumis à l'influence de la fixation de CO_2 et d'autres éléments, qui peut être importante dans certains cas. Elles ont de plus l'inconvénient de porter tout le poids des erreurs de l'analyse sur la différence $100 - i_p$. Elles ne sont pas applicables aux ciments contenant de l'insoluble, tels III et X.

L'examen fait sous A permet de se faire une idée de la valeur à accorder aux résultats des formules (4) et (5). On ne pourra conclure qu'il y a eu dissolution du ciment dans l'eau de mer que quand la différence entre i_m et i_p sera supérieure à 1 % environ. Il en résulte que le résultat donné par l'une ou l'autre formule doit être supérieur à environ 5 %.

Monsieur le Chef de travaux R. Jacquemin, docteur en sciences appliquées, nous a fait remarquer que l'on obtient plus de régularité et des résultats plus vraisemblables en répartissant l'erreur d'analyse avec un poids égal sur tous les éléments dosés, ce qui s'obtient en introduisant dans la formule (5) au lieu de $(i_m + p_m)$ la quantité i'_m d'insoluble rapportée à la somme des éléments secs dosés par l'analyse dans le cas d'immersion marine; et au lieu de $i_p + p_p$, i'_p , quantité d'insoluble calculée de la même manière en cas de conservation dans l'eau potable. On élimine de cette manière l'effet du CO_2 fixé et de toutes autres fixations que celles de Ca O et SO_3 dans l'immersion marine. Le phénomène principal étant une dissolution du ciment, une fixation de Ca O est improbable en mer; les fixations de SO_3 ne peuvent être très importantes, c'est ce qui ressort d'ailleurs en général des analyses.

La proportion en poids de *ciment anhydre* dissoute s'écrit alors

$$\frac{100}{i'_m} \left(\frac{i'_m - i'_p}{100 - i'_p} \right) 100 \% \quad (6)$$

Le tableau 12 (Pl. XV) reproduit les résultats de l'application de la formule (6) aux analyses chimiques des divers mortiers. Sous les réserves générales énoncées à la validité de ces formules, notamment de ce qu'elles ne sont pas convenables pour les ciments III et X contenant du

trass, les mortiers les plus attaqués sont ceux dosés à 300 kg. (21, 41, 51, 61), certains à 450 kg. (12, 22, 52), certains aussi à 600 kg. (13, 23). Certains ciments paraissent vraiment chimiquement indécomposables, surtout le VIII, puis le VII et le IX. Ce dernier, sous réserve de l'exactitude des analyses, indique une variation anormale de la proportion de ciment dissoute en fonction du dosage. Elle croît avec le dosage, alors que c'est en général l'inverse pour tous les autres ciments. L'indécomposabilité chimique ou la susceptibilité chimique sont en somme exprimées de la manière la plus caractéristique par le tableau 12. Si on le compare au tableau 9, les observations faites sur la complexité des facteurs de l'action marine sur les conglomérats à base de liants hydrauliques, parmi lesquels l'action chimique n'est qu'un élément, nullement prédominant dans un sens ou l'autre, prennent leur vraie valeur. Et il n'est pas douteux que les critères mécaniques sont pratiquement supérieurs, aux critères purement chimiques.

D. — Nous pouvons en conclure que l'analyse chimique complète n'est pas nécessaire dans tous les cas. Elle est surtout utile pour vérifier les hypothèses qui sont à la base des calculs ci-dessus, pour des contrôles approfondis et dans les cas où les ciments ont une proportion notable d'insoluble (tels III et X), enfin pour l'application de la formule (6).

Le plus souvent, eu égard au fait que le critère chimique n'est pas seul déterminant, on pourra se borner à des analyses chimiques réduites à la détermination de l'insoluble et de la perte au feu. Si l'on veut plus de précision, on déterminera le CO_2 pour la correction de la perte au feu.

Les déterminations de l'insoluble et de la perte au feu présentent le moins de difficultés et le plus de garanties, surtout pour des essais effectués en série. Selon A, on a un contrôle facile de l'insoluble, ou bien l'on peut se rendre compte si le ciment en contient de notables proportions. Les autres analyses sont plus délicates et moins sûres.

E. — Ces remarques ne concernent pas l'analyse chimique des ciments frais, qui est toujours recommandable pour les emplois à la mer, notamment en vue du contrôle de la teneur en Ca O, qui doit être aussi faible que possible, et de l'insoluble, afin de déterminer s'il y a eu des additions susceptibles de réduire la teneur en Ca O, ce qui ne donne aucune garantie, ainsi qu'il a été montré.

F. — A l'initiative de Monsieur Jacquemin et selon l'esprit des remarques précédentes, les résultats des analyses chimiques des mortiers âgés de 11 ans ont été mis dans le tableau 13 (Pl. XVI) sous une forme directement comparable sans impression erronée, en rapportant toutes

les analyses à la quantité nominale connue de sable considérée comme constituant la totalité de l'insoluble. Cela est licite pour les ciments autres que les n^{os} III et X, contenant du trass. En raison des discordances signalées sous A, le total des éléments analysés n'égale pas exactement 100 %. Pour les ciments III et X, l'insoluble envisagé comme terme constant a été fixé d'après l'analyse des mortiers conservés dans l'eau potable et en considérant le mélange de sable et des éléments dosés du ciment comme formant 100 %. Ces derniers résultats ne sont donnés qu'à titre de comparaison. De même, à titre de contrôle, pour les ciments ne contenant pas de trass (autre que III et X) et conservés dans l'eau potable, nous avons ajouté les résultats des analyses calculées à partir des analyses des ciments frais (1934) sur la base des proportions nominales de sable (insoluble) et de ciment, telles qu'elles sont considérées sous A. Le calcul comparatif ainsi effectué n'est pas affecté, comme dans les tableaux 10 par l'hypothèse faite sur la quantité d'eau fixée par les ciments.

Le tableau 13 montre une concordance généralement assez satisfaisante entre les résultats calculés et les analyses réellement effectuées sur les mortiers conservés dans l'eau potable. Cependant, il y a quelques discordances systématiques, au sujet notamment de la teneur en chaux des ciments contenant du laitier. Ces résultats ont probablement été faussés par la présence du manganèse. Ce tableau montre nettement que l'action chimique de la conservation marine diffère de celle de l'eau sulfatée à 15 grammes par litre de SO⁴ Mg et que, pour la majorité des éléments dosés, il y a diminution en cas de conservation marine. Quelques résultats semblent dénoter un léger accroissement de Si O², de R² O³, même de Ca O dans la conservation marine. Ces différences quelquefois insignifiantes ne peuvent s'expliquer que par des erreurs d'expérience ou de détermination. En ce qui concerne le SO³, il y a généralement augmentation en cas de conservation marine, en règle générale moindre que dans l'eau sulfatée et assez faible en valeur absolue. Dans le cas du ciment VII (sursulfaté), riche en sulfate, il y a toujours diminution.

Dans l'ensemble, il semble permis de conclure à une dissolution générale de la chaux, de la silice et des oxydes des ciments par l'action marine, encore que en proportions inégales, et à une fixation peu considérable seulement de SO³. Ceci précise les points de vue exposés précédemment.

Il en résulte aussi que les analyses chimiques sont assez aléatoires et ne constituent pas des critères pratiques pour caractériser la résistance des ciments à l'action de l'eau de mer.

G. — Certaines des remarques précédents doivent encore recevoir des corrections numériques, peu importantes pour la plupart des ciments, mais cependant appréciables pour certains. Elles proviennent de la perte au feu des ciments frais, que nous admettrons consister uniquement en humidité, et de la teneur en Mg O, qui n'a pas été déterminée pour les mortiers après 11 ans. Il en résulte que, dans la remarque A, les quantités de 300, 450 et 600 kg. de ciment frais doivent être réduites en conséquence, ce qui donne les résultats modifiés suivants :

Quantités d'insoluble théoriques (calculées).

Mortier	11	21	41	51	61	71	81	91
Insoluble	83,80	84,20	84,15	83,95	84,30	85,00	83,45	84,35
Mortier	12	22	42	52	62	72	82	92
Insoluble	77,60	78,00	77,95	77,80	78,10	79,10	77,10	78,20
Mortier	13	23	43	53	63	73	83	93
Insoluble	72,20	72,60	72,55	72,40	72,80	74,00	71,60	72,90

Écarts par rapport aux analyses directes.

Mortier	11	21	41	51	61	71	81	91
Ecart %	1,42	1,07	1,15	0,62	1,96	0,965	1,02	0,925
Mortier	12	22	42	52	62	72	82	92
Ecart %	1,79	2,26	0,49	1,80	1,77	2,40	1,09	1,33
Mortier	13	23	43	53	63	73	83	93
Ecart %	0,42	0,85	0,59	1,01	0,80	2,65	0,43	2,43

Les écarts sont sensiblement majorés par rapport à A, mais restent modérés. Les formules (1) et (2) se rapportent au ciment anhydre. Si l'on voulait les rapporter au ciment frais, il faudrait les corriger comme suit pour tenir compte de la perte au feu p_f du ciment frais :

$$\left(\frac{p}{100 - i - p} - \frac{p_f}{100 - p_f} \right) 100 \quad (1')$$

$$\left(\frac{p - a}{100 - i - p} - \frac{p_f}{100 - p_f} \right) 100 \quad (2')$$

Par contre, la formule (3) se rapporte au ciment frais et devrait être corrigée comme suit pour être relative au ciment anhydre :

$$100 \left(\frac{100}{100 - p_f} \times \frac{1500}{C} \times \frac{1 - i}{i} - 1 \right) \quad (3')$$

Les formules (4) et (5) sont inchangées et n'appellent aucune nouvelle observation. La formule (6) est par contre affectée d'une faible erreur systématique provenant de la magnésie non dosée dans les mortiers. Elle serait exacte si la magnésie était dissoute dans l'eau de mer dans la même proportion moyenne que les autres éléments. En fait, l'erreur doit être insignifiante. Le tableau 11 n'est donc pas affecté, tandis que les chiffres du tableau 12 sont légèrement influencés.

Les chiffres du tableau 13 sont affectés dans la même mesure que ceux de la remarque A. Cependant ces causes d'erreurs qui s'ajoutent à celles des inexactitudes d'analyses n'ont d'influence que sur les valeurs absolues des résultats, mais ceux-ci restent cependant comparables d'un milieu de conservation à l'autre, puisque chaque élément dosé est ramené à la même quantité d'insoluble. Ils se sont plus exactement comparables d'un ciment à l'autre car il faudrait tout ramener, comme dans la remarque A, à 1.500 kg. de sable pour tous les mortiers, seul élément fixe. Les chiffres de comparaison calculés d'après les analyses des ciments frais ont été corrigés pour tenir compte de la perte au feu et de la teneur en Mg O des ciments frais.

Ces diverses corrections sont *relativement* peu importantes et ne changent rien aux conclusions; nous ne les signalons que par acquit de conscience.

SAMENVATTING :

*Proeven aangaande
de weerstand van mortels en beton tegen zeeewater.*

*Samengestelde resultaten van proeven
uitgevoerd sinds 1934 tot 1945.*

Een eerste verslag over de in 1934, op initiatief van het Bestuur van Bruggen en Wegen ondernomen proeven verscheen in het Juni-nummer 1945 van het Tijdschrift der Openbare Werken van België, van de hand van de HH. F. Campus, R. Dantinne, E. Verschoore, J. Dooms en J. Verschave. Deze mededeling wordt thans aangevuld door de resultaten verkregen op de proefstukken die in October 1945, d.i. dus na 11 jaar onderdompeling, uit het water werden gehaald. Zij zijn samengevat in de tabellen 2-3-4-5-6-7 en 8 (Platen XI t.e.m. XIII). Tabel 9 (Plaat XIII) geeft, na deze 11 jaar, de verhoudingen tussen de weerstanden van de proefstukken die in zee, en deze van de proefstukken die in drinkbaar water werden bewaard.

De mortels met de grootste compactiteit (dit zijn deze met 600 kg. cement per m³ zand) hebben het best weerstand geboden. De betonmonsters (met 350 kg. cement per m³) hebben zich beter gehouden dan de mortels. De meest aangetaste, eventueel vernielde proefstukken zijn deze waarvan het cement het hoogste CaO-gehalte bezit. De door zee-water aangetaste proefstukken vertonen een gans ander uitzicht dan deze die werden bewaard in gesulfateerd water met een concentratie van 15 gr. per liter en die door deze oplossing werden gecorrodeerd.

Het grootste deel der aan de zeewerking onderworpen proefstukken bevond zich op halftijhoogte en komt bij iedere tij bloot te liggen. De doorlopend beneden laagtij ondergedompelde proefstukken zijn onaangetast gebleven.

De proeven voeren tot een wel bepaalde rangschikking in de gamma der aangewende cementsoorten :

- a) de cementsoorten rijk aan kalk (meer dan 60 % CaO) worden het sterkst aangetast, zelfs onder toevoeging van tras;*
- b) de cementsoorten met een gemiddeld kalkgehalte (meer dan 50 % CaO) bieden geringe weerstand;*
- c) de cementsoorten die het minst rijk zijn aan kalk (minder dan 50 % CaO en liefst minder dan 40 %) weerstaan het best.*

De alteratie van mortels en beton onder de inwerking van zeewater is niet uitsluitend van chemischen aard. De mechanische inwerkingen van het zeewater (golven, stromingen, alluviale materialen), die zich over de totale hoogte van het tijverschil laten voelen, alsmede de atmosferische invloeden, spelen samen met de chemische een niet onaanzienlijke rol. De proefstukken die voornamelijk aan deze laatste blootstonden (deze welke zich op de bodem zelf bevonden) zijn onaangetast gebleven.

De chemische analyse van de mortels, na 11 jaar onderdompeling in zeewater, vergeleken met deze van de mortels die in drinkbaar en in gesulfateerd water werden bewaard, wijst ten andere nog op een particuliere zee-actie welke zich, in volledige overeenstemming met de theorie van Maynard, veropenbaart door een oplossing van de kalk, gepaard gaande met een oplossing, in veranderlijke verhoudingen, van de andere elementen. De verrijking aan SO²⁻-ions is gering, soms zelfs negatief.

De interpretatie van de chemische analyses van een proef op grote schaal geeft aanleiding tot enkele moeilijkheden en onzekerheden. Over het geheel stemt zij trouwens overeen met de resultaten van de mechanische proeven, die het gemakkelijkste en het meest doeltreffende middel vormen om na te gaan hoe de verschillende cementsoorten zich ten opzichte van het zeewater gedragen.

De tabellen 10 t.e.m. 13 (Platen XIV t.e.m. XVI) hebben betrekking op de chemische analyses en op hun interpretatie.

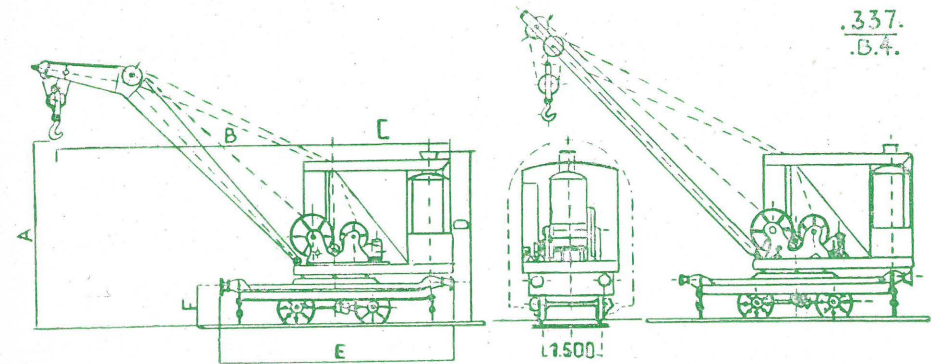
Een integrale Nederlandse versie van de verhandeling verscheen in de nummers 27 en 31 van het tijdschrift De Ingenieur van 4 Juli en van 1 Augustus 1947, onder de titel: « Proeven betreffende de ontbinding van mortels en beton in zeewater sinds 1934 uitgevoerd in de voorhaven van Oostende. »

Mécanique et Chaudronnerie de Bouffioulx

ANCIENNEMENT
LA BIESME

BOUFFIOULX
(BELGIQUE)

SES GRUES A VAPEUR



CARACTERISTIQUES PRINCIPALES	Type 643 6 T. à 5 m.	Type 1243 12 T. à 4 m.
Câbles de levage	2 brins	3 brins
Vitesses par minute : levage	18 m 000	12 m 000
» » translation	100 m 000	80 m 000
» » giration	3 tours env.	3 tours env.
Poids sans lest	24000 kgs	30000 kgs
Poids du lest, environ	7500 kgs	8500 kgs
Machine : diam. cylindres	180 mm	200 mm
» : course piston	250 mm	300 mm
Chaudière : timbre	10 kgs	10 kgs
» : surface de chauffe	8 m ²	10 m ²
Longueur du châssis	6 m 220	6 m 550
Remorque en palier droit	80 T. env.	120 T. env.

Les charges que peuvent lever ces grues pour des portées différentes sont indiquées au client pour chaque cas. Elles dépendent de la longueur de la flèche et de la variation de portée désirées. La construction de nos grues est prévue pour le placement facile d'un second tambour, lequel permet l'utilisation des grappins à 2 ou 4 câbles.

Nous construisons aussi les grues à vapeur pour charge de 16 Tonnes et plus.
Nous consulter pour les cas particuliers.