RAPPORT D'ENSEMBLE RELATIF AUX ESSAIS ET OBSERVATIONS EFFECTUES SUR DES EPROUVETTES DE MORTIERS ET DE BETONS PENDANT UNE DUREE DE TRENTE ANS (1934-1964), DONT UN GRAND NOMBRE ONT ETE IMMERGEES EN PERMANENCE DANS LA MER DU NORD A OSTENDE

(1ère suite) *

Rédigé par

Ferdinand CAMPUS

Professeur émérite, Recteur honoraire, Fondateur des Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège

Chapitre XI — PRELEVEMENTS DU 1er SEPTEMBRE 1938 (après 47 mois d'immersion)

1. — Opérations

Conformément au programme, après 47 mois d'immersion, trois séries complètes d'éprouvettes ont été retirées des trois milieux d'immersion le 1er septembre 1938. Ce jour a été choisi en raison de l'heure de la mer basse à Ostende, où les opérations, effectuées de la même manière que lors des prélèvements précédents, ont été dirigées par M.M. Campus, Dantinne et Jacquemin, en présence de M. Boehme, conducteur des Ponts et Chaussées. On a retiré de la mer les caisses IV, IV', 4, 16 et 17.

Les éprouvettes retirées de la mer étaient couvertes d'organismes marins. Elles ont été raclées, lavées, marquées, emballées et expédiées le jour même au laboratoire dans un container. Dès leur arrivée le lendemain, elles ont été immergées pendant 24 heures dans de l'eau potable et soumises aux essais mécaniques le 3 septembre, en même temps que les éprouvettes immergées dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée.

A l'occasion de ce dernier prélèvement, les bacs d'immersion, contenant les 3 séries restantes d'éprouvettes, ont été transportés dans les nouveaux locaux des Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale, dans le nouvel Institut du Génie Civil, 139, quai de Rome, à Liège. Ils ont été déposés dans le local conditionné de conservation des bétons.

* Pour le début, voir fasc. 1-1967 des *A.T.P. de Belgique,* p. 7.

2. — Résultats des essais mécaniques

A) Mortiers

Ciment 1.

11 M	28.1-129	12 M	51.9-291	13 M	81.5-549
11 S	—	12 S	—	13 S	74.8-421
11 P	41.3-263	12 P	62.9-552	13 P	89.3-733

Ciment 2.

21 M	32.8-116	22 M	61 -364	23 M	85.1-540
21 S	—	22 S	17.9-273	23 S	93.8-520
21 P	45.6-270	22 P	64.6-543	23 P	90.1-740

Ciment 3.

31 M *	22.9-130	32 M	57 -247	33 M	66.7-345
31 S	20.7-126	32 S	40.7-379	33 S	81.6-595
31 P	46.4-227	32 P	62.5-410	33 P	72.9-605

Ciment 4.

41 M	54 -220	42 M	76.3-403	43 M	89.6-517
41 S	—	42 S	26.7-272	43 S	98.8-641
41 P	47.2-245	42 P	69 -456	43 P	83.1-651

Ciment 5.

51 M	64.1-229	52 M	86.9-380	53 M	105.7-546
51 S	63.1-241	52 S	89.4-445	53 S	109.2-604
51 P	51.1-230	52 P	70.7-499	53 P	82.8-609

Ciment 6.

61 M	60.2-192	62 M	77 -360	63 M	106.1-503
61 S	57 -240	62 S	74.2-437	63 S	95 -579
61 P	45.4-222	62 P	63.1-427	63 P	73.7-581

Ciment 7.

71 M	79.7-322	72 M	104.9-498	73 M	112.7-644
71 S	78.7-540	72 S	102 -671	73 S	116.8-808
71 P	70 -437	72 P	85 -695	73 P	97.5-782

Ciment 8.

81 M	51.8-389	82 M	58.5-586	83 M	67 -756
81 S	56 -469	82 S	73.3-696	83 S	87.8-898
81 P	52.9-452	82 P	71.8-711	83 P	89.2-911

Ciment 9.

91 M	74.5-319	92 M	89 -469	93 M	103.7-578
91 S	63.3-259	92 S	82.6-509	93 S	108.2-655
91 P	55.2-225	92 P	71.2-508	93 P	86.5-623

* Moyenne de 3 éprouvettes seulement.

Ciment 10.

101 M	47.7-159	102 M	78.4-337	103 M	95.3-410
101 S	48.7-174	102 S	82.9-312	103 S	86.6-435
101 P	49.1-203	102 P	73.4-390	103 P	78.1-439

B) Bétons

1 M	473	1 S	534	1 P	611
2 M	491	2 S	622	2 P	674
3 M	430	3 S	462	3 P	515
4 M	538	4 S	538	4 P	590
5 M	531	5 S	511	5 P	508
6 M	499	6 S	463	6 P	493
7 M	716	7 S	666	7 P	621
8 M	769	8 S	659	8 P	671
9 M	580	9 S	561	9 P	533
		10 S	217	10 P	532

3. — Constatations et commentaires

Certaines des éprouvettes de mortier retirées de la mer commencent à montrer des traces d'altération visibles; il s'agit des ciments 1, 2, 3 et 10.

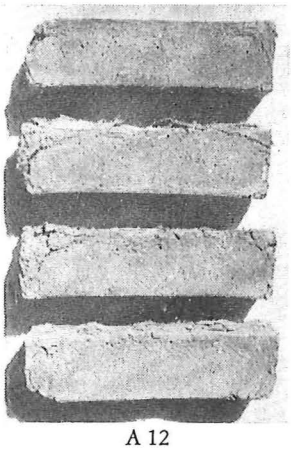
Les éprouvettes 11 M, 12 M et même 13 M présentaient de légères dégradations des faces latérales et des arêtes. Les résistances à la flexion diffèrent cependant peu de celles obtenues en 1936. Par contre, les résistances à la compression sont moindres, ce qui est dû sans doute aux déformations des surfaces en contact avec les plateaux de la presse, qui ont une grande influence sur les résultats de l'essai de compression.

Les éprouvettes 21 M, 22 M et 23 M donnent lieu aux mêmes remarques dans une moindre mesure.

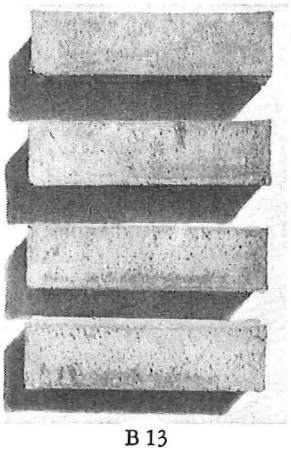
Par contre, les éprouvettes 31 M, 32 M et 33 M sont plus affectées. La dégradation est plus profonde, les arêtes sont plus émoussées, surtout pour les éprouvettes 31 M, dont la résistance à la flexion est diminuée d'environ 40 % par rapport aux essais de 1936. Une des quatre éprouvettes s'est d'ailleurs brisée aussitôt après retrait de la mer, lors du nettoyage opéré cependant avec précaution. Les photos J, K et L de la planche 44 représentent des éprouvettes 31, 32 et 33 retirées de la mer.

Les éprouvettes de mortier 101 M montraient une légère dégradation des arêtes. Les résistances à la flexion et à la compression étaient d'ailleurs quelque peu diminuées par rapport à 1936. A la planche 44, les photos M, N et O représentent des éprouvettes 101, 102 et 103 retirées de la mer.

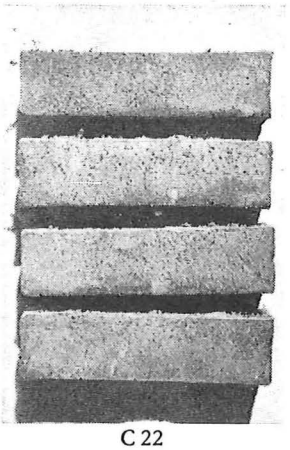
On constate donc que pour les ciments 1, 2, 3 et 10, l'effet des « *incrustations conservatrices* » de Vicat va en s'atténuant à la longue, ce qui correspond bien aux



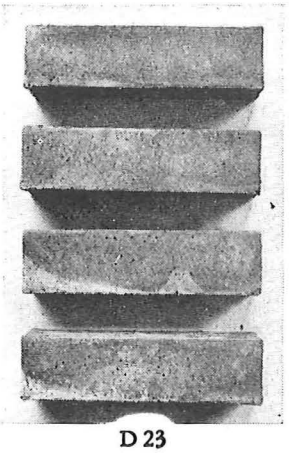
A 12



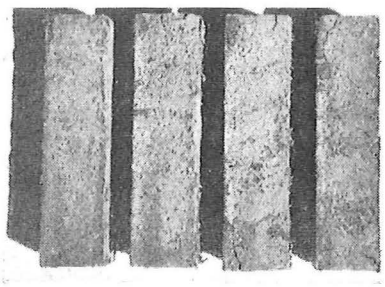
B 13



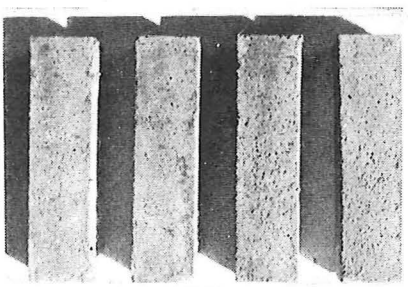
C 22



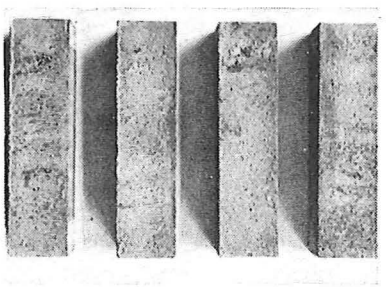
D 23



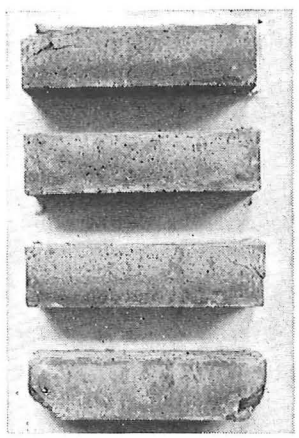
E 31



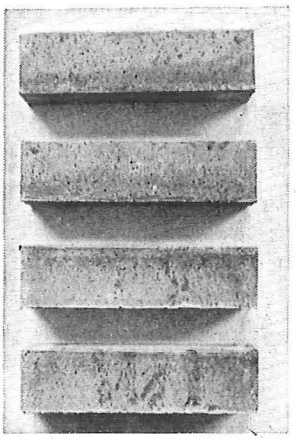
F 32



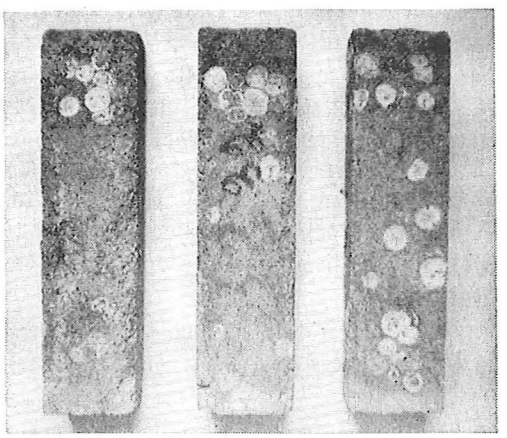
G 33



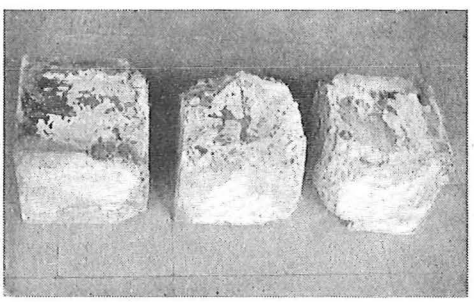
H 42



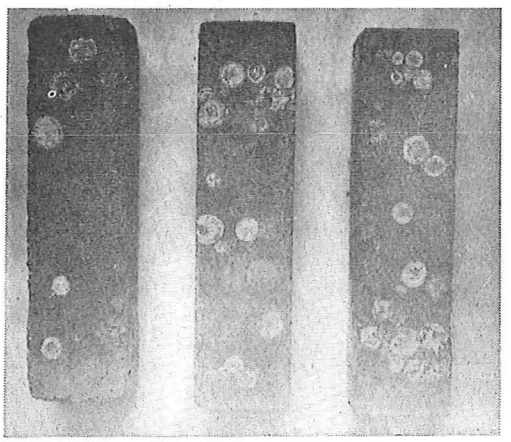
I 43



J 31 K 32 L 33



P 10



M 101 N 102 O 103

Planche 44.

remarques de H. Le Châtelier évoquées au Ch. IX, par. 3, concernant le fait que pour les ciments qui ne résistent pas à l'action marine, les croûtes superficielles ne constituent qu'une phase de la décomposition.

Pour les mortiers des ciments 4, 5, 6, 7, 8 et 9 cependant, les résistances à la flexion des éprouvettes retirées de la mer sont toutes supérieures à celles des éprouvettes conservées dans l'eau potable. Les incrustations marines augmentent donc leur cohésion superficielle. Mais elles doivent en même temps altérer la planéité des faces des éprouvettes, car leurs résistances à la compression sont toujours inférieures à celles des éprouvettes conservées dans l'eau potable.

On n'a pas constaté de dégradations visibles aux cubes de béton, mais on remarque une diminution des résistances à la compression des cubes retirés de la mer par rapport à ceux conservés dans l'eau potable, pour les ciments 1, 2, 3 et dans une moindre mesure pour 4. Ce doit être l'indice d'une altération superficielle, qui agit sur les conditions de contact entre les faces des cubes et les plateaux de la presse, indice très sensible et qui révèle d'autant plus sûrement un commencement de dégradation que, pour les autres ciments 5 à 9, la résistance à la compression des cubes retirés de la mer est supérieure à celle des cubes conservés dans l'eau potable.

Les résistances des éprouvettes de mortier et de béton conservées dans l'eau potable n'ont guère augmenté depuis 1936. Dans certaines séries, on constate même une légère régression sur la moyenne. Jusqu'à plus ample information, il faut admettre que c'est accidentel et dans les limites de la dispersion.

Pour la conservation dans l'eau sulfatée, certaines dégradations constatées en 1936 se sont amplifiées.

Les éprouvettes 11 S, 21 S et 41 S se sont transformées en une bouillie molle accumulée sur le fond du bac de conservation. Les éprouvettes 31 S (photo E, pl. 44) sont fortement attaquées, avec expansion et début de désagrégation des extrémités. Les éprouvettes 101 S ne présentent pas de signes visibles d'attaque, mais les résistances ont légèrement rétrogradé par rapport à 1936.

Les éprouvettes 12 S (photo A, pl. 44) sont à ce point détruites que les essais mécaniques sont rendus impossibles. Les éprouvettes 22 S et 42 S (photos C et H, pl. 44) sont très attaquées et leurs résistances fortement diminuées. Les éprouvettes 32 S (photo F, pl. 44) sont gonflées aux sommets et ont subi une diminution de résistance.

Les éprouvettes 13 S (photo B, pl. 44) montrent un début d'attaque aux coins, leurs résistances sont notablement diminuées, surtout à la compression. Les éprouvettes 23 S (photo D, pl. 44) sont également déformées aux coins. La résistance à la compression est relativement moins diminuée que celle de 13 S. La résistance à la flexion est même augmentée, ce qui est aussi le cas de 43 S (pl. 44, photos D et I). Il semble qu'il puisse donc aussi dans l'eau sulfatée se produire un stade de renforcement superficiel des ciments attaqués, comme dans la mer. Les déformations superficielles concomitantes réduisent plus ou moins fortement les résultats de l'essai de compression.

Les éprouvettes 33 S (photo G, pl. 44) et 103 S ne montrent aucun signe d'altération.

Il en est de même des éprouvettes de mortier des ciments 5, 6, 7, 8 et 9, dont les résistances sont généralement accrues.

Les cubes des bétons 1 et 2 conservés dans l'eau sulfatée sont légèrement attaqués en certains points des arêtes. Les cubes du béton n° 10 (pl. 44, photo P) sont très fortement dégradés, surtout aux arêtes et aux coins de la face lissée. La perte de poids moyenne sur les 3 éprouvettes est de 3.56 %. Les cubes ont une tendance à se rapprocher d'une forme sphérique. La partie attaquée est complètement détruite, l'intérieur paraît encore sain. L'attaque procède donc de la surface vers l'intérieur. La résistance à la compression est fortement diminuée, probablement surtout à cause de la déformation du cube. Il est clair cependant que le remplacement de 25 % de sable du Rhin O/2 par du sable fin des dunes dans le béton 2, ce qui fait le béton 10, n'est en aucune manière bénéfique.

4. — Examen des éprouvettes cylindriques contenant les armatures

A Ostende, les éprouvettes immergées à mi-marée étaient apparemment dans le même état qu'en 1936, les extrémités saillantes des barres étant très corrodées.

Les éprouvettes immergées en permanence sous le niveau des plus basses mers à l'écluse du Bassin de la Marine ont été retirées, nettoyées, examinées et remises en place. Le béton est intact, mais les extrémités saillantes des barres étaient complètement détruites par la rouille jusqu'au ras des bases des cylindres.

Les éprouvettes disposées sur une palée de l'estacade au-dessus des plus hautes mers ont aussi été retirées, examinées et replacées. Aucune fissuration n'était plus visible à la surface du béton, dont les parties exposées vers l'extérieur des caisses (a et a') étaient légèrement usées par l'action du sable chassé par le vent. On ne pouvait différencier l'importance de cette usure d'une éprouvette

à l'autre. Les extrémités saillantes des barres étaient très fortement rouillées.

Les cylindres de béton conservés au laboratoire présentent le même aspect qu'en 1936, les extrémités saillantes des barres étant fortement rouillées pour les cylindres conservés sous le sable mouillé, surtout dans le cas de l'eau sulfatée.

Chapitre XII — PRELEVEMENTS DES 8 et 9 OCTOBRE 1945 (après onze années d'immersion)

1. — Opérations

Selon le programme du 7 avril 1934 (cf. Chapitre I, paragraphe 2), la cinquième série complète d'éprouvettes devait être soumise aux essais après 6 années d'immersion dans la mer à Ostende, c'est-à-dire à la fin de septembre 1940. Comme le port d'Ostende était alors inaccessible par suite de l'état de guerre, il fut sursis, avec l'accord de l'Administration des Ponts et Chaussées, au prélèvement de 1940.

Aussitôt après la libération en septembre 1944, il fut constaté que les éprouvettes immergées dans la mer avaient été préservées de la destruction, malgré les graves dommages causés par les hostilités au port d'Ostende.

De même et bien que l'Institut du Génie Civil à Liège fût très gravement endommagé par les bombardements aériens, les éprouvettes conservées dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée avaient été préservées aussi et transférées au refuge provisoire des laboratoires, à l'ancien Institut de Mécanique, 32, Bd de la Constitution à Liège.

Mais la situation militaire ne permettait pas encore un prélèvement à Ostende en 1944, le port servant aux opérations navales. Par suite de sa destruction quasi totale, le laboratoire n'était d'ailleurs pas à même d'y procéder à cette époque. Les prélèvements furent encore ajournés d'une année.

D'accord avec l'Administration des Ponts et Chaussées, ils eurent lieu les 8 et 9 octobre 1945, c'est-à-dire après un peu plus de onze années d'immersion. A Ostende, une série complète d'éprouvettes fut retirée de la mer, avec le concours du personnel et du matériel de l'entreprise Vollemaere, en présence de M.M. Verschave, Ingénieur et Vandaele, Conducteur des Ponts et Chaussées, sous la direction de M.M. Campus, Dantinne et Jacquemin.

Les éprouvettes, furent prélevées dans les caisses V, V', 5, 14 et 15. De plus, comme les dispositifs n'avaient plus été examinés depuis 1938, toutes les autres caisses furent détachées, inspectées en nettoyées extérieurement. Il fut constaté que tout le matériel était resté en bonne condition à l'estacade du chenal d'accès au port de pêche (emplacement marqué A sur la planche 3). (fig. 1 et 2, pl. 45).

Les caisses b et b' de cylindres de béton contenant des armatures, immergées en permanence sous le niveau des plus basses mers à la tête de l'écluse du Bassin de la Marine, furent retrouvées intactes sous les décombres de l'estacade, qui était entièrement détruite jusqu'à une cinquantaine de mètres de l'emplacement de ces caisses (marqué B planche 3). Elles ont été retirées, inspectées et nettoyées. Après examen des éprouvettes, ces caisses ont été immergées à nouveau à l'emplacement A (cf. pl. 3). Toutes les caisses restantes ont été refixées solidement à l'estacade selon le programme initial d'immersion (cf. pl. 4). L'essai de longue durée pouvait donc être prolongé dans des conditions satisfaisantes jusqu'à 20 et 30 ans d'âge.

Les éprouvettes conservées au laboratoire provisoire dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée ont été également inspectées et trouvées (ou remises) en ordre.

Finalement, malgré les très réels hasards des hostilités de la guerre à Ostende et à Liège, il n'y a eu à déplorer comme perte en 1945 que les réserves des divers ciments conservées au laboratoire, disparues au cours des bombardements aériens de l'Institut du Génie Civil de Liège en mai 1944, ainsi qu'il a été indiqué au Ch. II, par. 11.

Le prélèvement des éprouvettes immergées dans la mer a été opéré dans les mêmes conditions que lors des opérations précédentes. Les éprouvettes recouvertes d'organismes marins ont été raclées, lavées, marquées, emballées et expédiées à Liège le 9 octore 1945 dans un container de la S.N.C.B. Dès leur arrivée le 11 octobre 1945, elles ont été soumises aux essais mécaniques dans la mesure permise par leur état de conservation. Les éprouvettes ayant subi des dégradations caractéristiques ont été photographiées avant tout autre traitement.

Les éprouvettes conservées dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée à Liège en ont été retirées le 10 octobre et soumises aux essais le même jour que celles ramenées d'Ostende, certaines ont été aussi photographiées.

2. — Programme modificatif et complémentaire

En vue de contribuer à élucider les caractères des phénomènes observés, un programme modificatif et complémentaire a été proposé le 25 juin 1945 par l'auteur à l'Administration des Ponts et Chaussées et accepté par celle-ci le 14 août suivant.

L'essai de flexion des mortiers était inchangé, mais l'essai de compression ne sera pas effectué sur les tronçons de toutes les éprouvettes rompues par flexion.

Une de ces éprouvettes sera réservée pour des essais chimiques et ce pour les trois modes de conservation.

On dosera :

l'insoluble dans H Cl (sable);
l'eau fixée;
CO^2;
Si O^2 soluble (du ciment);
Al^2 O^3;
Ca O;
SO^3.

Enfin on déterminera pour chaque mortier et chaque mode de conservation le volume et le poids spécifique apparent; on en déduira la compacité. On déterminera aussi la quantité d'eau d'interposition (ou d'imbibition) des éprouvettes. Enfin, il sera procédé à l'analyse d'un échantillon d'eau de mer.

3. — Résultats des essais mécaniques

A) Mortiers

L'état de dégradation de nombreuses éprouvettes retirées de la mer ou de l'eau sulfatée n'a plus permis de procéder aux essais mécaniques.

Ciment 1.

11 M	détruit	12 M	détruit	13 M	détruit
11 S	détruit	12 S	détruit	13 S	72.8-472
11 P	40.7-299	12 P	66.9-576	13 P	91.9-733

Ciment 2.

21 M	détruit	22 M	5.6-117*	23 M	36.9-405
21 S	détruit	22 S	17 -274	23 S	79.5-661
21 P	46.3-286	22 P	70.3-570	23 P	92.3-745

* Ces valeurs proviennent d'une seule éprouvette. Les autres étaient réduites à l'état de débris.

Ciment 3.

31 M	débris	32 M	débris	33 M*	—
31 S	33.8-221	32 S	52.6-352	33 S	103 -602
31 P	51.9-256	32 P	64 -435	33 P	78.9-630

* Les éprouvettes 33 M très corrodées n'offraient pratiquement plus de résistance.

Ciment 4.

41 M	15.2- 95	42 M	36.4-360	43 M	82.3-454
41 S	détruit	42 S	41 -438	43 S	100.5-602
41 P	46.2-247	42 P	70.3-525	43 P	85.5-728

Ciment 5.

51 M*	—	52 M	77 -468	53 M	91.5-591
51 S	79 -254	52 S	91.7-418	53 S	108.8-600
51 P	63.2-247	52 P	84 -517	53 P	88.5-685

* Les éprouvettes 51 M sont très corrodées et pratiquement dépourvues de résistance.

Ciment 6.

61 M	débris	62 M	57.3-280	63 M	75 -433
61 S	61.3-270	62 S	90.5-423	63 S	106 -562
61 P	55.5-272	62 P	70 -498	63 P	79.5-622

Ciment 7.

71 M	débris	72 M	80 -344	73 M	107.1-705
71 S	85.8-456	72 S	107.5-671	73 S	127.3-829
71 P	73.2-502	72 P	92.1-710	73 P	104.1-860

Ciment 8.

81 M	39.1-310	82 M	56.3-661	83 M	56 -828
81 S	50.4-424	82 S	70.5-585	83 S	84.5-850
81 P	45.6-368	82 P	68 -606	83 P	93 -948

Ciment 9.

91 M	détruit	92 M	84.1-413	93 M	107 -623
91 S	72.8-330	92 S	84 -538	93 S	105 -663
91 P	70 -365	92 P	74 -526	93 P	93 -744

Ciment 10.

101 M	débris	102 M*	—	103 M*	—
101 S	72.8-225	102 S	102 -424	103 S	107.5-459
101 P	65.3-256.7	102 P	78.5-467	103 P	86 -480

* Les éprouvettes 102 M et 103 M étaient très corrodées et n'avaient pratiquement plus de résistance.

B) Bétons

1 M	287	1 S	535	1 P	536
2 M	338.7	2 S	585	2 P	605
3 M	298	3 S	478	3 P	478
4 M	524	4 S	576	4 P	587
5 M	588	5 S	539	5 P	557
6 M	548	6 S	513	6 P	517
7 M	812	7 S	612	7 P	639
8 M	702	8 S	291	8 P	316

9 M 580	9 S 478	9 P 469
	10 S* —	10 P 312

* Les éprouvettes 10 S étaient très dégradées. L'une d'elles n'a pu être essayée; les deux autres ont donné 197 et 302kg/cm². La moyenne de 249.5 n'a plus guère de signification.

4. — Constatations effectuées sur les éprouvettes de mortier (cf. planche 45)

A) Immersion dans la mer à mi-marée.

Les éprouvettes 11 M, 12 M et 13 M ont été trouvées à l'état de débris. Il n'a pas été possible de trouver des fragments suffisants de 11 M pour procéder à une analyse chimique.

Une éprouvette 12 M et une éprouvette 13 M sont visibles sur la photo 3 de la planche 45. Des éprouvettes 21 M il reste comme débris les extrémités engagées dans les alvéoles, qui ont permis l'analyse chimique. Les éprouvettes 22 M très corrodées ne présentaient plus guère de résistance. Les éprouvettes 23 M étaient corrodées aux arêtes. Les éprouvettes 21 M et 22 M sont représentées sur la photo 3 de la planche 45.

Les éprouvettes 31 M et 32 M étaient réduites à l'état de débris comparables à 21 M, suffisants pour l'analyse chimique. Les éprouvettes 33 M (photo 3, pl. 45) étaient dans un état comparable à 22 M, sans résistance appréciable.

Les éprouvettes 41 M étaient très corrodées, légèrement en fuseau (photo 4, pl. 45). Les résistances trouvées n'ont plus guère de signification. La face lissée et les arêtes correspondantes des éprouvettes 42 M sont légèrement attaquées. La section de rupture par flexion est veinée de gris. Les éprouvettes 43 M sont apparement intactes; quelques veines grisâtres apparaissent dans la section de rupture par flexion.

Les éprouvettes 51 M sont fortement corrodées en fuseaux (photo 4, pl. 45). Les arêtes des éprouvettes 52 M sont légèrement attaquées; les 53 M sont intactes. 61 M est à l'état de débris comme 21 M (photo 4, pl. 45). Les éprouvettes 62 M (photo 4, pl. 45) ont les arêtes arrondies et les faces légèrement attaquées. Les résistances trouvées n'ont plus beaucoup de signification. Les sections de rupture par flexion présentent une teinte vert foncé, avec un liseré de 3 mm environ de taches blanches.

Les éprouvettes 63 sont apparemment intactes; quelques zones plus claires dans les cassures vert sombre. Les éprouvettes 71 M sont à l'état de débris (photo 5, pl. 45). Les éprouvettes 72 M sont corrodées aux arêtes et sur les faces sous forme de sillons de 2 à 3 mm de profondeur (photo 5, pl. 45). Leur forme générale est restée assez prismatique. L'essai de flexion a encore quelque signification. L'essai de compression en a moins, parce que les extrémités des éprouvettes engagées dans les alvéoles sont moins attaquées que le corps, qui prend une forme plus ou moins fuselée. La section de rupture vert sombre présente aussi un liseré de points blancs sur quelques mm. Les éprouvettes 73 sont intactes; leur rupture se fait avec bruit; la cassure est saine.

Les éprouvettes 81 M sont apparemment intactes, mais leur rupture est molle et la cassure d'aspect terreux contient de nombreux points blancs. Il en est de même pour 82 M. La rupture de 83 M est encore molle. La cassure d'aspect terreux présente peu de points blancs, mais des taches vert sombre dans le fond brun.

Les éprouvettes 91 M sont brisées (photo 4, pl. 45), tandis que 92 M et 93 M, apparemment intactes, donnent des cassures saines. Les éprouvettes 101 M sont à l'état de débris. Celles du 102 M sont très corrodées, devenues à peu près cylindriques; l'essai de compression n'est plus possible. Il en est de même pour 103 M. Les cassures de flexion sont d'aspect terreux. Ces trois types d'éprouvettes sont reproduits à la photo 5 de la planche 45.

B) Immersion dans l'eau sulfatée.

Comme lors des prélèvements de 1938, ce sont des mortiers des ciments 1, 2, 3 et 4 qui sont attaqués; les autres ne montrent pas de dégradations visibles. L'état des éprouvettes attaquées est le suivant.

11 S : réduites en bouillie.

12 S (photo 6, pl. 45) : très attaquées, déformées avec gonflement, n'ont pu être introduites dans le dispositif d'essai.

13 S (photo 6, pl. 45) : attaque caractérisée, gonflement et fissuration aux sommets, pas beaucoup d'extension cependant depuis 1938.

21 S : réduites en bouillie.

22 S (photo 6, pl. 45) : très attaquées, déformation en arc à cause du gonflement plus prononcé sur la face lissée. Une des éprouvettes n'a pu être introduite dans le dispositif de flexion. Section de rupture blanchâtre.

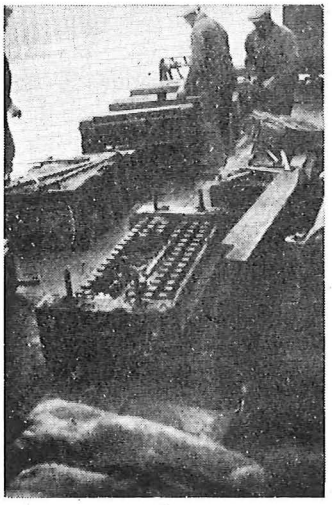
23 S : début d'attaque aux arêtes, n'a guère progressé depuis 1938. (photo 6, pl. 45)

31 S (photo 6, pl. 45) : très attaquées, gonflement et fissuration des sommets.

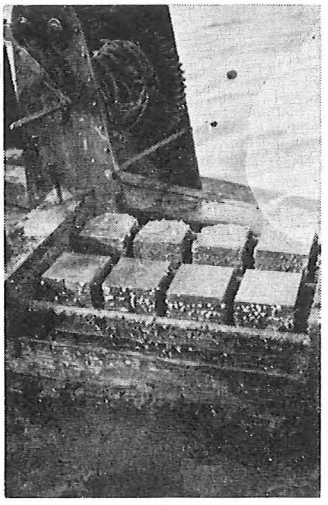
32 S : léger gonflement des sommets.

33 S : apparemment intactes.

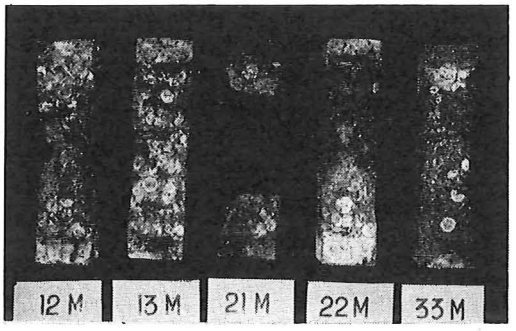
41 S : réduites en bouillie.



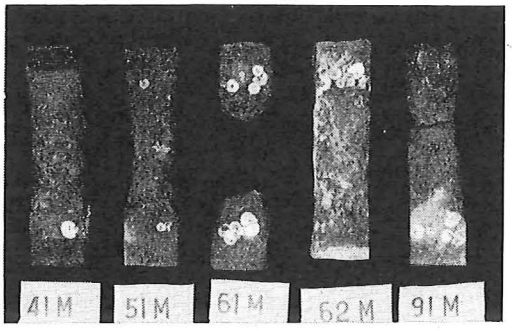
1



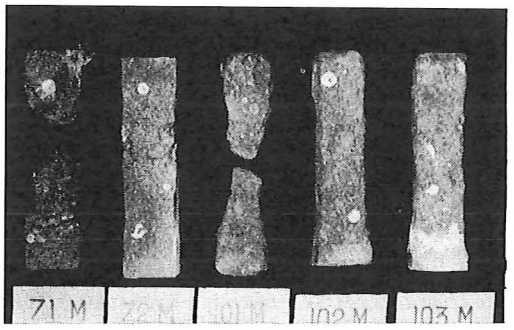
2



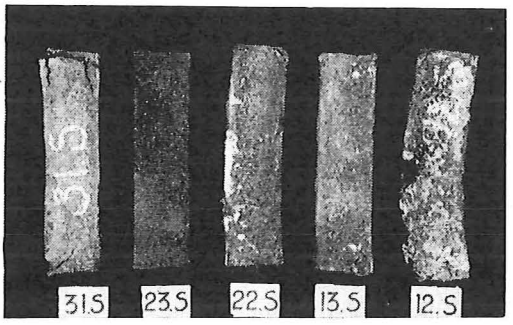
3



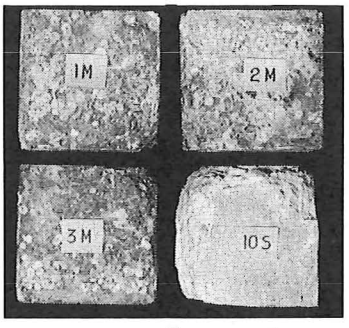
4



5



6



7

Planche 45.

42 S : début d'attaque aux sommets avec quelques petites fissures.

43 S : apparemment intactes.

L'immersion dans l'eau potable ne donne pas lieu à observations.

5. — Constatations effectuées sur les éprouvettes de béton (cf. pl. 45)

A) Immersion dans la mer à mi-marée.

L'attaque des cubes 1 M, 2 M et 3 M s'est prononcée depuis 1938 (photo 7, pl. 45). Les arêtes des faces lissées sont fortement corrodées. La réduction de volume en % du cube initial est :

3,65 % pour les éprouvettes 1 M
2,70 % pour les éprouvettes 2 M
2,90 % pour les éprouvettes 3 M.

Les éprouvettes 4 M sont apparemment intactes, comme les autres de 5 à 9.

B) Immersion dans l'eau sulfatée.

Les seuls cubes dégradés sont ceux marqués 10 S (photo 7, pl. 45). Ils sont fortement attaqués aux sommets, particulièrement du côté de la face lissée. Réduction de volume de l'ordre de 11 %.

6. — Constatations effectuées sur les cylindres de béton contenant des armatures

A) Immersion dans la mer à mi-marée.

Béton 1. De nombreux coquillages sont fixés sur la surface. La moitié de celle-ci tournée vers l'extérieur de la caisse est assez attaquée sur 5 à 8 mm de profondeur. Les graviers sont fortement mis en relief. Sur le restant de la surface, le mortier est devenu friable. Bien que la barre recouverte de 1 cm de béton seulement se trouve du côté le plus attaqué, aucune barre n'est découverte ou attaquée, aucune fissure n'est visible.

Béton 2. Mêmes apparences que le béton 1, l'attaque paraissant légèrement plus prononcée. Aux endroits où le mortier subsiste en surface, il est très friable et se détache sans efforts. Pas de fissures ni de traces de corrosion au droit des barres.

Béton 3. Etat comparable à celui du béton 1.

Béton 4. Moins de coquillages que sur les bétons précédents. Pas d'apparence d'attaque à première vue, mais le mortier superficiel est devenu friable sur une épaisseur de 1 à 2 mm et se laisse enlever facilement au moyen d'une lame de canif. Pas de traces de fissures ni de corrosion au droit des barres.

Béton 5. Aspect comparable à celui du béton 4, mais le mortier superficiel n'est pas attaqué.

Béton 6. Aspect comparable à celui du béton 4, tendance à la dénudation des graviers en surface.

Béton 7. Moins de coquillages que sur les éprouvettes précédentes. La surface des cylindres est dure et rugueuse.

Béton 8. Aspect comparable au béton 7, toutefois la surface est dure et lisse.

Béton 9. Aspect comparable au béton 7, surface dure et légèrement rugueuse.

Après 11 ans, aucune barre recouverte de béton n'est donc attaquée.

Les extrémités des cylindres engagées dans les alvéoles des caisses sont généralement intactes; les extrémités saillantes des barres sont fortement corrodées.

B) Immersion dans la mer sur le fond du chenal.

Les caisses b et b' ont été transférées de l'emplacement B à l'emplacement A (pl. 3) par les soins de M. D'Hoedt, surveillant des Ponts et Chaussées. L'examen des éprouvettes n'a rien montré.

C) Exposition à l'air marin.

Pas d'observations à formuler.

D) Conservations au laboratoire.

Rien à signaler.

7. — Commentaire des constatations et des résultats précédents

Le programme de 1934 (cf. Chap. I) visait à établir et à comparer le comportement des éprouvettes dans leurs divers milieux de conservation autant que possible suivant des critères objectifs. Comme il est de règle de définir la qualité des conglomérats hydrauliques par leurs résistances mécaniques, c'est l'évolution de ces dernières en fonction de la durée d'immersion que le programme a choisi comme caractéristique principale de ce comportement.

Au stade d'avancement de cette évolution après 11 ans, il convenait déjà de procéder à un examen critique de la signification de ces critères [8].

Il est bien connu que les essais mécaniques des ciments, des mortiers et des bétons, même normalisés et exécutés avec les plus grands soins, donnent lieu à des écarts notables des résultats. Une étude de M.M. Prot, contemporaine de la référence précédente [10] établissait que des séries d'essais de compression et de flexion, effectuées avec le souci de la plus grande exactitude, donnaient lieu à des écarts moyens de 8, 10 et 12 %, avec des extrêmes atteignant 23 et même 32 %. Elle analysait les causes de ces écarts, dont les principales sont l'hétérogénéité et les imperfections géométriques.

On ne peut supposer que les conditions dans lesquelles ont été confectionnées les éprouvettes, décrites au Chap. II, soient meilleures ou même équivalentes à celles qui prévalent pour les essais normaux de petites séries d'éprouvettes. Cependant, les écarts dans les séries les plus correctes au point de vue géométrique, c'est-à-dire celles des éprouvettes conservées dans l'eau potable, ont toujours été modérés et pas supérieurs à ceux relevés par M. Prot. Ceci permet de croire que l'hétérogénéité et les imperfections géométriques *initiales* des éprouvettes n'étaient pas excessives.

Mais les essais mécaniques sont normalement effectués dans des conditions telles et à des âges tels que les défauts initiaux ne soient pas (ou guère) modifiés.

Ceci n'est pas vrai dans les conditions d'essai et pour les durées des essais considérés ici. Les immersions de longue durée dans les milieux agressifs que constituent la mer et l'eau sulfatée modifiant les substances, les formes et les dimensions. On ne peut pas être non plus assuré de l'invariabilité des éprouvettes immergées pendant de nombreuses années dans l'eau potable.

Déjà après 1 an (cf. Chap. IX, par. 3), certaines anomalies apparaissaient, qui se sont amplifiées lors des prélèvements ultérieurs. Elles mettent en cause la signification même des essais mécaniques, lorsque leurs hétérogénéités sont augmentées, par des modifications superficielles ou profondes, et que leurs formes et dimensions sont altérées. Ces modifications ont pu atteindre un degré tel pour des éprouvettes conservées dans la mer et dans l'eau sulfatée que les essais mécaniques n'étaient plus possibles. A un stade moins avancé de détermination, ils perdaient leur valeur absolue.

Cependant, étant donné que les essais mécaniques sont sensibles aux altérations de substance et de forme, leur choix ne paraît pas récusable à priori dans une étude dont l'objet est précisément de déceler des altérations dont l'importance n'est pas connue au départ. Sans doutes amplifient-ils les effets des altérations; ce qui leur confère l'avantage d'être des détecteurs sensibles des produits altérables et en même temps des garants sérieux de la stabilité des produits non altérés. On reviendra sur les caractères des essais mécaniques à l'occasion des prélèvements après 20 et 30 ans d'immersion.

Les changements de forme sont plus ou moins liés aux altérations de substance. Ils peuvent provenir de modifications superficielles, généralement accompagnées d'enlèvement de matière à la surface, mais sans altération profonde. C'est souvent le cas des éprouvettes en immersion marine. Les modifications de forme paraissent plus rarement dues à une altération de la masse, comme pour certaines éprouvettes de mortier immergées dans l'eau sulfatée. Dans le cas d'enlèvement de matière, les variations de poids pourraient constituer un critère objectif, mais incomplet, car il ne renseigne pas sur l'état interne de la matière restante.

Il en est de même de la variation de volume, qui a été indiquée pour quelques cubes de béton (Chap. XI, par. 3 et par. 5, A) et B) du présent Chapitre). On ne peut rien en déduire sur l'état de ce qui subsiste des cubes, certes pas pour le béton 10, ainsi qu'il résultera de la suite.

Les critères objectifs considérés ci-dessus sont en défaut en cas d'altération confinant à la destruction, p.ex. fragmentation, transformation à l'état de bouillie. On peut considérer la cote O comme adéquate à ces états.

8. — Essais complémentaires d'après le paragraphe 2

Ces essais avaient pour objet la recherche d'autres critères objectifs visant à une relation plus directe avec la nature des phénomènes.

V. Sevieri avait formulé des remarques à ce sujet, en rapport explicite avec le travail entrepris en 1934 à Ostende [11] [12]. L'organisation de la recherche permettait d'y donner suite, puisque les éprouvettes conservées dans l'eau potable permettaient de mettre en évidence des changements éventuels survenus aux éprouvettes de même composition immergées dans l'eau sulfatée ou dans la mer, en principe du moins. Pour les analyses chimiques on pouvait, également en principe, se référer aux analyses initiales des divers ciments, en admettant que le sable ne contienne d'autres éléments que de la silice insoluble.

A) L'analyse de l'eau de mer prélevée le 9-10-45 a été indiquée au Ch. II, paragraphe 10.

B) Densité apparente, compacité, eau d'interposition (ou libre) des mortiers.

Les déterminations ont été effectuées sur des demi-éprouvettes provenant d'un essai de flexion. Le volume a été déterminé à la balance hydrostatique. On a déterminé le poids des éprouvettes complètement imbibées d'eau et ensuite après dessiccation jusqu'à poids constant dans une étuve à 110° C.

Les résultats obtenus ne sont pas caractéristiques. Pour cette raison, on se bornera à indiquer les porosités en volume en %.

	Conservation		
Mortiers	P	S	M
11	20.87	—	—
12	18.45	18.15	19.00
13	18.05	18.10	18.45
21	20.02	—	22.74
22	18.35	18.05	19.30
23	18.35	18.05	20.62
31	21.90	22.01	—
32	19.72	20.00	—
33	20.53	22.05	20.40
41	19.57	—	21.80
42	18.34	18.80	22.07
43	17.97	18.40	20.50
51	20.25	20.15	21.04
52	20.67	20.70	21.42
53	20.58	20.17	21.35
61	20.75	20.65	22.31
62	20.32	19.95	20.90
63	19.52	19.43	22.71
71	20.71	19.43	21.82
72	20.31	19.20	21.00
73	20.04	20.32	22.23
81	17.47	18.32	19.47
82	16.11	16.08	16.27
83	15.45	15.15	15.25
91	18.35	18.40	18.65
92	20.16	20.45	21.31
93	18.13	18.80	18.73
101	23.34	22.90	24.37
102	20.36	19.70	20.83
103	18.66	18.75	19.40

Ces résultats paraissent souvent aberrants. Même lorsqu'ils ne le sont pas, ils n'établissent que des différences peu significatives. On ne peut mettre en doute la précision des pesées, ni même la détermination des volumes à la balance hydrostatique. C'est plutôt le principe qui est discutable. En effet, l'attaque des éprouvettes est superficielle. Or, les mesures de poids et le volume concernent ce qui subsiste des éprouvettes, donc la partie la moins attaquée.

Cependant, les analyses chimiques établissent le départ de certaines substances. Mais les mortiers en fixent d'autres enlevés à l'ambiance. Pour l'immersion marine, à mi-marée, il y a carbonatation, les incrustations marines, etc. Dans la solution sulfatée, il y a fixation de sulfates.

Il semble donc que les mesures de compacité ou de porosité ou de la quantité d'eau interstitielle ne sont pas caractéristiques du degré de dégradation des mortiers dans les milieux agressifs. Il ne faudrait pas franchir le pas d'en conclure que la porosité a peu d'importance pour la résistance des conglomérats hydrauliques aux agents agressifs. L'observation établit au contraire que l'action de ces derniers se manifeste surtout sur les conglomérats très poreux. Le contrôle de la compacité est donc utile à titre préventif de la corrosion; il n'est pas caractéristique comme indicateur de corrosion.

C) Analyses chimiques des mortiers.

Les analyses chimiques ont été effectuées sur des échantillons séchés à l'étuve à 130° C jusqu'à poids constant. Elles ont été effectuées par les méthodes usuelles pour l'analyse des liants hydrauliques mentionnées au Chapitre III, paragraphe 2.

Les valeurs figurant aux tableaux ci-après représentent en % les résultats bruts des analyses. La perte au feu est désignée par p. L'insoluble est dénommé « Sable », ce qui implique que tout le sable soit insoluble et que les autres éléments du mortier n'en contiennent que des quantités négligeables. Cela est suffisamment exact pour tous les mortiers, sauf ceux désignés sous les numéros 3 et 10 qui contiennent du trass, qui introduit une fraction non négligeable de silice insoluble.

Ces résultats d'analyses chimiques sont reproduits non seulement à titre de compte rendu, mais davantage comme élément d'appréciation et même comme instrument de travail éventuel. A ce point de vue, il faut déplorer qu'à l'époque de ce travail, les services du laboratoire étaient « réfugiés » dans des locaux étriqués et peu adéquats, à la suite de la destruction de leurs installations par les bombardements aériens de 1944. De ce fait aussi ils étaient privés de certains appareils. Celui qui était en usage pour la détermination du CO^2 avait été détruit et les efforts entrepris tant à l'étranger qu'en Belgique n'avaient pas encore permis son remplacement en 1946. Le dosage du CO^2 fait donc défaut; il en est de même de celui de la magnésie.

On a cependant tenté de contrôler les résultats à partir des analyses initiales des ciments (cf. Ch. III, par. 2) pour les mortiers conservés dans l'eau potable, en partant de l'hypothèse qu'il n'y avait pas eu de diffusion

Ciment 1

Mortier	p.	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	SO^3
11 P	4.90	78.53	3.64	1.87	10.66	0.35
11 S	—	—	—	—	—	—
11 M	—	—	—	—	—	—
12 P	6.19	70.87	4.89	2.52	14.20	0.51
12 S	6.20	70.86	4.17	2.02	12.27	4.24
12 M	6.92	77.92	3.15	2.71	7.87	0.53
13 P	6.50	66.79	5.82	3.07	16.64	0.57
13 S	6.27	66.70	5.42	3.11	16.71	1.58
13 M	6.86	69.83	5.07	3.20	13.70	0.78

Ciment 2

Mortier	p	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	SO^3
21 P	6.00	77.74	3.08	1.87	10.28	0.35
21 S	—	—	—	—	—	—
21 M	4.57	86.82	1.53	2.00	3.88	0.71
22 P	7.22	70.32	4.37	2.57	14.52	0.45
22 S	7.27	70.79	3.52	2.80	12.30	2.64
22 M	5.78	77.43	3.61	2.73	8.22	0.98
23 P	6.99	66.53	5.05	3.24	17.06	0.54
23 S	6.76	66.79	4.43	3.32	16.23	1.87
23 M	6.60	70.73	4.26	3.07	13.47	0.77

Ciment 3

Mortier	p	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	SO^3
31 P	4.72	81.49	3.45	2.60	7.13	0.23
31 S	4.12	81.91	3.31	2.37	6.75	0.93
31 M	—	—	—	—	—	—
32 P	5.37	76.35	4.64	3.08	9.54	0.32
32 S	5.78	76.43	4.34	2.72	9.28	1.10
32 M	—	—	—	—	—	—
33 P	5.93	71.03	5.81	3.74	12.08	0,41
33 S	5.96	70.70	5.98	3.87	12.40	0,69
33 M	7.47	72.86	4.86	3.84	9.84	0,74

Ciment 4

Mortier		Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	SO^3
41 P	4.54	79.25	3.62	3.19	8.68	0.53
41 S	—	—	—	—	—	—
41 M	4.47	81.40	3.41	2.97	6.55	0.86
42 P	5.78	72.45	4.67	3.78	11.85	0.66
42 S	6.36	71.27	4.94	3.92	11.76	1.02
42 M	6.02	71.76	5.12	4.09	11.24	0.95
43 P	6.73	66.76	6.05	4.69	14.26	0.80
43 S	6.48	66.83	6.10	4.60	14.57	1.01
43 M	6.59	67.90	5.81	4.83	13.50	0.99

Ciment 5

Mortier	p	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	SO^3
51 P	4.53	79.12	3.67	3.18	8.39	0.48
51 S	4.35	79.14	3.89	3.28	8.11	0.91
51 M	4.65	81.77	3.20	2.99	5.78	0.65
52 P	6.04	71.12	5.15	4.48	11.71	0.63
52 S	5.65	72.94	5.05	4.18	10.81	0.89
52 M	5.40	73.76	4.92	4.32	9.82	0.78
53 P	5.84	67.07	6.22	5.52	14.15	0.62
53 S	5.98	67.17	6.20	5.40	13.86	0.93
53 M	6.37	66.79	6.01	5.43	13.98	0.97

Ciment 6

Mortier	p	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	SO^3
61 P	4.26	78.86	4.40	3.05	8.57	0.53
61 S	4.20	78.36	4.45	3.45	8.07	0.80
61 M	4.44	82.08	3.23	3.22	6.01	0.75
62 P	4.81	72.98	5.82	4.25	11.38	0.69
62 S	4.91	73.27	5.63	3.76	11.23	0.87
62 M	5.29	72.78	5.42	4.24	10.44	0.85
63 P	5.23	68.40	6.77	4.85	13.86	0.82
63 S	5.50	67.67	6.34	4.96	14.20	0.97
63 M	5.20	67.94	6.67	4.88	13.69	0.94

Ciment 7

Mortier	p	Sable	SiO^2	R^2O^3	Ca O	SO^3
71 P	4.00	80.45	3.95	3.04	6.80	1.32
71 S	4.02	80.00	4.02	3.23	6.60	1.75
71 M	4.59	81.36	4.29	3.38	5.19	1.12
72 P	4.58	73.60	5.55	4.44	9.74	2.00
72 S	4.40	74.58	5.14	4.32	9.47	1.97
72 M	4.58	74.67	5.00	4.50	9.26	1.60
73 P	5.10	67.85	6.98	5.41	11.63	2.31
73 S	4.03	69.61	6.59	5.60	11.02	2.43
73 M	4.97	68.94	6.80	5.52	10.76	2.18

Ciment 8

Mortier	p	Sable	SiO^2	R^2O^3	Ca O	SO^3
81 P	6.15	77.08	1.03	8.87	6.28	0.05
81 S	6.15	76.80	1.15	9.10	6.34	0.26
81 M	6.03	77.07	1.09	8.83	6.01	0.18
82 P	7.40	70.41	1.45	12.00	8.39	0.08
82 S	6.85	70.45	1.63	12.17	8.41	0.30
82 M	7.02	70.10	1.52	12.43	8.75	0.18
83 P	7.60	65.67	1.73	14.58	10.09	0.04
83 S	6.76	66.00	1.82	15.00	10.23	0.19
83 M	6.95	66.10	1.84	14.92	9.90	0.14

Ciment 9

Mortier	p	Sable	SiO^2	R^2O^3	Ca O	SO^3
91 P	3.52	80.48	4.09	3.18	8.16	0.39
91 S	3.71	80.45	3.73	3.31	7.60	0.69
91 M	4.25	80.08	3.94	3.16	7.84	0.49
92 P	4.34	73.57	5.62	4.27	11.22	0.67
92 S	4.20	74.02	5.49	3.79	11.03	0.89
92 M	4.86	74.04	5.08	4.30	10.48	0.78
93 P	4.53	67.80	7.14	5.10	14.50	0.77
93 S	4.40	68.15	6.72	5.13	13.86	0.98
93 M	4.03	70.18	6.40	5.00	13.19	0.87

Mortier	p	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	SO^3
101 P	4.01	84.19	2.04	2.59	6.19	0.37
101 S	4.17	83.86	1.95	2.40	6.37	0.73
101 M	4.60	86.00	1.96	2.60	4.25	0.35
102 P	4.24	80.27	2.71	3.49	8.29	0.46
102 S	4.17	81.35	2.31	3.24	8.29	0.61
102 M	5.13	80.81	2.35	3.77	6.72	0.51
103 P	5.16	76.25	3.47	4.03	10.08	0,60
103 S	4.88	76.05	3.75	4.17	10.11	0.77
103 M	5.66	76.70	3.04	4.10	9.17	0.58

d'éléments constitutifs du ciment ni de carbonatation [8]. Or, cette dernière hypothèse est inadmissible.

L'analyse a en effet été effectuée sur des échantillons séchés à l'étuve à 130° C jusqu'à poids constant. Pour les raisons indiquées plus haut, on ne disposait à l'époque que d'une étuve ventilée dans une atmosphère chargée de CO^2 (brûleurs sans cheminées). Aucune précaution n'avait d'ailleurs été prise après le retrait des éprouvettes de leurs divers milieux de conservation pour les mettre à l'abri du CO^2 atmosphérique. Il est apparu plus tard que ces précautions sont importantes.

Il en résulte que si en 1946 on avait pu doser le CO^2, cette opération aurait eu principalement le caractère d'une correction de la perte au feu, mais n'aurait pas donné la teneur exacte en CO^2 de l'échantillon lors de son prélèvement. Cependant la correction de la perte au feu aurait pu indiquer la quantité d'eau combinée au ciment par l'hydratation, en admettant avec R. Jacquemin [13] qu'au-dessus de la température de 130° C, il ne subsiste dans le ciment hydraté que l'eau fixée.

Compte tenu de ces imperfections, la comparaison des résultats de l'analyse avec ceux calculés à partir des analyses initiales de 1934 est plus satisfaisante qu'on pouvait l'espérer. Elle est exposée d'une manière critique dans la référence [8].

En dépit aussi de ces imperfections, on avait consciencieusement en 1946 tenté de déduire des analyses chimiques des mortiers des indications sur l'eau fixée par les divers ciments et sur la proportion de ciment décomposée par les eaux agressives. Les résultats de ces spéculations sont également exposés dans la référence [8]. Elles ne seront pas reproduites ici parce que, dans l'état actuel de la question, elles ne présentent plus l'intérêt que, malgré de nombreuses réserves, on croyait pouvoir leur accorder en 1946.

Deux préoccupations restent cependant actuelles : contrôler l'exactitude des analyses et aussi en déduire un indice de décomposition. On postule que le sable est totalement inerte et inaltéré, comme l'insoluble en général.

Pour les mortiers autres que ceux des ciments 3 et 10, qui contiennent du trass, un contrôle global peut être obtenu par l'insoluble des mortiers conservés dans l'eau potable. Les quantités théoriques d'insoluble d'après les dosages nominaux sont :

$$\text{Mortiers à 300 kg, } \frac{1500}{1500 + 300} \times 100 = 83{,}33\ \%$$

$$\text{Mortiers à 450 kg, } \frac{1500}{1500 + 450} \times 100 = 76{,}92\ \%$$

$$\text{Mortiers à 600 kg, } \frac{1500}{1500 + 600} \times 100 = 71{,}42\ \%$$

Pour comparer ces valeurs à celles que l'on peut déduire des analyses des mortiers de 1946, c'est-à-dire au rapport

$$\frac{\text{Sable}}{\text{Sable} + SiO^2 + R^2O^3 + CaO + SO^3},$$

il faut auparavant corriger les valeurs théoriques pour tenir compte de la perte au feu des ciments frais (cf. Ch. III, par. 2) et de ce que les analyses des mortiers de 1946 ont négligé le MgO.

On trouve les valeurs théoriques corrigées suivantes.

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

Les valeurs déduites comme indiqué ci-dessus des analyses de 1946 des mortiers conservés dans l'eau potable sont

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
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
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

Les écarts sont toujours de même sens. Par rapport aux valeurs théoriques ils sont en %

Mortier	11	21	41	51	61	71	81	91
Ecarts	1.42	1.07	1.15	0.62	1.96	0.97	1.02	0.93
Mortier	12	22	42	52	62	72	82	92
Ecarts	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
Ecarts	0.42	0.85	0.59	1.01	0.80	2.65	0.43	2.34

Ils proviennent des erreurs d'analyse mais aussi des écarts des dosages réels des éprouvettes par rapport aux dosages nominaux. Mais ces écarts ne semblent pouvoir être toujours de même sens. Il doit donc y avoir une cause d'erreur systématique, d'ailleurs modérée. En effet, les écarts moyens sont pour les mortiers 1 et 3 de 1.14 %, pour les mortiers 2 de 1.62 %. Cela n'est pas considérable pour des valeurs résultant d'opérations numériques sur des résultats d'analyses chimiques.

Les chiffres qui précèdent concernent les mortiers conservés dans l'eau potable, supposés exempts de toute attaque ou modification chimique. Pour caractériser l'attaque par l'eau sulfatée ou l'eau marine, il faut comparer les analyses des mortiers conservés dans ces milieux à celles des mortiers homologues conservés dans l'eau potable. On constate que tous les éléments dosés des ciments ne sont pas également affectés. Le plus affecté est le Ca O. En désignant par Sp et Ca Op les teneurs en sable et en Ca O des mortiers conservés dans l'eau potable, par Sm et Ca Om les teneurs correspondantes des mortiers homologues conservés dans l'eau de mer, la valeur de $\left(1 - \frac{\text{Ca Om} \times \text{Sp}}{\text{Ca Op} \times \text{Sm}}\right)$ peut être considérée comme un indice de la proportion de ciment décomposée ou modifiée par l'action de l'immersion marine. Il n'implique aucun autre postulat que l'invariabilité du rapport $\frac{\text{Ca O}}{\text{S}}$ dans tous les mortiers homologues en l'absence de toute altération du ciment, et aussi que les ciments ne sont pas altérés par la conservation dans l'eau potable. S'il y avait une altération par la conservation dans l'eau potable du rapport initial $\frac{\text{Ca Oo}}{\text{So}}$, l'altération des mortiers conservés dans l'eau de mer par rapport à ceux conservés dans l'eau potable serait

$$\left(\frac{\text{Ca Op} \times \text{So}}{\text{Sp} \times \text{Ca Oo}} - \frac{\text{Ca Om} \times \text{So}}{\text{Sm} \times \text{Ca Oo}}\right) =$$

$$\left(1 - \frac{\text{Ca Om} \times \text{Sp}}{\text{Sm} \times \text{Ca Op}}\right)\frac{\text{Ca Op} \times \text{So}}{\text{Sp} \times \text{Ca Oo}}$$

Le multiplicateur extérieur aux parenthèses ne peut en tout état de cause être très inférieur à l'unité, de telle sorte que l'indice considéré rend certes compte d'une manière significative de l'altération des mortiers dans l'immersion marine par rapport aux témoins réels conservés dans l'eau potable, dont la fonction selon la conception des expériences est précisément de constituer ces repères réputés non altérés. Cet indice peut même s'appliquer aux mortiers 3 et 10 contenant du trass. Il n'est affecté que par les erreurs accidentelles sur la confection des éprouvettes (cf. Chap. II, par. 4) et sur l'analyse des échantillons, dont les résultats figurent ci-dessus.

TABLEAU DES VALEURS

des indices $\left(1 - \frac{\text{Ca Om} \times \text{Sp}}{\text{Ca Op} \times \text{Sm}}\right)$

Mortier	Indice	Mortier	Indice
11	(1)	61	0,227
12	0,496	62	0,08
13	0,212	63	0,006
21	0,662	71	0,246
22	0,486	72	0,063
23	0,256	73	0,089
31	(1)	81	0,043
32	(1)	82	(— 0,047)
33	0,206	83	0,025
41	0,265	91	0,036
42	0,043	92	0,072
43	0,068	93	0,12
51	0,332	101	0,328
52	0,191	102	0,192
53	0,008	103	0,095

La valeur négative pour le mortier 82 n'est pas admissible; elle doit être due aux erreurs accidentelles. Si l'on déterminait les mêmes indices pour les mortiers conservés dans l'eau sulfatée, on trouverait des valeurs géné-

ralement voisines de O et assez fréquemment négatives. Ceci met en évidence l'incidence des causes d'erreur accidentelles, qui affectent considérablement les indices dont la valeur est assez voisine de O. Il ne faudrait pas attribuer à cet indice une signification trop strictement quantitative, qui ne convient pas à un problème aussi complexe. Mais on peut lui reconnaître une valeur qualitative précisée par des ordres de grandeur, ce qui lui donne un caractère très sélectif.

9. — Commentaires au sujet des essais complémentaires

Les déterminations de compacité ou de porosité ou connexes sont simples, faciles, peu coûteuses mais ne sont pas caractéristiques des dégradations éventuelles ni de l'état de la matière restante. Elles sont apparues à vrai dire sans intérêt.

Il n'en est pas de même des analyses chimiques, effectuées cependant dans des circonstances difficiles. Elles sont certes compliquées, délicates et coûteuses. Mais elles concordent complètement avec les résultats des essais mécaniques, auxquels elles apportent une explication par des aperçus sur la tenue des divers ciments. Sous ce rapport, l'indice de la proportion de ciment décomposée ou modifiée paraît intéressant. Il classe les ciments quant à leur résistance à l'action marine de la même manière que les essais mécaniques. Il constitue donc un facteur global caractéristique.

Cet indice a l'avantage d'être assez fidèlement représentatif du processus de destruction des ciments, car il est fondé sur la diminution de la teneur en CaO. Or, les analyses reproduites dans le paragraphe précédent établissent bien que la dégradation des conglomérats hydrauliques par l'eau marine procède principalement de l'élimination de CaO. Cela est conforme à une théorie déjà ancienne de Maynard sur le départ de la chaux par diffusion en immersion marine, adoptée par H. Le Châtelier [4].

Les indices calculés au paragraphe précédent distinguent nettement les ciments portland 1 et 2 de tous les autres. L'addition de trass moulu (liant 3) n'améliore pas les indices, cependant que le ciment-trass 50/50 (n° 10) a des indices comparables à ceux des ciments de haut-fourneau.

Les pouzzolanes agissent par leur silice active. Or, les analyses chimiques établissent que le trass moulu additionné au ciment 2 pour former le liant 3 contient une forte proportion de silice insoluble. Le ciment-trass n° 10 apporte aussi un supplément important d'insoluble et contient relativement peu de silice active.

Par rapport à ces constatations, la bonne tenue des ciments métallurgiques s'explique par l'activité totale du laitier basique de haut-fourneau granulé de bonne qualité et broyé très finement. Il constitue à la fois un liant hydraulique lent et une pouzzolane très active [14] [13]. Tous les résultats consignés jusqu'ici dans ce rapport établissent une excellente activité combinée des ciments contenant du laitier. Au contraire, tous les mortiers contenant du trass sont détruits par la mer après 11 ans; même le béton 3 est très corrodé. Cela résulte de ce que l'action chimique du trass est très lente et que le durcissement des conglomérats est ralenti. Or, la résistance à l'action marine complexe dans la zone de marnage demande un durcissement soutenu, dont la progression l'emporte sur celle de l'attaque. L'addition de trass ne remplit pas cette condition. Elle ralentit le durcissement cependant que son action chimique très lente n'atténue pas assez rapidement la vulnérabilité du liant à l'attaque marine.

Dans le cas de l'immersion dans l'eau sulfatée immobile, l'attaque purement chimique progresse moins vite. La résistance des conglomérats aux liants 3 et 10 a fluctué pendant les premières années et semble se stabiliser après 11 années.

Le tableau des indices du paragraphe précédent établit qu'ils diminuent en règle générale lorsque la richesse en ciment augmente, donc aussi la compacité. Cependant, il y a quelques exceptions : mortiers 43, 73. 91, 92 et 93. Elles sont situées dans le domaine des indices de faible valeur, qui sont les moins sûrs. C'est pourquoi il n'est pas permis de se servir de ces indices pour des comparaisons trop strictement quantitatives. Mais on peut considérer que les analyses chimiques établissent aussi la grande importance de la compacité pour la résistance à l'action marine, d'une manière cependant plus nuancée que les essais mécaniques. Cela tient à l'amplification des effets des dégradations par les essais mécaniques, commentée au paragraphe 7.

Pour conclure, on peut considérer que les essais complémentaires ont apporté d'utiles contributions à la recherche à ce point de son avancement. Cependant, le choix à l'origine des résistances mécaniques comme critère de résistance à l'action marine est justifié par leur comparaison aux autres moyens, tant par leur efficacité que par leur commodité.

Chapitre XIII — PRELEVEMENT DU 16 SEPTEMBRE 1954 (après vingt années d'immersion)

1. — Opérations

Le 16 septembre 1954, une série complète d'éprouvettes a été retirée de la mer, sous la direction de M. R.

Dantinne et de Melle M. Dzulynski, en présence de M. Vervelst, Conducteur et de M. Gunst, Garde principal des Ponts et Chaussées. L'entreprise Van Huele était chargée du travail.

Dans l'intervalle de temps depuis le prélèvement précédent, un événement important s'était produit, la marée-tempête calamiteuse du 1er février 1953, qui avait causé de graves dégâts sur les côtes des Pays-Bas, de la Grande-Bretagne et de la Belgique, notamment à Ostende.

Toutes les caisses qui devaient servir aux deux derniers prélèvements à Ostende ont été retrouvées, de même que celles contenant les cylindres en béton avec armatures, sauf les caisses b et b' immergées sur le fond et qui avaient été transférées en 1945 de l'emplacement B à l'emplacement A (cf. planche 3 et Chap. XII, par. 1). Celles-ci avaient disparu.Elles auront probablement été emportées par la violence de la tempête et se seront enfoncées dans la vase du chenal.

Des photographies des caisses VII et VI', ainsi que 7, 12 et 13 ont été prises par le Service photographique du Ministère des Travaux Publics après qu'elles avaient été détachées et ouvertes, afin de fixer l'aspect global des dégradations.

Les éprouvettes ont été ensuite retirées, nettoyées, étiquetées et expédiées au laboratoire, où elles ont été soumises aux examens en même temps que les éprouvettes correspondantes retirées de l'eau sulfatée et de l'eau potable.

2. — Constatations faites lors du prélèvement à Ostende

La planche 46 reproduit 6 des photographies dont il est question ci-dessus.

La photo 1 montre les caisses en place et leur fixation. La photo 2 montre la caisse VII ouverte. Les barrettes des mortiers 1, 2 et 3 sont complètement disparues. Elles existent partiellement pour le mortier 4 et pour les mortiers 5 à 8 seulement pour les dosages 2 et 3 (450 et 600 kg de ciment par m³ de sable).

La photo 3 est celle de la caisse 7 ouverte. Les cubes des bétons 1, 2 et 3 sont fortement dégradés, le cube 4 l'est beaucoup moins; les cubes 5 à 8 paraissent intacts.

Les photos 4 et 5 sont celles de la caisse VI' ouverte. Il ne reste que des débris du mortier 10. Les barrettes du mortier 9 sont détruites (dosage 1) ou dégradées (dosages 2 et 3). Les cubes du béton 9 sont intacts.

Enfin, la photo 6 montre la caisse m des cylindres des bétons 1 à 8 ouverte; ils paraissent intacts, mais le cylindre 1 a une barre partiellement dénudée (fig. 7, pl. 46).

3. — Constatations faites au laboratoire

Après 20 années d'immersion, beaucoup d'éprouvettes ont été détruites, beaucoup d'autres ont été dégradées et déformées à tel point que les essais mécaniques ne sont plus possibles ou n'ont plus leur pleine signification (cf. Chap. XII, par. 7). Dès lors, la simple constatation de l'état physique des éprouvettes, complétée par une pesée, devient un élément d'appréciation essentiel de la résistance aux actions agressives. C'est pourquoi il est procédé d'abord ci-après au relevé succinct de ces constatations, illustré par les photos des planches 47 et 48.

Ciment 1. Les mortiers 11 M, 12 M et 13 M sont détruits, ainsi que 11 S. Il reste 3 éprouvettes 12 S (photo 3, pl. 47), écornées et légèrement boursouflées (poids 644, 659 et 656 gr). Il subsiste 4 éprouvettes 13 S, dont 3 ont les coins crevassés ou ébréchés et boursouflés (poids 631, 640, 630 et 641 gr). On constate que les poids des éprouvettes conservées dans l'eau sulfatée sont supérieurs à ceux des éprouvettes correspondantes conservées dans l'eau potable. Le phénomène se marque aussi à des degrés divers pour les autres ciments examinés ci-après. Il rappelle les augmentations de poids observées dans les essais Le Châtelier-Anstett (cf. Chap. IV).

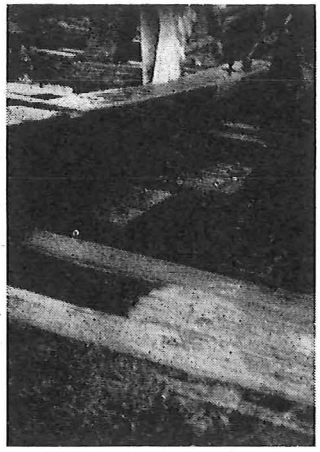
Les éprouvettes 11 P, 12 P et 13 P sont intactes. Les poids, peu différents d'un échantillon à l'autre, sont en moyenne 581 gr pour 11 P, 601 gr pour 12 P et 612 gr pour 13 P.

Les cubes de béton 1 M sont fortement dégradés (photo 4, pl. 47). Les coins et les arêtes sont abattus, le béton est friable en surface. Poids 7.742, 7.710 et 7.965 kg. Les cubes de béton 1 S ont les coins un peu ébréchés. Poids 10.000, 9.905 et 9.934 kg. Les cubes 1 P sont intacts; poids 9.925, 9.940 et 9.944 kg.

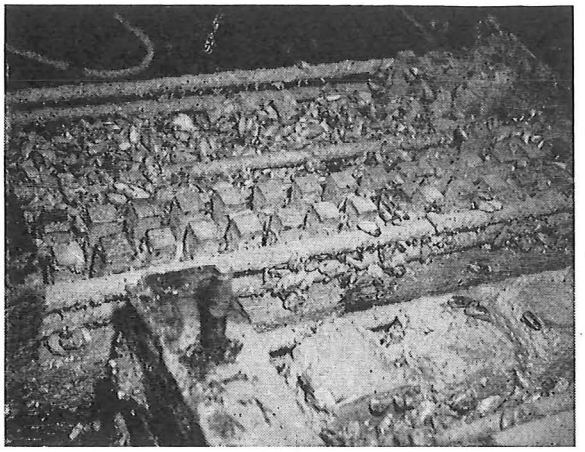
Le cylindre de béton armé 1 M immergé à mi-marée est dégradé sur presque tout le pourtour de l'éprouvette, comme le montre la photo 7 de la planche 46, prise à Ostende par le Service photographique des Ponts et Chaussées le 16 septembre 1954. Les bases insérées dans les alvéoles des caisses sont intactes, mais ailleurs les graviers sont apparents en saillie. L'armature la plus proche de la surface (1 cm) est mise à nu sur 5 cm de longueur environ. Il y a un liseré vert sur le béton au contact de la barre. Aucune fissure n'est visible.

Les autres cylindres de béton avec armatures sont tous intacts.

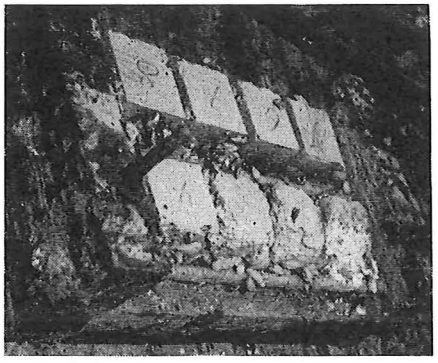
Ciments 2. Les éprouvettes de mortier 21 M, 22 M et 23 M sont détruites. Il en est de même de 21 S. Les 4



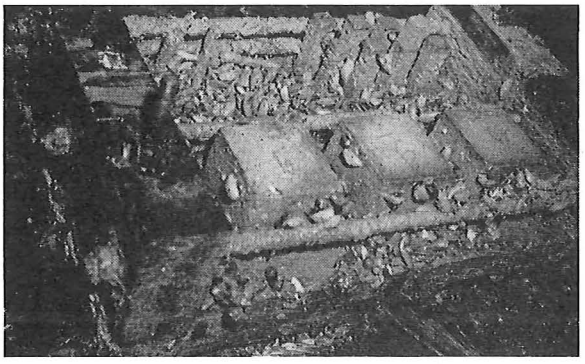
1



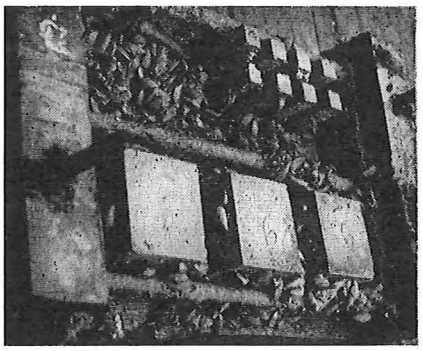
2



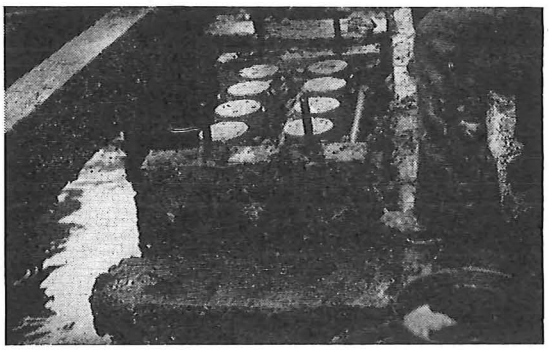
3



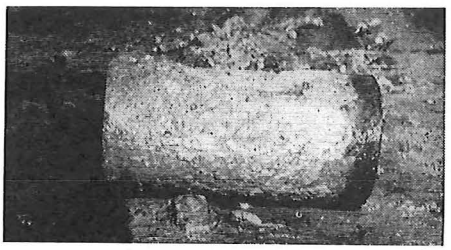
4



5

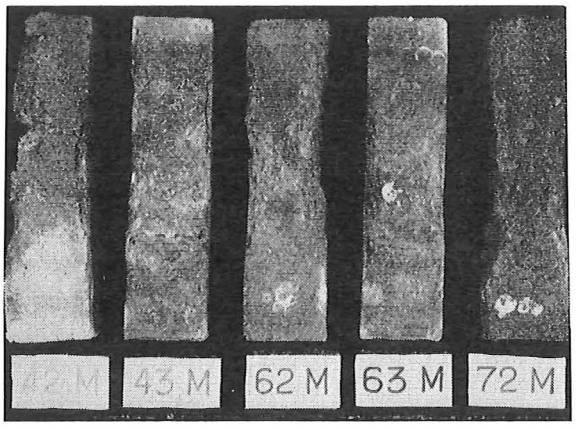


6

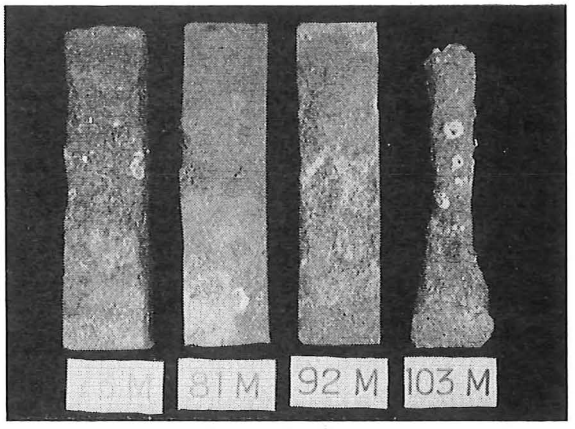


7

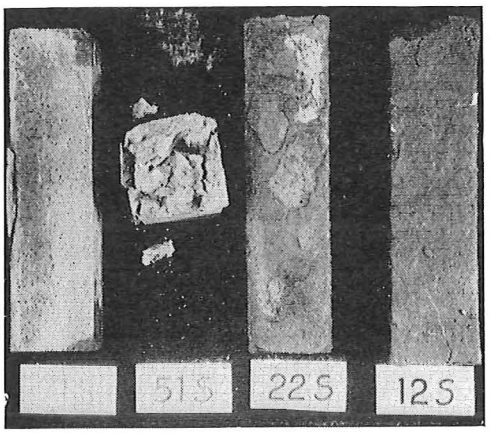
Planche 46.



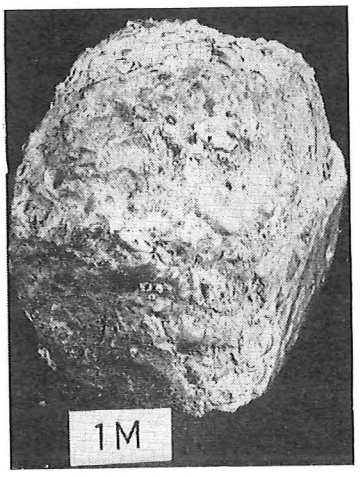
1



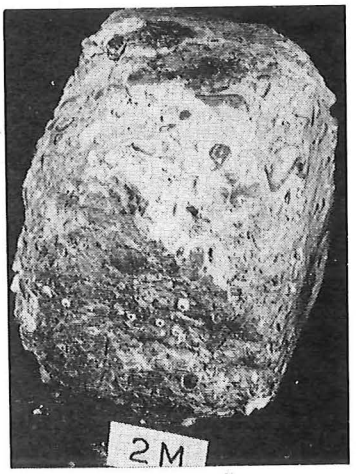
2



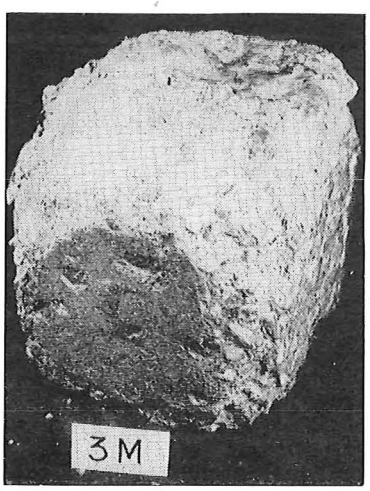
3



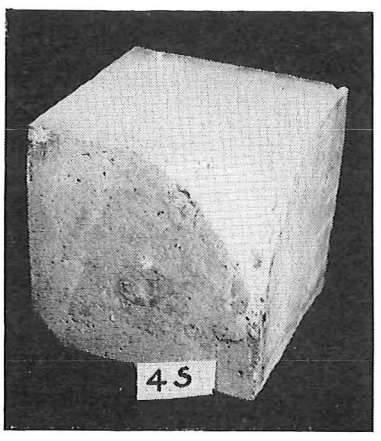
4



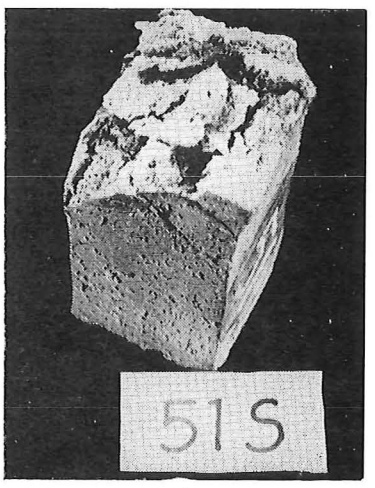
5



6



7



8

Planche 47.

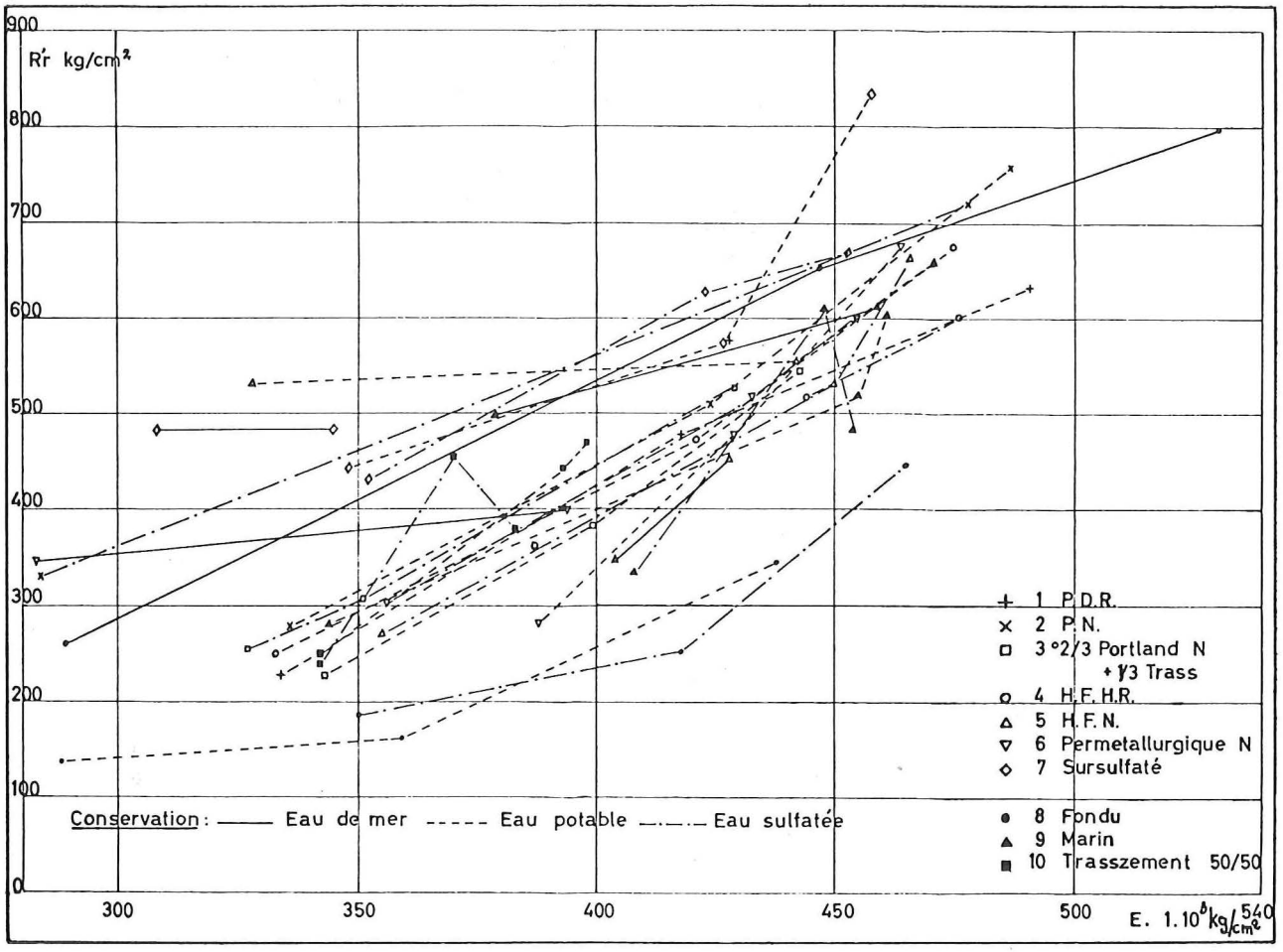


Planche 48.

éprouvettes 22 S subsistent. 2 d'entre elles ont les faces de lissage boursouflées et sont cintrées (photo 3, pl. 47), les 2 autres ont des coins ébréchés (poids 623, 622, 625 et 616 gr). 3 éprouvettes 23 S sont intactes, une a un coin éclaté (poids 616, 625, 626 et 627 gr). Les éprouvettes 21 P, 22 P et 23 P sont intactes; les poids moyens sont : pour 21 P 586 gr, pour 22 P 589 gr, pour 23 P 611 gr.

Les 3 cubes 2 M ont subi des dégradations importantes (photo 5, pl. 47). Poids 8.327, 8.772 et 8.792 kg. Les 3 cubes 2 S sont intacts (poids 9.900, 10.020 et 9.942 kg), ainsi que les cubes 2 P (poids 9.955, 9.972 et 9.913 kg).

Le cylindre de béton armé 2 M immergé à mi-marée est moins dégradé en surface que le cylindre 1 M. Il ne montre ni fissure ni dénudation de barre. Tous les autres cylindres sont intacts.

Ciment 3. Les éprouvettes 31 M, 32 M et 33 M sont disparues. Il reste 3 éprouvettes 31 S en bon état (poids 571, 580 et 590 gr). De 32 S, 2 éprouvettes sont en bon état, 2 sont fissurées et gonflées aux extrémités (poids 603, 598, 583 et 597 gr). Les 4 éprouvettes 33 S sont en bon état, poids moyen 596 gr. Les éprouvettes conservées dans l'eau potable sont intactes; leurs poids moyens sont : pour 31 P 567 gr; pour 32 P 583 gr; pour 33 P 595 gr.

Parmi les cubes 3 M, un est en bon état (9.145 kg), un autre est écorné (8.890 kg), le dernier est très écorné (8.639 kg) (photo 6, pl. 47). Les 3 cubes 3 S ont les faces de lissage boursouflées et écaillées (poids 9.842, 9.826 et 9.865 kg). Les poids des cubes 3 P sont 9.774, 9.872 et 9.856 kg.

Le cylindre de béton armé 3 M est légèrement érodé en surface; tous les autres sont sans dégradations.

Ciment 4. Il ne reste rien des éprouvettes 41 M. De 42 M, 3 éprouvettes sont en débris friable; une est restée entière mais est fortement attaquée (photo 1, pl. 47). L'intérieur est verdâtre, le poids est de 522 gr. Les 4 éprouvettes 43 M (photo 1, pl. 47) sont fortement attaquées sur la face de lissage et aux arêtes contiguës (poids 597, 611, 594 et 600 gr).

Dans l'eau sulfatée, il ne reste rien des éprouvettes 41 S; il subsiste une éprouvette 42 S peu dégradée (598 gr) et toutes les éprouvettes 43 S intactes (poids 607, 606, 617 et 612 gr). Pour les éprouvettes retirées de l'eau potable, les poids moyens sont : pour 41 P, 578 gr; pour 42 P, 595 gr et pour 43 P, 605 gr.

2 cubes 4 M ont une arête légèrement ébréchée, le 3e est intact (poids 9.919, 9.801 et 9.893 kg). Les 3 cubes 4 S ont un coin enlevé et les autres fendillés (photo 7, pl. 47); deux d'entre eux ont une face boursouflée (poids 9.856, 9.931 et 9.899 kg). Les poids des cubes 4 P sont 10.014, 9.909 et 9.896 kg.

Pour ce qui est des cylindres, seul 4 M a un peu de laitance enlevée en surface.

Ciment 5. Il ne subsiste rien des éprouvettes 51 M. Les éprouvettes 52 M sont corrodées superficiellement, 2 sont légérement ébréchées aux arêtes (poids 587, 593, 593, 578 gr). Les arêtes des éprouvettes 53 M sont légèrement corrodées (poids 608, 605, 605 et 595 gr). Dans l'eau sulfatée, 2 éprouvettes 51 S sont entières et relativement intactes; il reste en outre deux demi-éprouvettes très friables (fig. 3, pl. 47 et fig. 8, pl. 47) (poids : 574, 578, 280 et 247 gr). Les 4 éprouvettes 52 S sont en bon état (poids 604, 593, 599 et 609 gr). Il en est de même des éprouvettes 53 S, poids moyen 609 gr. Pour les éprouvettes retirées de l'eau potable, les poids moyens sont : pour 51 P, 568 gr; pour 52 P, 594 gr; pour 53 P, 607 gr.

Les cubes 5 M ont les coins et les arêtes légèrement ébréchés (poids 9.990, 9.766 et 9.957 kg). Les 3 cubes 5 S sont en bon état (poids 10.068, 9.960 et 9.882 kg). Les poids des cubes 5 P sont 10.005, 9.932 et 9.961 kg. Tous les cylindres de béton sont sans dégradations.

Ciment 6. Toutes les éprouvettes 61 M ont disparu. Les éprouvettes 62 M sont légèrement corrodées en forme de fuseau (photo 1, pl. 47) (poids 518, 515, 544, 514 gr). Les éprouvettes 63 M ont la même déformation, mais moins prononcée (photo 1, pl. 47) (poids 585, 577, 587, 586 gr).

Toutes les barrettes de mortiers retirées de l'eau sulfatée sont en bon état.

Les poids moyens sont les suivants :

61 S, 565 gr; 62 S, 589 gr; 63 S, 600 gr.

Les poids moyens des éprouvettes retirées de l'eau potable sont :

61 P, 564 gr; 62 P, 582 gr; 63 P, 596 gr.

1 cube 6 M a une arête à moitié ébréchée; ils ont tous l'aspect rugueux (Poids 9.941, 9.857 et 9.860 kg). Les cubes retirés de l'eau sulfatée sont en bon état (poids 9.820, 9.962 et 9.994 kg). Il en est de même des cubes 6 P (poids 9.883, 9.872 et 9.999 kg). Tous les cylindres sont intacts.

Ciment 7. Il ne subsiste rien des éprouvettes 71 M. Les éprouvettes 72 M sont assez corrodées en forme de fuseau (photo 1, pl. 47) (poids 522, 493, 509 et 517 gr). Les éprouvettes 73 M ne sont guère corrodées, sauf la face de lissage et les arêtes adjacentes (photo 2, pl. 47) (poids 565, 574, 574 et 568 gr).

Dans l'eau sulfatée, une éprouvette 71 S est intacte, 2 ont les extrémités éclatées et la dernière est fêlée transversalement en son milieu (photo 3, pl. 47) (poids 568, 569, 565 et 577 gr). 3 éprouvettes 72 S sont en bon état, la dernière a une arête ébréchée sur 4 cm (poids 587, 580, 599 et 577 gr). 2 éprouvettes 73 S sont intactes, 1 a un coin abîmé et la dernière a une arête abîmée et gonflée sur la moitié de sa longueur (poids 599, 608, 607 et 597 gr). Les éprouvettes retirées de l'eau potable ont les poids moyens suivants : 71 P, 571 gr; 72 P, 585 gr; 73 P, 596 gr.

Les 3 cubes 7 M sont en bon état, l'un d'eux a un aspect un peu rugueux (poids 9.717, 9.630 et 9.652 kg). Les cubes 7 S sont intacts (poids 9.850, 9.891 et 9.888 kg). Les poids des cubes 7 P sont 9.907, 9.934 et 9.859 kg. Tous les cylindres sont sans dégradations.

Ciment 8. Il subsiste une éprouvette entière 81 m (photo 2, pl. 47), ses arêtes sont abimées en gonflées. Des 3 autres éprouvettes, il reste des débris assez durs. Le poids de l'éprouvette conservée est 598 gr. Les 4 éprouvettes 82 M sont en bon état (poids moyen 599 gr). Il en est de même de 83 M (poids moyen 614 gr). Dans l'eau sulfatée, toutes les éprouvettes sont intactes. Les poids moyens sont : 81 S, 577 gr; 82 S, 605 gr; 83 S, 620 gr. Les poids moyens des éprouvettes retirées de l'eau potable sont : 81 P, 574 gr; 82 P, 618 gr; 83 P, 630 gr.

Tous les cubes sont en bon état. Les poids sont les suivants :

8 M, 9.884, 10.070 et 10.047 kg
8 S, 10.030, 10.024 et 10.070 kg
8 P 10.093, 10.187 et 10.236 kg.

Les cylindres n'ont aucune dégradation.

Ciment 9. Il n'existe plus d'éprouvettes 91 M. De 92 M il reste 1 éprouvette légèrement corrodée (photo 2, pl. 47), 2 éprouvettes très corrodées et une éprouvette en débris (poids 598, 570, 573 et 290 gr). 3 éprouvettes 93 M sont à peine dégradées, la dernière l'est très fortement (poids 610, 599, 605 et 536 gr).

Toutes les éprouvettes retirées de l'eau sulfatée sont en bon état. Les poids moyens sont : 91 S, 576 gr; 92 S, 602 gr; 93 S, 609 gr. Les poids moyens des éprouvettes conservées à l'eau potable sont : 91 P, 573 gr; 92 P, 593 gr; 93 P, 608 gr.

Tous les cubes sont en bon état. Les poids respectifs sont :

pour 9 M : 9.882, 9.883 et 10.010 kg;
pour 9 S : 9.931, 9.940 et 9.944 kg;
pour 9 P : 9.965, 9.915 et 9.771 kg.

Tous les cylindres sont sans dégradations.

Ciment 10. Toutes les éprouvettes 101 M et 102 M ont disparu. Il reste 2 éprouvettes 103 M très corrodées en forme de poinçon et des débris des deux autres (photo 2, pl. 47) (poids 189, 164, 51 et 51 gr). Dans l'eau sulfatée, toutes les éprouvettes sont en bon état. Les poids moyens sont respectivement :

101 S, 574 gr; 102 S, 593 gr; 103 S, 592 gr.

Ceux des éprouvettes conservées dans l'eau potable sont :

101 P, 571 gr; 102 P, 595 gr; 103 P, 595 gr.

Il n'a pas été fait de cubes ni de cylindres de béton avec le ciment 10.

Cubes de béton marqués 10. Il s'agit de cubes confectionnés avec le ciment 2, dans le béton desquels 25 % du sable du Rhin a été remplacé par du sable fin des dunes (cf. Chap. II, par. 9). Ces cubes n'ont été immergés que dans l'eau sulfatée et dans l'eau potable. Les poids des cubes 10 P sont : 9.943, 9.950 et 9.940 kg.

Pour ce qui est des cubes 10 S, lors d'un nettoyage des bacs de conservation effectué le 24 mai 1950 à l'occasion d'un renouvellement de la solution sulfatée, il a été constaté que les cubes 10 S étaient désagrégés au point que le cœur seul avait encore quelque consistance. Ces fragments devenus inutilisables ont été évacués à cette date, après environ 16 ans d'immersion.

☞ Les cylindres armés de béton 10 conservés au laboratoire étaient intacts après 20 ans.

4. — Résultats des essais mécaniques

A) Mortiers

Les résultats mentionnés ci-après sont à considérer sous les mêmes réserves qu'après 11 ans d'immersion (cf. Ch. XII, par. 3, A).

Ciment 1.

12 S : il reste 3 éprouvettes endommagées		16.2 - 178,8
13 S 58.7-557.5		
11 P 40.9-227.5	12 P 64 -479.8	13 P 75.1-631,6

Ciment 2.

22 S 34.1-330.4	23 S 78 -717.2	
21 P 40.5-278.1	22 P 62.2-512	23 P 79.1-757.2

Ciment 3.

31 S 43.7-255.8	32 S 49.1-306.1	33 S 73.9-528.2
31 P 40.9-227.3	32 P 54.1-384.5	33 P 62.6-547.1

Ciment 4.

43 M 73.7-363.1		
42 S 72.5-533.5	43 S 94.7-598.2	
41 P 38.2-250.2	42 P 59.4-473.5	43 P 74.5-674

Ciment 5.

52 M 70.4-348.2	53 M 80 -454.5	
51 S 38.2-270.8	52 S 62.6-531.9	53 S 50.5-663.4
51 P 42.4-532.5	52 P 71.4-557.1	53 P 71.5-658.6

Ciment 6.

62 M 38 -343.5	63 M 72.4-406	
61 S 49.2-303.7	62 S 48.5-517.4	63 S 60.7-600.4
61 P 42.9-282.2	62 P 59.5-478.6	63 P 65.5-676.7

Ciment 7.

72 M 53.7-486.5	73 M 75.7-485.2	
71 S 66.9-433.8	72 S 65 -629.8	73 S 72.5-672.5
71 P 67.2-444.1	72 P 68 -574.8	73 P 78.1-836.2

Ciment 8.

81 M 9.5-259.8	82 M 90.9-653.2	83 M 72 -799.2
81 S 40 -186.4	82 S 53.9-252	83 S 62.2-449.4
81 P 31.7-137.7	82 P 41.9-162.7	83 P 52.6-346.1

Ciment 9.

92 M 53.8-498.3	93 M 77.4-612.3	
91 S 42.2-334	92 S 58.2-484.2	93 S 70 -610.5
91 P 41 -279.6	92 P 69.5-522.9	93 P 66.1-604.4

Ciment 10.

101 S 55.5-238.4	102 S 55.2-382	103 S 61 -456.6
101 P 38.6-250.1	102 P 61.6-443.1	103 P 63.4-471.1

B) Bétons

Certains cubes conservés dans la mer et dans l'eau sulfatée étaient devenus informes. Les altérations de surface des autres ne les rendaient plus guère propres à des

essais de compression. Pour ces raisons, on a extrait de tous ces cubes des éprouvettes géométriquement parfaites, cylindriques de 100 cm² de section et de 10 cm de hauteur. Elles ont été confectionnées au moyen de sondes diamantées et les bases ont été rectifiées au moyen de meules diamantées. Les cubes conservés dans l'eau potable ont été comprimés tels qu'ils étaient.

Des essais comparatifs de compression sur cubes de 16 cm de côté et sur éprouvettes cylindriques de 100 cm² de section (diamètre 11,3cm) et de 10 cm de hauteur, extraites par sondage de cubes de 16 cm, ont été effectués pour comparer les résultats. Il a été confectionné 18 cubes du béton suivant :

Gravier 5-20	1250 kg
Sable du Rhin O-2	610 kg
Ciment P.H.R.	350 kg
Eau	150 kg

Poids spécifique 2360 kg/m³.

Les résultats ont été les suivants :

Age (jours)	Résistance à la compression (kg/cm²) Cubes	Cylindres
3	242	208.3
28	346	332
98	400	430.7

Les résistances sont donc statistiquement équivalentes pour les comparaisons dont il s'agit, qui ne peuvent être considérées comme strictement quantitatives, mais portent plutôt sur des ordres de grandeurs.

Les résultats obtenus dans les conditions indiquées sont les suivants.

Ciment 1.

1 M	Poids moyen	2.392 kg	R′ =	710.7 kg/cm²
1 S		2.397 kg		753.7
1 P		9.700 kg		636.7

Toutes les ruptures sont explosives.

Ciment 2.

2 M	Poids moyen	2.383 kg	R′ =	698.3 kg/cm²
2 S		2.392		817.3
2 P		9.750		625.3

Toutes les ruptures sont explosives.

Ciment 3.

3 M	Poids moyen	2.353 kg	R′ =	495 kg/cm²
3 S		2.367		534.3
3 P		9.833		481.7

Les ruptures sont moins brusques que celles de 2.

Ciment 4.

4 M	Poids moyen	2.395 kg	R′ =	865.3 kg/cm²
4 S		2.422		743
4 P		9.733		583

Toutes les ruptures sont explosives. Le béton de 4 M est de teinte vert foncé; dans les cavités on distingue des taches blanches de cristallisation. Le béton de 4 S est vert foncé. Celui de 4 P est vert clair avec des auréoles grises autour de certaines pierres.

Ciment 5.

5 M	Poids moyen	2.405 kg	R′ =	636.7 kg/cm²
5 S		2.423		649
5 P		9.717		590.7

Toutes les ruptures sont explosives; le béton de toutes les éprouvettes est vert foncé.

Ciment 6.

6 M	Poids moyen	2.398 kg	R′ =	686 kg/cm²
6 S		2.403		651.7
6 P		9.800		548

Toutes les ruptures sont explosives; le béton de toutes les éprouvettes est vert très foncé.

Ciment 7.

7 M	Poids moyen	2.383 kg	R′ =	863 kg/cm²
7 S		2.406		522
7 P		9.733		709

Les ruptures de 7 M et 7 P sont très explosives; celle de 7 S l'est moins. Toutes les cassures sont d'un vert très foncé avec de nombreuses taches blanches semblant formées de petits cristaux tapissant les parois de cavités.

Ciment 8.

8 M	Poids moyen	2.385 kg	R′ =	504.3 kg/cm²
8 S		2.347		240.3
8 P		9.867		200

Les ruptures sont lentes et progressives. Les bétons 8 M et 8 S ont un aspect gris clair poussiéreux. Le béton 8 P a un aspect gris verdâtre et terreux.

Ciment 9.

9 M	Poids moyen	2.408 kg	R′ =	708 kg/cm²
9 S		2.408		634.7
9 P		9.700		560

Toutes les ruptures sont explosives. Les teintes des bétons sont les suivantes :

9 M vert foncé;
9 S vert moyen;
9 P gris.

Béton 10 P (cf. par. 3)

Poids moyen 9.817 kg $R' = 598.7$ kg/cm².

5. — Essais non destructifs sur les barrettes de mortier

Préalablement aux essais de flexion et de compression sur les barrettes de mortier encore susceptibles d'y être soumises, M. K. Gamski a procédé à la détermination de leur fréquence propre de vibration longitudinale par une méthode de résonance [15]. On peut en déduire le module d'élasticité dynamique sous tension nulle par la formule $E = \frac{v\gamma}{g} = \frac{f\lambda P}{Vg}$, dans laquelle

f = fréquence propre de l'éprouvette
λ = longueur d'onde (2×16 cm $= 32$ cm)
P = poids de l'éprouvette
V = volume de l'éprouvette ($4 \times 4 \times 16$ cm³)

Le tableau ci-après résume les résultats [16].

Ils sont reproduits en diagramme à la planche 48.

On a remarqué que les éprouvettes conservées dans l'eau de mer (peu nombreuses) et dans l'eau sulfatée présentaient, pour la plupart et pour tous les ciments sauf le n° 1, deux fréquences propres, pas très différentes, mais cependant distinctes. Elles s'expliquent probablement par une différenciation entre le cœur de l'éprouvette et sa périphérie qui est plus ou moins modifiée par l'action du milieu d'immersion agressif. Le phénomène ne se manifeste pas pour les éprouvettes conservées dans l'eau potable.

Les diagrammes de la planche 48 permettent de formuler les remarques suivantes. En général, les points expérimentaux sont assez bien groupés pour les conservations dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée immobiles et pour tous les ciments, sauf le 8 dont les points se placent plus bas et le 7, dont les points se placent plus haut. Il y a une anomalie pour le point 51 P.

Les éprouvettes retirées de la mer qui permettent encore des mesures, c'est-à-dire des ciments 6, 7, 8, et 9, ont pour un même module dynamique des résistances plus élevées que les éprouvettes des mêmes ciments conservées dans l'eau potable ou sulfatée. Les éprouvettes 52 M et 53 M font exception.

Globalement, le module d'élasticité dynamique déterminé de la manière ici considérée ne semble pas approprié comme mesure de la détérioration marine.

Ciment	Conservation	éprouvette	Poids gr	Fréquence propre cyc./sec	E kg/cm²	R'_r kg/cm²
1 - P.D.R.	eau de mer	11	—	—	—	—
		12	—	—	—	—
		13	—	—	—	—
	eau potable	11	581,3	11850	334000	227,5
		12	602,5	13025	418000	479,8
		13	617,3	13975	491000	631,6
	eau sulfatée	11	—	—	—	—
		12	653	—	—	178,8 *
		13	635,5	13025	428000	577,5
2 - P.N.	eau de mer	21	—	—	—	—
		22	—	—	—	—
		23	—	—	—	—
	eau potable	21	586	11850	336000	278,1
		22	589	13275	424000	512
		23	611	13975	487000	757,2
	eau sulfatée	21	—	—	—	—
		22	621,6	10570	284000	330,4 *
		23	623,6	13716	478000	717,2
3 - 2/3 Portland + 1/3 Trass	eau de mer	31	—	—	—	—
		32	—	—	—	—
		33	—	—	—	—
	eau potable	31	567	12137	343000	227,3
		32	582,5	12975	399000	384,5
		33	594,7	13525	443000	547,1
	eau sulfatée	31	580,3	11733	327000	255,8
		32	595,2	12010	351000	306,1
		33	595,7	13300	429000	528,2

Chapitre XIV — PRELEVEMENTS DU 1er AVRIL 1964 (après trente années d'immersion) MORTIERS ET BETONS

1. — Opérations

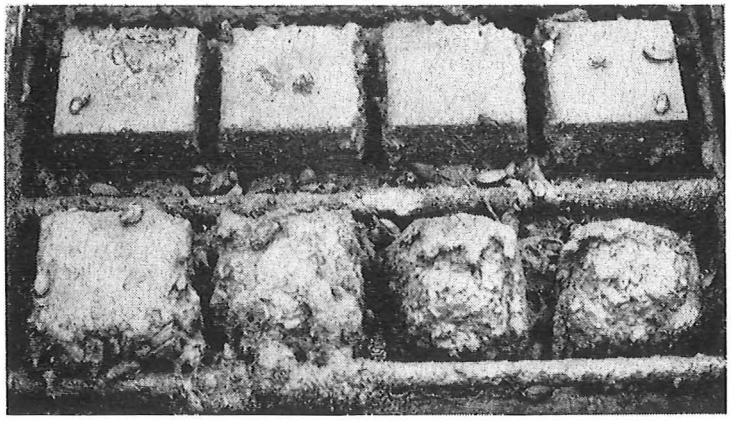
La dernière série d'éprouvettes a été retirée de la mer à Ostende le 1er avril 1964 par les soins de l'entreprise Van Huele, sous la direction de M.M. F. Campus et R. Dantinne et de Melle M. Dzulynski, en présence de

Ciment	Conservation	éprouvette	Poids gr	Fréquence propre cyc./sec	E kg/cm²	R'r kg/cm²
4 - H.F.H.R.	eau de mer	41	—	—	—	—
		42	522	—	—	—
		43	600,5	12560	387000	363,1
	eau potable	41	578,2	11875	333000	250,2
		42	595,5	13175	421000	473,5
		43	604,5	13900	475000	674
	eau sulfatée	41	—	—	—	—
		42	598	13500	404000	518,5
		43	610,5	13850	476000	598,2
5 - H.F.N.	eau de mer	51	—	—	—	—
		52	587,7	12950	444000	348,2
		53	603,2	13180	428000	454,5
	eau potable	51	568	11887	328000	532,5
		52	596,7	13487	44200	557,1
		53	607,2	13812	471000	658,6
	eau sulfatée	51	576	12300	355000	270,8
		52	601,2	13537	466000	531,9
		53	608,7	13710	450000	663,4
6 - Permétallurgique N	eau de mer	61	—	—	—	—
		62	522,7	11500	283000	343,5 *
		63	583,7	12850	394000	400
	eau potable	61	653,5	12075	388000	282,2
		62	582	13412	429000	478,6
		63	595,5	13860	464000	676,7
	eau sulfatée	61	565	12440	356000	303,7
		62	589,2	13414	433000	517,4
		63	599,5	13657	455000	600,4
7 - Sursulfaté	eau de mer	71	—	—	—	—
		72	510,2	12133	308000	486,5 *
		73	570,2	12175	345000	485,2
	eau potable	71	571,2	12200	384000	444,1
		72	585	13387	427000	574,8
		73	596,2	13750	458000	836,2
	eau sulfatée	71	569,7	12319	352000	433,8
		72	585,7	13287	423000	629,8
		73	602,7	13581	453000	672,5

Ciment	Conservation	éprouvette	Poids gr	Fréquence propre cyc./sec	E kg/cm²	R'r kg/cm²
8 - Fondu alumineux	eau de mer	81	598	10900	289000	259,8 *
		82	599	14250	497000	653,2
		83	616,2	14642	541000	799,2
	eau potable	81	574	11100	288000	137,7
		82	618,2	11925	359000	162,7
		83	629,7	13050	438000	346,1
	eau sulfatée	81	576,7	12187	350000	186,4
		82	629,7	12760	418000	252
		83	619,7	13550	465000	449,4
9 - Marin	eau de mer	91	—	—	—	—
		92	580,3	12662	379000	498,3
		93	587,5	13833	459000	612,3
	eau potable	91	572,5	12125	344000	279,6
		92	595,2	13725	455000	522,9
		93	608,2	13662	461000	604,4
	eau sulfatée	91	609,3	12800	408000	334
		92	601,7	13620	454000	484,2
		93	575,7	13830	448000	610,5
10 - Trasszement	eau de mer	101	—	—	—	—
		102	—	—	—	—
		103	—	—	—	—
	eau potable	101	570,7	12125	342000	250,1
		102	589,5	12775	393000	443,1
		103	594,7	12837	398000	471,1
	eau sulfatée	101	592	11900	342000	238,4
		102	592,7	12600	383000	382
		103	574,2	12587	370000	456,6

* Eprouvettes dégradées.

M. Van Dael, Conducteur des Ponts et Chaussées. Les dernières caisses étaient numérotées VI, VII', 6, 10 et 11. On a aussi retiré les caisses de cylindres immergés à mi-marée m et m'. Les caisses b et b' étaient déjà manquantes en 1954 (cf. Chap XIII, par. 1). Quant aux caisses a et a', contenant des cylindres de béton armé, fixées sur une palée de l'estacade au niveau du tillac, au-dessus des plus hautes mers, on a constaté en 1964



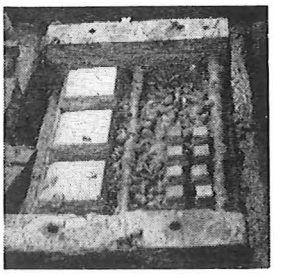
3



5



1



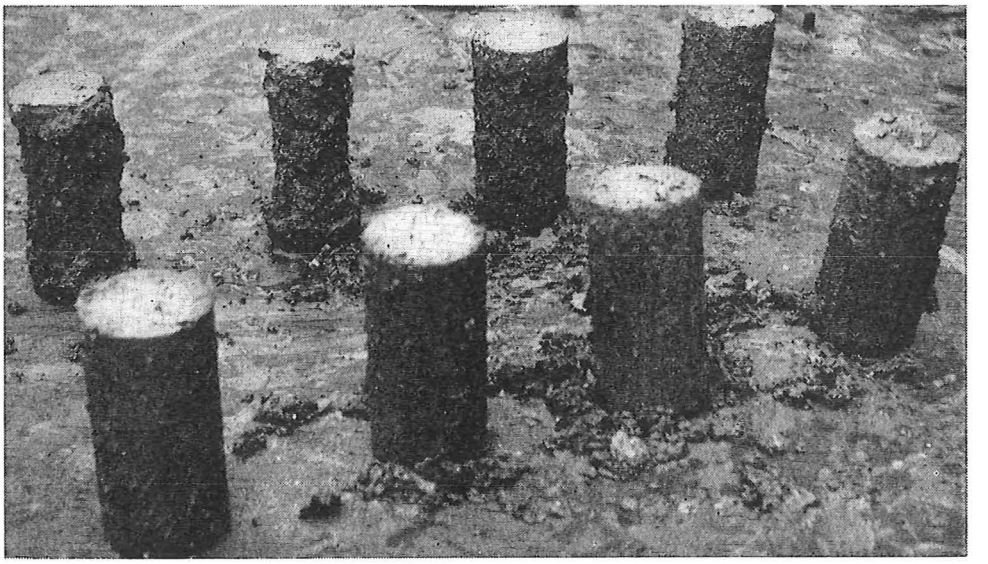
4



6



2



7

Planche 49.

qu'elles avaient été pillées. Il ne restait que 2 des 9 éprouvettes primitives, impossibles à identifier, car elles avaient été déplacées. Cette perte est regrettable, car il se peut que des constatations intéressantes auraient pu être faites sur les éprouvettes manquantes. Elle n'était pas prévisible, car les caisses a et a' étaient difficilement accessibles et il fallait disposer d'outils assez importants pour les démonter.

Depuis le prélèvement précédent en 1954, des circonstances exceptionnelles s'étaient produites du fait de l'hiver exceptionnellement rigoureux de 1962-1963 (cf. Chap. II, par. 10). La mer avait été gelée à Ostende (fig. 1 et 2). On doit y voir la cause probable de l'aggravation marquée des dégradations aux éprouvettes les plus vulnérables. Les photos de la planche 49 sont suggestives à ce sujet.

La figure 1 montre ouverte la caisse VI des mortiers des ciments 1 à 8. Les dégradations sont importantes pour les ciments 1, 2 et 3. La figure 2 montre deux caisses à béton en place; la figure 3 une des caisses ouverte. Les cubes 1, 2 et 3 sont fortement dégradés. La figure 4 montre la caisse VII' ouverte; les mortiers 10 sont très dégradés. La figure 5 montre la caisse de cylindres a en place et ouverte.

Les éprouvettes retirées des caisses ont été nettoyées sur place (fig. 6 et 7, pl. 49), étiquetées et expédiées au laboratoire, où des constatations plus détaillées ont été effectuées en même temps que sur les dernières éprouvettes retirées de l'eau sulfatée et de l'eau potable. Les figures 6 et 7 montrent nettement que les dégradations les plus importantes affectent les cubes et les cylindres des bétons 1, 2 et 3.

Comme le dernier prélèvement procurait un ensemble exceptionnel d'éprouvettes ayant séjourné pendant 30 ans dans des milieux diversement agressifs, il a paru intéressant de tenter d'en tirer le plus possible de résultats. Des suggestions à cet effet ont été sollicitées de quelques spécialistes éminents, notamment du Dr. F. M. Lea, directeur de la Building Research Station, du Dr. H. Lafuma, directeur du Centre de recherches sur les liants hydrauliques, de M. R. Dutron, directeur du Centre de recherches sciientifiques et techniques de l'industrie cimentière, du Prof. W. De Keyser, directeur du Laboratoire de chimie industrielle de l'Université libre de Bruxelles.

Compte tenu des réponses reçues, de nombreuses investigations supplémentaires et complémentaires ont été effectuées aux laboratoires de Liège, dont la nature et les résultats sont rapportés plus loin. En outre, des collections d'éprouvettes ont été remises au Prof. W. De Keyser pour y faire l'objet d'examens spéciaux de caractère physico-chimique, sous les auspices du Centre de recherches scientifiques et techniques de l'industrie cimentière.

2. — Constatations effectuées au laboratoire sur les éprouvettes retirées de la mer

A. Mortiers

Ciment 1. Du mortier 12 M, il reste 1 éprouvette très rongée (458 gr) et 3 tronçons (210, 194 et 192 gr) (fig. 1, pl. 50). Du mortier 13 M, il reste 7 tronçons fortement rongés (poids 214, 132, 146, 127, 142, 252 et 182 gr) (fig. 2, pl. 50).

Ciment 2. Du mortier 21 M, il reste 5 morceaux fortement dégradés (262, 272, 77, 92 et 98 gr) (fig. 3, pl. 50). Du mortier 22 M, il reste 4 éprouvettes entières, mais fendillées et très rongées (fig. 4, pl. 50) (poids 446, 477, 484 et 415 gr). Du mortier 23 M, il reste 2 éprouvettes entières fortement rongées (322 et 327 gr) et 2 éprouvettes cassées en 2 tronçons (266, 177, 151 et 52 gr) (photo 5, pl. 50).

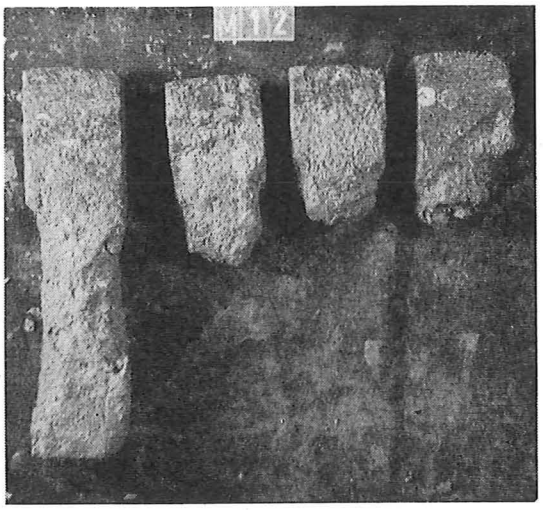
Ciment 3. Du mortier 31 M, il reste 2 éprouvettes presque entières (387 et 342 gr) fortement rongées et 2 tronçons (171 et 102 gr) (fig. 6, pl. 50). Du mortier 32 M, il reste 3 éprouvettes presque entières et fortement rongées (430, 407 et 437 gr) et un tronçon de 218 gr (fig. 1, pl. 51). Du mortier 33 M, il reste 2 éprouvettes presque entières et fortement rongées (310 et 302 gr); les 2 autres étaient divisées en 2 tronçons (238, 228, 66 et 64 gr) (fig. 2, pl. 51).

Ciment 4. Du mortier 41 M, il reste 1 éprouvette entière corrodée (458 gr) et 4 tronçons (245, 193, 190 et 50 gr) (fig. 3, pl. 51). Du mortier 42 M, il reste 3 éprouvettes entières corrodées (395, 435 et 453 gr); la dernière est en 2 tronçons de 222 et 137 gr) (fig 4, pl. 51). Le mortier 43 M a ses 4 éprouvettes corrodées mais entières (363, 297, 361 et 402 gr) (fig. 5, pl. 51).

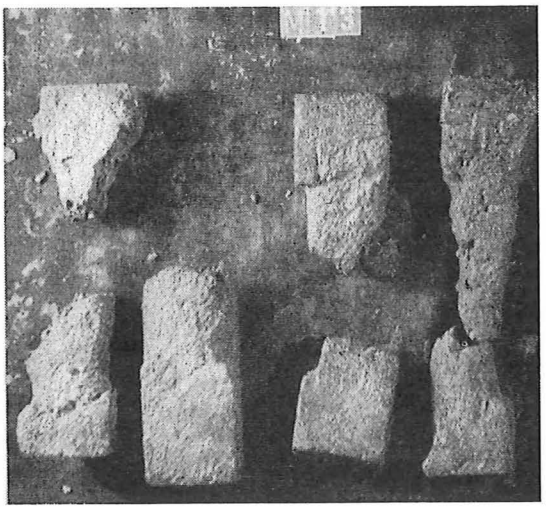
Ciment 5. Les 4 éprouvettes 51 M sont corrodées mais entières (350, 346, 412 et 408 gr) (fig. 6, pl. 51). Les 4 éprouvettes 52 M (poids moyen 593 gr) et 53 M (poids moyen 592 gr) sont intactes.

Ciment 6. Les 4 éprouvettes 61 M sont corrodées mais entières (445, 492, 438 et 443 gr) (fig. 1, pl. 52). Les 4 éprouvettes 62 M sont légèrement corrodées en surface (poids moyen 586 gr). Les 4 éprouvettes 63 M sont intactes (poids moyen 597 gr).

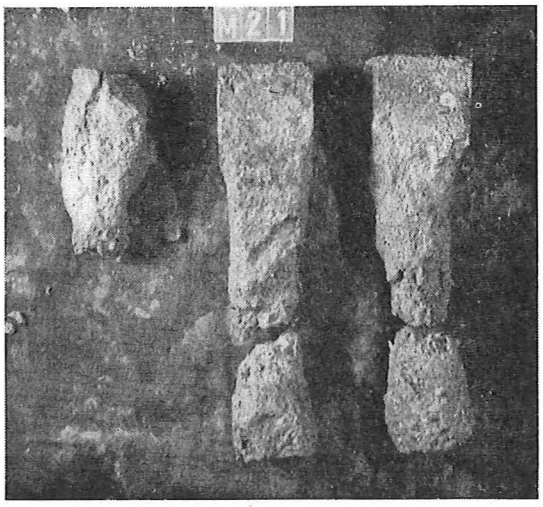
Ciment 7. Les 4 éprouvettes 71 M sont corrodées mais presque entières (485, 392, 480 et 412 gr) (fig. 2, pl. 52). Les 4 éprouvettes 72 M sont légèrement corrodées en surface (poids moyen 585 gr). Les 4 éprouvettes 73 M sont intactes (poids moyen 589 gr).



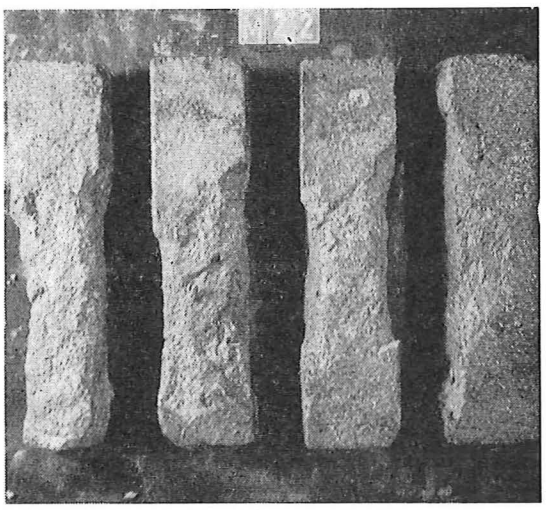
1



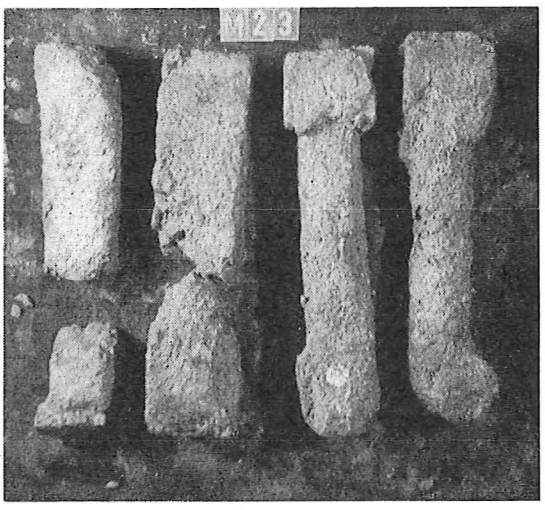
2



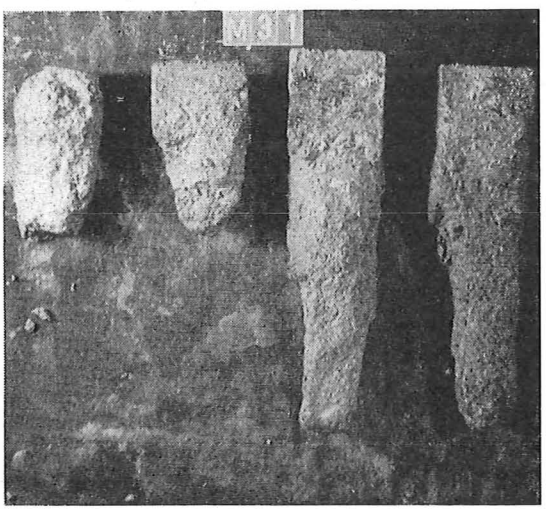
3



4

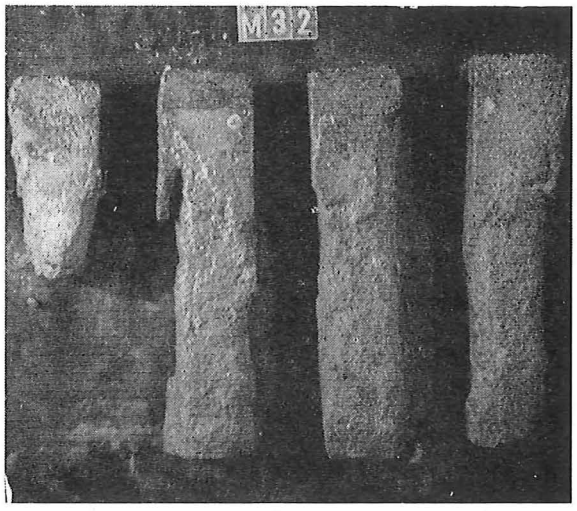


5

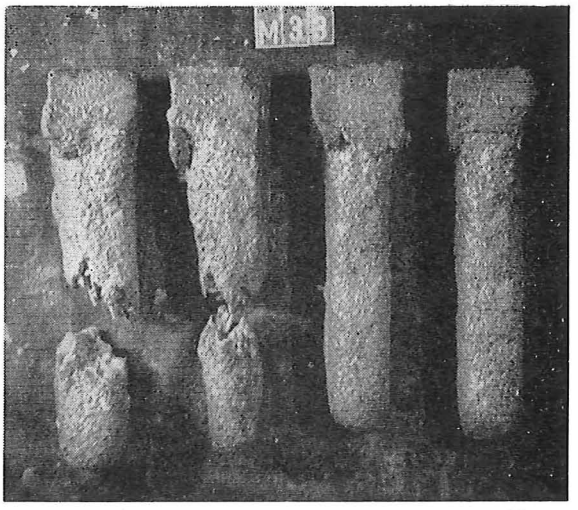


6

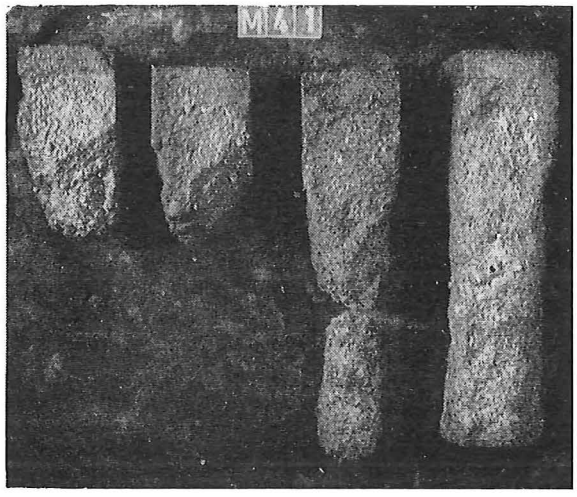
Planche 50.



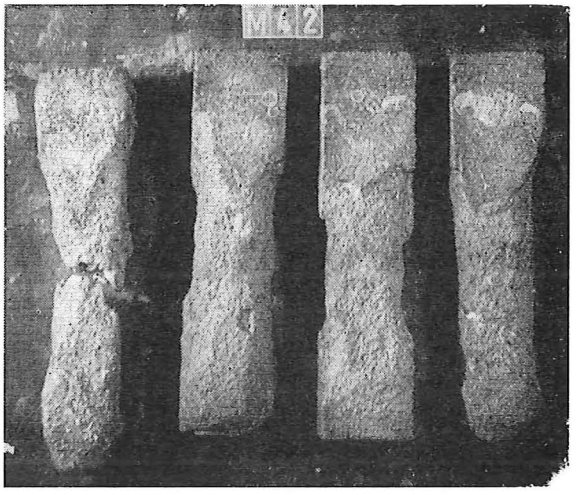
1



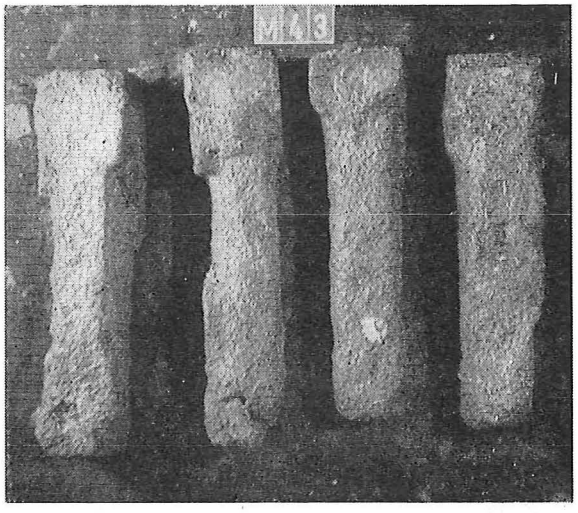
2



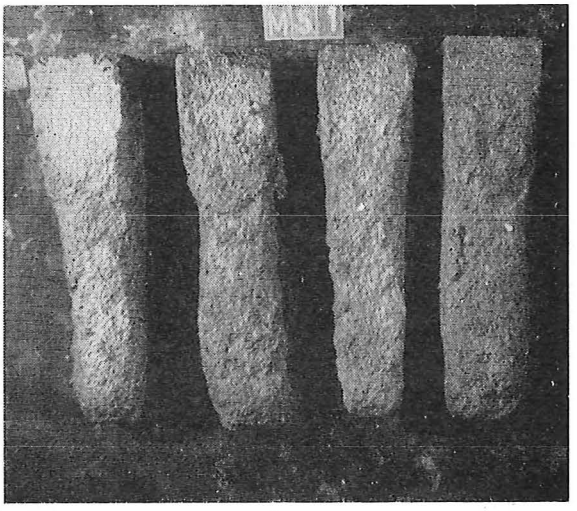
3



4

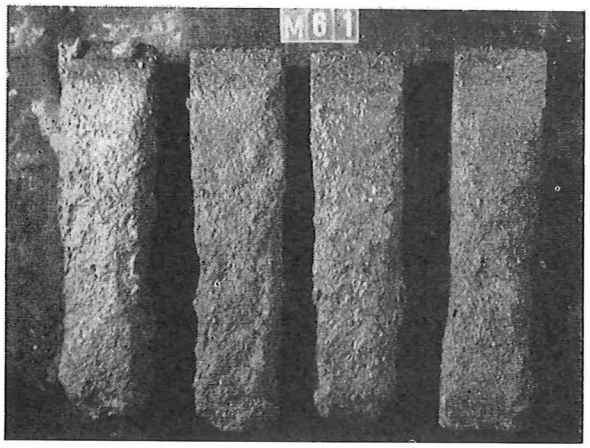


5

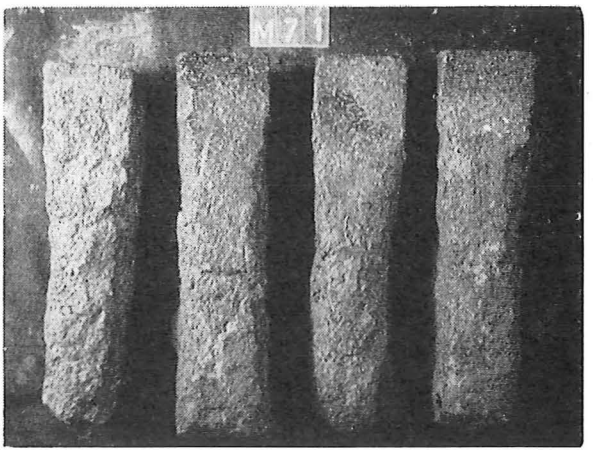


6

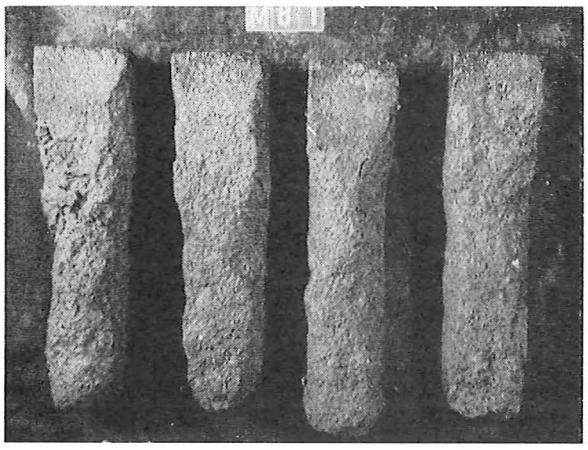
Planche 51.



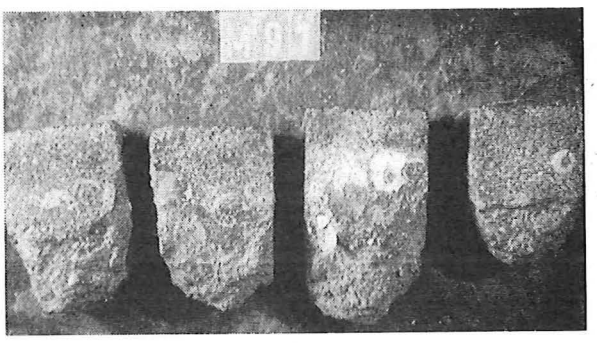
1



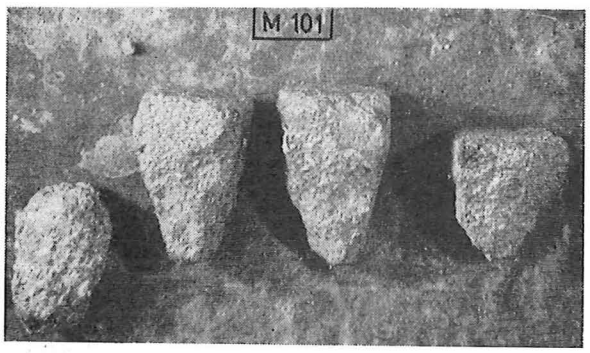
2



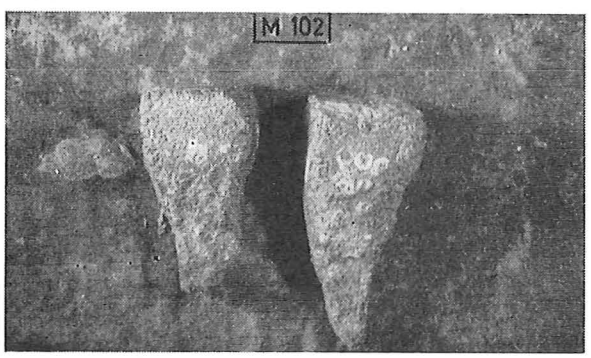
3



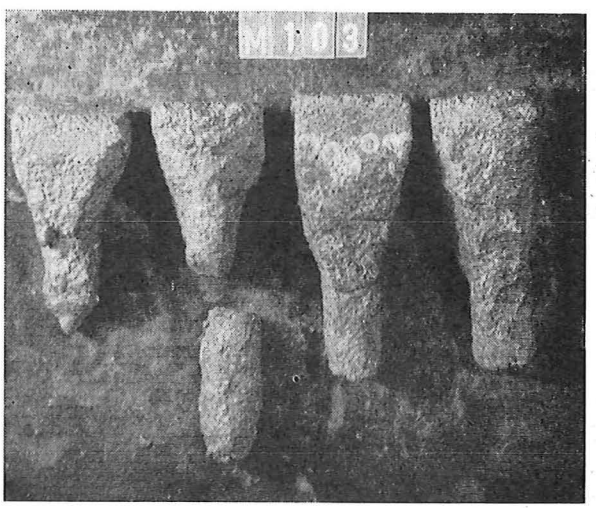
4



5

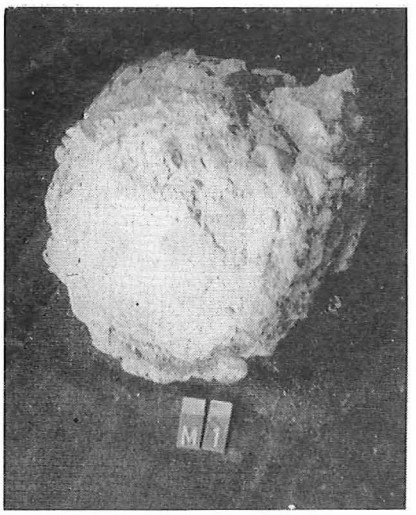


6

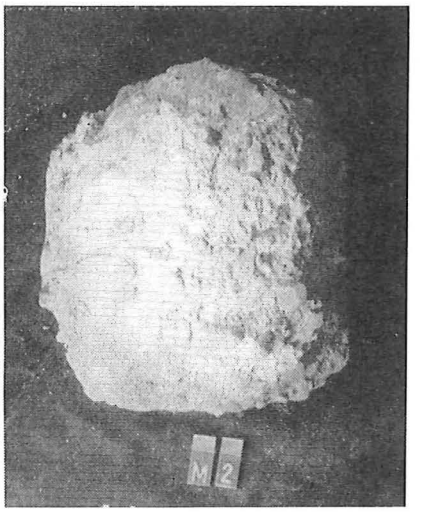


7

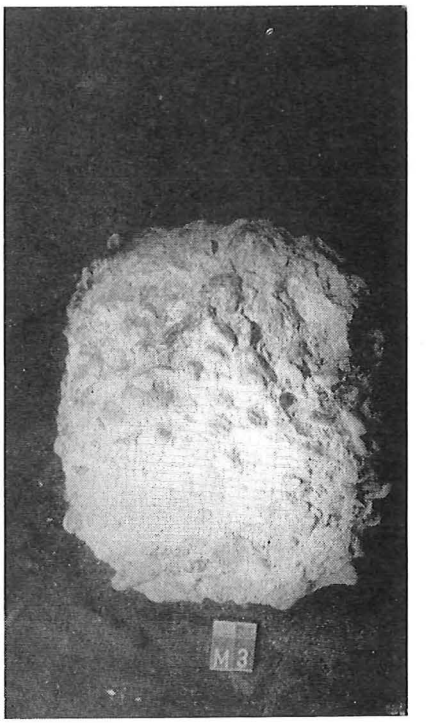
Planche 52.



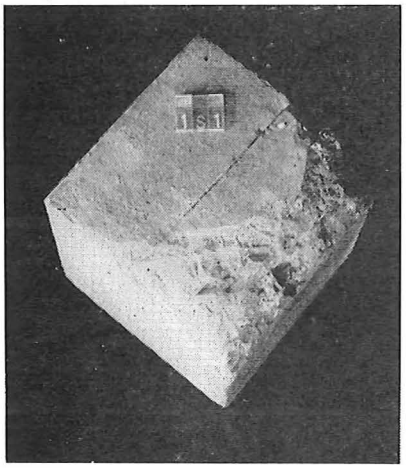
1



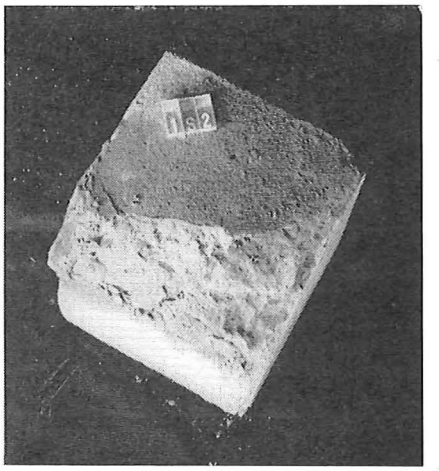
2



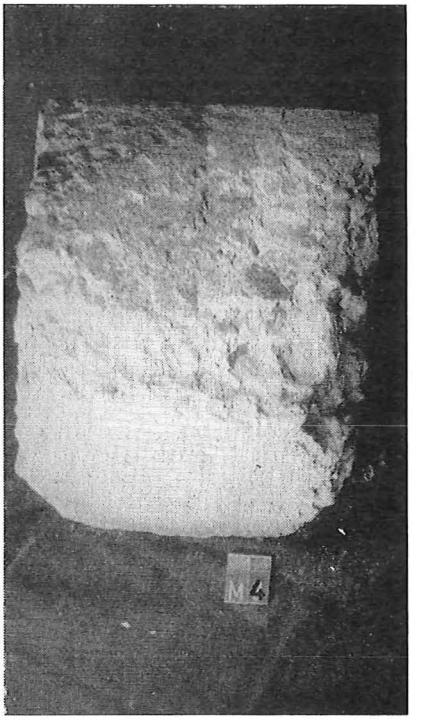
3



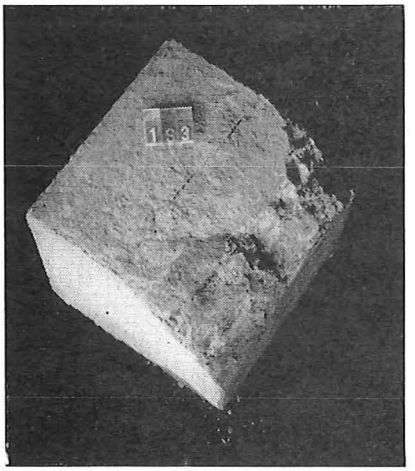
5



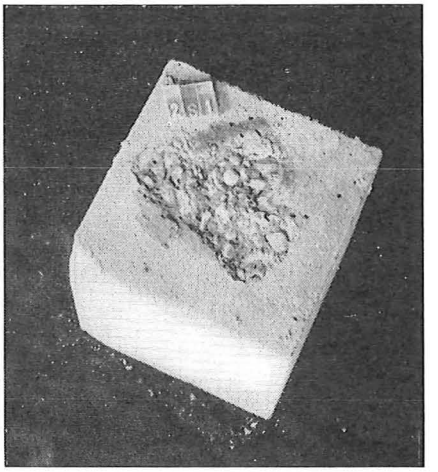
6



4



7



8

Planche 53.

Ciment 8. Les 4 éprouvettes 81 M sont corrodées mais presque entières (396, 418, 365 et 394 gr)(fig. 3, pl. 52). Les 4 éprouvettes 82 M sont corrodées en surface (572, 578, 575 et 577 gr). Les 4 éprouvettes 83 M sont intactes (578, 583, 588 et 591 gr).

Ciment 9. Du mortier 91 M, il reste 4 morceaux d'éprouvettes (204, 172, 162 et 136 gr) (fig. 4, pl. 52). Les 4 éprouvettes 92 M sont corrodées en surface (565, 572, 554 et 562 gr).

Les 4 éprouvettes 93 M sont intactes (poids moyen 606 gr).

Ciment 10. Il reste 4 fragments du mortier 101 M (129, 137, 88 et 63 gr) (fig. 5, pl. 52). Il reste 2 fragments du mortier 102 M (162 et 166 gr) (fig. 6, pl. 52). Il reste 5 tronçons du mortier 103 M (200, 186, 137, 117 et 37 gr) (fig. 7, pl. 52).

B. Bétons

Ciment 1. Les 3 cubes 1 M sont fortement corrodés, transformés en boules et friables en surface. (fig. 1, pl. 53). Poids : 6.840, 4.795 et 5.920 kg.

Ciment 2. Les 3 cubes 2 M sont dans un état analogue à celui des cubes 1 M (fig. 2, pl. 53). Poids : 7.255, 5.000 et 5.375 kg.

Ciment 3. Les cubes 3 M sont dans un état analogue aux précédents, mais moins dégradés (fig. 3, pl. 53). Poids : 7.450, 8.550 et 8.245 kg.

Ciment 4. Le cube 4 M le plus corrodé a quelques arêtes arrondies (fig. 4, pl. 53) et a perdu 5 % env. de son poids. Un autre a une perte de poids moitié moindre; le 3e est quasi entier, sauf enlèvement de laitance de surface. Poids : 9.400, 9.675 et 9.900 kg.

Ciment 5. La laitance de surface des 3 cubes 5 M est enlevée par endroits. Poids 9.925, 9.990 et 9.825 kg.

Ciment 6. Les cubes 6 M sont dans le même état que les précédents. Poids : 9.850, 9.950 et 9.725 kg.

Ciment 7. La laitance de surface des cubes 7 M est presque totalement enlevée. Poids : 9.700 pour les 3 cubes.

Ciment 8. Les 3 cubes sont intacts. Poids : 10.100, 10.100 et 10.075 kg.

Ciment 9. Comme pour le ciment 8. Poids : 9.775, 9.800 et 9.825 kg.

3. — Constatations faites au laboratoire sur les éprouvettes retirées de l'eau sulfatée

A. Mortiers

Ciment 1. 1 éprouvette 12 S est cassée en 2 morceaux (poids total 660 gr), boursouflures superficielles et quelques fissures. Les 3 autres éprouvettes 12 S sont entières et ont des coins ébréchés, des boursouflures et quelques fissures. Poids : 670, 653 et 640 gr (fig. 1, pl. 54).

Les 4 éprouvettes 13 S sont entières, 2 ont des coins ébréchés. Poids : 628, 628, 627 et 625 gr.

Ciment 2. Il subsiste 3 éprouvettes 22 S, qui sont cintrées, la surface de lissage convexe étant gonflée et fissurée (fig. 2, pl. 54). Poids : 626, 634 et 614 gr.

Les 4 éprouvettes 23 S sont entières, 2 ont les coins légèrement cassés. Poids : 611, 622, 627 et 612 gr.

Ciment 3. 1 éprouvette 31 S est fortement déformée et crevassée; les 3 autres ont les extrémités gonflées et fissurées (fig. 3, pl. 54). Poids : 634, 596, 596 et 591 gr. Du mortier 32 S, 3 éprouvettes sont intactes, la 4e a une extrémité fissurée et gonflée. Poids : 591, 592, 587 et 605 gr. Les éprouvettes 33 S sont intactes. Poids : 592, 590, 596 et 597 gr.

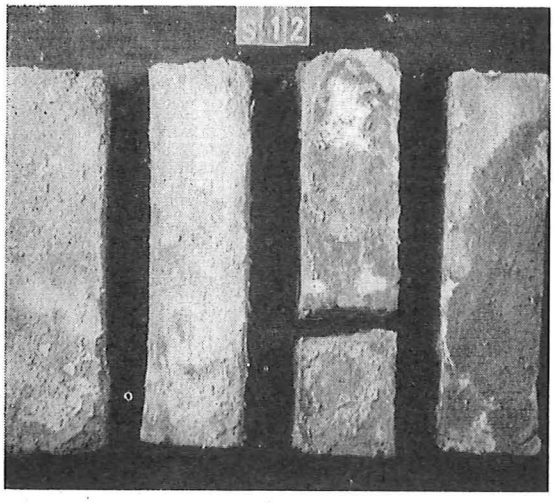
Ciment 4. 2 éprouvettes 42 S entières sont éclatées et fissurées aux extrémités (poids 571 et 570 gr). Il y a en plus 2 fragments d'un poids total de 510 gr (fig. 4, pl. 54). Les 4 éprouvettes 43 S intactes. Poids : 606, 604, 619 et 616 gr.

Ciment 5. 3 éprouvettes 51 S sont entières, mais fissurées et ébréchées aux extrémités; il subsiste un morceau de la 4e (fig. 5, pl. 54). Poids : 567, 574, 576 et 625 gr.

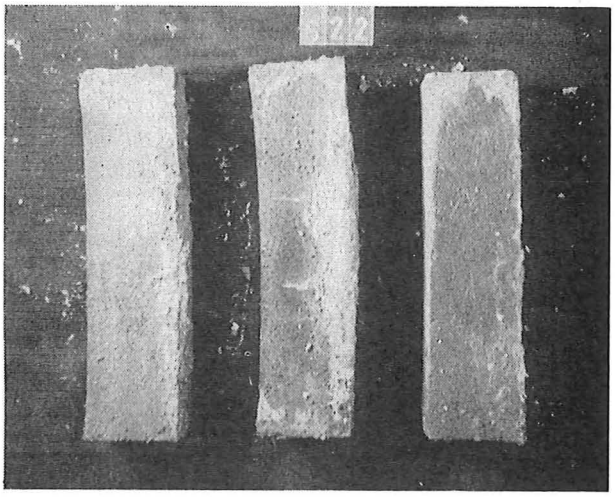
3 éprouvettes 52 S sont intactes; la 4e est entière mais a 2 coins éclatés et une fissure tout le long d'une arête. Poids : 596, 590, 600 et 600 gr.

2 éprouvettes 53 S sont intactes, 2 sont entières mais ont un petit éclat à un coin. Poids : 615, 599, 606 et 606 gr.

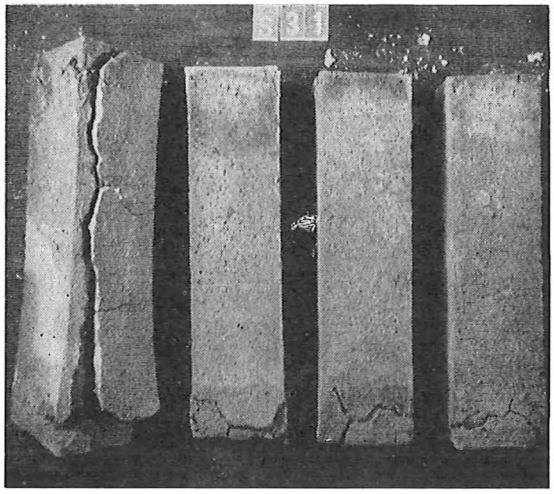
Ciment 6. Les 4 éprouvettes 61 S sont entières. 1 est intacte, 2 ont un coin légèrement ébréché, la dernière également et porte en plus une petite fissure. Poids : 568, 564, 567 et 564 gr. 3 éprouvettes 62 S sont intactes, la dernière est entière mais a un coin ébréché et une petite fissure le long d'une arête. Poids 596, 591, 587 et 588 gr. 3 éprouvettes 63 S sont intactes, la 4e a une petite fissure le long d'une arête. Poids : 598, 601, 599 et 592 gr.



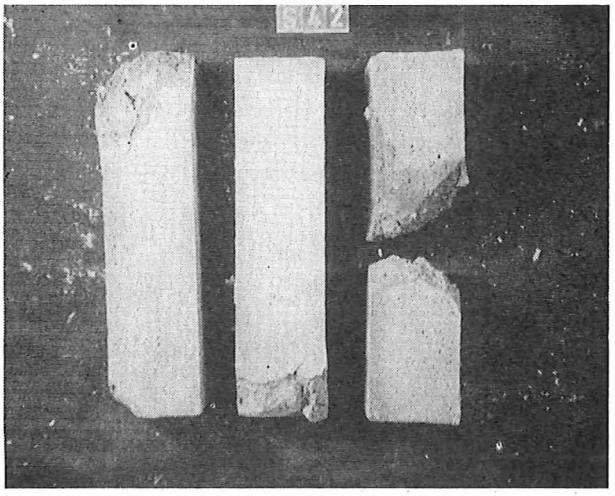
1



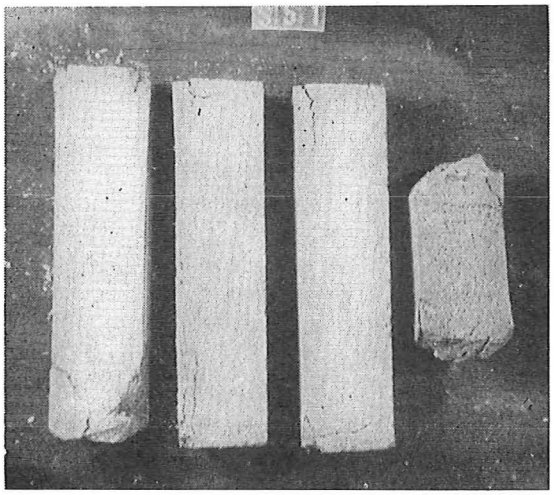
2



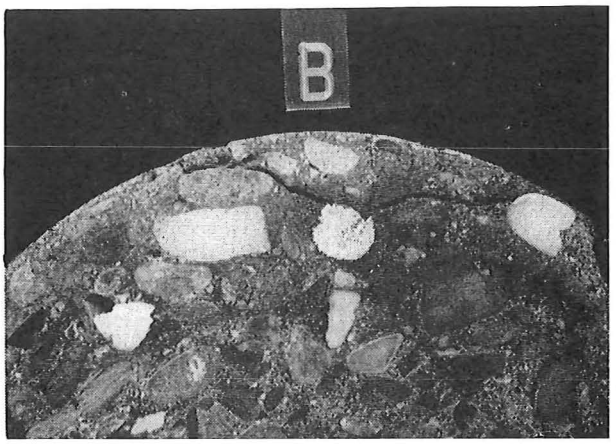
3



4

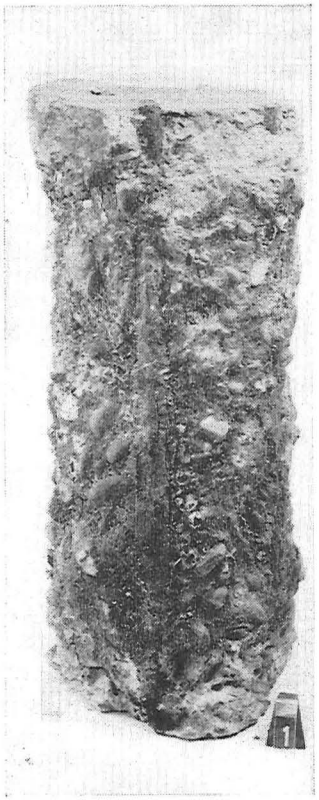


5

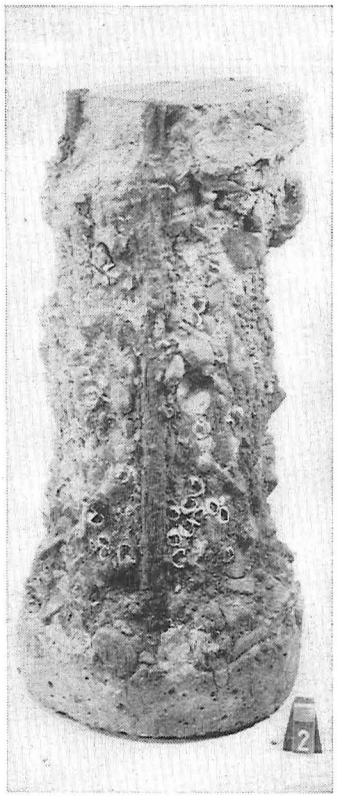


6

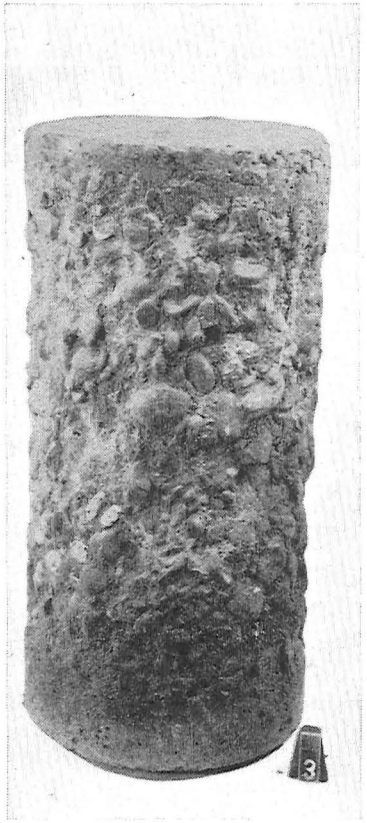
Planche 54.



1



2



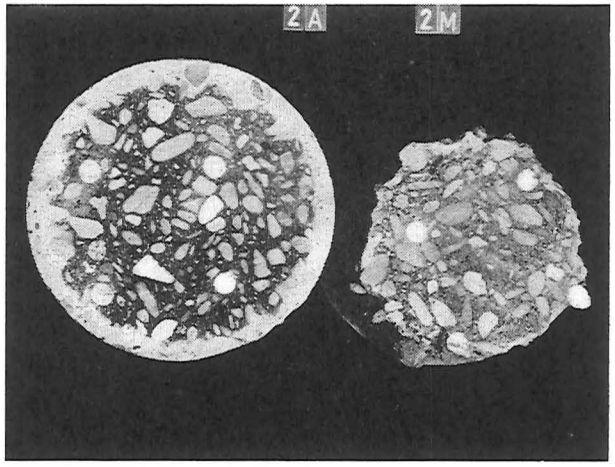
3



5



4



6

Planche 55.

Ciment 7. Les 4 éprouvettes 71 S sont légèrement corrodées en surface. Poids : 584, 578, 585 et 580 gr. 2 éprouvettes 72 S sont intactes, 1 a un coin légèrement ébréché, la dernière une petite ébréchure d'arête. Poids : 582, 588, 584 et 591 gr. 2 éprouvettes 73 S sont intactes, une a un coin éclaté et la dernière a une arête et 2 coins légèrement ébréchés. Poids : 586, 601, 608 et 606 gr.

Ciment 8. 3 éprouvettes 81 S sont intactes, la 4e présente un éclat en surface d'environ 7 × 1 cm. Poids : 585, 586, 583 et 572 gr. Les 4 éprouvettes 82 S (poids moyen 591 gr) et les 4 éprouvettes 83 S (poids moyen 613 gr) sont intactes.

Ciment 9. Toutes les éprouvettes sont intactes. Poids moyens : 91 S : 568 gr; 92 S : 600 gr; 93 S : 606 gr.

Ciment 10. 2 éprouvettes 101 S sont intactes; les deux autres ont une face gonflée et fissurée. Poids : 595, 581, 578 et 572 gr. 3 éprouvettes 102 S sont intactes; la dernière a un coin légèrement ébréché. Poids : 599, 596, 584 et 596 gr. 3 éprouvettes 103 S sont intactes, la 4e a une fissure longitudinale. Poids : 581, 582, 608 et 621 gr.

B. Bétons

Les 3 cubes 1 S ont des coins fortement ébréchés (fig. 5, 6 et 7, pl. 53) près de la face de lissage. Poids : 9.550, 9.270 et 9.600 kg.

Les 3 cubes 2 S sont peu corrodés, sauf enlèvement de laitance ou de mortier en surface et légère écornure de coins (fig. 8, pl. 53). Poids : 9.950, 9.950 et 9.850 kg.

Les 3 cubes 3 S sont intacts, sauf de légères écornures de coins. Poids : 10.050, 10.000 et 10.000 kg.

Les 3 cubes 4 S sont intacts, sauf enlèvement partiel de laitance. Poids : 9.950, 9.950 et 10.000 kg.

Tous les autres cubes sont intacts. Les poids moyens sont :

5 S	6 S	7 S	8 S	9 S
10.000	9.930	9.850	10.140	10.000 kg

4. — Eprouvettes conservées dans l'eau potable

Aux fins de comparaison, on trouve ci-après les poids moyens des éprouvettes ayant séjourné pendant 30 ans dans l'eau potable.

A. Mortiers (gr)

11 P : 580	12 P : 604	13 P : 616
21 P : 583	22 P : 601	23 P : 616
31 P : 572	32 P : 584	33 P : 597
41 P : 576	42 P : 594	43 P : 601
51 P : 567	52 P : 596	53 P : 599
61 P : 570	62 P : 591	63 P : 599
71 P : 570	72 P : 586	73 P : 596
81 P : 577	82 P : 614	83 P : 627
91 P : 580	92 P : 599	93 P : 614
101 P : 571	102 P : 592	103 P : 597

B. Bétons (kg)

1 P	2 P	3 P	4 P	5 P
9.917	9.925	9.800	9.900	9.933
6 P	7 P	8 P	9 P	10 P
9.858	9.867	10.158	9.750	9.908

5. — Résultats des essais mécaniques

Au paragraphe 7 du Chapitre XII, l'attention a été attirée sur l'effet des altérations de forme des éprouvettes soumises à l'action prolongée de l'immersion dans la mer à mi-marée ou dans l'eau sulfatée, qui affecte les résultats des essais mécaniques. Il est possible que la forme des éprouvettes conservées pendant plusieurs dizaines d'années dans l'eau potable ne soit plus identique à leur forme initiale. Afin de permettre la comparaison dans le temps, on a procédé le plus longtemps possible aux essais mécaniques sur les éprouvettes brutes, comme au départ.

Cependant, les altérations de forme ont tellement augmenté avec l'âge qu'il a fallu renoncer aux essais pour certaines éprouvettes. Ou encore, comme on l'a fait pour les bétons conservés pendant 20 ans dans la mer ou dans l'eau sulfatée (cf. Chap. XIII, par. 4. B), on a extrait des spécimens bruts des éprouvettes cylindriques plus petites et géométriquement correctes. Ce système hybride a toutefois le désavantage de ne plus permettre la comparaison dans le temps ni même à un même âge. Si cet inconvénient n'est pas majeur, puisque la comparaison porte plutôt sur des ordres de grandeur que sur des valeurs strictes, il a néanmoins paru utile, au terme des expériences, d'effectuer les essais mécaniques autant que possible sur des éprouvettes géométriquement correctes.

Cela n'a pas été possible naturellement pour les essais de flexion, qui n'ont pu être effectués que sur les éprouvettes brutes encore susceptibles de s'y prêter. Cela n'a plus été possible pour de nombreux mortiers, dont il ne subsistait que des tronçons ou des éprouvettes trop déformées. Pour les autres, les résistances à la flexion ont été probablement plus affectées par les changements de forme que par les altérations de la matière.

Mais pour les essais de compression, il a été possible d'opérer sur des éprouvettes correctes, de telle sorte que

les résistances à la compression caractérisent l'état de la matière conservée au cœur des éprouvettes primitives.

Pour tous les mortiers, on a extrait des tronçons des éprouvettes de flexion rompues, et même hors des morceaux des éprouvettes dégradées ne permettant plus d'essai de flexion, des éprouvettes cylindriques d'un pouce de diamètre et d'un pouce de hauteur, à bases rectifiées à la meule diamantée.

De même, on a extrait de tous les cubes des éprouvettes cylindriques de 100 cm² de base (diamètre 11,3 cm) et de 10 cm de hauteur, à bases rectifiées. Toutefois, les cubes 1 M et 2 M ne permettaient plus d'en tirer des éprouvettes de ces dimensions. Il a fallu se borner dans ces 2 cas à des éprouvettes cylindriques de 50 cm² de base (diamètre 8 cm) et de 7 cm de hauteur.

Les résultats ci-après indiqués correspondent à ces conditions et comportent de ce fait des valeurs de résistances à la compression pour des mortiers dont les valeurs n'étaient plus indiquées à des âges antérieurs.

A. Mortiers

Ciment 1.

12 M	492.8	13 M	671.5		
12 S	15.25-339.4	13 S	60.4-756.7		
11 P	38 -283	12 P	63.7-580	13 P	75.8-827.7

Ciment 2.

21 M	331	22 M	531.3	23 M	695.5
22 S	36.7-559	23 S	87.12-886		
21 P	42.75-318.3	22 P	58.6-656	23 P	87.6-1003.6

Ciment 3.

31 M	280.7	32 M	529.5	33 M	590
31 S	39.5-214.7	32 S	62 -371.5	33 S	73.4-678.8
31 P	50.9-268	32 P	62.7-395.5	33 P	73.4-639.5

Ciment 4.

41 M	282.5	42 M	536.5	43 M	648.7
42 S	93.5-485	43 S	96 -761		
41 P	42.4-262.3	42 P	63.4-564.3	43 P	80.1-934.8

Ciment 5.

51 M	383.3	52 M	82.4-660.2	53 M	87.6-801.5
51 S	55.3-285.4	52 S	84.3-555	53 S	85.9-705.3
51 P	55.2-228.4	52 P	84.1-585.5	53 P	87.9-723.2

Ciment 6.

61 M	419	62 M	82.1-663	63 M	89 -865.2
61 S	64.8-264.8	62 S	94.4-518	63 S	96 -680.8
61 P	54.1-257.2	62 P	68.9-536	63 P	82.5-697.1

Ciment 7.

71 M	379.3	72 M	80 -679.5	73 M	95.8-879
71 S	58.8-500.3	72 S	99.8-818.5	73 S	120.3-976.8
71 P	67.8-581.2	72 P	90.2-800.5	73 P	91.9-1023

Ciment 8.

81 M	388.5	82 M	76.1-650	83 M	91.2-835
81 S	42.1- 98.8	82 S	57.9-131.3	83 S	74 -209
81 P	29.7-108.9	82 P	43.1-149	83 P	54.5-275.5

Ciment 9.

91 M	331.5	92 M	61.3-571	93 M	85.3-678
91 S	70.4-306.5	92 S	83.8-539	93 S	110.4-762.3
91 P	59.1-321.5	92 P	76.8-585.3	93 P	85.8-641.2

Ciment 10.

102 M	320	103 M	517		
101 S	63.2-219	102 S	98.4-408.8	103 S	80 -522.8
101 P	56.4-276	102 P	71 -488.2	103 P	71.4-538.5

B. Bétons

1 M 852.3 *	1 S 755	1 P 855
2 M 829.7 *	2 S 575.7	2 P 931.7
3 M 564.7	3 S 766.7	3 P 622.3
4 M 684	4 S 899.3	4 P 851.7
5 M 724	5 S 714	5 P 754.7
6 M 609.3	6 S 658.7	6 P 646
7 M 834.7	7 S 870	7 P 936
8 M 499	8 S 310	8 P 297
9 M 771	9 S 715	9 P 730.7
10 P 732.7 **		

* Cylindres de 8 cm de diamètre et 7 cm de hauteur.

** Béton confectionné avec le ciment 2 et dont 25 % de sable du Rhin 0/2 a été remplacé par du sable des dunes.

6. — Résultats des essais non destructifs

Préalablement aux essais destructifs et autant que l'état des éprouvettes le permettait, on a procédé à une mesure de la vitesse de propagation des ultrasons dans le sens longitudinal des barrettes de mortier et dans les cubes de béton, au moyen de l'appareil Cawkell. Il comporte un générateur d'impulsions électriques à fréquence constante de 150 kHz et deux palpeurs. Un cristal piézo-électrique disposé dans la tête de chaque palpeur transforme les oscillations électriques en impulsions mécaniques au palpeur d'émission et inversement au palpeur de réception. Le déphasage des circuits d'émission et de réception permet de déterminer le temps t de propagation des ondes entre les 2 palpeurs, c'est-à-dire sur la longueur L de l'éprouvette. On en dé-

duit la vitesse de propagation $v = \frac{L}{t}$. Pour les éprouvettes intactes, L = 16 cm. Pour celles qui ont été dégradées mais dont l'état permet encore la mesure, on a mesuré les longueurs individuelles.

On a aussi utilisé le scléromètre de Schmidt pour les cubes de béton ayant conservé une forme correcte. Ils ont été serrés entre les plateaux d'une presse sous une charge de 2 tonnes. Dix mesures ont été effectuées sur deux faces parallèles opposées en 10 points répartis sur chaque face. Les chiffres mesurés sont conventionnels et à convertir en résistances approximatives à la compression par une formule ou une courbe de tarage.

On a reproduit ci-après les valeurs moyennes des vitesses de propagation en m/sec et des indices sclérométriques, sans conversion en modules d'élasticité ou en résistance à la compression et ce en raison des discordances de comparaison constatées par rapport aux résultats des essais destructifs.

A. Mortiers (m/sec)

Ciment 1.

	12 M 4130	
12 S 3877	13 S 4490	
11 P 4000	12 P 4455	13 P 4576

Ciment 2.

	22 M 4245	23 M 4205
22 S 4340	23 S 4665	
21 P 4045	22 P 4375	23 P 4625

Ciment 3.

31 M 3770	32 M 4190	33 M 4205
31 S 3703	32 S 4230	33 S 4541
31 P 4065	32 P 4237	33 P 4422

Ciment 4.

41 M 3830	42 M 4257	43 M 4250
42 S 4535	43 S 4625	
41 P 4035	42 P 4380	43 P 4647

Ciment 5.

51 M 4027	52 M 4535	53 M 4562
51 S 4167	52 S 4527	53 S 4653
51 P 4107	52 P 4497	53 P 4582

Ciment 6.

61 M 4162	62 M 4425	63 M 4565
61 S 4257	62 S 4540	63 S 4762
61 P 4150	62 P 4462	63 P 4577

Ciment 7.

71 M 4085	72 M 4425	73 M 4450
71 S 4332	72 S 4640	73 S 4637
71 P 4237	72 P 4545	73 P 4582

Ciment 8.

81 M 4047	82 M 4257	83 M 4454
81 S 4185	82 S 4325	83 S 4377
81 P 3630	82 P 4102	83 P 4297

Ciment 9.

92 M 4342	93 M 4462	
91 S 4302	92 S 4640	93 S 4740
91 P 4137	92 P 4504	93 P 4702

Ciment 10.

101 S 4112	102 S 4335	103 S 4272
101 P 3950	102 P 4260	103 P 4255

B. Bétons

Le premier nombre indique la vitesse de propagation des ultrasons en m/sec, le deuxième l'indice sclérométrique au marteau de Schmidt.

	1 S 4850-45.9	1 P 4868-43.8
	2 S 4248-43.3	2 P 4807-40.9
	3 S 4623-47.2	3 P 4687-40.1
4 M 4745-42.1	4 S 4800-46.1	4 4890-44.5
5 M 4747-44.7	5 S 4745-45.9	5 P 4888-45.8
6 M 4633-40.7	6 S 4673-45.2	6 P 4867-44.7
7 M 4623-41.8	7 S 4793-48.2	7 P 4963-49.5
8 M 4487-56.2	8 S 4293-38.9	8 P 4293-28.3
9 M 4740-43.7	9 S 4793-44	9 P 4773-39.7

10 P 4917-47.1 (voir remarque par. 5).

Les discordances qui apparaissent à la simple comparaison des valeurs numériques justifient l'absence de diagrammes rapportant les vitesses de propagation des ultrasons ou les indices sclérométriques aux résistances à la compression. Ces diagrammes seraient très irréguliers. Cela tient à ce que les essais non destructifs considérés ici sont très sensibles aux conditions de surface, qui sont très incertaines pour les éprouvettes qui ont subi les effets d'agents agressifs. Dans ces conditions, les résultats de ces essais ne peuvent plus avoir une signification quantitative pour les comparaisons. Les essais destructifs sur des éprouvettes correctes géométriquement donnent des résultats plus significatifs de l'état de la matière restante.

7. — Résultats des analyses chimiques des mortiers

Comme lors des prélèvement de 1945, il a été procédé aux analyses des mortiers encore subsistants et cette fois

dans des circonstances normales et partant d'une manière plus complète.

Ci-après, à titre documentaire et à toutes fins utiles les résultats de ces analyses moyenne sur le fragments des essais mécaniques homogénéisés par broyage.

Pour les mortiers à 600 kg de ciment par m³ de sable conservés dans l'eau potable (3 P), on a déterminé la teneur en oxyde ferrique Fe^2O^3. On a admis que la différence par rapport à la teneur en R^2O^3 représente la teneur en alumine Al^2O^3. Les valeurs sont les suivantes.

Mortier	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	MgO	SO^3	CO^2
			Ciment 1				
11 P	78	4.26	1.71	9.95	0.28	0.37	1.03
12 P	71.92	5.49	2.52	14.40	0.21	0.53	2.30
12 S	70.81	4.12	2.23	13.74	0.89	2.60	1.18
12 M	74.55	5.18	3.92	6.39	2.58	0.76	1.79
13 P	66.68	6.59	2.49	17.83	0.20	0.37	1.99
13 S	65.91	5.47	2.66	17.76	0.54	1.74	1.03
13 M	69.01	6 84	5.66	8.24	2.83	0.95	2.39
			Ciment 2				
21 P	78.40	4.17	2.13	10.82	0.22	0.21	1.94
21 M	70.77	3.20	3.37	3.36	3.11	0.52	1.71
22 P	71.03	5.85	2.70	15.99	0.18	0.71	1.27
22 S	70 91	4.20	2.06	14.24	0.25	2.25	2.03
22 M	74.57	5.59	5.36	6.25	0.45	0.73	2.00
23 P	66.99	6.18	2.70	16.93	0.37	0.85	1.94
23 S	65.77	5.40	2.56	16.48	0.61	1.42	2.42
23 M	67.76	7.36	8.04	7.73	1.06	0.92	2.38
			Ciment 3				
31 P	81.81	4.07	2.04	7.24	0.20	0.23	2.04
31 S	80.21	3.32	2.22	7.65	0.46	1.33	2.23
31 M	80.89	3.42	4.16	3.48	2.31	0.92	1.52
32 P	78.20	5.06	2.21	9.59	0.40	0.35	1.96
32 S	75.11	4.41	2.61	9.74	0.37	1.29	2.10
32 M	72.16	6.27	4.25	7.37	2.76	1.32	1.73
33 P	71.40	6.39	2.92	11.96	0.19	0.50	1.77
32 S	71.20	6.07	3.73	12.13	0.32	0.79	1.34
33 M	68.06	7.21	5.06	8.38	2.80	1.32	1.43
			Ciment 4				
41 P	78.80	4.40	2.12	8.27	0.84	0.73	1.34
41 M	81.24	3.76	3.75	2.92	2.02	0.72	2.14
42 P	72.15	5.38	2.85	12.15	0.68	0.87	1.59
42 S	69.08	5.16	4.02	12.55	0.90	1.36	1.38
42 M	74.83	5.42	4.22	6.32	2.51	0.80	2.00
43 P	67.34	6.22	3.96	14.35	0.70	1.08	1.14
43 S	65.48	5.77	2.99	15.49	1.38	1.30	1.69
43 M	68.90	6.87	5.06	8.69	2.72	1.11	1.41

Mortier	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	MgO	SO^3	CO^2
			Ciment 5				
51 P	78.67	4.09	3.00	8.27	0.55	0.48	1.32
51 S	78.03	3.26	2.14	8.31	1.01	0.97	1.63
51 M	80.77	3.19	2.31	3.75	2.32	1.02	1.33
52 P	69.63	6.07	4.11	12.26	0.49	0.72	1.28
52 S	70.40	5.08	3.65	11.85	1.11	1.12	1.60
52 M	74.31	5.29	4.30	8.55	1.81	1.16	1.12
53 P	64.61	6.40	4.67	14.35	1.14	0.77	1.19
53 S	65.92	6.40	4.12	14.18	1.11	1.20	1.58
53 M	67.88	7.40	5.13	11.33	1.93	1.07	1.47
			Ciment 6				
61 P	78.57	4.24	2.27	7.98	1.18	0.48	1.35
61 S	73.50	3.52	2.89	7.71	0.87	1.27	1.54
61 M	80.68	3.28	2.01	5.49	1.93	0.91	1.54
62 P	72.55	5.67	3.93	10.54	1.27	0.86	1.06
62 S	74.79	5.22	6.04	11.10	1.35	1.10	1.21
62 M	73.06	6.14	2.58	8.86	1.67	0.98	2.10
63 P	66.98	7.04	4.51	13.91	1.72	0.97	2.55
63 S	66.49	6.33	4.61	14.30	1.51	1.24	1.52
63 M	68.40	7.30	4.39	10.71	1.70	1.22	1.56
			Ciment 7				
71 P	78.19	4.36	3.07	7.53	0.75	1.21	1.67
71 S	76.25	3.21	2.25	8.36	1.34	1.78	2.16
71 M	82.13	3.62	2.55	4.15	1.38	0.89	2.26
72 P	74.30	4.22	4.00	9.75	0.89	1.94	1.41
72 S	71.35	4.72	3.39	11.65	1.26	2.13	1.59
72 M	74.55	4.67	2.10	8.88	1.51	0.82	1.53
73 P	69.36	5.80	4.66	11.49	0.90	2.50	1.04
73 S	65.89	6.62	4.79	14.00	1.20	2.40	1.46
73 M	67.93	6.97	3.24	11.38	1.77	0.98	2.17
			Ciment 8				
81 P	78.39	1.26	8.06	5.63	0.37	0.27	1.32
81 S	76.28	1.20	8.14	7.08	0.45	0.74	1.73
81 M	80.98	3.00	2.11	5.30	2.17	0.96	2.00
82 P	71.97	1.97	10.39	7.04	0.40	0.37	2.16
82 S	69.99	1.30	11.61	9.15	0.31	0.62	1.82
82 M	72.94	5.42	3.98	9.14	1.77	1.05	1.66
83 P	65.79	2.46	13.22	9.20	0.41	0.25	1.62
83 S	66.32	1.68	11.58	10.03	0.33	0.55	2.00
83 M	68.63	6.36	5.18	10.76	1.96	1.15	1.30

Mortier	Sable	SiO^2	R^2O^3	CaO	MgO	SO^3	CO^2
			Ciment 9				
91 S	77.46	3.78	3.80	8.63	0.88	0.93	1.58
91 M	81.03	2.39	3.30	4.45	2.60	0.78	1.93
92 S	72.34	5.29	4.09	8.58	1.49	1.21	1.39
92 M	74.14	4.44	2.46	6.07	1.59	0.96	2.22
93 S	65.74	6.38	4.42	14.67	1.26	1.32	1.47
93 M	67.37	5.90	3.27	12.06	1.29	0.89	2.40
			Ciment 10				
101 S	83.71	3.16	1.71	5.96	2.50	0.83	1.57
101 M	82.82	1.39	2.94	3.20	3.04	0.55	3.20
102 S	78.98	4.29	1.97	8.20	1.20	0.68	2.40
102 M	81.26	1.66	2.21	3.17	3.32	0.42	2.42
103 S	74.32	4.09	3.20	9.47	1.08	0.88	2.77
103 M	77.61	2.64	3.28	5.13	3.89	0.51	3.15

Ciment	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe^2O^3	1.28	1.52	1.65	1.33	1.01	0.99	1.20	3.36
Al^2O^3	1.21	1.18	1.27	2.63	3.66	3.52	3.46	9.68

Les analyses des mortiers des ciments 9 et 10 conservés dans l'eau potable font défaut, les échantillons correspondants ayant été égarés après l'exécution des essais mécaniques.

Les analyses ont été effectuées conformément aux prescriptions de la norme N.B.N. 140, édition de 1951. Les déterminations de l'insoluble calciné, de la silice saluble, des sesquioxydes R^2O^3 du groupe de l'ammoniaque, de la magnésie et de l'anhydride sulfurique ont été effectuées par gravimétrie, celle de la chaux par manganimétrie et celle de l'anhydride carbonique par calcimétrie, sous la direction de M. Cerf, licencié en chimie.

Avant le prélèvement des éprouvettes, des consultations ont eu lieu avec le Prof. W. De Keyser en vue d'établir le programme combiné des investigations chimiques et physico-chimiques. Suivant ses indications, des précautions ont été prises pour conserver l'état de carbonatation des éprouvettes existant au moment du prélèvement. Celles retirées de la mer à Ostende ont été, aussitôt nettoyées et étiquetées, serrées dans des sacs en plastique assez étanches. Dès leur arrivée au laboratoire, elles ont été placées dans des boîtes étanches, de même que les éprouvettes conservées dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée, dès leur retrait des bacs de conservation.

L'examen détaillé de ces analyses, en comparaison avec les analyses initiales des ciments frais (cf. Ch. III, par. 2) et celles effectuées sur les mortiers en 1945 (cf. Ch. XII, par. 8 C) permettrait de faire sans doute d'intéressantes constatations. On se bornera ici à procéder comme au Ch. XII, par. 8 C à une vérification globale des analyses et à ce qui a été considéré comme indice de décomposition des mortiers immergés dans la mer à mi-marée.

Pour la vérification globale, on se réfèrera aux proportions théoriques corrigées d'insoluble (ou de sable) indiquées au Ch. XII, par. 8 C, qui négligent le MgO. Elles sont à comparer aux valeurs des rapports

$$\frac{\text{Sable}}{\text{Sable} + SiO^2 + R^2O^3 + CaO + SO^3}$$

calculées à partir des analyses des mortiers, qui sont les suivants (conservation dans l'eau potable).

Mortier	11	21	41	51	61	71	81
Insoluble	82.6	81.8	83.6	83.3	83.1	83	83.6
Mortier	12	22	42	52	62	72	82
Insoluble	75.9	73.9	77.3	75.1	77.5	78.8	78.5
Mortier	13	23	43	53	63	73	83
Insoluble	71	71.4	72.5	71.1	71.8	74	72.5

Par rapport aux valeurs théoriques corrigées, les différences sont les suivantes en %

Ces écarts sont généralement supérieurs à ceux trouvés en 1945. Les valeurs moyennes sont de 1.38 % pour les mortiers 1, de 2.06 % pour les mortiers 2 et de 1.12 % pour les mortiers 3 (contre 1.14 %, 1.62 % et 1.14 % respectivement en 1945). On doit considérer que ces valeurs sont satisfaisantes étant donné le caractère assez aléatoire et approximatif des bases de ces calculs.

Mortier	Ecarts	Mortier	Ecarts	Mortier	Ecarts
11	— 1.43	12	— 1.97	13	— 1.66
21	— 2.85	22	— 5.26	23	— 1.65
41	— 0.65	42	— 0.77	43	— 0.07
51	— 0.785	52	— 3.47	53	— 1.8
61	— 1.43	62	— 0.77	63	— 1.37
71	— 2.36	72	— 0,38	73	0
81	+ 0,18	82	+ 1.82	83	+ 1.26

Pour ce qui est des indices de la proportion de ciment décomposée ou modifiée, exprimés par $1 - \frac{CaOm \times Sp}{CaOp \times Sm}$ pour l'immersion marine (cf. Ch. XII, par. 8 C), on trouve d'après les analyses précitées les valeurs suivantes.

Mortier	Indice	Mortier	Indice
11	(1)	51	0.579
12	0.609	52	0.344
13	0.553	53	0.25
21	0.699	61	0.33
22	0.628	62	0.167
23	0.527	63	0.245
31	0.513	71	0.475
32	0.167	72	0.092
33	0.265	73	— 0.012
41	0.658	81	0.088
42	0.500	82	— 0.28
43	0.542	83	— 0.12

Ces valeurs appellent des réserves pour certains ciments. Les mortiers du liant 3, mélange de 2/3 de ciment 2 et d'un tiers de trass moulu, contiennent de l'insoluble provenant du trass. Or, on constate que l'insoluble de ces mortiers est moindre pour l'immersion marine que pour la conservation dans l'eau potable. Il en résulte que l'hypothèse de la conservation intégrale de l'insoluble est sujette à caution.

Les mortiers du ciment 8 alumineux fondu donnent 2 valeurs négatives assez importantes de l'indice. En 1945 (cf. Ch. XII, par. 8), une valeur négative assez faible avait été trouvée. Les analyses de 1964 établissent une augmentation des teneurs en chaux de 82 M et 83 M par rapport à 82 P et 83 P, ainsi qu'une augmentation marquée de SiO^2, alors que R^2O^3 est très fortement diminué. Le choix de CaO comme élément pour apprécier le degré de décomposition n'est donc pas approprié. Si l'on se référait à R^2O^3, on obtiendrait des valeurs assez élevées mais aussi contestables, car il serait sans doute plus approprié de se rapporter à Al^2O^3, dont les teneurs n'ont pas été déterminées.

Abstraction faite de ces deux ciments 3 et 8, on voit que l'indice de décomposition a augmenté pour tous les ciments de 1945 à 1964. Ce laps de temps couvre à peu près les deux tiers de la durée des épreuves et a connu deux événements exceptionnels, la marée-tempête extraordinaire du 1er février 1953 et l'hiver particulièrement rigoureux de 1962-1963. Le ciment le moins chimiquement décomposable paraît être le 7; la valeur négative insignifiante pour 73 M, voisine de O, est sans signification et due aux erreurs; elle correspond à une valeur très faible de l'indice. Ensuite viennent le permétallurgique 6 et le ciment de haut fourneau normal 5. Ces constatations sont en bon accord avec celles de l'examen visuel, les pesées et les résultats des essais mécaniques.

8. — Commentaires combinés sur les résultats des analyses chimiques et des essais mécaniques des éprouvettes de mortier retirées de la mer

Il faut rappeler que ces éprouvettes avaient initialement comme dimensions 4 × 4 × 16 cm et que, après 30 années d'immersion marine à mi-marée, la plupart d'entre elles avaient subi des dégradations au moins superficielles plus ou moins importantes (cf. par. 2 A et planches 50, 51 et 52). On peut croire que leur composition était plus ou moins différenciée entre la surface et le cœur. Cependant, comme l'action mécanique marine enlève les éléments friables au fur et à mesure qu'ils sont formés, il se peut que cette différenciation soit peu accusée. La résistance mécanique relativement élevée des éprouvettes de compression prélevées dans les tronçons les plus dégradés semble l'indiquer. Même pour des éprouvettes prismatiques intactes, le prélèvement de cylindres de 1 pouce de diamètre et de hauteur intéresse de la matière qui n'est pas éloignée de la surface de plus de 6, 25 mm et naturellement moins pour les éprouvettes dégradées. Cependant, les résistances comparativement élevées des éprouvettes de compression 12 M, 13 M, 21 M, 22 M, 23 M, 31 M, 32 M, 33 M, 41 M, 42 M, 43 M, 51 M, etc. (cf. par. 5 A) semblent correspondre à une assez grande homogénéité de la matière. Les hétérogénéités accusées produisent en effet généralement de fortes chutes de résistance.

Les analyses chimiques effectuées sur les mortiers sont globales et moyennes; elles n'ont pas été organisées en vue de mettre en évidence des différenciations au sein de la masse. On ne peut donc rien en déduire à ce sujet. Il est cependant certain qu'il doit y en avoir. La carbonatation notamment doit être limitée principalement à la région superficielle, comme le donnent à penser des investigations sur les cylindres de béton armé dont il sera question plus loin. L'indice de décomposition (cf. par. 7) établit le départ de la moitié aux deux tiers de la chaux pour les mortiers des ciments 1 à 5. Ce phénomène de diffusion selon Maynard [4] n'est sans doute pas uniforme au début mais doit vraisemblablement

tendre à la longue vers un appauvrissement plus ou moins uniforme lorsqu'il est aussi considérable qu'il est indiqué ci-dessus.

Il est alors tout à fait remarquable de constater qu'un appauvrissement proportionnel aussi considérable en CaO, élément réputé jouer un rôle essentiel dans la résistance des liants hydrauliques, semble ne l'affecter en réalité que très peu (cf. par. 5 A). Pour les mortiers des ciments les plus riches en chaux, on remarque un enrichissement en MgO, mais qui ne compense généralement pas le déficit en CaO. Il semble donc se poser un réel problème de la composition des éléments résistants de la pâte liante d'un mortier immergé dans la mer pendant une longue durée.

Chapitre XV — PRELEVEMENTS DU 1er AVRIL 1964 (après 30 années d'immersion) CYLINDRES DE BETON ARME

1. — Constatations faites au laboratoire sur les cylindres retirés de la mer

Jusqu'en 1954, les cylindres de béton armé n'avaient guère donné lieu à observations. A cette époque, seul le cylindre 1 M avait montré une dégradation notable : la mise à nu sur 5 cm de longueur de l'armature couverte de 1 cm de béton seulement (cf. Ch. XIII, par. 3 et fig. 7, pl. 46). En 1964, des dégâts plus considérables sont apparus. On peut croire que l'hiver exceptionnel de 1962-1963 y a beaucoup contribué.

Le cylindre 1 M (fig. 1, pl. 55) est très fortement dégradé. Les 3 barres situées respectivement à 1, 2 et 3 cm de la surface initiale sont mises à nu sur presque toute leur longueur. De nombreux coquillages étaient fixés sur le béton.

Le cylindre 2 M (fig. 2, pl. 55) est dans un état analogue au précédent, toutefois les 3 barres les plus proches de la surface ne sont pas dénudées sur toute leur longueur.

Le cylindre 3 M (fig. 3, pl. 55) est fortement corrodé en surface; le mortier superficiel et même des grains de gravier ont été enlevés, mais aucune barre n'est dénudée et l'on ne constate ni rouille ni fissure.

Les cylindres 4 M, 5 M, 6 M, 7 M et 8 M montrent une légère corrosion superficielle consistant en disparition plus ou moins générale de laitance, sans mise à nu de gravier, sauf éventuellement au pourtour des bases (fig. 4, planche 55, cylindre 6 M à droite). Aucune trace de rouille ni de fissure au droit des barres.

Le cylindre 9 M (fig. 5, pl. 55) présente la même corrosion superficielle légère que les précédents, mais en outre un éclat de béton s'est détaché sur presque toute la hauteur de la barre située initialement à 1 cm de la surface.

Il n'y a pas de cylindres du ciment 10 (ciment-trass 50/50).

Les caisses b et b′ contenant des cylindres de béton armé immergés en permanence sous le niveau des plus basses mers n'ont pas été retrouvées en 1954 (cf. Ch. XIII, par. 1).

En 1964(on n'a retrouvé dans les caisses a et a′ (cf. Ch. XIV, par. 1) que deux cylindres non identifiables parce que déplacés. Les 7 autres avaient disparu. Les deux cylindres restants, exposés pendant 30 ans à l'air marin au-dessus des plus hautes eaux, ne présentaient aucune dégradation visible extérieurement. Ils ont été désignés arbitrairement par α et β. Lors de l'opération du sciage transversal des cylindres (voir plus loin) il est apparu (fig. 6, pl. 54) qu'un éclat de béton était détaché au droit de l'armature distante de 1 cm de la surface. Les fissures correspondantes n'étaient pas discernables et il n'y avait aucune trace de rouille.

2. — Constatations faites sur les cylindres conservés aux laboratoires

Tous les cylindres conservés dans la salle conditionnée de conservation des bétons du laboratoire sont intacts, qu'ils aient été conservés à l'air sec (marque A), ou sous du sable imbibé d'eau douce (marque D), ou sous du sable imbibé de la solution sulfatée (marque S). Il en est ainsi notamment des cylindres du béton 10, dont les cubes immergés dans l'eau sulfatée ont été rapidement corrodés (cf. Ch. VIII, par. 3; Ch. X, par. 3; fig. 3, pl. 43; Ch. XI, par. 3; pl. 44, photo P); Ch. XII, par. 4; fig. 7, pl. 45; Ch. XIII, par. 3) et pratiquement détruits en moins de 16 ans. L'attaque a commencé par les sommets et s'est propagée à partir de là. La forme des éprouvettes a donc de l'importance pour les essais de corrosion du béton. Le cylindre 10 S semble indiquer une bonne résistance à l'enveloppement dans du sable imbibé d'une solution sulfatée, alors que 3 cubes immergés dans la même solution ont été détruits en moins de 16 ans. Le cylindre 6 S (fig. 4, pl. 55) porte des traces localisées de corrosion de laitance. Le cylindre 9 S présente des traces de corrosion locale à l'arête circulaire d'une base. Il s'agit dans ces deux cas de dégradations superficielles limitées et insignifiantes.

3. — Vitesse de propagation des ultrasons

Cette vitesse a été mesurée sur les cylindres suivant leur axe longitudinal de la manière indiquée au Ch. XIV, par. 6. Ci-après les vitesses relevées en m/sec

1 M 4390	1 S 4590	1 D 4740	1 A 4070
2 M 4280	2 S 4540	2 D 4540	2 A 4090
3 M 4380	3 S 4530	3 D 4560	3 A 3980
4 M 4475	4 S 4550	4 D 4600	4 A 4300
5 M 4500	5 S 4620	5 D 4660	5 A 4300
6 M 4430	6 S 4530	6 D 4710	6 A 4040
7 M 4510	7 S 4560	7 D 4650	7 A 4270
8 M 4460	8 S 4320	8 D 4150	8 A 4000
9 M 4370	9 S 4520	9 D 4600	9 A 3980
	10 S 4520	10 D 4480	10 A 3880

Conservation à l'air marin

α 4300 β 4460

On remarque que les écarts sont assez modérés. Les valeurs les plus faibles sont relevées sur les cylindres conservés à l'air sec du laboratoire. Il est vraisemblable que la vitesse de propagation des ultrasons est influencée par le degré d'humidité du béton, notamment par sa saturation éventuelle en eau, qui élève la vitesse.

4. — Essais de compression sur carottes co-axiales aux cylindres

Les cylindres ont été coupés à mi-longueur à la scie diamantée. Dans chaque demi-cylindre, une carotte cylindrique de 5 cm de diamètre est façonnée suivant l'axe, entre les 4 armatures, au moyen d'une sondeuse diamantée. De ces carottes on tire des éprouvettes de compression à bases parallèles de 5, 6 cm de hauteur, au moyen d'une tronçonneuse à disque diamanté. Les bases sont soigneusement rectifiées à la meule diamantée. La hauteur de 56 mm a été adoptée d'après la communication [17] de M.R. Joosting, du Laboratoire fédéral d'essais des matériaux de Zurich, au Colloque international de la R.I.L.E.M. sur les essais du béton de chantier, tenu en octobre 1964 à l'Ecole polytechnique de Norvège à Trondheim. D'après cet auteur, la résistance à la compression de ces petits cylindres serait statistiquement égale à celle obtenue au moyen de cubes de 16 cm de côté. Les résultats obtenus sont les suivants, en kg/cm².

1 M 551	1 S 627	1 D 530	1 A 474
2 M 434	2 S 592	2 D 515	2 A 402
3 M 370	3 S 480	3 D 433	3 A 485
4 M 515	5 S 582	5 D 556	5 A 321
6 M 572	6 S 571	6 D 652	6 A 428
7 M 405	7 S 403	7 D 408	7 A 530
8 M 521	8 S 433	8 D 418	8 A 525
9 M 567	9 S 597	9 D 625	9 A 260
	10 S 602	10 D 535	10 A 469

Dans l'air marin : α 531 β 357

On remarque que ces valeurs sont généralement inférieures à celles indiquées au par. 5 B. Cela peut être dû à un compactage moins parfait, en raison de la présence des armatures. On remarque aussi que ces valeurs sont plus voisines les unes des autres qu'au par. 5 B et en général assez élevées; sur 32 valeurs, 3 seulement sont inférieures à 400 kg/cm²; toutes sont relatives à des bétons conservés dans l'atmosphère.

5. — Profondeur de carbonatation du béton

Comme il a été indiqué au paragraphe précédent, les cylindres ont été tronçonnés transversalement par le milieu et la section droite circulaire fraîchement coupée a été aussitôt mouillée par une solution alcoolique de phénolphtaléine. La zone centrale non carbonatée restée basique se colore en rouge tandis que l'anneau extérieur éventuellement carbonaté reste gris. On attribue au caractère basique du béton non carbonaté une vertu de protection des armatures contre la corrosion, qui serait de nature chimique. La carbonatation du béton réduirait ou supprimerait cette sauvegarde et ne laisserait subsister qu'une protection d'enveloppe inerte d'étanchéité. Il était donc intéressant de mettre en évidence la situation des barres par rapport à la zone carbonatée, en observant le degré de préservation des barres.

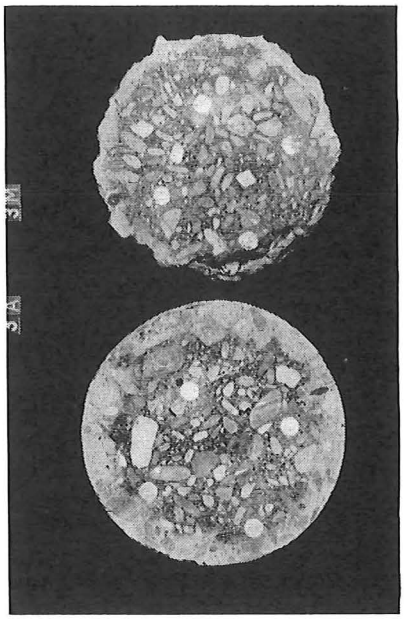
Immersion marine à mi-marée (M).

L'épaisseur carbonatée est généralement assez faible. Pour 4 M, 5 M, 6 M et 7 M, en moyenne 4 mm, pour 8 M et 9 M, 6 mm. Les zones carbonatées des cylindres 1 M et 2 M (fig. 6, pl. 55) ont été enlevées par la mer, toute la section restante est rouge (diamètre moyen de 1 M : 11,5 cm environ; pour 2 M : 11 cm env.). Le cylindre 3 M (fig. 7, pl. 56) a un diamètre restant de 14 à 15,5 cm env., le noyau rouge a un diamètre de 13 cm. Pour tous les cylindres toutes les barres sont dans la zone rouge, toutefois dans 8 M et 9 M, les barres distantes de 1 cm de la surface sont quasi tangentes à la zone carbonatée. La figure 8 de la planche 56 montre une coupe de 5 M. La situation de 4 M est analogue, bien que le diamètre extérieur soit réduit à 14,8 cm environ (diamètre du noyau rouge 14 cm).

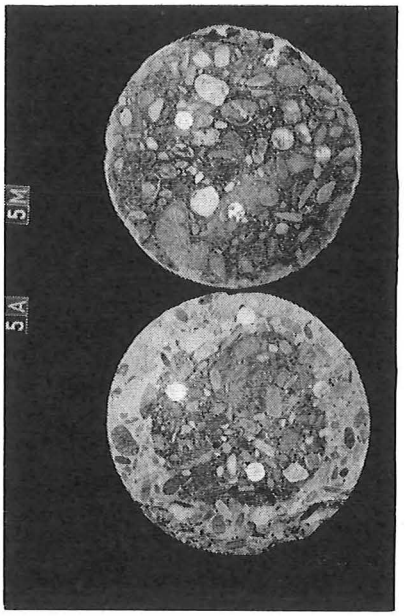
Conservation sous sable imbibé d'eau douce (D) ou d'une solution sulfatée (S).

Toutes les sections transversales de tous les cylindres sont complètement rouges. L'enveloppement permanent de sable mouillé semble donc constituer un empêchement quasi parfait de carbonatation.

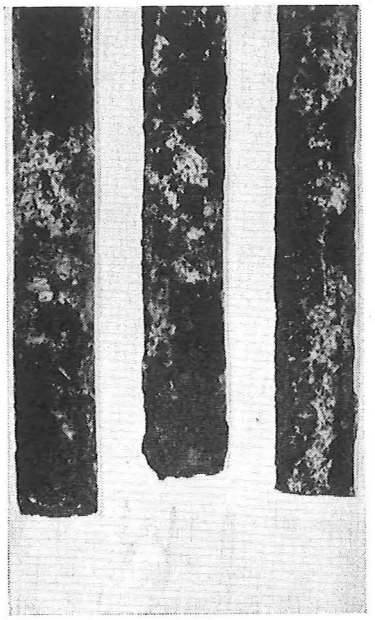
On peut croire que les éprouvettes immergées en permanence dans la mer sous marée basse et non retrouvées en 1954 (cf. Chap. XIII, par. 1) auraient donné lieu à la même constatation.



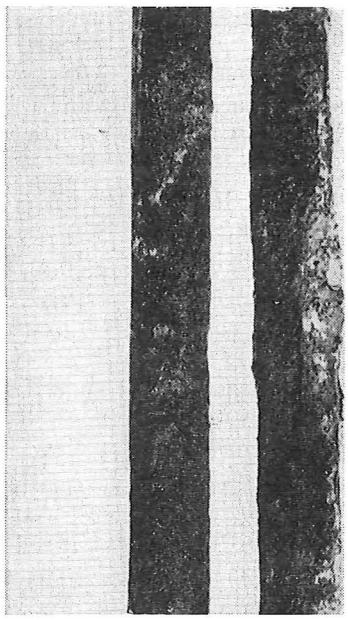
7



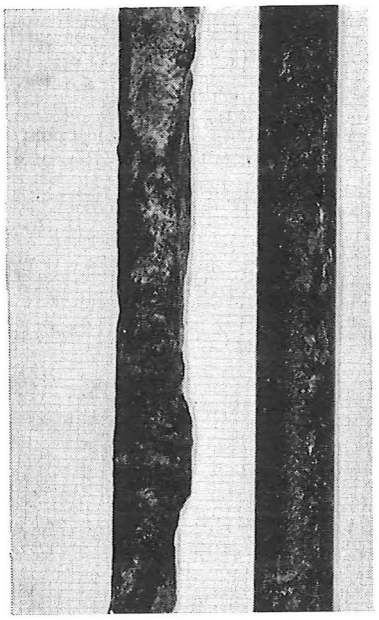
8



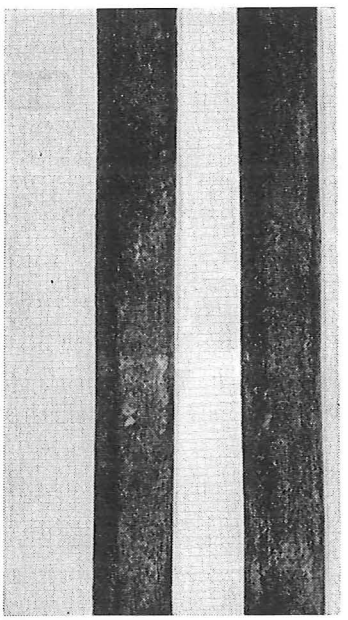
9



10



11



12

Planche 56.

Conservation à l'air conditionné du laboratoire (A).

(température env. 20° C, humidité relative env. 0,65, sous réserve des périodes troublées de la guerre 1940-1945).

Il y a en général une zone carbonatée d'épaisseur appréciable (fig. 8, pl. 56). Les barres les plus proches de la surface sont à la limite de la zone carbonatée ou à l'intérieur, mais on ne remarque pas de corrosion.

1 A, zone rouge de 13,5 cm de diamètre, barre la moins couverte tangente à la zone carbonatée.

2 A, zone rouge de 13 à 13,5 cm, barre la moins couverte tangente à la zone carbonatée (fig. 6, pl. 55).

3 A, zone rouge de 12 à 12,5 cm, barre la moins couverte partiellement dans la zone carbonatée (fig. 7, pl. 56).

4 A, zone rouge de 13 cm, la barre la moins couverte est partiellement dans la zone carbonatée.

5 A, zone rouge de 10 cm, les 2 barres les moins couvertes sont dans la zone carbonatée (fig. 8, pl. 56).

6 A, zone rouge de 11,5 à 12 cm, la barre la moins couverte est dans la zone carbonatée, une autre y est à moitié.

7 A, zone rouge de 11 à 12,5 cm, la barre la moins couverte est dans la zone carbonatée.

8 A, zone rouge de 9 cm. Les 2 barres les moins couvertes sont dans la zone carbonatée, une 3e y est engagée à moitié.

9 A, zone rouge de 13,5 à 14 cm, la barre la moins couverte est tangente à la zone carbonatée.

Toutes les autres barres sont dans la zone rouge.

10 A, zone rouge de 11,5 à 12 cm (moindre que celle de 2 A, confectionné avec le même ciment). La barre la moins couverte est dans la zone carbonatée, une autre y est tangente.

Toutes les autres barres sont dans les zones rouges.

Conservation à l'air marin, au-dessus de marée haute.

Après tronçonnage des cylindres α et β (cf. par. 1), l'examen de l'aspect et de la coloration du béton fraîchement scié, a fait supposer que le cylindre désigné par α était à base de ciment portland, tandis que celui désigné par β était d'un béton de ciment à base de laitier (peut être de ciment 9).

Le cylindre α a une section presque totalement rouge, sauf un liséré carbonaté.

Le cylindre β a une zone rouge de 13,5 cm. La barre la moins couverte est tangente à la zone carbonatée, à l'endroit de la fissuration du béton (fig. 6, pl. 54, cf. par. 1).

Ces constatations ne permettent pas une interprétation facile à défaut d'observations possibles sur les 7 autres cylindres conservés dans les mêmes conditions et disparus.

6. — Compacités de l'enveloppe et du cœur des cylindres

Après tronçonnage des cylindres et prélèvement des carottes cylindriques coaxiales de 5 cm de diamètre, on a procédé aux expériences suivantes, dans le but de comparer les compacités du cœur des cylindres et de l'enveloppe extérieure. A cet effet, pour chaque cylindre, un tronçon de cœur et un tronçon d'enveloppe sont immergés dans l'eau douce à la pression et à la température ambiantes jusqu'à poids constant. Ils sont ensuite desséchés à l'étuve à 105° C jusqu'à poids constant.

A l'état saturé, chaque tronçon est pesé dans l'air et dans l'eau; à l'état sec il est pesé à l'air. Pour les enveloppes, qui contiennent les armatures, les volumes et les poids des barres ont été déduits de manière à déterminer les volumes et les poids du béton seul. Ces mesures ont permis de déterminer le poids spécifique du béton à l'état sec, le pourcentage des vides en volume et l'absorption d'eau en % du poids.

Ces caractéristiques sont reproduites ci-après, les colonnes c étant relatives au cœur, les colonnes e relatives à l'enveloppe.

Les différences de compacité entre l'enveloppe et le cœur des éprouvettes immergées dans la mer à mi-marée pendant 30 ans sont les suivantes :

1 M	2 M	3 M	4 M	5 M
— 0,0588	— 0,0613	— 0,0149	+ 0,0125	— 0,0067
6 M	7 M	8 M	9 M	
+ 0,0152	+ 0,004	— 0,0098	— 0,0083	

Ces valeurs sont naturellement aléatoires. Elles sont influencées par la carbonatation, les incrustations marines et, évidemment, par les écarts initiaux inconnus.

Il est à remarquer cependant que pour les conservations à l'air sec, l'enveloppe est toujours plus compacte que le cœur, en raison probablement de la carbonatation. Les différences sont les suivantes :

1 A	2 A	3 A	4 A	
+ 0,0198	+ 0,004	+ 0,0115	+ 0,0154	
5 A	6 A	7 A	8 A	9 A
+ 0,0222	+ 0,0168	+ 0,0334	+ 0,0022	+ 0,0278

Il en est de même pour les conservations dans l'eau sulfatée et dans l'eau douce, sauf pour le ciment 8. Les différences sont les suivantes :

1 S	2 S	3 S	4 S	5 S
+ 0,0099	+ 0,0363	+ 0,0168	+ 0,0234	+ 0,0304
6 S	7 S	8 S	9 S	
+ 0,0275	+ 0,0389	— 0,0134	+ 0,0145	
1 D	2 D	3 D	4 D	5 D
+ 0,0290	+ 0,0212	+ 0,0194	+ 0,0215	+ 0,0469
6 D	7 D	8 D	9 D	
+ 0,0106	+ 0,0376	— 0,0001	+ 0,0205	

Pour le béton 10, on a

10 A	10 S	10 D
+ 0,0148	+ 0,0327	+ 0,022

Pour les bétons ayant sejourné pendant 30 ans à l'air marin, on a

α : + 0,0208 β : — 0,0096

Le dernier résultat est le seul qui paraisse aberrant, mais il n'est pas susceptible d'interprétation par suite de

Echantillon	Poids spécifique kg/dm³		Porosité %		Absorption %	
	c	e	c	e	c	e
1 M	2.275	2.134	13.	18.88	5.72	8.85
1 S	2.282	2.28	12.43	11.44	5.45	5.025
1 D	2.26	2.262	14.10	11.20	6.24	4.95
1 A	2.262	2.282	13.55	11.57	5.98	5.06
2 M	2.282	2.134	12.62	18.75	5.53	8.78
2 S	2.24	2.305	14.66	11.03	6.54	4.79
2 D	2.256	2.262	13.32	11.20	5.90	4.95
2 A	2.23	2.245	13.8	13.4	6.18	5.97
3 M	2.25	2.215	14.73	16.22	6.55	7.32
3 S	2.215	2.215	15.9	14.22	7.17	6.42
3 D	2.22	2.22	16.04	14.10	7.42	6.35
3 A	2.28	2.295	12.85	11.7	5.63	5.1
4 M	2.27	2.265	13.43	12.18	5.92	5.37
4 S	2.26	2.285	13.22	10.88	5.86	4.75
4 D	2.302	2.3	12.20	10.05	5.30	4.37
4 A	2.27	2.285	13.42	11.88	5.92	5.2
5 M	2.295	2.255	12.35	13.02	5.38	5.78
5 S	2.275	2.315	12.86	9.82	4.24	5.83
5 D	2.284	2.335	13.33	8.64	5.83	3.705
5 A	2.22	2.25	15.70	13.48	7.07	5.98
6 M	2.24	2.235	14	12.48	6.25	5.58
6 S	2.28	2.32	12.42	9.67	5.45	4.17
6 D	2.27	2.268	13.4	12.34	5.89	5.44
6 A	2.25	2.275	13.05	11.37	5.80	4.99
7 M	2.27	2.25	14.78	14.38	6.52	6.39
7 S	2.245	2.30	14.62	10.73	6.51	4.67
7 D	2.235	2.28	15.5	11.74	6.93	5.14
7 A	2.26	2.305	14.28	10.94	6.31	4.75
8 M	2.34	2.32	9.82	10.8	4.19	4.66
8 S	2.322	2.28	10.48	11.82	4.51	5.18
8 D	2.295	2.3	11.37	11.38	4.96	4.94
8 A	2.33	2.34	11	10.78	4.72	4.61
9 M	2.30	2.255	12.27	13.1	5.34	5.81
9 S	2.28	2.32	12.15	10.7	5.32	4.62
9 D	2.305	2.3	12.57	10.52	5.46	4.58
9 A	2.24	2.30	14.2	11.42	6.34	4.96
10 S	2.26	2.295	13.15	9.88	5.82	4.30
10 D	2.23	2.21	13.72	13.55	6.15	6.13
10 A	2.28	2.30	12.42	10.94	5.45	4.75

l'impossibilité d'identifier le ciment et de la disparition des autres cylindres.

Finalement, la conclusion intéressante de ces expériences, qui est bien établie qualitativement et s'accorde bien avec toutes les autres constatations, est la diminution appréciable de compacité du béton dans l'enveloppe des cylindres 1 M et 2 M par rapport au cœur. L'enlèvement progressif de matière à partir de la surface apparaît clairement pour ces deux bétons les plus vulnérables à la mer. L'addition de trass au ciment 2 (béton 3 M) réduit considérablement cette diminution de compacité, qui ne se produit pas ou guère avec les autres ciments.

6. — Examen des armatures corrodées

Eprouvette 1 M. Les 3 armatures couvertes respectivement de 1 cm, 2 cm et 3 cm de béton étaient dénudées et corrodées (fig. 1, pl. 55). Elles ont été dégagées et examinées. La fig. 9, pl. 56 montre leur état de corrosion. La figure 1, pl. 57 reproduit une section transversale agrandie, montrant une corrosion localisée d'une de ces barres dans une région voisine de la surface du béton, c'est-à-dire la moins recouverte de béton et la première exposée à la corrosion par la dégradation du recouvrement de béton. La figure 2 de la planche 57 est une micrographie métallographique, au grossissement de 245 fois à un endroit de corrosion localisée reconnaissable sur la figure 1 de la même planche.

Eprouvette 2 M. Les 3 barres recouvertes de 1 cm, 2 cm et 3 cm de béton étaient partiellement dénudées et corrodées (fig. 2, pl. 55). Les 2 plus attaquées ont été retirées et examinées. La figure 10, planche 56, montre leur aspect général de corrosion. La figure 3 de la planche 57 reproduit une section transversale agrandie de la barre recouverte de 1 cm de béton. La figure 4 de la planche 57 reproduit une micrographie ($\times$ 245) de la même barre.

Eprouvette 9 M. La barre recouverte de 1 cm de béton était découverte sur les 3/4 de sa longueur et corrodée sur la partie découverte (fig. 5, pl. 55). Cette barre a été retirée et examinée. La figure 11 de la planche 56 montre l'état général de cette barre comparé à celui de la barre qui était recouverte de 3 cm de béton et non corrodée. La coupe transversale agrandie (fig. 5, pl. 57) montre que la corrosion a été localisée à la partie de la barre qui était dénudée par le détachement d'une esquille de béton de couverture. La micrographie ($\times$ 245) de la figure 6, planche 57, montre la pénétration de la corrosion sous une pellicule d'acier presque détachée de la barre.

Eprouvette β exposée à l'air marin.

Lors du tronçonnage de cette barre, on a constaté (voir fig. 6, pl. 54), qu'une esquille de béton couvrant la barre écartée de 1 cm de la surface était détachée de la masse par 2 fissures. On a retiré cette barre ainsi que celle qui était recouverte de 3 cm de béton. La figure 12, planche 56, montre l'aspect général de ces 2 barres, qui n'étaient pas corrodées ni l'une ni l'autre.

La figure 7 de la planche 57 montre une section transversale agrandie de la barre recouverte de 1 cm de béton et la figure 8 de la même planche la micrographie ($\times$ 245) de la même barre, pratiquement intacte sur tout son pourtour.

D'une manière générale, la corrosion des barres est donc limitée aux surfaces qui ne sont plus recouvertes de béton.

7. — Examen des extrémités saillantes des barres

Ainsi qu'il a été indiqué au Chapitre II, paragraphe 6, les extrémités des barres dépassaient l'extérieur des 2 bases des cylindres d'environ 2 cm. La raison en était de permettre le maintien en position correcte des barres par rapport aux parois cylindriques des moules pendant le bétonnage. Mais ces bouts d'acier non protégés ont fait office de témoins d'intensité d'agressivité des milieux dans lesquels ont été plongées les éprouvettes. L'examen de leur état après trente années d'exposition à l'attaque de ces milieux présente de l'intérêt en rapport avec la protection conférée par la couverture de béton dans les mêmes conditions.

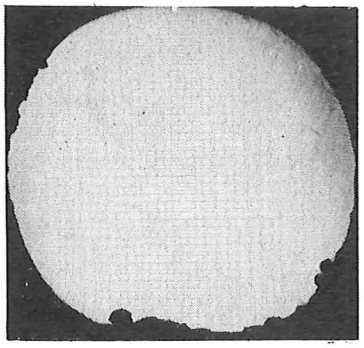
Conservation à l'air du laboratoire.

Les cylindres conservés dans l'air ont été déposés dans la salle conditionnée de conservation des bétons, dont la température est d'environ 20° C et l'humidité relative voisine de 0,65. Les conditions de conservation ont donc été très stables pendant 30 ans. Elles ont cependant été fortement perturbées pendant la guerre, de mai 1944 à octobre 1947, en raison de l'évacuation des laboratoires à la suite des bombardements aériens et de la réintégration des laboratoires à l'Institut du Génie Civil après sa restauration.

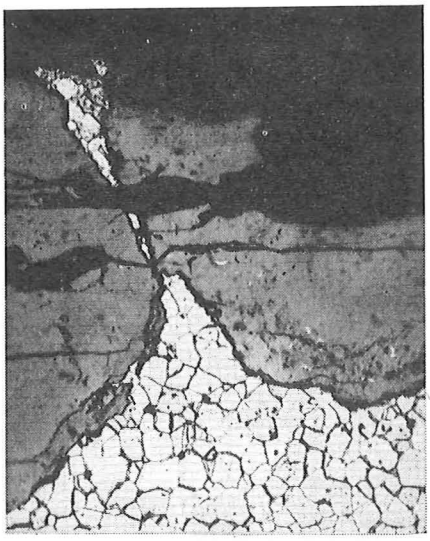
Les figures 11 et 12 de la planche 57 établissent que les bouts saillants des barres sont rouillées superficiellement et n'ont donc pas été soumises à une corrosion intense. Le cylindre représenté est le cylindre 1 A.

Conservation sous sable imbibé d'eau douce.

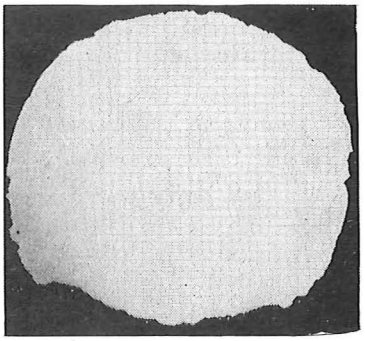
Cette conservation était faite dans la même salle conditionnée, à la température d'environ 20° C. L'eau douce d'imbibition du sable était l'eau de la distribution urbaine de la Ville de Liège, dont une analyse figure au Chapitre VI, paragraphe 2. Sous réserve des mêmes perturbations que pour la conservation à l'air, les condi-



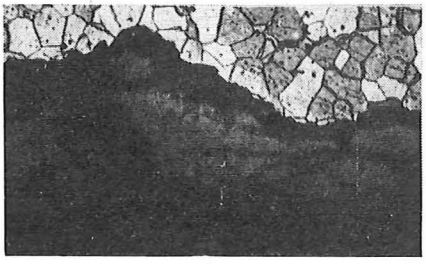
1



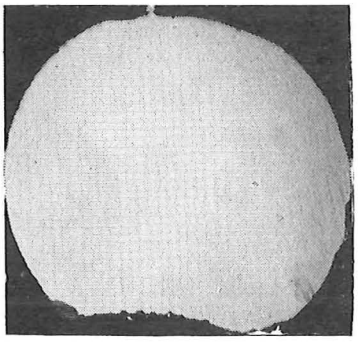
2



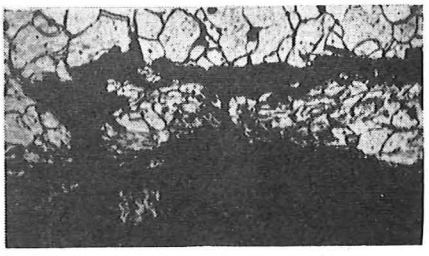
3



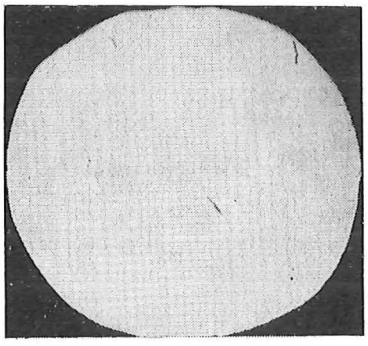
4



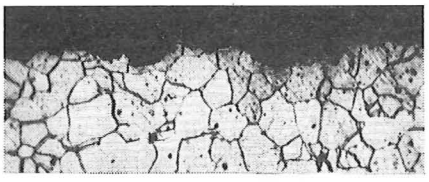
5



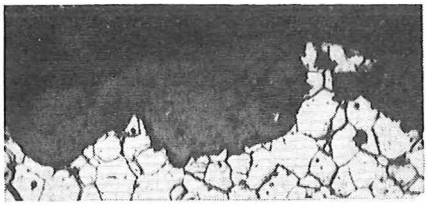
6



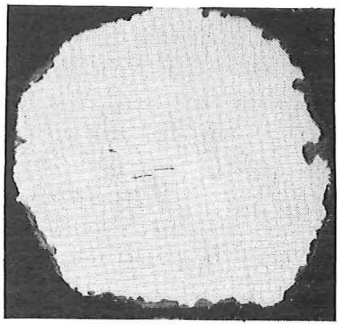
7



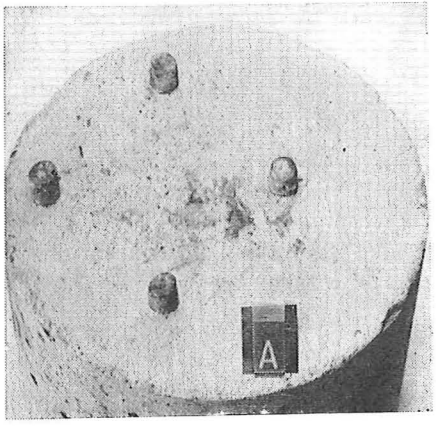
8



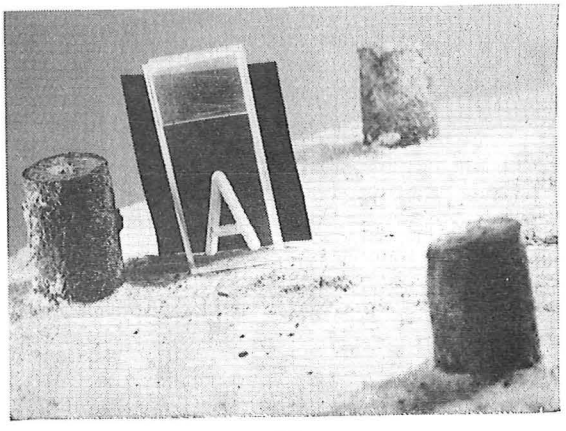
10



9



11



12

Planche 57.

tions ont donc aussi été très constantes. Les figures 1 et 2 de la planche 58, relatives au cylindre 3 D, montrent que les extrémités saillantes des barres sont assez fortement corrodées sous l'action simultanée de l'eau douce d'imbibition et de l'air occlus dans le sable imbibé.

Conservation sous sable imbibé d'une solution sulfatée (de 15 gr. de 50^4Mg cristallisé par litre).

La conservation a été faite dans la même salle conditionnée et a subi les mêmes perturbations que les deux conservations précédemment examinées. Les figures 3 et 4 de la planche 58 montrent que les extrémités saillantes des barres ont subi une corrosion beaucoup plus importante que dans le cas de la conservation sous sable imbibé d'eau douce. Les extrémités saillantes des barres de l'éprouvette 1 S représentée sur ces figures sont presque complètement détruites.

La figure 9 de la planche 57 montre une coupe transversale agrandie d'une extrémité saillante d'une barre du cylindre 2 S, qui indique bien la nature et la profondeur de la corrosion sur tout le pourtour de la barre. A comparer à la figure 7 de la même planche relative à une barre non corrodée de même diamètre initial. La figure 10 de la planche 57 est une micrographie (×245) de cette barre du cylindre 2 S.

Immersion dans la mer à mi-marée.

Les figures 5 et 6 de la planche 58 se rapportent au cylindre 5 M. Les extrémités saillantes des barres ont disparu. Certaines sont remplacées par un dépôt brunâtre plus ou moins étalé. Pour d'autres, ce dépôt a été enlevé vraisemblablement par l'effet mécanique des eaux marines et la barre corrodée apparaît au ras du béton ou même à quelque profondeur sous sa surface. La figure 7 de la planche 58 se rapporte à l'éprouvette 8 M et correspond à une barre dont la destruction par corrosion s'est poursuivie jusqu'à une profondeur de 8 mm sous la surface du béton.

L'annalyse chimique du dépôt brunâtre trouvé à la place des extrémités saillantes d'une barre a donné ce qui suit :

Perte au feu	24,15 %
Insoluble dans H Cl	6,36 %
$R^2 O^3$	59,7 %
dont $Fe^2 O^3$	58,8 %
CaO	4,44 %

Le CO^2 de carbonatation de CaO est 3,49 %. Le reste de la perte au feu provient vraisemblablement de matières organiques. Moyennant cette hypothèse, le calcul de la composition des matières minérales à partir de l'analyse conduit aux résultats suivants :

Insoluble dans H Cl	8,02 %
$R^2 O^3$	75,3 %
dont $Fe^2 O^3$	74,2 %
Ca CO^3	10 %

Le dépôt serait donc formé en majeure partie d'oxydes de fer provenant de la corrosion complète des extrémités saillantes des barres et de carbonates provenant du béton et de coquillages, en plus de divers sels provenant de l'eau de mer et dont l'existence est vraisemblable, mais n'a pas été recherchée.

L'examen de l'état des extrémités saillantes des barres après 30 années d'exposition aux divers milieux agressifs est donc très indicatif de l'agressivité de ces milieux sur les barres non protégées et aussi, par comparaison avec les constatations exposées aux paragraphes 1, 2, 4, 5 et 6, très propres à montrer la grande efficacité de la protection des barres par le béton dans les conditions de ces expériences.

QUATRIEME PARTIE

Examen des résultats

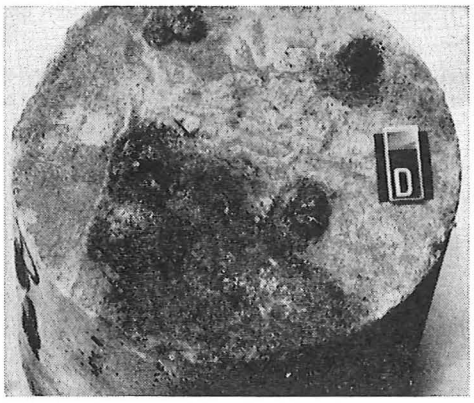
Chapitre XVI — COMMENTAIRES GENERAUX

« Qui ne sait se borner, ne sût jamais écrire »
Nic. Boileau-Despréaux (L'art poétique)

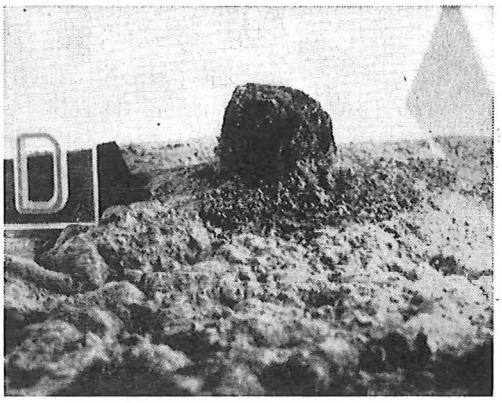
1. — Limitation des commentaires

Dans les 15 chapitres précédents, on a reproduit les résultats de tous les travaux expérimentaux effectués dans le cadre de la recherche entreprise en 1934 et poursuivie jusqu'en 1964. On les a condensés autant que possible, tout en veillant qu'ils restent assez complets pour permettre à un lecteur averti et intéressé d'en tirer personnellement toutes les remarques et observations par une étude attentive de ces doucuments objectifs et véridiques. Le cas échéant, une telle étude pourraît être encore documentée d'une manière plus complète par l'examen des procès-verbaux bruts des essais, qui pourraient être consultés aux Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège.

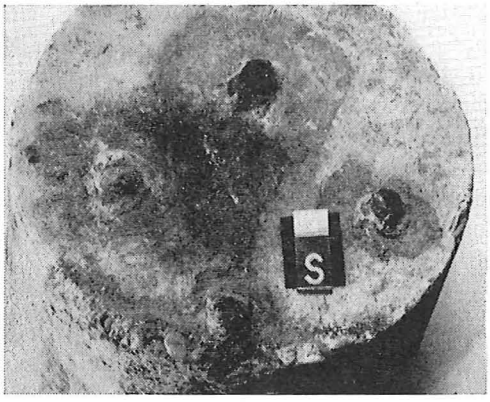
Dans ces chapitres, on s'est astreint à introduire peu de commentaires, seulement ceux qui étaient utiles, voire nécessaires, pour éclairer les circonstances ou les résultats des expériences, ou dont le caractère particulier non négligeable était rendu le plus significatif en l'insérant dans le chapitre correspondant. On a voulu de la sorte éviter que ces chapitres reçoivent un caractère trop abstrait et rebutant pour un lecteur non spécialiste,



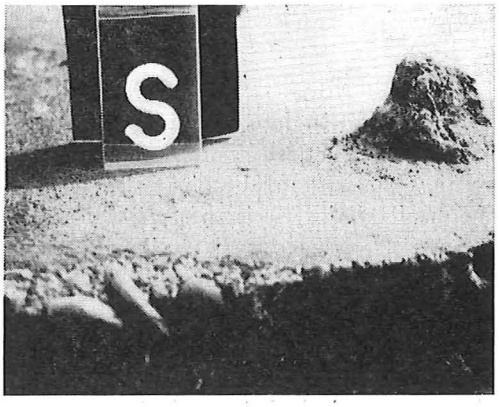
1



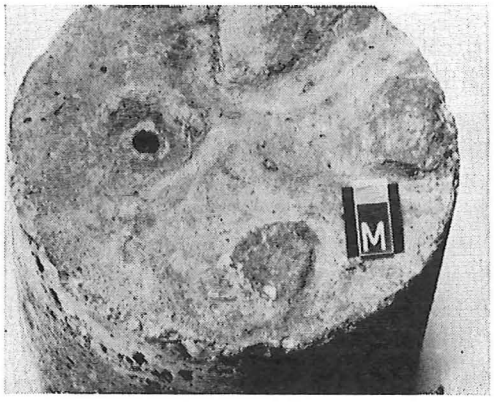
2



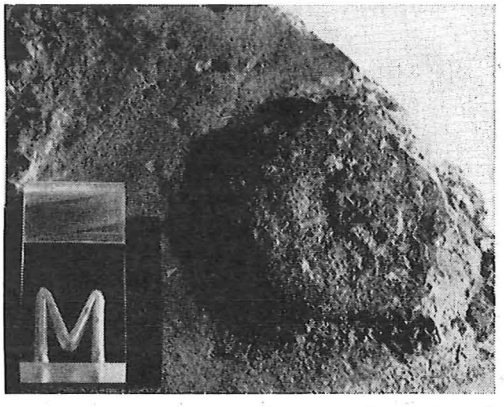
3



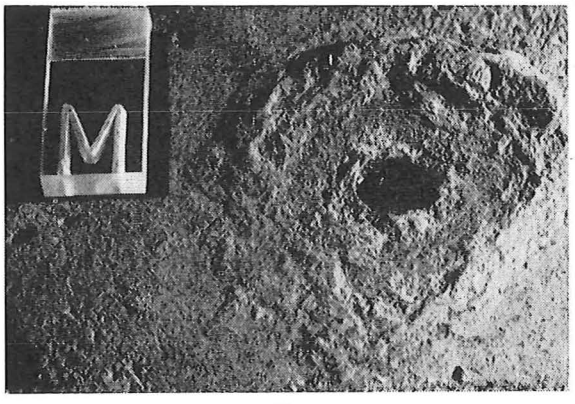
4



5



6



7

Planche 58.

mais conservent un tour assez vivant pour pouvoir l'intéresser.

On s'est cependant préoccupé avant tout de l'objectivité scientifique et d'éviter de présenter une quantité de conclusions peuvent être entachées de tendances personnelles ou, plus simplement, risquant d'être trop nombreuses.

Ce risque découle de la conception et du programme même de la recherche. Les éprouvettes immergées dans l'eau sulfatée et dans l'eau douce étaient destinées seulement à servir de témoins, de termes de comparaison pour les spécimens immergés dans la mer à mi-marée. Or, par la durée des expériences, elles ont acquis un intérêt propre.

D'autre part, pendant la durée de la recherche, des compléments ont été apportés au programme dans un but d'investigation plus approfondie. Ces recherches connexes, comme aussi certains essais spéciaux figurant au programme, peuvent présenter aussi un intérêt propre.

Il en résulte que le nombre d'objets de commentaires particuliers ou comparatifs devient considérable. Il a paru préférable de les limiter assez strictement et de laisser aux lecteurs avertis la latitude de les compléter par leur étude personnelle des documents présentés.

On se bornera dans la suite surtout à la tenue des éprouvettes immergées dans la mer. Cependant, il paraît utile de traiter aussi de l'action des sulfates, mais plus brièvement.

2. — Signification des essais mécaniques sur les éprouvettes immergées dans la mer à mi-marée

Le programme initial avait prévu l'immersion dans la mer à mi-marée d'éprouvettes de mortiers et de bétons ayant les formes et les dimensions usuelles pour l'essai de ces matériaux à des âges assez peu avancés, ne dépassant généralement pas un an et le plus souvent beaucoup moindres. A titre comparatif, des éprouvettes identiques étaient immergées dans l'eau douce et dans une solution de sulfate de magnésie cristallisé à 15 gr par litre.

On a vu dans les chapitres VIII à XV que, déjà après 5 mois d'immersion et d'une manière croissante avec l'âge, la question s'est posée de la signification des essais mécaniques destructifs sur ces éprouvette. Leurs résultats sont en effet très fortement influencés par la correction des formes et des dimensions des éprouvettes et aussi par l'homogénéité ou l'hétérogénéité de la matière. Or, l'action progressive de l'eau marine dans l'immersion à mi-marée s'exerce à la surface des éprouvettes et modifie celle-ci, d'une manière à la fois chimique, physique et géométrique. La formation d'*incrustations conservatrices* selon Vicat [9] (cf. Chap. IX, par. 3; Chap. X, par. 3 et Chap. XI, par. 3) se marquait par une résistance à la flexion supérieure à celle des éprouvettes témoins conservées dans l'eau douce et cela déjà à partir de 5 mois d'immersion (cf. Chap. VIII, par. 2. A.).

Cependant cet effet ne persistait pas après une durée variable selon la nature du ciment et d'autant moins longue que le ciment était plus altérable. Dans la suite, la surface des éprouvettes des ciments altérables était corrodée, ce qui était en accord avec l'opinion de Le Châtelier que les incrustations ou croûtes constituent une phase de la décomposition [4]. Lorsque la surface est progressivement corrodée, la forme géométrique et les dimensions des éprouvettes sont de plus en plus modifiées, de telle sorte que les résistances à la flexion diminuent très fortement et ne sont plus *quantitativement* significatives. A la longue, certaines éprouvettes encore entières ne permettent plus l'essai de flexion, ou sont même fragmentées ou disparues.

Pour ce qui est des résistances à la compression mesurées sur les éprouvettes brutes, pour les plus courtes durées d'immersion, celles des ciments les plus résistants à l'action marine sont supérieures à celles des éprouvettes correspondantes conservées dans l'eau potable. Cela doit provenir aussi des incrustations, mais se modifie pour les plus longues durées d'immersion, pour lesquelles les altérations superficielles des éprouvettes même les moins attaquées sont suffisantes pour réduire les résistances à la compression, déterminées sur les éprouvettes brutes retirées de la mer, à des valeurs moindres que celles des éprouvettes correspondantes conservées dans l'eau douce. Il faut toutefois faire remarquer que ces effets sont encore fortement influencés par la nature du ciment et par le dosage. Les éprouvettes des ciments les plus altérables 1 et 2 ont marqué des déficits de résistance en flexion et en compression déjà après 5 mois d'immersion, variant avec le dosage et croissant avec la durée d'immersion. C'étaient là les signes de dégradation assez rapide.

On est donc justifié à croire que les essais mécaniques destructifs sur les éprouvettes brutes, s'ils sont quantitativement contestables, constituent cependant par leur nature même des *indicateurs très sensibles* d'attaque par l'eau marine, notamment l'essai à la compression. Ils établissent une distinction très nette entre les mortiers très attaquables, ceux qui le sont moyennement et ceux qui le sont peu.

Cette dernière conclusion s'applique aux cubes de béton comme aux prismes de mortier; toutefois les bar-

rettes de mortier sont plus sensibles, étant moins compactes et moins massives que les cubes.

Après 20 et 30 années d'immersion, la forme de nombreuses éprouvettes était à ce point modifiée que des essais sur éprouvettes brutes n'étaient plus possibles. Après 20 années, on a extrait des cubes de béton retirés de la mer (et aussi de l'eau sulfatée) des cylindres de 100 cm² de section (11,3 cm de diamètre) et 10 cm de hauteur. Bien que l'on ait eu quelques raisons de croire (cf. Chap. XIII, par. 4. B) que les résistances à la compression mesurées sur ces cylindres étaient statistiquement égales à celles mesurées sur cubes de 16 cm de côté, on n'a pas extrait de cplindres hors des cubes conservés dans l'eau potable, qui ont été essayés tels quels, en vue de ne pas troubler la comparabilité avec les prélèvements précédents.

Après 30 ans, on a procédé de même, cette fois pour tous les cubes, sauf pour les cubes 1 M et 2 M qui étaient à ce point réduits qu'il n'était plus possible d'en extraire des cylindres de plus de 7 cm de hauteur et de 8 cm de diamètre. On a aussi extrait des barrettes de mortier, qu'elles aient encore été susceptibles ou non d'être rompues par flexion et éventuellement hors des débris, des éprouvettes cylindriques de compression de 2,5 cm de diamètre et de hauteur. Toutes ces éprouvettes cylindriques ont été confectionnées avec soin, de manière a être aussi correctes que possible de formes et de dimensions.

Ceci altère naturellement considérablement la comparabilité des résultats avec ceux des essais antérieurs sur éprouvettes brutes, même pour celles conservées dans l'eau potable. Mais on constate que les résultats obtenus au moyen de ces éprouvettes, même extraites des spécimens les plus dégradés, les plus détruits, sont très élevés et en général peu inférieurs, quelquefois même un peu supérieurs à ceux des éprouvettes correspondantes conservées dans l'eau potable.

Ces expériences sont d'un très grand intérêt. Car elles mettent particulièrement en lumière la *sensibilité indicatrice* des essais mécaniques sur éprouvettes brutes. Elles montrent aussi d'une manière indubitable la progression effective de l'alténation marine de l'extérieur vers l'intérieur. Cependant, les résultats des analyses donnent lieu à ce sujet à d'importantes questions considérées plus loin.

En 1934, les laboratoires de Liège étaient déjà bien équipés pour la confection d'éprouvettes cylindriques par sondage, mais c'est à bon escient que le programme initial a prévu des essais mécaniques destructifs sur éprouvettes brutes.

Quant aux essais non destructifs, en 1934 ils étaient pratiquement inconnus et ils n'ont guère commencé à se répandre avant 1950. Dès 1954 (cf. Chap. XIII, par. 5) on a mesuré les modules d'élasticité dynamiques sur les barrettes de mortier par la résonance longitudinale. En 1964 (cf. Chap. XIV et XV), on a mesuré la vitesse de propagation des ultrasons sur les barrettes de mortier ainsi que sur les cubes et les cylindres de béton, cependant que le scléromètre de Schmidt (percussion) a été appliqué aux cubes et aux cylindres de béton.

Les résultats n'ont pas été très caractéristiques et cela tient à la nature des choses. Les résultats des mesures fondées sur les vibrations longitudinales sont influencés par les altérations des formes et des dimensions des éprouvettes et aussi probablement par les héterogénéités de la matière (cf. Chap. XIII, par. 5). Les relations de caractère statistique entre ces résultats et les résistances à la compression doivent en être affectées. Ces relations (de type logarithmique ou exponentiel) ne sont pas de nature à mettre en évidence de faibles variations de résistance. Or, les essais destructifs sur éprouvettes cylindriques mentionnés plus haut ont établi que la résistance de la matière restante des spécimens les plus dégradés n'était pas très différente de celle des spécimens inaltérés conservés dans l'eau potable. Il est donc compréhensible que les essais non destructifs considérés ne peuvent être très caractéristiques.

Les dimensions des éprouvettes ne permettaient pas l'examen de la méthode de la vitesse de propagation des ébranlements créés par des impacts superficiels. Il est certain que les mêmes influences, doivent affecter ces résultats, outre l'état géométrique de la surface et l'altération superficielle éventuelle de la matière (hétérogénéité).

Ces dernières remarques s'appliquent également au contrôle superficiel par le scléromètre de Schmidt (cf. Chap. XIV et XV). Il est à remarquer que la relation entre l'indice sclérométrique et la résistance n'est pas non plus propre à mettre en évidence de petites différences, d'autant plus que la précision n'est pas élevée.

Les 7 tableaux ci-après récapitulent les résultats des essais mécaniques destructifs effectués lors des divers prélèvements. On peut constater qu'ils donnent des indications très caractéristiques et sélectives. Elles justifient le choix des critières d'appréciation de la résistance à l'action marine adoptés dans le programme initial, dont le but était uniquement de permettre à l'Administration des Ponts et Chaussées d'établir quels étaient les ciments les plus appropriés pour les ouvrages maritimes et de définir leurs spécifications.

TABLEAU 1 — Essais de flexion en mortier plastique à 300 kg de ciment par m³ de sable

Ciment	Indicatif du mortier	Conservation	Résistance en kg/cm²						
			au départ	après une immersion de					
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans	30 ans
		1		34,0	30,1	28,4	28,1	0	0	0
I	11	2	32,0	12,6	4,78	0	0	0	0	0
		3		34,6	39,9	42,2	41,3	40,7	40,9	38,0
		1		34,0	35,9	31,2	32,8	0	0	0
II	21	2	36,7	21,5	10,9	0	0	0	0	0
		3		36,3	38,2	41,2	45,6	46,3	40,5	42,8
		1		37,6	44,7	39,8	22,9	0	0	0
III	31	2	30,2	28,4	20,2	32,8	20,7	33,8	43,7	39,5
		3		37,1	37,0	47,2	46,4	51,9	40,9	50,9
		1		42,2	43,5	49,6	54,0	15,2	0	0
IV	41	2	36,4	35,4	5,77	0	0	0	0	0
		3		36,1	39,5	45,1	47,2	46,2	38,2	42,4
		1		53,7	53,0	54,5	64,1	0	0	0
V	51	2	34,7	45,5	50,5	61,4	63,1	79,0	38,2	55,3
		3		37,7	42,8	49,3	51,1	63,2	42,4	55,2
		1		41,5	45,4	51,1	60,2	0	0	0
VI	61	2	29,0	43,3	49,1	54,9	57,0	61,3	49,2	64,8
		3		34,0	38,1	42,5	45,4	55,5	42,9	54,1
		1		52,5	66,1	70,0	79,7	0	0	0
VII	71	2	44,4	61,1	65,5	73,5	78,7	85,8	66,9	58,8
		3		52,5	60,9	64,7	70,0	73,2	67,2	67,8
		1		38,9	45,9	50,6	51,8	39,1	9,5	0
VIII	81	2	48,8	41,3	40,0	46,8	56,0	50,4	40,0	42,1
		3		39,3	38,5	47,6	52,9	45,6	31,7	29,7
		1		53,4	61,1	69,2	74,5	0	0	0
IX	91	2	36,7	51,6	51,6	57,5	63,3	72,8	42,2	70,4
		3		43,0	44,4	46,1	55,2	70,0	41,0	59,1
		1		43,3	49,6	53,2	47,7	0	0	0
X	101	2	25,8	39,3	47,5	58,2	48,7	72,8	55,5	63,2
		3		34,6	39,7	51,1	49,1	65,3	38,6	56,4

Conservation : 1 = Eau de mer 2 = Eau sulfatée 3 = Eau potable

TABLEAU 2 — Essais de flexion en mortier plastique à 450 kg de ciment par m³ de sable

Ciment	Indicatif du mortier	Conservation	Résistance en kg/cm²							
			au départ	après une immersion de						
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans	30 ans
		1		54,9	52,1	51,8	51,9	0	0	0
I	12	2	50,4	55,5	38,1	0	0	0	16,2	15,3
		3		58,5	59,6	60,3	62,9	66,9	64,0	63,8
		1		52,7	51,0	53,3	61,0	5,6	0	0
II	22	2	52,5	57,6	62,4	32,4	17,9	17,0	34,1	36,7
		3		53,2	54,6	62,6	64,6	70,3	62,2	58,6
		1		51,2	52,2	59,2	57,0	0	0	0
III	32	2	47,6	53,4	45,0	46,0	40,7	52,6	49,1	62,0
		3		49,2	50,6	55,6	62,5	64,0	54,1	62,7
		1		62,4	66,5	71,5	76,3	36,4	0	0
IV	42	2	54,4	57,9	45,5	39,5	26,7	41,0	72,5	93,5
		3		54,9	57,3	61,9	69,0	70,3	59,4	63,4
		1		66,3	67,3	78,4	86,9	77,0	70,4	82,4
V	52	2	56,6	76,9	68,3	78,3	89,4	91,7	62,6	84,3
		3		62,4	64,1	69,0	70,7	84,0	71,4	84,1
		1		59,4	67,2	74,3	77,0	57,3	38,0	82,1
VI	62	2	46,3	60,2	59,3	71,2	74,2	90,5	48,5	94,4
		3		51,0	52,9	58,6	58,6	70,0	59,5	68,9
		1		77,6	86,9	94,9	104,9	79,8	53,7	80,0
VII	72	2	68,4	80,3	82,6	98,5	102,0	107,5	65,0	99,8
		3		76,5	81,8	84,9	85,0	92,1	68,0	90,2
		1		48,0	46,6	58,1	58,5	56,3	90,9	76,1
VIII	82	2	69,5	56,7	59,5	62,2	73,3	70,5	53,9	57,9
		3		55,0	58,2	64,1	71,8	68,0	41,9	43,1
		1		69,0	74,3	83,9	89,0	84,1	53,8	61,3
IX	92	2	46,8	65,8	68,4	75,7	82,6	84,0	58,2	83,8
		3		61,8	55,6	67,8	71,2	74,0	69,5	76,8
		1		61,9	70,0	80,5	78,4	0	0	0
X	102	2	42,5	58,8	64,9	79,6	82,9	102,0	55,2	98,4
		3		50,7	54,2	62,5	73,4	78,5	61,6	71,0

Conservation : 1 = Eau de mer 2 = Eau sulfatée 3 = Eau potable

TABLEAU 3 — Essais de flexion en mortier plastique à 600 kg de ciment par m³ de sable

Ciment	Indicatif du mortier	Conservation	Résistance en kg/cm²							
			au départ	après une immersion de						
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans	30 ans
		1		72,8	76,2	80,1	81,5	0	0	0
I	13	2	64,4	80,0	87,0	75,5	74,8	72,8	58,7	60,4
		3		72,8	70,3	83,7	89,3	91,9	75,1	75,8
		1		71,0	71,5	72,9	85,1	36,9	0	0
II	23	2	64,4	71,8	84,0	92,3	93,8	79,5	78,0	87,1
		3		70,6	75,1	80,5	90,1	92,3	79,1	87,6
		1		70,8	80,3	83,1	66,7	0	0	0
III	33	2	61,5	66,4	77,4	86,1	81,6	103,0	73,9	106,6
		3		67,0	62,3	71,9	72,9	78,9	62,6	73,4
		1		80,8	80,0	89,9	89,6	82,3	73,7	0
IV	43	2	64,0	75,3	78,2	83,4	98,8	100,5	94,7	96
		3		67,1	69,4	74,3	83,1	85,6	74,5	80,1
		1		70,8	81,1	90,5	105,7	91,5	80,0	87,6
V	53	2	63,6	80,0	84,5	94,0	109,2	108,8	50,5	85,9
		3		72,9	68,1	79,4	82,8	88,5	71,5	87,9
		1		73,9	82,6	93,3	106,1	75,0	72,4	89
VI	63	2	62,5	75,2	79,3	90,2	95,0	106,0	60,7	96
		3		64,4	67,3	68,5	73,7	79,5	65,5	82,5
		1		88,0	102,6	121,0	112,7	107,1	75,7	95,8
VII	73	2	79,1	90,2	96,4	118,0	116,8	127,3	72,5	120,3
		3		86,0	88,8	92,4	97,5	104,1	78,1	91,9
		1		65,1	67,9	69,5	67,0	56,0	72,0	91,2
VIII	83	2	81,0	67,8	66,8	76,2	87,8	84,5	62,2	74,0
		3		67,4	74,3	75,8	89,2	93,0	52,6	54,5
		1		70,4	78,6	85,7	103,7	106,8	77,4	85,3
IX	93	2	57,4	88,7	82,3	90,7	108,2	105,0	70,0	110,4
		3		75,9	72,8	75,5	86,5	93,0	66,1	85,8
		1		68,6	78,5	92,9	95,3	0	0	0
X	103	2	48,0	70,0	71,4	85,2	86,6	107,5	61,0	80,0
		3		59,0	61,1	74,4	78,1	86,0	63,4	71,4

Conservation : 1 = Eau de mer 2 = Eau sulfatée 3 = Eau potable

TABLEAU 4 — Essais de compression en mortier plastique à 300 kg de ciment par m³ de sable

Ciment	Indicatif du mortier	Conservation	Résistance en kg/cm²							
			au départ	après une immersion de						
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans	30 ans *
		1		189	186	184	129	0	0	0
I	11	2	203,5	164	43,7	0	0	0	0	0
		3		228	246	265	263	299	228	283
		1		179	191	186	116	0	0	331
II	21	2	200	199	139	0	0	0	0	0
		3		199	247	273	270	286	278	318
		1		172	184	160	130	0	0	281
III	31	2	160	167	152	220	126	221	256	215
		3		203	202	227	227	256	327	268
		1		189	197	208	220	95	0	282,5
IV	41	2	163	194	107	0	0	0	0	0
		3		196	193	244	245	247	250	262
		1		228	179	234	229	0	0	383
V	51	2	160	202	192	241	241	254	271	285
		3		165	191	229	230	247	533	228
		1		148	155	191	192	0	0	419
VI	61	2	116	176	195	224	240	270	304	265
		3		166	174	220	222	272	282	257
		1		234	293	284	322	0	0	379
VII	71	2	185	273	306	404	540	546	434	500
		3		246	305	392	437	502	444	581
		1		369	436	408	389	310	260	388,5
VIII	81	2	358	334	340	445	469	424	186	99
		3		371	348	455	452	368	138	109
		1		236	263	262	319	0	0	331,5
IX	91	2	179	220	247	252	259	330	334	306,5
		3		238	225	225	225	365	280	321,5
		1		173	185	175	159	0	0	0
X	101	2	116	144	178	206	174	225	238	219
		3		157	183	191	203	257	250	276

Conservation : 1 = Eau de mer 2 = Eau sulfatée 3 = Eau potable

* éprouvettes cylindriques de 2,5 cm de diamètre et de hauteur

TABLEAU 5 — Essais de compression en mortier plastique à 450 kg de ciment par m³ de sable

Ciment	Indicatif du mortier	Conservation	Résistance en kg/cm²							
			au départ	après une immersion de						
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans	30 ans *
		1		399	427	397	291	0	0	493
I	12	2	392	345	264	0	0	0	0	339
		3		440	479	542	552	576	480	580
		1		435	434	423	364	117	0	531
II	22	2	375	434	408	377	273	274	330	559
		3		430	454	525	543	570	512	656
		1		273	287	307	247	0	0	529,5
III	32	2	314	336	301	377	379	352	306	371,5
		3		356	350	417	410	435	384,5	395,5
		1		402	437	416	403	360	0	536,5
IV	42	2	361	405	367	407	272	438	533,5	485
		3		404	424	453	456	525	473,5	564
		1		420	344	388	380	468	348	660
V	52	2	360	472	338	383	445	418	532	555
		3		383	520	497	499	517	557	585,5
		1		298	307	330	360	280	343,5	663
VI	62	2	256	300	314	437	437	423	517	518
		3		314	357	433	427	498	479	536
		1		496	481	495	498	344	486,5	679,5
VII	72	2	389	517	508	675	671	671	630	818,5
		3		458	540	607	695	710	575	800,5
		1		539	550	520	586	661	653	650
VIII	82	2	484	551	608	724	696	585	252	131
		3		579	683	712	711	606	163	149
		1		461	425	427	469	413	498	571
IX	92	2	329	352	411	467	509	538	484	539
		3		419	367	493	508	526	523	585
		1		272	340	319	337	0	0	320
X	102	2	244	307	301	373	312	424	382	409
		3		304	273	393	390	467	444	488

Conservation : 1 = Eau de mer 2 = Eau sulfatée 3 = Eau potable

* Eprouvettes cylindriques de 2,5 cm de diamètre et de hauteur

TABLEAU 6 — Essais de compression en mortier plastique à 600 kg de ciment par m³ de sable

Ciment	Indicatif du mortier	Conservation	Résistance en kg/cm²							
			au départ	après une immersion de						
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans	30 ans *
I	13	1	527	540	576	623	549	0	0	671,5
		2		590	490	597	421	472	577,5	757
		3		670	593	724	733	733	632	828
II	23	1	522	535	551	626	540	405	0	695,5
		2		524	660	650	520	661	717	886
		3		552	652	665	740	745	757	1004
III	33	1	457	465	453	462	345	0	0	590
		2		501	508	619	595	602	528	679
		3		535	525	601	605	630	547	639,5
IV	43	1	483	548	522	553	517	454	363	649
		2		562	576	643	641	602	598	761
		3		524	561	636	651	728	674	935
V	53	1	467	522	499	514	546	591	454,5	801,5
		2		521	463	616	604	600	663	705
		3		469	533	603	609	685	659	723
VI	63	1	386	465	410	489	503	433	400	865
		2		489	454	556	579	562	600	681
		3		457	570	588	581	622	677	697
VII	73	1	567	616	648	637	644	705	485	879
		2		700	656	803	808	829	672,5	977
		3		605	744	790	782	860	836	1023
VIII	83	1	600	747	776	750	756	828	799	835
		2		742	693	908	898	850	449	209
		3		787	774	921	911	948	346	275,5
IX	93	1	426	519	512	528	578	623	612	678
		2		536	549	683	655	663	610,5	762
		3		566	545	641	623	744	604	641
X	103	1	305	344	350	369	410	0	0	517
		2		383	406	435	435	459	437	523
		3		390	391	391	439	480	471	538,5

Conservation : 1 = Eau de mer 2 = Eau sulfatée 3 = Eau potable

* Eprouvettes cylindriques de 2,5 cm de diamètre et de hauteur

TABLEAU 7 — Essais de compression sur éprouvettes en béton

Ciment	Conservation	Essai de départ (âge véritable) kg/cm²	Résistance en kg/cm² après une immersion de						
			5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans	30 ans
I	1	467	493	519	516	473	287	711*	852**
	2		538	535	563	534	535	754*	755*
	3		535	532	571	611	536	637	855*
II	1	470	503	505	517	491	339	698*	830**
	2		547	527	541	622	585	817*	576*
	3		540	523	581	674	605	625	932*
III	1	358	368	420	402	430	298	495*	565*
	2		422	428	432	462	478	534*	767*
	3		425	430	470	515	478	482	622*
IV	1	396	443	472	453	538	524	685*	684*
	2		474	488	468	538	576	743*	899*
	3		482	468	534	590	587	583	852*
V	1	334	400	466	462	531	588	637*	724*
	2		435	445	449	511	539	649*	714*
	3		423	432	466	508	557	591	755*
VI	1	286	360	428	433	499	548	686*	609*
	2		354	388	432	463	513	652*	659*
	3		382	410	460	493	517	548	646*
VII	1	402	568	594	614	716	812	863*	835*
	2		550	594	613	666	612	522*	870*
	3		562	579	642	621	639	709	936*
VIII	1	551	609	659	622	769	702	504*	499*
	2		608	623	611	659	291	240*	310*
	3		580	599	622	671	316	200	297*
IX	1	341	441	491	527	580	580	708*	771*
	2		427	459	487	561	473	635*	715*
	3		442	459	505	533	469	560	731*

Conservation : 1 = Eau de mer 2 = Eau sulfatée 3 = Eau potable

* Eprouvettes cylindriques de 11,3 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur
** Eprouvettes cylindriques de 8 cm de diamètre et 7 cm de hauteur

SAMENVATTING :

VOLLEDIG VERSLAG AANGAANDE DE PROEVEN EN WAARNEMINGEN UITGEVOERD OP PROEFSTUKKEN VAN DIVERSE MORTELS EN BETONSOORTEN GEDURENDE EEN PERIODE VAN DERTIG JAAR (1934-1964), EN WAARVAN EEN GROOT AANTAL BLIJVEND WERDEN ONDERGEDOMPELD IN DE NOORDZEE TE OOSTENDE

(1e Vervolg) *

Het Hoofdstuk XI betreft de monsterneming van 1.9.1938, na 47 maand onderdompeling.

De mortels die in het zeewater werden bewaard beginnen merkbare sporen van alteratie te vertonen voor de bindmiddelen 1, 2, 3 en 10. De incrustaties van deze cementen maken zonder twijfel een faze van de ontbinding uit. Voor de andere cementsoorten, blijft de buigvastheid boven deze liggen van de overeenkomstige proefstukken die in drinkbaar water werden bewaard.

Voor de proefstukken die in sulfaathoudend water werden bewaard, zijn deze van de mortels 1, 2 en 3 nog meer aangetast dan in 1936, terwijl de weerstanden van de mortel 101 beginnen te verminderen. Het sulfaathoudend water heeft bovendien de kanten aangetast van de betonkubussen 1 en 2, en de kubussen van beton 10 hebben gemiddeld 3,56 % van hun volume verloren (hoeken en kanten).

Steeds geen opmerkingen wat de betoncilinders met wapeningen betreft.

De vijfde monsterneming moest plaatsgrijpen in 1940, na 6 jaar onderdompeling, doch kon niet gebeuren wegens de oorlogstoestand. Zij geschiedde op 8 en 9.10.1945, na 11 jaar onderdompeling. Niettegenstaande de schade welke de haven van Oostende onder invloed der vijandelijkheden had ondergaan, en de ernstige vernielingen aan de Laboratoria te Luik teweeggebracht door de luchtbombardementen van mei 1944, werden de drie laatste collecties proefstukken gaaf teruggevonden. Alleen de volledig afgedichte, gelaste dozen, waarin zich reserves van de verschillende cementsoorten bevonden, werden samen met de Laboratoria vernield. Al de bewaringsinrichtingen werden geïnspecteerd en terug in orde gebracht ter gelegenheid van de vijfde monsterneming.

Talrijke mortelproefstukken zijn door het zeewater vernield geworden of minstens sterk gecorrodeerd, namelijk, 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33, 41, 42, 51, 52, 61, 62, 71, 72, 81, 82, 91, 101, 102, 103. In het sulfaathoudend water, geldt hetzelfde voor de mortels van de cementsoorten 1, 2, 3 en 4, met uitzondering van 33 en 43.

De aantasting van de kubussen 1, 2 en 3 door het zeewater treedt sterk naar voren; de volumeverminderingen bedragen respectievelijk 3,65, 2,70 en 2,90 %. De enige kubussen die in het sulfaathoudend water werden aangetast zijn nog altijd de kubussen 10, die 11 % van hun volume hebben verloren.

De betoncilinders 1, 2 en 3, die in de zee bewaard bleven, beginnen oppervlakkige degradaties te vertonen, die tamelijk merkbaar zijn voor 1 en 3. Maar er is geen

* Zie eerste deel, *T.O.W. van België*, nr 1-1967, blz. 45.

schijn van scheurvorming noch van corrosie van de wapeningen.

Veel proefstukken hebben ten gevolge van hun bewaring in agressieve vloeistofmilieu's dikwijls aanzienlijke geometrische wijzigingen ondergaan; enkele daarvan ook alteraties van homogeniteit. Dit had een aanzienlijke weerslag voor gevolg op de resultaten van de mechanische proeven, zowel onder buiging als onder druk. Voor bepaalde proefstukken, zijn deze proeven zelfs onmogelijk geworden. De mechanische proeven, die als objectieve criteria van de alteratiegraad werden gekozen, in vergelijking met de overeenstemmende en niet gealtereerde proefstukken die in drinkwater werden bewaard, zijn dus uiterst gevoelig en hun resultaten krijgen door de alteratie een zuiver comparatieve en kwalitatieve betekenis. Dit punt wordt besproken, evenals de keuze van andere criteria. Het gewichtsverlies is objectief, maar licht niet in omtrent de toestand van de bewaarde stof. Er werd getracht tot bijkomende proeven over te gaan in twee richtingen. Men heeft de porositeiten in volume bepaald van de mortels, die geen kenmerkende verschillen hebben vertoond.

Daarentegen hebben de chemische analyses van de diverse mortels interessante resultaten opgeleverd. Men heeft hun globale juistheidsgraad kunnen controleren, uitgaande van de gekende nominale samenstellingen. Men heeft ook een kenmerkende variatie opgemerkt van het gehalte aan CaO. Daarvan uitgaande, en mits aan te nemen dat het zand en de proefstukken bewaard in drinkwater onaangetast blijven, heeft men ontbindings- of wijzigingsindices kunnen opstellen voor de mortels die in zeewater werden bewaard, ten opzichte van deze bewaard in drinkwater. Deze indices stemmen goed overeen met de conclusies die werden afgeleid uit de mechanische proeven en de waarnemingen.

Voor de mortels die in sulfaathoudend water werden bewaard, zijn deze indices daarentegen niet kenmerkend.

In het Hoofdstuk XII wordt commentaar uitgebracht aangaande de bijkomende proeven die in 1945 werden uitgevoerd en waaruit blijkt dat enkel de chemische analyses van de mortels welke uit het zeewater werden gehaald kenmerkende resultaten hebben opgeleverd; dit verklaart de resultaten van de mechanische proeven en het vergelijkend gedrag, in zeewater, van de diverse cementsoorten.

Na de monsterneming van 1945, werd besloten de waarnemingen tot een totale duur van 30 jaar voort te zetten. Het Hoofdstuk XIII brengt verslag uit over deze welke in 1954 plaatsgrepen, na 20 jaar onderdompeling. Intussen had zich het onweersgetij van 1 februari 1953 voorgedaan, dat ernstige beschadigingen aan de Belgische kust had berokkend. De kisten die te Oostende in het zeewater waren ondergedompeld werden niettemin in behoorlijke staat teruggevonden, met uitzondering nochtans van deze waarin zich cilinders van gewapend beton bevonden, die op de zeebodem rustten en die verdwenen waren.

De beschadigingen welke men reeds in 1945 had waargenomen zijn over het algemeen veel sterker naar voren getreden. Talrijke mortelproefstukken zijn verdwenen; andere zijn sterk beschadigd of tot afval herleid. Mechanische proeven zijn dan niet meer mogelijk; de vernielingstoestand wordt gekenmerkt door het gewicht.

Voor de cementsoorten 1, 2 en 3, zijn de mortels welke in het zeewater waren ondergedompeld vernield; deze welke in het sulfaathoudend water werden bewaard zijn sterk aangetast. De betonkubussen die uit het zeewater werden gehaald zijn sterk beschadigd, en hetzelfde geldt voor de cilinders van gewapend beton, waaronder deze vervaardigd met het cement 1 een ontbloting vertoont van de dichtst bij het oppervlak gelegen wapening (1 cm), over een lengte van 5 cm.

De proefstukken vervaardigd met de andere cementsoorten zijn minder aangetast. Niettemin zijn de mortels vervaardigd met het cement 10, welke in het zeewater werden ondergedompeld, bijna alle verdwenen, en hetzelfde geldt voor de betonkubussen 10 (cement 2 met toevoeging van duinzand) die in sulfaathoudend water werden bewaard.

In deze omstandigheden, konden de mechanische proeven op mortelstaafjes slechts nog op een klein aantal monsters worden uitgevoerd, die uit het zeewater werden gehaald, voor de cementsoorten 4 t.e.m. 9, alsmede op het merendeel van deze welke in het sulfaathoudend water bewaard werden, voor de cementsoorten 1 t.e.m. 4.

Daar de vormen van al de kubussen welke men uit het zeewater en uit het sulfaathoudend water had gehaald nochtans min of meer beschadigd waren, heeft men er met gediamanteerde boortoestellen cilindervormige proefstukken uitgehaald, met een doorsnede van 100 m² en een hoogte van 10 cm. De kubussen welke in drinkwater bewaard bleven werden als dusdanig beproefd. Zij hebben aanzienlijke weerstanden opgeleverd, die nochtans over het algemeen tamelijk beneden deze lagen van de cilinders, niettegenstaande de dikwijls zeer uitgesproken alteratie van de kubussen waaraan zij werden ontnomen.

Men heeft ook getracht over te gaan tot vergelijkende, niet destructieve proeven op de mortelstaafjes die konden onderworpen worden aan mechanische proeven, dit door de bepaling van de eigen frequentie volgens de langsrichting. De resultaten zijn onzeker en weinig kenmerkend (pl. 49). Dit spruit voort uit de alteratie van de vorm van de proefstukken en ook van de materie zelf. Zo komt het dat bijna al de proefstukken die uit het zeewater et uit het sulfaathoudend water werden genomen en die konden beproefd worden, twee eigen frequenties vertoonden, waarschijnlijk wegens de differentiatie tussen de kern en de omtrek van de proefstukken.

De laatste monsterneming, na 30 jaar onderdompeling, die op 1 april 1964 plaatsgreep, geeft aanleiding tot twee hoofdstukken. Het Hoofdstuk XIV betreft de mortels en de betonkubussen. Tijdens de periode verlopen sinds de vorige monsterneming, had men de uitzonderlijk strenge winter van 1962-1963 gekend, gedurende dewelke een bevriezing van de zee werd waargenomen te Oostende. Dit verklaart waarschijnlijk de aanzienlijke toename van de beschadigingen welke werden vastgesteld op de proefstukken die uit het zeewater werden gehaald, ten opzichte van 1954.

Daar men hiermede het einde had bereikt van de beproevingscampagne, werden de waarnemingen op een bijzonder gedetailleerde wijze genoteerd en gestaafd door talrijke foto's, vooral voor de proefstukken die uit het zeewater werden gehaald en, in een mindere mate, voor deze welke in sulfaathoudend water waren bewaard gebleven.

Vermits de mechanische proeven op de proefstukken ontnomen aan het zeewater en aan het sulfaathoudend water niet veel betekenis meer hadden, heeft men er zoveel mogelijk drukproefstukken uit gehaald met een regelmatige vorm. Voor de mortels heeft men, uit de fragmenten voortkomende van de buigproeven of uit de nog bestaande afval van de proefstukken waarop geen buigproeven meer konden worden uitgevoerd, cilinders gehaald van 2,5 cm diameter en 2,5 cm hoogte. Uit de betonkubusssen, en voor al de bewaringsmodaliteiten, werden cilinders geboord met 100 cm² doorsnede en 10 cm hoogte, uitgezonderd voor de kubussen van de betonsoorten 1 en 2 die uit het zeewater waren gehaald, en die de vorm hadden aangenomen van knollen waaruit enkel nog cilinders van 50 cm² doorsnede en van 7 cm hoogte konden worden vervaardigd.

Op deze proefstukken, — zelfs op deze ontnomen aan vormeloze mortelafval, — werden nog aanzienlijke en dikwijls zeer hoge drukweerstanden verkregen, die soms groter waren voor de bewaring in het zeewater dan voor de bewaring in drinkwater. Dit is echter meestal niet het geval gebleken voor de bewaring in sulfaathoudend water.

(wordt vervolgd)