

duc provisoire Quai des Tuileries - Quai du Louvres à Paris. — <i>Het voorlopig viadukt van de Quai des Tuileries - Quai du Louvre, te Parijs. (Samenvatting)</i> . . . . .	76
FRANCE et SUISSE - FRANKRIJK en ZWITSERLAND — Nouvelle méthode pour le fonçage des caissons. — <i>Nieuwe methode voor het zinken van caissons. (Samenvatting)</i> . . . . .	78
GRANDE-BRETAGNE - GROOT-BRITTANNIË — Het registreren der lading van baggerwerktuigen. — <i>L'enregistrement du chargement des dragues suceuses. (Résumé)</i> . — Blackweel Tunnel — Rijnvloer in geprefabriceerde elementen. — <i>Tunnel de Blackweel — Route en éléments préfabriqués. (Résumé)</i> . . . . .	79
PAYS-BAS - NEDERLAND — La drague à tête trainante la plus grande du monde. — <i>De grootste sleepzuiger ter wereld. (Samenvatting)</i> . — Travaux du Plan Delta — Evolution du profil transversal des digues de fermeture des bras de mer. — <i>Deltawerken — Evolutie der dwarsdoorsneden van de dammen. (Samenvatting)</i> . . . . .	82

**BIBLIOGRAPHIE**

Manuel de l'assainissement urbain, par KARL IMHOFF, édité par *Dunod*, Paris. — Memento de l'ingénieur en cimenterie, par OTTO LABAHN, Editions *Eyrolles*, Paris. — Architectural Engineering — New Structures, par R.E. FISCHER, éditeur *Mc Graw Hill Book Co.*, Londres. — Fundamentsetzungen (2e Teil) — Erläuterungen und Berechnungsbeispiele für die Anwendung der Normen DIN 4019 Blatt 2 « Baugrund ». Setzungsberechnungen beischräg und bei aussermittigt wirkender Belastung. (Verkantung): Richtlinien, par M. KANY, éditeurs *Beuth-Vertrieb GmbH et W. Ernst & Sohn*, Berlin. — Guide pratique de charpente métallique, par R. DAUSSY, édité par la *Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics*, Paris. — FAHRBAHNN-ÜBERGÄNGE in Brücken und Betonbahnen — Joints de chaussées pour ponts et routes en béton, par W. KÖSTER, Coédité par les Editions *Eyrolles*, Paris et *Bauverlag GmbH*, Wiesbaden. — Le béton tendu dans la flexion simple et composée, par S. CERVI, édité par *Dunod*, Paris . . . . . 85

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 IMMERGEEES EN PERMANENCE  
DANS LA MER DU NORD A OSTENDE

1<sup>re</sup> Partie

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

Ont collaboré à ces études et recherches, dans le sein des Laboratoires susnommés :

Roger Dantinne, professeur émérite (de 1934 à 1964).  
René Jacquemin, professeur ordinaire à la Faculté polytechnique de Mons (de 1934 à 1947).

Monique Dzulynski, chef de travaux (de 1947 à 1964).  
Kasimierz Gamski, chargé de cours associé (de 1954 à 1964).

programme d'assez grande envergure pour l'examen comparatif du comportement de ciments hydrauliques de diverses natures dans l'eau de la Mer du Nord. Cette administration venait d'éprouver de graves mécomptes dans les travaux du nouveau port de pêche d'Ostende, entamés en 1922 et terminés en 1929. L'écluse du bassin à flot des chalutiers était ruinée à tel point en 1934, par la décomposition généralisée de son béton, qu'il avait fallu prévoir sa mise hors service et décider la construction d'une nouvelle écluse. [1]

**AVANT-PROPOS**

Les Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège avaient à peine quatre ans lorsque l'Administration des Ponts et Chaussées, en la personne de Monsieur l'Inspecteur Général G. De Cuyper, leur proposa d'établir un

Cet incident grave fit naître quelque appréhension dans l'industrie cimentière belge, qui se trouvait à l'époque dans une période d'évolution en suite de l'apparition récente sur le marché national de nouveaux types de ciments, dont certains revendiquaient des propriétés particulières d'indécomposabilité et prônaient à ce sujet des épreuves particulières, telles que l'essai dit Le Châtelier-Anstett.

L'Administration des Ponts et Chaussées éprouvait dès lors la nécessité de déterminer des compositions de bétons pour ses ouvrages maritimes garantissant contre le retour des insuccès subis à Ostende et aussi de s'éclairer sur les mérites respectifs d'indécomposabilité par l'action marine des divers ciments offerts sur le marché. Le programme demandé aux Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège devait donc répondre à un but purement pratique et utilitaire, dont le caractère scientifique devait seulement garantir l'efficacité et l'impartialité.

L'objet recherché par l'administration a été atteint. Elle a pu depuis plusieurs lustres entreprendre des bétonnages en eau marine ou saumâtre avec le minimum d'aléas. En ce sens, la présente publication est superflue.

Mais, en dépit de sa portée scientifique accessoire au départ, des nombreuses insuffisances qui en résultent et qui lui imposent de rester modeste dans ses prétentions finales, la recherche a cependant permis de rassembler tant d'observations et de résultats qu'il a paru utile de les faire connaître avec quelques détails. Cela non seulement pour étayer des conclusions propres, mais aussi pour permettre à d'autres spécialistes d'exploiter cette documentation suivant leurs méthodes particulières, à l'instar de R. Feret [2] à propos d'une relation entre les résistances à la flexion et les résistances à la compression des barreaux de mortier relevées de 1934 à 1938 [1]. Cette notion était totalement étrangère aux buts des expériences. L'intérêt possible de cette documentation résulte principalement de la durée inhabituelle d'observation. La connaissance des liants hydrauliques, des mortiers et des bétons est fondée surtout sur des expériences dont la durée atteint (et certes dépasse) rarement un an. L'examen des paramètres après 30 ans peut n'être pas dépourvu d'intérêt. Après la communication des résultats relevés en 1945, après 11 ans, R. Feret écrivait en août 1946 pour constater qu'ils ne permettaient plus d'étayer la relation que les résultats jusqu'à l'âge de 4 ans faisaient encore considérer comme valable [2].

C'est donc principalement dans un but scientifique, imprévu à l'origine, mais à toutes fins qui pourraient être utiles, que cette publication est entreprise, de manière que ce long travail puisse donner tous les résultats dont il est susceptible.

## PREMIERE PARTIE

### Programme et organisation des essais

#### Chapitre I. — PROGRAMME DES ESSAIS

Daté du 7 avril 1934 et approuvé le 24 mai suivant, il a été fidèlement suivi à très peu de choses près, de

telle sorte qu'il constitue une introduction utile à la description et à la compréhension des expériences.

#### 1. — Ciments

Huit liants seront comparés dans les essais :  
Ciment alumineux fondu.  
Ciments portland normal et à durcissement rapide.  
Ciments de haut-fourneau normal et à haute résistance.  
Ciment portland normal additionné de 50 % en poids de trass moulu d'Andernach.  
Ciment sursulfaté Sealithor.  
Ciment permétallurgique normal.

#### 2. — Mortiers

Des éprouvettes de mortier plastique de 3 dosages différents seront confectionnées au moyen des différents ciments et conservées en permanence dans l'eau potable, dans l'eau de mer et dans une solution de sulfate de magnésium dont la teneur sera trois fois celle de l'eau de la Mer du Nord. Les éprouvettes seront des prismes de  $4 \times 4 \times 16$  cm. Chaque essai se fera sur 4 éprouvettes, permettant 4 essais de flexion et 8 essais de compression sur les fragments.

Trois compositions sont prévues pour les mortiers plastiques, contenant respectivement, 300, 450 et 600 kg de ciment par  $m^3$  de sable du Rhin 0/2.

Afin d'assurer la plus grande uniformité des éprouvettes, on confectionnera le même jour et en une seule gâchée toutes les éprouvettes correspondant à chaque dosage pour chaque ciment. Ces éprouvettes seront démolées le lendemain de leur confection et conservées dans l'air humide. Les opérations dureront  $3 \times 8 = 24$  jours consécutifs.

28 jours après la confection de la dernière série d'éprouvettes, celles-ci seront par tiers immergées dans l'eau potable, dans l'eau de mer artificielle du laboratoire et dans la mer à l'endroit fixé par l'Administration. Ce même jour, une collection complète d'éprouvettes sera soumise aux essais. Les résultats de ces essais initiaux serviront de repères de départ pour l'observation de l'évolution de résistances pendant l'immersion permanente dans les trois milieux de conservation.

Les éprouvettes immergées dans la mer seront disposées par collections complètes de 4 éprouvettes de chaque liant et de chaque dosage, soit  $4 \times 8 \times 3 = 96$  éprouvettes, dans des caisses à claire-voie, en réservant un espace d'environ 2 cm entre les barrettes de mortier par un double réseau de lattes fixées sur les fonds. Le poids de 96 éprouvettes est d'environ 50 kg. 7 caisses semblables seront équipées et les éprouvettes y seront disposées dans un ordre défini, permettant de les identifier avec

certitude par un repère dans un angle des caisses. Pour les essais à différents âges, il suffira de retirer de la mer une des caisses. Les éprouvettes en seront extraites, identifiées et soumises aux essais en même temps que deux collections identiques conservées au laboratoire dans l'eau potable et dans l'eau de mer artificielle.

Les durées d'immersion prévues sont de 5 mois, 11 mois, 23 mois, 4 ans et 6 ans. Les âges d'essai des deux dernières collections seront plus opportunément décidés d'après les résultats des premiers prélèvements.

Ces dispositions semblent éviter tout risque de confusion. Des objections pourraient être faites à propos des âges différents des éprouvettes lors de l'immersion, qui s'échelonnent entre 28 et 51 jours. Afin d'éviter des contestations à ce sujet, l'ordre de confection suivant est proposé pour les divers liants :

1. C.P.D.R.
2. C.P.N.
3. C.P.N. + trass.
4. H.F.H.R.
5. H.F.N.
6. C. permétallurgique.
7. C. Sealithor (sursulfaté).
8. C. fondu (alumineux).

Il favorise les ciments qui à première vue paraissent les plus vulnérables et qui seront immergés à l'âge le plus élevé, pour chacun d'eux dans l'ordre d'âge 300, 450 et 600 kg de ciment par  $m^3$  de sable.

Le nombre total d'éprouvettes sera de  $4 \times 3 \times 8 \times (7 \times 3 + 1) = 2112$  dont 96 pour l'essai de départ et 672 pour chaque milieu d'immersion.

#### 3. — Bétons

Des cubes de 16 cm de côté, d'un poids d'environ 10 kg, au nombre de 3 par essai et par âge, seront confectionnés au moyen de bétons plastiques de la composition suivante :

- 800 litres de gravier roulé 5/15 mm.
- 400 litres de sable du Rhin 0/2 mm.
- 350 kg d'un des ciments précédemment définis.

La quantité d'eau sera déterminée pour assurer une consistance appropriée. Le nombre total de cubes sera  $8 \times 3 (3 \times 7 + 1) = 528$  pour permettre l'essai à 7 âges différents, comme pour les mortiers, de collections de trois cubes pour chaque ciment, conservés dans l'eau potable, l'eau de mer artificielle et la Mer du Nord. Une série supplémentaire servira à l'essai de départ le jour de l'immersion.

Les cubes seront disposés par séries de 8 (poids net 80 kg) dans 21 caisses à claire-voie pour l'immersion dans la mer. A chaque prélèvement, on retirera trois caisses de bétons en même temps, qu'une caisse d'éprouvettes de mortier.

#### 4. — Bétons armés

Des éprouvettes cylindriques de 15 cm de diamètre et de 30 cm de hauteur seront confectionnées au moyen des mêmes bétons que les cubes et contiendront une armature formée de 4 barres d'acier d'un centimètre de diamètre, disposées suivant les génératrices d'un cylindre de 10 cm de diamètre, excentré de 1,5 cm par rapport à l'axe du moule, de telle sorte que l'une des armatures soit à 1 cm de la surface extérieure du béton, une autre à 4 cm et les deux autres à 2 et 3 cm.

3 caisses de 8 éprouvettes seront

l'une immergée en permanence sous marée basse;  
une autre immergée à mi-marée;  
la troisième exposée à l'air marin au-dessus de marée haute.

3 séries de comparaison seront conservées au laboratoire, respectivement dans l'air, dans l'eau potable et dans l'eau de mer artificielle.

#### 5. — Essais divers au laboratoire

Il sera procédé aux essais suivants, destinés à caractériser les divers ciments.

- a) Essais normaux de réception des ciments.
- b) Analyse chimique des ciments.
- c) Essais sur mortier plastique aux dosages prévus en 2, à l'âge de 28 jours; essai de flexion sur barreaux de  $4 \times 4 \times 16$  et essais de compression sur les fragments.
- d) Essais de retrait sur pâte pure, mortier et béton, avec conservation à l'air, dans l'eau potable et dans une solution de sulfate de magnésium à 1,5 %.
- e) Enregistrement de la température de prise en pâte normale.
- f) Essais de Le Châtelier-Anstett sur pâtes ayant durci pendant 14 jours.
- g) Essais de filtration forcée d'eau distillée, d'eau potable et d'eau sulfatée à 1,5 % sur éprouvettes de mortier au dosage de 450 kg de ciment par  $m^3$  de sable, avec établissement des courbes de débit et observation des dégradations éventuelles.
- h) Essais de compression sur trois cubes des bétons définis sous 3 conservés à l'air humide jusqu'à l'âge de 28 jours.

## 6. — Extension des essais à deux ciments supplémentaires

Avec l'accord du Service spécial de la Côte de l'Administration des Ponts et Chaussées, le programme des essais a été étendu aux ciments suivants :

9. Ciment « Marin » de la S.A. John Cockerill, à Seraing s. Meuse. (pour la totalité des essais)
10. Trasszement 50/50 du Trassbund (pour les essais sur mortiers seulement) (cf. chapitre II, paragraphe 9)

## 7. — Réserve de ciment

Une réserve d'une vingtaine de kg de chaque ciment utilisé pour les essais sera gardée dans des boîtes métalliques étanches soudées, à toutes fins ultérieures utiles.

## 8. — Manutentions et expéditions

Il avait été prévu au programme que les caisses pour l'immersion marine auraient été envoyées au laboratoire et réexpédiées à Ostende après avoir été pourvues de leurs éprouvettes.

En raison du poids et de l'encombrement de ces caisses et des difficultés de manutention, il a été décidé, après que le programme eût été arrêté et d'accord avec M. E. Verschoore, Ingénieur en chef-Directeur des Ponts et Chaussées, directeur du Service spécial de la Côte, que la mise en caisse des éprouvettes serait effectuée à Ostende.

## Chapitre II. — ORGANISATION ET DEROULEMENT DES OPERATIONS

### 1. — Matériaux

#### A. — Ciments.

1. Ciment portland artificiel à durcissement rapide, marque « Haccourelite », approvisionné le 5-7-1934 à la cimenterie des Ciments Liégeois de Haccourt.
2. Ciment portland artificiel normal approvisionné le 5-7-1934 au chantier des nouveaux instituts universitaires du Val-Benoît à Liège et provenant de la Cimenterie de Visé.
3. Mélange de deux parties en poids du ciment P.A.N. 2 précédent et d'une partie de trass moulu. Ce dernier a été fourni en sacs plombés du Deutscher Trassbund (Tubbag) par M. A. Janssen d'Anvers et reçu le 30-6-1934.
4. Ciment de haut fourneau à haute résistance, approvisionné le 4-7-1934 à la Cimenterie de la S.A. John Cockerill, à Seraing-sur-Meuse.
5. Ciment de haut fourneau normal approvisionné le 4-7-1934 au chantier des nouveaux instituts universi-

taires du Val-Benoît et provenant de la Cimenterie de la S.A. John Cockerill.

6. Ciment permétallurgique normal approvisionné le 4-7-1934 à la Cimenterie de la S.A. d'Ougrée-Marihaye à Ougrée.
7. Ciment sursulfaté marque « Seallithor » approvisionné le 16-7-1934 au chantier du barrage de Mornimont sur la Sambre par les soins de M. l'Ingénieur principal des Ponts et Chaussées Caulier et provenant de la Cimenterie de Thieu.
8. Ciment alumineux fondu, des Cimenteries Lafarge (France), approvisionné le 4-7-1934 au dépôt Garot et Burton à Liège.
9. Ciment « Marin » de la S.A. John Cockerill, approvisionné le 1-9-1934.
10. Trass-Zement 50/50 marque « Tubbag », reçu le 9-7-1934 en sacs papier d'origine et provenant du « Forschungs-Institut der Tuffstein und Basaltlava A.G. » à Andernach (Allemagne).

Il est à remarquer que tous ces ciments ont été approvisionnés sans référence à leur destination, sauf le n° 9 (Ciment Marin) ajouté au programme à la demande de la cimenterie productrice, mise hors d'activité ultérieurement. Il s'agit donc de produits commerciaux et non préparés spécialement en vue des essais auxquels ils seront soumis.

Dès réception, les ciments ont été mis en fûts métalliques étanches et soumis aux essais de réception selon les prescriptions du Cahier général des charges de l'Administration des Ponts et Chaussées. Les résultats en sont relatés au Chapitre III.

#### B. — Gravier.

Le gravier de Meuse 5/20 mm a été approvisionné le 5-7-1934 au chantier des nouveaux instituts universitaires du Val-Benoît, entreprise Martin, en une fois et par temps sec. Il a ensuite été mélangé avec soin de manière à être rendu aussi homogène que possible et conservé en silos à l'intérieur du laboratoire. L'analyse granulométrique figure au paragraphe 3 ci-après.

#### C. — Sable.

Le sable dit du Rhin 0/2 mm a été approvisionné le 5-7-1934 au chantier des nouveaux instituts universitaires du Val-Benoît, entreprise Bémat. Il a été traité de la même manière que le gravier. L'analyse granulométrique figure au paragraphe 3 ci-après.

### 2. — Compositions des mortiers

Trois dosages ont été employés

- 1) 1500 kg de sable 0/2 sec, 300 kg de ciment.

- 2) 1500 kg de sable 0/2 sec, 450 kg de ciment.
- 3) 1500 kg de sable 0/2 sec, 600 kg de ciment.

Tous ont reçu une addition d'eau de 11 % du poids des matières sèches. Les rapports eau/ciment sont respectivement 0,66, 0,476 et 0,395.

Ces quantités d'eau constituent les minima compatibles avec une mise en œuvre aisée et régulière, de manière à obtenir la même aptitude de mise en œuvre plutôt que la même consistance. Pour cela, le mortier maigre a dû avoir un rapport E/C plus grand que le mortier riche.

### 3. — Composition des bétons

Ils contiennent tous 350 kg de ciment par m<sup>3</sup> de béton frais. Les proportions de sable et de gravier ont été déterminées de telle sorte que le mélange sec gravier-sable-ciment satisfasse le mieux possible à la formule de Fuller-Bolomey

$$R_d = (100 - A) \left(1 - \sqrt{\frac{d}{D}}\right)$$

dans laquelle :

$R_d$  est le refus en % en poids sur le tamis de jour  $d$  mm,

Analyses granulométriques				
Jours des tamis en mm	Refus cumulés % en poids			
	Gravier	Sable	Béton	Fuller-Bolomey
18.85	3		1.69	2.5
9.42	48.5		27.2	27.9
4.7	89		50	45.4
2.36	98	1.7	55.48	57.8
1.17	99.6	15.2	60.27	66.8
0.589	99.7	40.3	67.3	72.9
0.295	99.8	89.5	81.2	77.3
0.147	99.9	99.5	84.1	80.4
Modules de finesse	6.375	2.462	4.272	4.307

$D$  est la dimension moyenne des éléments les plus gros (20 mm),

$A$  est un coefficient numérique. On lui a donné la valeur 12 indiquée par J. Bolomey pour un béton très plastique de matériaux roulés.

La quantité d'eau de malaxage a été déterminée par expérience, de manière à obtenir un béton plastique facile à mettre en œuvre et à compacter par un léger damage manuel.

Les essais préliminaires ont conduit à la composition suivante :

Gravier 5/20	1250 kg	56,2 % du poids sec
Sable	630	28,1
Ciment	350	15,7
Eau	158	7,1

Poids par m<sup>3</sup> : 2388 kg.

Rapport eau/ciment 0,452.

Affaissement moyen au cône d'Abrams 2 cm.

### 4. — Confection des éprouvettes de mortier

On a utilisé 100 moules de prismes 4 × 4 × 16 en blocs de 10, neufs et bien rectifiés. Les mélanges ont été réalisés par pesée et malaxés à la truelle dans un grand bac en 4 gâchées de 16 kg chacune.

Aussitôt après gâchage, le mortier était placé dans les moules en deux couches damées jusqu'à reflux à l'aide d'une petite dame en bois. Pour assurer la plus grande régularité, un même opérateur expérimenté a procédé à tous les gâchages; un second opérateur a procédé à tous les moulages. Le temps nécessaire à la confection des 25 éprouvettes d'une gâchée était d'environ 15 à 20 minutes à partir du moment de l'addition de l'eau au mélange.

Les éprouvettes étaient démoulées après 24 heures et conservées ensuite dans du sable fin mouillé. Les moules vides étaient aussitôt nettoyés soigneusement, huilés et remontés.

Les opérations de démoulage ont été généralement effectuées sans déchets, sauf pour les mortiers à 300 kg des ciments à durcissement lent, dont quelques éprouvettes se sont rompues pendant le démoulage. Mais la réserve de 8 éprouvettes pour chaque dosage par rapport au nombre d'éprouvettes nécessaires de 92 a toujours permis de remplacer celles qui étaient brisées.

Chaque ciment a été affecté d'un numéro indiquant l'ordre suivi pour la confection des différentes séries d'éprouvettes, ordre défini au programme (cf. chapitre I, paragraphe 2) et conservé plus haut (cf. chapitre II, paragraphe 1. A.) dans la nomenclature des ciments utilisés. Les différents mortiers d'un même ciment sont distingués en faisant suivre le chiffre indicatif du ciment par les chiffres 1, 2 ou 3 suivant qu'il s'agit du mortier à 300, 450 ou 600 kg de ciment par m<sup>3</sup> de sable (cf. cha-

pitre II, paragraphe 2). Par exemple, le mortier désigné 52 est celui confectionné au moyen de ciment de haut fourneau normal au dosage de 450 kg de ciment par m<sup>3</sup>.

Les dates de confection des diverses séries d'éprouvettes ont été les suivantes.

11 le 1-8-1934.	12 le 2-8-1934.	13 le 3-8-1934.
21 le 4-8	22 le 5-8	23 le 6-8
31 le 7-8	32 le 8-8	33 le 9-8
41 le 10-8	42 le 11-8	43 le 12-8
51 le 13-8	52 le 14-8	53 le 15-8
61 le 16-8	62 le 17-8	63 le 18-8
71 le 19-8	72 le 20-8	73 le 21-8
81 le 22-8	82 le 23-8	83 le 24-8

C'est pour réduire le décalage inévitable entre les diverses séries, dont l'ordre a été arrêté en conséquence (cf. chapitre I, paragraphe 2), que la confection des éprouvettes a été réalisée sans désassembler, jours ouvrables ou non.

#### 5. — Confection des éprouvettes en béton

Les cubes de béton de 16 cm de côté ont été confectionnés au moyen de 24 moules métalliques, en 8 blocs de 3, neufs et bien rectifiés. Les cloisons divisant les blocs en trois alvéoles cubiques étaient constituées par des plaques de fonte soigneusement rectifiées.

Le béton nécessaire à la confection de 24 éprouvettes cubiques et de deux éprouvettes cylindriques, dont il sera question ci-après, soit 250 kg, était malaxé en une gâchée à la pelle, par deux opérateurs, sur une grande tôle d'acier. Le remplissage des moules était fait en deux couches picotées et damées légèrement jusqu'à reflux. La surface était légèrement lissée à la truelle et marquée d'un trait permettant de repérer les faces moulées sur les plaques de fonte et destinées à être placées en contact avec les plateaux de la presse dans l'essai de compression.

Le temps nécessaire à la confection des éprouvettes était de 40 minutes à partir du moment de l'addition de l'eau au mélange. Les cubes étaient démoulés après 24 heures et conservés dans du sable fin mouillé. Les mêmes opérations étaient répétées pendant 3 jours consécutifs avec le même ciment pour réaliser 72 cubes et 6 cylindres. Le programme prévoyait 69 éprouvettes cubiques; l'essai de départ a été fait sur 6 cubes au lieu de 3. La confection de toutes les éprouvettes n'a donné lieu à aucun déchet.

Les dates de confection ont été les mêmes que celles des mortiers des mêmes ciments.

Béton 1, les 1, 2 et 3-8-1934.

Béton 2, les 4, 5 et 6-8.

Béton 3, les 7, 8 et 9-8.

Béton 4, les 10, 11 et 12-8.

Béton 5, les 13, 14 et 15-8.

Béton 6, les 16, 17 et 18-8.

Béton 7, les 19, 20 et 21-8.

Béton 8, les 22, 23 et 24-8.

Les éprouvettes d'un même béton n'ont donc pas le même âge, mais différent de 1 ou 2 jours. Elles n'ont cependant pas été distinguées les unes des autres, mais mélangées pour un même ciment au cours des manipulations.

#### 6. — Cylindres en béton contenant des armatures

Au moyen de chaque béton, on a confectionné 6 éprouvettes cylindriques de la manière qui a été indiquée ci-dessus. On a employé des moules standard américains en acier, de 6 pouces de diamètre et 12 pouces de hauteur. Dans chacun de ces cylindres on a disposé quatre barres d'acier doux à béton, de 10 mm de diamètre, ligaturées de manière à être disposées suivant des génératrices d'un cylindre d'un diamètre extérieur de 10 cm. Cette armature a été placée excentriquement par rapport au moule, de manière à réaliser des recouvrements sur les différentes barres sensiblement égaux à 1, 2, 3 et 4 cm. Leur position était assurée pendant le remplissage des moules principalement par un fond perforé. Les extrémités des barres faisaient saillie d'environ 2 cm sur les deux bases des cylindres.

#### 7. — Immersion des éprouvettes dans la mer

Le 17-9-1934, toutes les éprouvettes ont été retirées du sable humide. Celles destinées à être conservées au laboratoire ont été lavées à grande eau pour les débarrasser du sable et les empêcher de sécher; elles ont été déposées dans des bacs de conservation.

Les 672 éprouvettes de mortier destinées à être immergées dans la mer ont été placées par groupes de 28 (4 × 7 âges d'essai) dans 24 caissettes (3 dosages de 8 ciments) portant le numéro distinctif du mortier. Elles étaient disposées dans du sable mouillé pour les protéger pendant le transport contre les chocs et la dessiccation.

Les 168 cubes et les 24 cylindres de béton ont été marqués de leur chiffre distinctif et fortement humectés.

Le 18-9-1934, toutes ces éprouvettes ont été transportées à Ostende par camion automobile, convoyées par M.M. R. Dantinne et R. Jacquemin. Arrivées à destination, elles ont été déposées sur un embarcadère à proximité du chantier de l'entreprise L. Van Huele, chaussée d'Oudenburg. Les caisses destinées à les contenir étaient placées sur un ponton contigu.

La mise en caisse a été effectuée sur le ponton par les soins du personnel de la firme L. Van Huele, sous la direction de M. R. Dantinne et de M. R. Jacquemin, en présence de M. Boehme, Conducteur des Ponts et Chaussées. Commencée le 18-9 à 14 heures, elle était achevée dans la matinée du 20.

Les mortiers ont été placés dans 7 caisses identiques, portant les marques I à VII, chacune contenant 4 éprouvettes de tous les types de mortiers (de 11 à 83). Les bases et les couvercles de ces caisses étaient constitués par des madriers en chêne d'une dizaine de cm d'épaisseur, garnis d'entailles de section carrée légèrement supérieure à 4 × 4 cm et de 2 cm de profondeur environ, écartées de centre à centre d'environ 7,5 cm. Il y a 6 rangs de 16 entailles. Les éprouvettes y sont disposées suivant le schéma suivant (pl. 1).

1 <sup>er</sup> rang	4 × 13	4 × 23	4 × 33	4 × 43
2 <sup>e</sup> rang	4 × 12	4 × 22	4 × 32	4 × 42
3 <sup>e</sup> rang	4 × 11	4 × 21	4 × 31	4 × 41
4 <sup>e</sup> rang	4 × 51	4 × 61	4 × 71	4 × 81
5 <sup>e</sup> rang	4 × 52	4 × 62	4 × 72	4 × 82
6 <sup>e</sup> rang	4 × 53	4 × 63	4 × 73	4 × 83

Les petits côtés des caisses étaient formés de madriers servant à relier les bases et les couvercles. Les deux grands côtés étaient ouverts, traversés suivant la longueur par deux tirants boulonnés. Un tirant médian (2 dans la caisse n° I) est disposé entre le 3<sup>e</sup> et le 4<sup>e</sup> rang.

Cette disposition met les éprouvettes de chaque mortier dans une même situation, les mortiers les plus exposés aux actions mécaniques de l'eau étant les plus riches. D'autre part l'orientation des caisses immergées était telle que les mortiers des rangs 6, 5 et 4 étaient plus directement exposés aux vagues venant du large que les trois autres.

Chacune des caisses contient l'assortiment complet des éprouvettes pour l'essai à un âge déterminé. Une broche en bois a été insérée dans chaque couvercle au-dessus de la série 1, afin de permettre d'identifier toutes les éprouvettes à chaque prélèvement.

Pendant les manipulations de remplissage des caisses, 3 éprouvettes (sur 672) ont été cassées, des séries 11, 31 et 61. Elles ont pu être remplacées par des éprouvettes de réserve.

Les cubes de béton ont été placés dans 21 caisses numérotées 1 à 21, constituées comme les précédentes mais un peu plus petites. Les alvéoles des fonds, de surface légèrement supérieure à 16 × 16 cm, sont disposées en 2 rangs de 4. Les cubes y sont disposés dans l'ordre

1 <sup>er</sup> rang	1	2	3	4
2 <sup>e</sup> rang	5	6	7	8

Les diverses éprouvettes sont séparées par des intervalles de 25 à 30 mm. Une broche en bois est insérée dans chaque couvercle au-dessus du cube 1 pour permettre l'identification. Les faces lissées des cubes sont tournées vers l'extérieur des caisses; celles destinées à venir en contact avec les plateaux de la presse de compression sont logées dans les alvéoles. L'orientation des caisses de bétons est la même que celle des caisses de mortiers (pl. 1). 3 caisses seront retirées à chaque âge d'essai.

Les éprouvettes cylindriques en béton contenant des armatures ont été placées par groupes de 8 suivant le même schéma (pl. 1) dans 3 caisses identiques marquées m, a et b. L'une d'elles est destinée à être immergée à mi-marée comme les précédentes. Une autre sera placée sur un peigne de l'estacade au-dessus du niveau des plus hautes mers. La troisième sera immergée en permanence sous le niveau des plus basses mers.

Le 20-9-1934, le ponton a été amené à la jetée Sud du chenal d'accès au bassin à marée du port de pêche (pl. 3). Les caisses I à VII et 1 à 21 ont été fixées à marée basse sur une plate-forme basse à claire-voie de l'estacade, au moyen de fortes poutres solidement boulonnées aux traverses (planche 46, fig. 1).

La mise en place a été effectuée sans incident en présence de M. E. Verschoore, Ingénieur en chef-Directeur des Ponts et Chaussées, Directeur du Service spécial de la Côte, de M.M. F. Campus, R. Dantinne et R. Jacquemin. Un plan de position des diverses caisses a été relevé par M. Boehme, Conducteur des Ponts et Chaussées. (pl. 4)

#### 8. — Immersion des éprouvettes au laboratoire

Dans la journée du 21-9-34, deux collections identiques d'éprouvettes de mortiers et de bétons ont été immergées au laboratoire, l'une dans l'eau potable, l'autre dans une solution de 15 gr par litre de sulfate de magnésie cristallisé. Les mortiers et les bétons sont disposés chacun dans 7 bacs de conservation à l'eau potable et 7 bacs de conservation à l'eau sulfatée, soit en tout 28 bacs. Les dispositions des éprouvettes dans les bacs sont indiquées à la planche 2. Contrairement à ce qui était prévu au programme, les éprouvettes cylindriques armées n'ont pas été immergées. Une série a été déposée sur des tablettes à l'air du laboratoire. Une autre a été conservée dans du sable imbibé d'eau potable; la troisième dans du sable imbibé de la solution sulfatée. Ces dispositions ont été préférées parce que la corrosion des armatures est plus forte dans le sable mouillé qu'en immersion en raison de l'accès de l'air qui active la corrosion de l'acier.

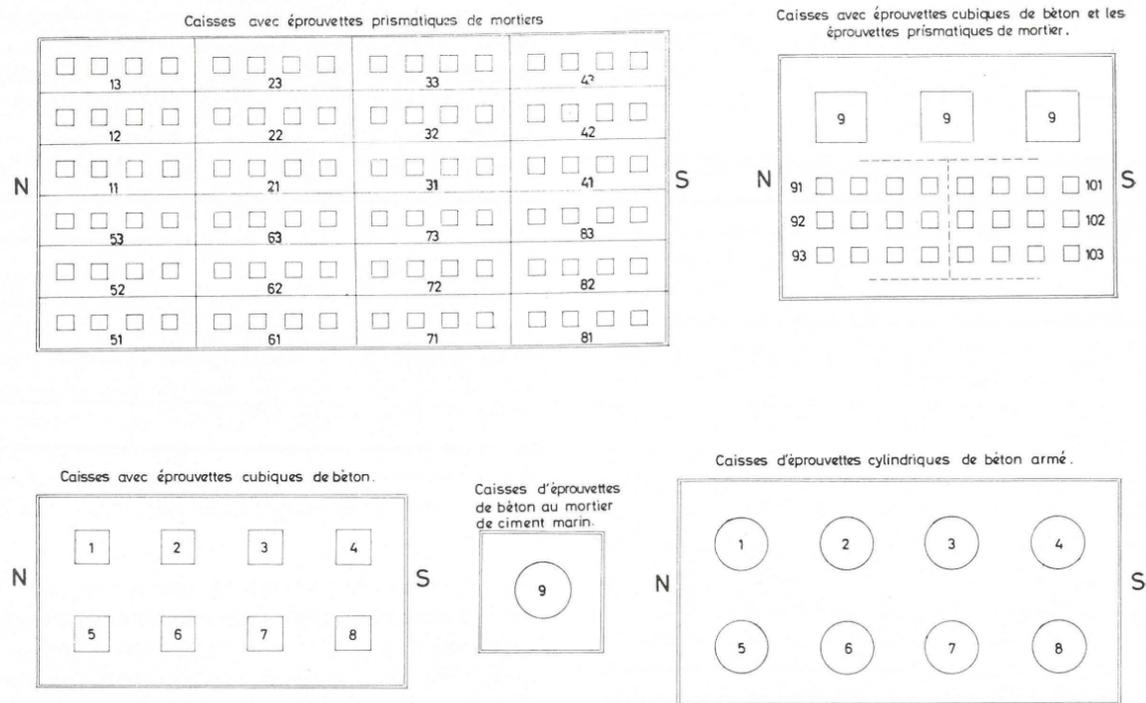


Planche 1.

## CONSERVATION DES MORTIERS ET BETONS AU LABORATOIRE

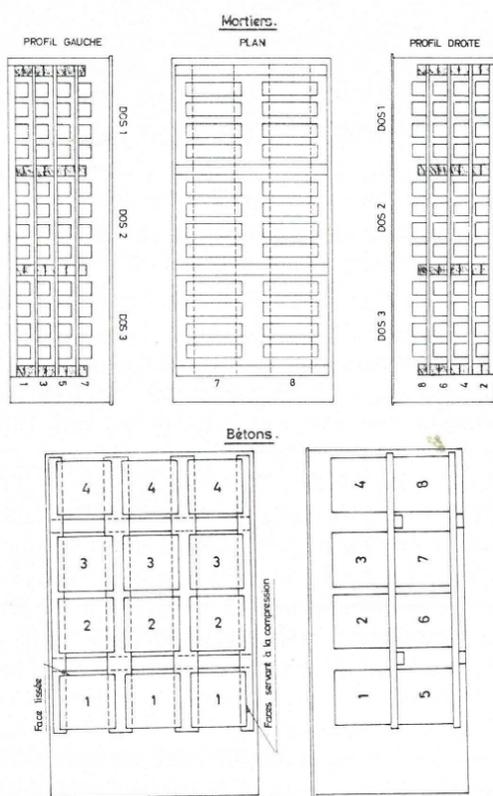


Planche 2.

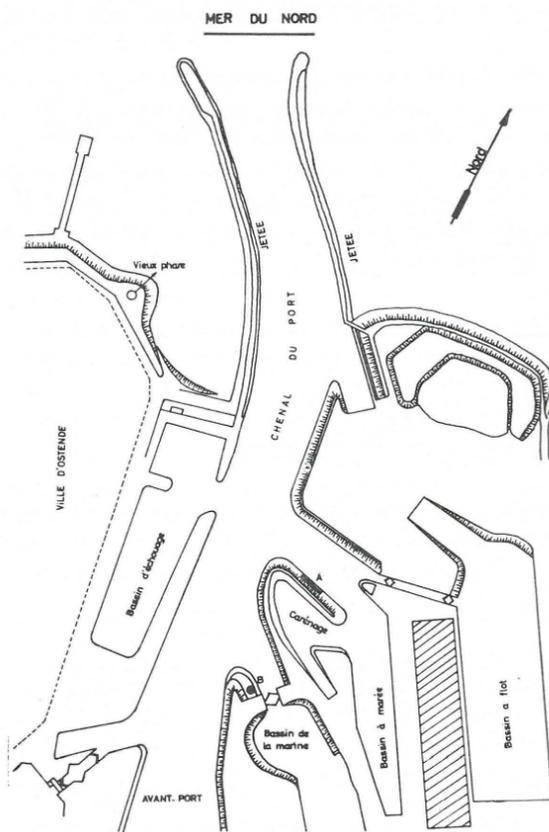


Planche 3.

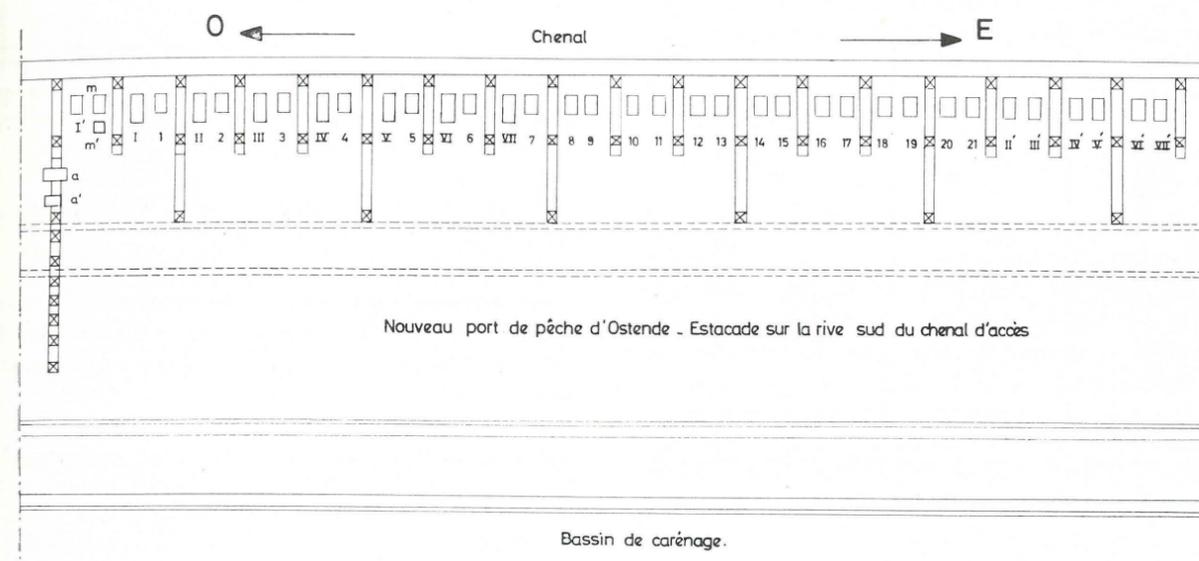


Planche 4.

## 9. — Suppléments au programme

(en suite à la lettre du 30 avril 1934 de la direction du Service spécial de la Côte).

A la demande de la S.A. John Cockerill de Seraing-sur-Meuse, le programme complet a été étendu sans modification au ciment « Marin » fabriqué par cette firme et fourni par elle (cf. paragraphe 1 A). Ce ciment a reçu le n° 9 et selon la convention générale, les mortiers ont été désignés par 91 (300 kg), 92 (450 kg) et 93 (600 kg); les bétons par le n° 9 (cubes et cylindres).

En outre, sur la proposition de M. F. Campus, un programme partiel a été décidé sur un Trassément 50/50 marqué 10 (cf. paragraphe 1 A). Il comporte une série complète de mortiers, désignés 101, 102 et 103 pour les dosages de 300, 450 et 600 kg de ciment par m<sup>3</sup> de sable. Une modification a été nécessaire pour le mortier 103, beaucoup plus sec que les mortiers correspondants des autres ciments et exigeant un damage plus énergique pour le remplissage des moules. La quantité d'eau de gâchage a été portée à 13,1 % du poids des matières sèches afin d'obtenir la même facilité de mise en œuvre (rapport eau/ciment 0,458).

Enfin, on a ajouté 48 cubes de béton marqués 10, mais qui sont confectionnés au moyen de ciment 2 (portland artificiel normal). La différence avec le béton 2 réside

dans la substitution de sable fin des dunes à 25 % du poids du sable du Rhin 0/2. Ce sable, provenant de la firme Savels à Heyst-sur-mer, avait la granulométrie suivante :

Jour des tamis mm :	1.17	0.589	0.295	0.147
Refus cumulé % en poids :	0	0	11	99,65
Module de finesse	1.1065			

Du fait de cette substitution, la quantité d'eau de malaxage a dû être portée à 176 kg/m<sup>3</sup> (7,9 % du poids des matières sèches). Le rapport eau/ciment est 0,503.

Ces cubes n'intéressent pas l'essai à la mer et doivent être immergés dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée au laboratoire seulement. Trois éprouvettes cylindriques armées de ce béton sont à conserver au laboratoire dans l'air et sous sable, imbibé d'eau potable ou sulfatée.

Les éprouvettes de mortier 91, 92, 93 et de béton 9 ont été confectionnées du 3 au 5-9-1934; les mortiers 101, 102, 103 du 6 au 8-9-1934; les bétons 10 les 6 et 7-9-1934, suivant les modalités exposées aux paragraphes 4, 5 et 6. Après quelques jours de conservation sous sable humide, 24 éprouvettes de béton 9 et 28 éprouvettes de chacun des mortiers 91, 92, 93, 101, 102 et 103 ont été transportées à Ostende le 18-9-1934, en même temps que toutes les autres éprouvettes. Les barrettes de mortier étaient rangées dans 6 caissettes numérotées remplies de sable mouillé. A Ostende, les éprou-

vettes ont été déposées au chantier de la firme L. Van Huele et conservées sous du sable des dunes mouillé.

Le 5-10-1934, les éprouvettes ont été mises dans des caisses spéciales, numérotées I' à VII', suivant la disposition indiquée à la planche 1

1 <sup>er</sup> rang	4 × 93	4 × 103
2 <sup>e</sup> rang	4 × 92	4 × 102
3 <sup>e</sup> rang	4 × 91	4 × 101
4 <sup>e</sup> rang	3 × 9	

Ces caisses sont constituées d'une manière analogue à celle des autres (cf. paragraphe 7). Une broche d'identification est insérée dans le couvercle au-dessus des éprouvettes de mortier 93. Les cubes ont été disposés dans leurs alvéoles de la même manière que ceux des ciments 1 à 8 (cf. paragraphe 7). Chaque caisse contient l'assortiment complet pour un essai à un âge déterminé. 3 cylindres de béton 9 armé ont été placés dans 3 petites caisses individuelles (cf. pl. 1) m', a' et b'.

L'après-midi du même jour, à marée basse, les caisses ont été fixées sur l'estacade auprès de celles fixées le 20-9-34. Les opérations de remplissage des caisses, de transport sur ponton et d'immersion ont été effectuées sous la direction de M. R. Dantinne et en présence de M. Boehme, Conducteur des Ponts et Chaussées, qui a complété le plan de position des diverses caisses (planche 4). Aucune éprouvette n'a subi de dégradation pendant toutes ces opérations.

Le même jour (5-10-1934), 42 éprouvettes cubiques des bétons 9 et 10 et 56 éprouvettes des mortiers 91, 92, 93, 101, 102 et 103 ont été immergées par moitié dans l'eau potable et dans la solution de sulfate de magnésium, dans les bacs contenant les autres éprouvettes. Les liquides d'immersion ont été renouvelés à cette occasion. Enfin trois cylindres de chacun des bétons 9 et 10 ont été déposés l'un à l'air du laboratoire, l'autre sous du sable imbibé d'eau potable et le troisième sous du sable mouillé d'eau sulfatée. Il y a donc un décalage de 15 jours entre le départ des essais en immersion des ciments 1 à 8 et celui des ciments 9 et 10.

#### 10. — Conditions de l'immersion marine à Ostende (planches 3 et 4).

La quasi totalité des éprouvettes sont immergées à l'endroit indiqué A sur la planche 3. Les fonds des caisses reposent sur une plate-forme de l'estacade à la cote + 1.35 au-dessus du zéro d'Ostende. Les niveaux moyens de marée haute et basse sont

	Marée haute	Marée basse
Mortes eaux	+ 3,83	+ 0,92
Vives eaux	+ 4,76	+ 0,08

Le niveau moyen de la mer est voisin de + 2,40.

La cote la plus élevée de haute mer est + 6,80; la cote extrême de basse mer est - 0,95.

Les éprouvettes se trouvent à environ 0,90 m sous le niveau moyen de la mer. Elles sont donc à chaque marée découvertes pendant environ 1/3 de la durée de la marée, immergées le restant du temps.

A l'endroit de l'immersion, les plus fortes lames ont une hauteur d'un mètre environ.

Les indications précédentes sont extraites d'une lettre du 14-5-1955 de M. l'Ingénieur en chef-Directeur des Ponts et Chaussées J. Verschave, Directeur du Service spécial de la Côte à Ostende.

La salinité de l'eau dans le port d'Ostende est variable selon l'état de la marée et la pluviosité, en raison de l'évacuation de quantités variables d'eau douce à marée descendante [3]. A l'endroit A, elle n'est en général pas sensiblement inférieure à la salinité à l'entrée du chenal d'accès au port.

Le tableau suivant reproduit les analyses de divers prélèvements d'eau de mer à l'endroit A d'immersion des éprouvettes et effectuées par les Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale. Les teneurs sont toutes exprimées en gr/litre.

Les teneurs relevées ci-dessus sont compatibles avec celles figurant dans la référence [3].

La planche 4 indique la disposition des caisses sur l'estacade en A.

- 7 caisses d'éprouvettes de mortier I à VII
- 21 caisses de cubes de béton 1 à 21
- 7 caisses d'éprouvettes de mortiers et de cubes de béton I' à VII'
- 1 caisse de cylindres de béton armé m
- 1 caisse de cylindres de béton armé m

Toutes ces caisses sont immergées à la cote + 1.35.

Les caisses a et a' contenant des cylindres de béton armé (comme m et m') sont fixées sur une palée de l'estacade, à sa partie supérieure, au-dessus du niveau des plus hautes mers.

Enfin deux caisses b et b' contenant également les cylindres armés ont été déposées sur le fond sous une estacade contiguë au mur en retour N - O de la tête de l'écluse du Bassin de la Marine, au point marqué B à la planche 3. Des chaînes attachées aux caisses permettent de les retirer. Ces caisses sont donc toujours sous eau, quel que soit l'état de la marée.

Analyses de l'eau de mer

Prélèvement	Date	9-10-45	16-9-54	16-9-54	1-4-64*	1-4-64*	1-4-64*
	Heure	—	—	—	10 <sup>h</sup> 10	13 <sup>h</sup>	15 <sup>h</sup> 15
	Marée	—	Basse	Mi-marée montante	Basse	Mi-marée	Haute
Résidu sec		15.88	34.20	36.50	22.94	19.84	13.40
Résidu fixe **		14.53	29.9	31.75	20.03	17.81	11.54
S O <sub>3</sub>		0.98	2.153	2.174	1.406	1.244	0.732
Ca O		0.36	0.59	0.61	0.41	0.38	0.33
Mg O		0.96	0.63	0.63	1.33	1.19	0.78
Cl		8.58	13.84	17.78	11.69	10.48	7.04
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.0015	0.007	0.009	0.0013	0.0037	0.0045
PH		7.20	7.45	8.00	7.20	7.00	6.62

\* Epoque très pluvieuse, débit d'évacuation d'eau douce probablement important.

\*\* Calcination à 600° C.

Le climat à Ostende est caractérisé par les éléments suivants, communiqués par l'Institut royal météorologique de Belgique.

Latitude 51°13' N      Longitude 2°54' E.

Température moyenne annuelle 9°6

Température maximum annuelle moyenne 31°1

Température minimum annuelle moyenne - 8°6

Maxima absolus annuels 26°2 à 34°9

Minima absolus annuels - 2°8 à - 19°

Nombres annuels moyens de jours où la température est inférieure à

0°	- 5°	- 10°
44,4	7,3	1,3

Nombre annuel de jours le plus élevé le plus bas où la température

est inférieure à 0°	82	15
- 5°	31	0

Première gelée Moyenne 8-11, extrêmes 28-10 et 7-12

Dernière gelée Moyenne 6- 4, extrêmes 1- 3 et 13- 5

Périodes sans gelées, moyenne 216 jours, extrêmes 254 et 177.

Hauteurs de pluie annuelles : moyenne 782 mm, extrêmes 988 et 434.

Nombre moyen annuel de jours de neige 8,7.

Première neige, moyenne 1-12, extrêmes 30-10 et 30-12.

Dernière neige, moyenne 21-3, extrêmes 29-1 et 27-4.

Durée moyenne de la période sans neige 255 jours.

Les indications précédentes sont relatives à la période trentenaire 1901-1930. Elles caractérisent un climat très variable et assez souvent rigoureux.

Le régime des vents est aussi très variable, avec les fréquences annuelles en % prédominantes suivantes

N	NNE	NE	S	SSW	SW	WSW	W	Calmes
5.1	9.3	7.7	9.7	8.2	8.8	9.7	7.1	8.7

(pour la période 1930-1939). Les pointes maximales du vent dépassent 40 m/sec; le maximum absolu est voisin de 50 m/sec.

Au cours des hivers exceptionnellement rigoureux, la Mer du Nord est gelée et présente près du rivage un aspect d'embâcle. Les figures 1 et 2, reproduites avec

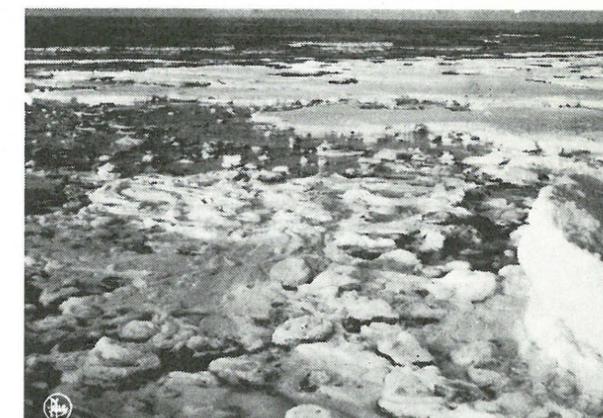


Fig. 1.

l'aimable autorisation de la S.A. Anciens Etablissements Thil à Bruxelles, montrent des aspects de la mer à Ostende en janvier-février 1963. Dans le fond de la

figure 2, la jetée Ouest du chenal d'accès au port. Pendant la période d'immersion 1934-1964, les températures observées au cours des hivers rigoureux furent les suivantes :

	Max. moy.	Min. moy.
Janvier 1940	— 0,1	— 6,3
Février 1956	— 0,4	— 6,9
Janvier 1963	— 1,8	— 6,0
Février 1963	0,6	— 3,7



Fig. 2.

## 11. — Déroulement des opérations et incidents

Après l'approvisionnement des ciments et des granulats, il a été procédé aux essais normaux de réception et aux analyses chimiques (cf. chapitre III).

Après la confection des éprouvettes de mortier et de béton, il a été procédé aux essais mécaniques de définition à 28 jours. Le jour de l'immersion dans les divers milieux de conservation, c'est-à-dire le 20-9-1934 pour les ciments 1 à 8 et le 5-10-34 pour les ciments 9 et 10, il a été procédé aux essais mécaniques de départ sur les éprouvettes de mortier et de béton (cf. chapitre III).

Après l'approvisionnement de tous les ciments, il a été procédé aux essais Le Châtelier-Anstett d'indécomposabilité par les sulfates pour les ciments 1 à 9 (cf. chapitre IV).

Le 22 février 1935, après 5 mois d'immersion, une série complète d'éprouvettes de mortier et de béton a été retirée de la mer à Ostende et des bacs de conservation au laboratoire et soumise aux essais mécaniques (cf. Chapitre VIII).

Entre-temps, les expériences relatives à la détermination de la chaleur de durcissement des divers ciments pendant les 72 premières heures ont été effectuées (cf. Chapitre VII).

Le 20 août 1935, après 11 mois d'immersion, un nouveau prélèvement d'éprouvettes de mortier et de béton, sur lesquelles il a été procédé aux essais mécaniques (cf. Chapitre IX).

Les essais de retrait sur pâtes pures, mortiers et bétons entrepris dès 1934 ont été prolongés jusqu'à l'âge de 365 jours (cf. Chapitre V). Parallèlement ont été effectuées les expériences de filtration forcée sur mortiers (cf. Chapitre VI).

Le 24 août 1936, il a été procédé au 3<sup>e</sup> prélèvement d'éprouvettes, après 23 mois d'immersion (cf. Chapitre X).

Le 4<sup>e</sup> prélèvement a été effectué le 1 septembre 1938, après 47 mois d'immersion (cf. Chapitre XI).

Jusqu'à là, le programme arrêté en 1934 a été exactement respecté; les dates des prélèvements ayant été fixées à des jours où la marée était basse au début de la journée de travail.

Le prélèvement prévu au programme à la fin de l'été de 1940 ne put avoir lieu, le port d'Ostende étant devenu inaccessible par suite de l'occupation allemande.

En mai 1944, les laboratoires furent pris dans les bombardements aériens massifs et prolongés préparatoires aux débarquements alliés sur les plages normandes. Ils furent entièrement dévastés par la violence des explosions. Mais, heureusement, les éprouvettes de mortier et de béton étaient conservées dans une salle très abritée (qui avait même servi d'abri au personnel lors des premiers bombardements) et elles échappèrent à la destruction. Elles purent être évacuées après la fin des premiers bombardements pour être transportées, avec tout le matériel encore susceptible d'être déménagé à cette époque, dans des locaux provisoires où furent poursuivies les activités des laboratoires jusqu'à leur retour à l'Institut du Génie Civil au cours de l'automne 1947.

Malheureusement, les boîtes soudées contenant les réserves des divers ciments (cf. Chapitre I, paragraphe 7) ont disparu à la suite des bombardements. Cette perte regrettable a eu des conséquences fâcheuses lorsque l'on a voulu en 1964 développer les investigations chimiques (voir plus loin).

Après la libération du territoire, il fut constaté à l'automne 1944 que les éprouvettes immergées dans la mer avaient été préservées de la destruction, malgré que le port d'Ostende eût été assez endommagé. Mais ce n'est pas avant l'automne de 1945 que le 5<sup>e</sup> prélèvement put avoir lieu, les 8 et 9 octobre de la dite année. A cette occasion, il fut procédé à une remise en ordre de toutes les caisses, afin de permettre la continuation des essais (cf. Chapitre XII).

Il fut décidé alors de les poursuivre jusqu'en 1964. L'avant-dernier prélèvement eut lieu le 26 septembre 1954 (cf. Chapitre XIII). A cette occasion, on constata la disparition des caisses b et b' contenant les cylindres de béton immergés sur le fond. En 1945, elles avaient été retrouvées sous les débris de l'estacade d'accès à l'écluse de la Marine. On les avait alors transportées à l'emplacement A (cf. planche 3), où elles avaient été à nouveau immergées sur le fond et attachées par leurs chaînes à l'estacade. On a supposé que ces chaînes corrodées n'auraient pas résisté à la violente marée-tempête du 1<sup>er</sup> février 1953, qui causa aussi beaucoup de dégâts à la côte belge, et que les caisses b et b' se seront enfoncées dans la vase du chenal.

Enfin, le dernier prélèvement eut lieu le 1<sup>er</sup> avril 1964 (cf. Chapitre XIV). Les dernières éprouvettes furent ainsi essayées, sauf celles des caisses a et a' (cf. pl. 3), contenant les cylindres de béton armé exposés à l'air marin. On ne retrouva que 2 des cylindres sur 9. Les caisses avaient été pillées, action qui n'était cependant guère facile. Car l'accès des caisses était malaisé et périlleux et leur ouverture demandait un outillage spécial et des efforts assez considérables, en raison de la corrosion des boulons.

Au total, non compris les essais normaux de réception et les essais spéciaux effectués au laboratoire, le travail a porté sur :

- 1) 3000 barrettes 4 × 4 × 16 cm de mortier, dont
  - 120 pour les essais à 28 jours,
  - 278 pour les essais de départ,
  - 840 immergées dans la mer.

Ciment	Eau pour pâte normale %	Durée de prise		Finesse %	Stabilité	
		Début	Fin		A froid	A chaud
		Heures		mm		
1	26	2.10'	4.10'	2,8	3	1
2	27,5	3	5	4,8	1	1
3*	30	2.15'	5.15'	7,4	2	0
4	26	3	5	3	2	1
5	26,5	3	5	5,8	2	1
6	27	5.30'	7.40'	4,8	1	0
7	29,5	3.40'	7.30'	0,5	3	1
8	26	1.30'	4	5,4	0	1
9	27	3	4.20'	1,5	1	1
10	33	2.40'	5.10'	7,4	0	2

\* Il faut rappeler que le liant 3 est un mélange de 2/3 (en poids) du ciment 2 et de 1/3 de trass moulu.

- 2) 696 cubes de béton de 16 cm de côté, dont
  - 30 pour les essais à 28 jours,
  - 57 pour les essais de départ,
  - 189 immergés dans la mer.
- 3) 57 cylindres de béton de 15 cm de diamètre et de 30 cm de hauteur, contenant 4 barres d'acier, dont 18 immergés dans la mer. 16 de ces cylindres ont été perdus, dont 9 dans la mer.

Outre le déchet de quelques éprouvettes, principalement de mortiers de 300 kg de ciment par m<sup>3</sup>, brisées au démoulage ou pendant la mise en caisse, il n'y a eu, malgré les hasards de la guerre de 1940 à 1945, d'autre perte importante que celle des réserves des divers ciments. Les liquides de conservation au laboratoire ont été renouvelés en moyenne 2 fois par an.

## DEUXIEME PARTIE

### Essais comparatifs des divers ciments

#### Chapitre III. — ESSAIS NORMAUX DE RECEPTION, ANALYSES CHIMIQUES ET ESSAIS DE DEPART

##### 1. — Essais normaux de réception

Ils ont été effectués conformément aux prescriptions du Cahier général des charges de l'Administration des Ponts et Chaussées en vigueur en 1934. On verra que ces ciments satisfaisaient aux normes de l'Institut belge de normalisation actuellement en vigueur, sauf une valeur qui est signalée plus loin. Pour éviter de longues reproductions de chiffres, les résultats des essais normaux sont condensés ci-après en deux tableaux.

Le liant 3 est constitué par le ciment 2 additionné de 50 % de trass moulu. L'activité de la poudre de trass moulu a fait l'objet des essais suivants.

*Finesse* : Refus sur le tamis de 900 mailles par cm<sup>2</sup> 1,8 %. Refus sur le tamis de 4900 mailles par cm<sup>2</sup> : 15,1 %.

*Résistance en mortier battu normal.*

Le mortier est formé de

1 partie en poids de chaux grasse éteinte,

Résistance kg/cm <sup>2</sup>								
Ciment	Compression				Traction			
	1 j.	3 j.	7 j.	28 j.	1 j.	3 j.	7 j.	28 j.
1	357	456	591	663	27.2	28.9	31.5	35.4
2*	—	385	552	677	—	27.4	35.9	38.9
3	—	337	410	587	—	25	28	33.6
4	—	322	445	560	—	28.3	34.3	37
5	—	230	338	473	—	25	32	36
6	—	244	330	437	—	23.5	26.4	35.1
7**	—	184	469	700	—	16	28.8	32.9
8	539	610	683	762	32.9	34	37	37.5
9	—	242	392	502	—	25.9	34.2	41.6
10	—	144	228	345	—	12.5	19.5	26.6

\* Ce ciment P.N. satisfait aux normes du P.H.R.

\*\* Les résistances à 3 jours ne satisfont pas à celles requises par les normes pour un ciment sursulfaté normal; à 7 et 28 jours elles dépassent celles requises pour un ciment sursulfaté à haute résistance.

2 parties en poids de trass,  
3 parties en poids de sable normal,  
28 % d'eau du poids sec de la chaux et du trass.

Ce mortier est confectionné, conservé et essayé dans les mêmes conditions que les mortiers normaux de ciment battus.

Résistances kg/cm <sup>2</sup>	A la	
	compression	traction
7 jours	50	9.16
28 jours	105	20.1

Le ciment 10 (Trassément 50/50) n'est pas normalisé en Belgique, non plus que le ciment 8 (Ciment aluminé fondu Lafarge).

Les granulométries du gravier et des sables figurent au Chapitre II, paragraphes 3 et 9.

## 2. — Analyses chimiques des ciments

Les analyses ont été effectuées en 1934 suivant les méthodes recommandées par la Commission américaine de standardisation des méthodes d'analyse (cf. W.W. Scott. Standard methods of chemical analysis).

*Perte au feu* : calcination au creuset de platine fermé.

*Si O<sup>2</sup>* : insolubilisation par HCl concentré, correction par HF.

*R<sup>2</sup> O<sup>3</sup>* : comprend l'alumine, les oxydes de fer et de manganèse; double précipitation par NH<sup>3</sup>.

*Ca O* : double précipitation par l'oxalate ammonique.

*Mg O et SO<sup>3</sup>* : par les méthodes indiquées au Cahier des charges de l'Administration des Ponts et Chaussées.

*S* : précipitation de sulfure cadmique, addition d'iode et titrage en retour.

*Alcalis* : méthode de Lawrence Smith.

Le tableau ci-après condense les résultats.

Lorsque en 1964 on a voulu développer les études physico-chimiques sur les produits d'hydratation des ciments dans les mortiers ayant séjourné pendant 30 ans dans la mer, dans l'eau potable ou dans la solution sulfatée, on a regretté que l'on n'ait pas effectué de dosages séparés de l'alumine et des oxydes de fer. La disparition des réserves des ciments à la suite des bombardements de l'Institut du Génie Civil en 1944 (cf. Chapitre II, paragraphe 11) n'a plus permis de pallier cette lacune avec certitude.

On a tenté, à partir des mortiers 13 et 23, les plus riches en ciments 1 et 2, conservés dans l'eau potable, de refaire une analyse des ciments en question. Les résultats ci-après ont été obtenus par M. Cerf, licencié en chimie aux Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale.

### Mortier 13 P

	66,68 %	Sable	66,68 %
Insoluble	6,59	Ciment	27,48
Si O <sup>2</sup> soluble	1,28		
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	1,21		
Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	17,83		
Ca O	0,20		
Mg O	0,37		
SO <sup>3</sup>	1,99		
CO <sup>2</sup>			

Admettant que le total de 96,15 % corresponde au poids des matières sèches et l'indosé de 3,85 % à l'eau fixée, le poids par unité de volume du mortier durci de 30 ans après dessiccation serait le suivant :

Sable	1500 kg	68,70 %
Ciment	600	27,45 %
Eau fixée	84	3,85 %
<hr/>		
	2184 kg	

Le ciment aurait ainsi fixé 14 % de son poids d'eau après 30 ans.

La comparaison avec l'analyse de 1934 donne ce qui suit

	1934	1964
Si O <sup>2</sup>	21.05	24
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	4.24	4.75
Al <sup>2</sup> O <sup>2</sup>	3.92	4.40
Ca O	65.10	64.90
Mg O	1.08	0.73
SO <sup>3</sup>	2.16	1.34

La répartition ci-dessus entre Fe<sup>2</sup> O<sup>3</sup> et Al<sup>2</sup> O<sup>3</sup> pour 1934 a été faite dans le même rapport que celui établi en 1964. A partir de ces analyses, on a calculé par les formules de Bogue les compositions minéralogiques suivantes, somme toute assez satisfaisantes en considérant que les calculs précédents sont assez aléatoires.

C <sup>3</sup> S	71.89 %	45.54 %
C <sup>2</sup> S	5.45	34.52
C <sup>3</sup> A	3.21	3.62
C <sup>4</sup> A F	12.92	14.45

Total	93.47	98.13
Ca SO <sup>4</sup>	3.67	2.28
Mg O	1.08	0.73
Total	101.14	98.22

Les résultats suivants ont été obtenus en opérant de même sur le mortier 23 P. L'analyse de 1964 donne :

	66,99 %	Sable	66,99 %
Insoluble	6.18	Ciment	27.03
Si O <sup>2</sup> soluble	1.52		
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	1.18		
Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	16.93		
Ca O	0.37		
Mg O	0.85		
SO <sup>3</sup>	1.94		
Co <sup>2</sup>	4.04		

D'après cela, le poids de l'unité de volume du mortier durci desséché serait

Sable	1500 kg	68,50 %
Ciment	600	27,40 %
Eau fixée	89,7	4,04 %
<hr/>		
	2189,7	

	Trass	Ciments			
		1	2	8	10
Perte au feu	10.06	2.53	5.2	0.6	9.37
Si O <sup>2</sup>	52.68	21.05	19.55	6.08	32.10
R <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	29.99	8.16	12.20	51.70	16.38
Ca O	2.01	65.10	61.10	40.15	38.60
Mg O	0.8	1.08	0.44	0.20	1.12
SO <sup>3</sup>	—	2.16	1.78	1.30	2.37
Alcalis	3.2				

	Ciment				
	4	5	6	7	9
Perte au feu	3.92	2.50	3.42	8.80	4.68
Si O <sup>2</sup>	22.40	23.80	23.95	24.10	25.50
R <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	16.25	25.20	18.10	16.50	20.40
Ca O	51.90	41.70	43.30	38.90	40.50
Mg O	1.39	2.11	2.81	2.94	2.10
SO <sup>3</sup>	2.35	2.38	2.93	6.67	2.95
S	1.60	1.85	1.95	2.12	2.19

Le ciment 2 aurait fixé en 30 ans 14,95 % de son poids d'eau.

La comparaison des deux analyses, dans les mêmes conditions qui ci-dessus, s'établit comme suit.

	1934	1964		
Si O <sup>2</sup>	19.55	22.85	} 12.20	} 9.99
Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	6.86	5.62		
Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	5.34	4.37		
Ca O	61.10	62.7		
Mg O	0.44	1.37		
S O <sup>3</sup>	1.78	3.14		

D'où les compositions minéralogiques suivantes

	1934	1964
C <sup>3</sup> S	53.81	43.9
C <sup>2</sup> S	15.15	32.31
C <sup>3</sup> A	2.56	2.06
C <sup>4</sup> A F	20.85	17.1
Total	92.37	95.37
Ca S O <sup>4</sup>	3.03	5.34
Mg O	0.44	1.37
Total	95.84 %	102.09 %

Les remarques auxquelles ces déterminations pourront donner lieu doivent faire beaucoup regretter que la prévoyance de l'organisation au sujet des réserves de ciments ait été rendue sans effets par des faits de guerre imprévus.

### 3. — Essais mécaniques à 28 jours sur mortiers plastiques

En 1934, les essais normaux de ciments étaient déjà effectués sur mortiers plastiques dans quelques pays. La question de sa généralisation était déjà à l'ordre du jour des débats entre spécialistes. Mais son adoption en Belgique ne pouvait guère être considérée alors comme prochaine, à cause précisément de l'évolution de la cimenterie belge à cette époque, qui a été évoquée dans l'introduction. Un changement des méthodes de réception dans ces circonstances ne pouvait être envisagé. Il n'est d'ailleurs pas encore effectué actuellement, 30 ans plus tard, bien que la méthode RILEM-CEMBUREAU, de caractère international, soit prise en considération.

Ciment	Flexion			Compression		
	Mortier 1 (300 kg)	Mortier 2 (450 kg)	Mortier 3 (600 kg)	Mortier 1 (300 kg)	Mortier 2 (450 kg)	Mortier 3 (600 kg)
1	28.24	43.94	62.05	178.4	357.5	542
2	31.6	50.4	61.75	162.8	392	498.5
3	25.6	37.2	54.4	119.1	232.6	392
4	36.1	50.9	64.0	150	335	509
5	31.5	53.7	62.4	129	341.5	395
6	26.2	40.6	55.2	84.7	211.5	325
7	37.6	58.2	71.8	163.5	356.5	501
8	49.4	69.7	79.6	382.5	525.5	628.5
9	36.2	54.0	66.2	177	325	399.5
10	28.8	40.6	51.0	126	236	336

Cependant, comme les essais de longue durée des mortiers conservés dans divers milieux d'immersion seraient effectués sur mortiers plastiques, il a paru opportun, même en dehors de toute normalisation, de procéder à des essais mécaniques à 28 jours sur les divers mortiers prévus pour les essais de longue durée.

Les éprouvettes ont été prélevées sur l'ensemble de celles confectionnées comme il a été indiqué au chapitre II, paragraphe 4, au nombre de 4 pour chaque dosage. Conservées sous sable mouillé après démoulage, elles ont été essayées à 28 jours. L'essai de flexion a été effectué en posant l'éprouvette sur deux appuis à rotules distants de 12 cm et en y appliquant une charge centrale progressivement croissante (dispositif Amsler). La tension de rupture de comparaison est calculée par la formule

$$R_f = \frac{3Pl}{2e^3} = \frac{3 \times 12 \times P}{2 \times 64} = 0,281 P \text{ kg/cm}^2$$

L'essai de compression est effectué sur les deux fragments entiers des éprouvettes placés entre les plateaux d'une presse par leurs faces de moulage, selon la méthode de Feret. La résistance de rupture de comparaison est obtenue en divisant la charge totale par  $4 \times 16 = 64 \text{ cm}^2$ .

Les résultats sont réunis au tableau ci-après (moyennes de 4 éprouvettes).

Les écarts ont été en général modérés, sauf un petit nombre pour les mortiers 1 à 300 kg de ciment par m<sup>3</sup> de sable, mélange qui n'est guère approprié pour des essais normaux. On remarquera que tous ces ciments, bien que purement commerciaux, sont tous de bonne qualité selon les exigences actuellement en vigueur. Les résultats des expériences de 30 années sont irréprochables à ce su-

jet. On ne peut davantage objecter qu'elles n'ont pas pris en considération les ciments revendiquant des propriétés spéciales de résistance à la décomposition par l'eau de mer et les sulfates. Les ciments 7, 8 et 9 en étaient caractéristiquement, sans doutes aussi 10 (sinon le mélange 3). Enfin le ciment 6 peut être considéré comme approprié à ce sujet.

Il n'y avait pas en 1934 sur le marché belge de ciment portland dépourvu de C<sup>3</sup> A en vue de résister à la décomposition par les sulfates.

### 4. — Essais mécaniques de départ sur mortiers

Ces essais ont été effectués de la même manière que les essais sur mortiers plastiques à 28 jours rapportés ci-dessus. Mais ils ont été effectués les mêmes jours que l'on procédait aux immersions (cf. Chapitre II, paragraphes 7, 8 et 9). Les éprouvettes avaient donc des âges différents. Confectionnées avec l'ensemble des éprouvettes de mortier pour les essais de longue durée (cf. Chapitre II, paragraphe 4), elles sont destinées à établir les valeurs initiales de comparaison pour les essais de longue durée.

Les résultats groupés dans le tableau suivant sont des moyennes de nombres variables d'éprouvettes, au maximum 12. Cela provient de ce que l'on a pour chaque mortier confectionné 100 éprouvettes (cf. Chapitre II, paragraphe 4), alors qu'il n'en fallait que 88 pour tous les autres essais. Comme certaines des éprouvettes supplémentaires ont servi à remplacer des déchets (cf. Chapitre II, paragraphe 4 et 5), il en est resté un nombre variable pour chaque mortier au départ. Le nombre d'éprouvettes est indiqué entre parenthèses pour chaque mortier.

Ciment	Flexion			Compression		
	Mortier 1 (300 kg)	Mortier 2 (450 kg)	Mortier 3 (600 kg)	Mortier 1 (300 kg)	Mortier 2 (450 kg)	Mortier 3 (600 kg)
1	32,0(4)	50,4(8)	64,4(9)	203,5	392	527
2	36,7(6)	52,5(10)	64,4(9)	200	375	522
3	30,2(3)	47,6(10)	61,5(12)	160	314	457
4	36,4(11)	54,4(11)	64 (12)	163	361	483
5	34,7(10)	56,6(11)	63,6(8)	160	360	467
6	29,0(8)	46,3(12)	62,5(11)	116	256	386
7	44,4(5)	68,4(8)	79,1(9)	185	389	567
8	48,8(8)	69,5(12)	81 (12)	358	484	600
9	36,7(8)	46,8(10)	57,4(12)	179	329	426
10	25,8(7)	42,5(12)	48 (11)	116	244	305

On remarque que les résultats peuvent différer quelque peu de ceux des essais à 28 jours. Cela est dû aux différences d'âge et aux nombres différents d'éprouvettes, qui influent sur les moyennes.

### 5. — Essais à 28 jours et de départ sur bétons

Des essais sur cubes de béton de la composition indiquée au Chapitre II, paragraphe 3 ont été effectués pour les ciments 1 à 9 :

- à l'âge de 28 jours en quelque sorte en guise d'essai « normal » sur béton;
- les jours d'immersion pour établir des valeurs de départ pour les essais de longue durée. Tous les résultats relatés dans le tableau ci-après sont des moyennes de 3 éprouvettes à 28 jours et de 6 pour les essais de départ.

Béton	Densité au démoulage	Essais	
		à 28 jours	de départ
1	2.41	425	467
2	2.42	450	470
3	2.39	321	358
4	2.39	359	396
5	2.42	304	334
6	2.39	234	286
7	2.39	424	402
8	2.42	556	551
9	2.41	337	341
10	—	360	—

Pour des bétons à 350 kg de ciment par m<sup>3</sup>, ces résultats établissent aussi la bonne qualité de tous les ciments employés.

## Chapitre IV — ESSAIS LE CHÂTELIER-ANSTETT

### 1. — Généralités

A l'époque où fut élaboré et arrêté le programme des essais sur le comportement dans la Mer du Nord à la côte belge des ciments disponibles sur le marché belge, des divergences de vues se manifestaient au sujet de la signification de l'essai Le Châtelier-Anstett. Elles opposaient naturelle-

ment les producteurs des ciments qui ne passaient pas ce test à ceux dont certains produits y satisfaisaient.

A la suite des mécomptes survenus au port d'Ostende rappelés dans l'avant-propos, l'opinion avait été avancée qu'il fallait utiliser pour les ouvrages à la mer des ciments satisfaisant à l'essai Le Châtelier-Anstett. Afin d'élucider ce point, il fut décidé de faire subir ce test comparativement par tous les ciments dont le comportement dans la mer serait par ailleurs observé pendant une longue durée.

Cet essai pouvait être considéré surtout comme un moyen d'investigation, de recherche; ses modalités n'étaient nullement normalisées. Elles pouvaient cependant avoir quelque influence sur les résultats. H. Le Châtelier avait donné les premières indications en 1903 [4] et plus précisément en 1904 [5]. Il opérait sur des baguettes prismatiques que leur fragilité rendait peu commodes. F. Anstett avait pour cette raison adopté des éprouvettes cylindriques.

C'est cette forme qui a été adoptée pour les essais relatés ici, suivant le mode opératoire décrit ci-après et qui résultait de l'expérience déjà acquise au laboratoire par de nombreux essais antérieurs. L. Blondiau, dans une publication beaucoup plus récente [5] a défini un mode opératoire plus évolué. On consultera avec intérêt ce travail pour l'historique de cet essai et l'étude détaillée de sa signification. La manière dont il a été opéré au laboratoire en 1934-1935 s'est montrée satisfaisante au point de vue comparatif, comme on en jugera par les résultats non ambigus.

## 2. — Mode opératoire

Les divers ciments ont été hydratés de 3 manières, par gâchage en pâte avec 30 %, 40 % et 50 % d'eau distillée (en poids). Les pâtes ainsi préparées ont été conservées dans la chambre humide. Après 24 heures, les pâtes à 40 % et à 50 % ont été immergées dans l'eau distillée. 14 jours après le gâchage, les pâtes ont été concassées en fragments traversant le tamis à mailles carrées de 2,36 mm de jour et séchées à poids constant à l'étuve à 50° C, puis additionnées de 50 % de leur poids de gypse séché dans les mêmes conditions. Ces mélanges ont été, à la température ordinaire, réduits en poudre homogène dans un petit désintégrateur à barres, à une finesse telle qu'elle ne laisse pas de résidu sur le tamis de 900 mailles par cm<sup>2</sup>. Cette poudre a été humectée de 6 % de son poids d'eau distillée et comprimée dans un moule cylindrique de 80 mm de diamètre et de 30 mm de hauteur, sous une pression de 20 kg/cm<sup>2</sup> appliquée pendant 2 minutes.

Les éprouvettes ainsi préparées, suffisamment agglomérées pour être manipulables, sont mesurées suivant le dia-

mètre, pesées, puis déposées sur une plaque de verre de 12 cm de largeur recouverte d'une feuille de papier filtre Schleicher n° 598 exempte de toute souillure, plongeant dans l'eau distillée par ses extrémités des deux côtés de la plaque de verre, dont le plan supérieur est à 10 cm au-dessus de la surface de l'eau.

L'essai a été effectué sur les ciments marqués 1 à 9 suivant les 3 degrés d'hydratation indiqués, toutes les éprouvettes étant en double. Il y en a donc 6 par ciment. Elles ont été placées par rangées de 6 dans deux boîtes identiques, dont le couvercle étanche est à joint hydraulique. Ces éprouvettes sont marquées 130, 140, 150, 230, 240, 250, ..... 930, 940 et 950. Le premier chiffre indique le ciment, les indications 30, 40 et 50 le pourcentage d'eau de gâchage.

Pour chacun des ciments, on a confectionné à partir de la pâte hydratée à 50 % une éprouvette témoin en remplaçant le gypse d'addition par du sable normal. Ces éprouvettes sont marquées 1 T, 2 T, ..... et 9 T.

Les plus grandes précautions de propreté ont été observées pendant la confection des éprouvettes, notamment pour éviter tout mélange de poudres. Avant chaque broyage, du sable normal a été passé au désintégrateur pendant un temps suffisant pour enlever toute trace de poudre du broyage précédent.

## 3. — Résultats des essais

Les observations ont porté sur 3 points.

a) *Gonflement*. Il a été exprimé par l'augmentation du diamètre en fonction du temps en jours, par rapport au diamètre initial. Indiqué par d.

b) *Augmentation de poids* (par absorption d'eau). Elle est exprimée par l'augmentation du poids en fonction du temps en % du poids initial. Elle est indiquée par p.

c) *Consistance*. Elle est mesurée par l'enfoncement de l'aiguille normale de Vicat (1 mm<sup>2</sup> de section, 300 grammes de charge). Elle est indiquée par e en mm. Lorsque e atteint la valeur 30, cela signifie que l'éprouvette est entièrement traversée par l'aiguille.

Les valeurs de d, p et e moyennes pour chaque groupe de 2 éprouvettes ont été reportées en diagrammes pour le 9 ciments examinés (planches 5 à 8). L'évolution des phénomènes observés et le comportement des divers ciments en ressort clairement. Les pâtes à 30 %, 40 % et 50 % d'eau sont représentées respectivement en traits pleins, en traits interrompus et en traits points-tirets. Les résultats des deux éprouvettes d'un même groupe ont toujours été très voisins. La planche 9 reproduit les

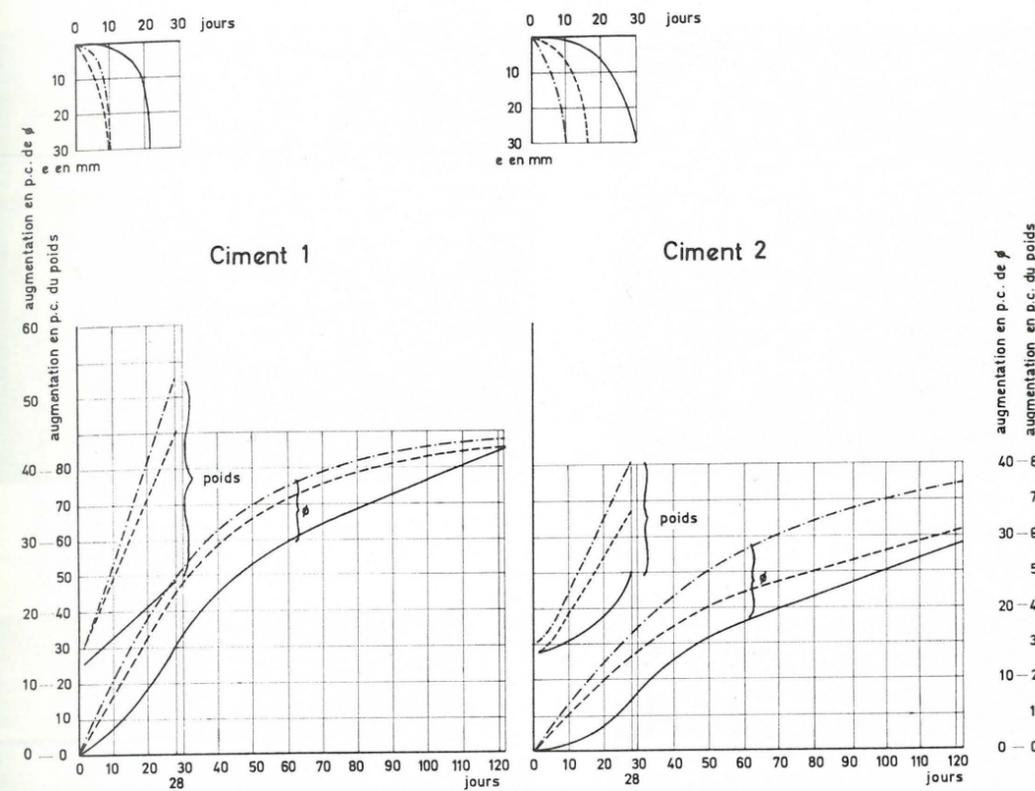


Planche 5.

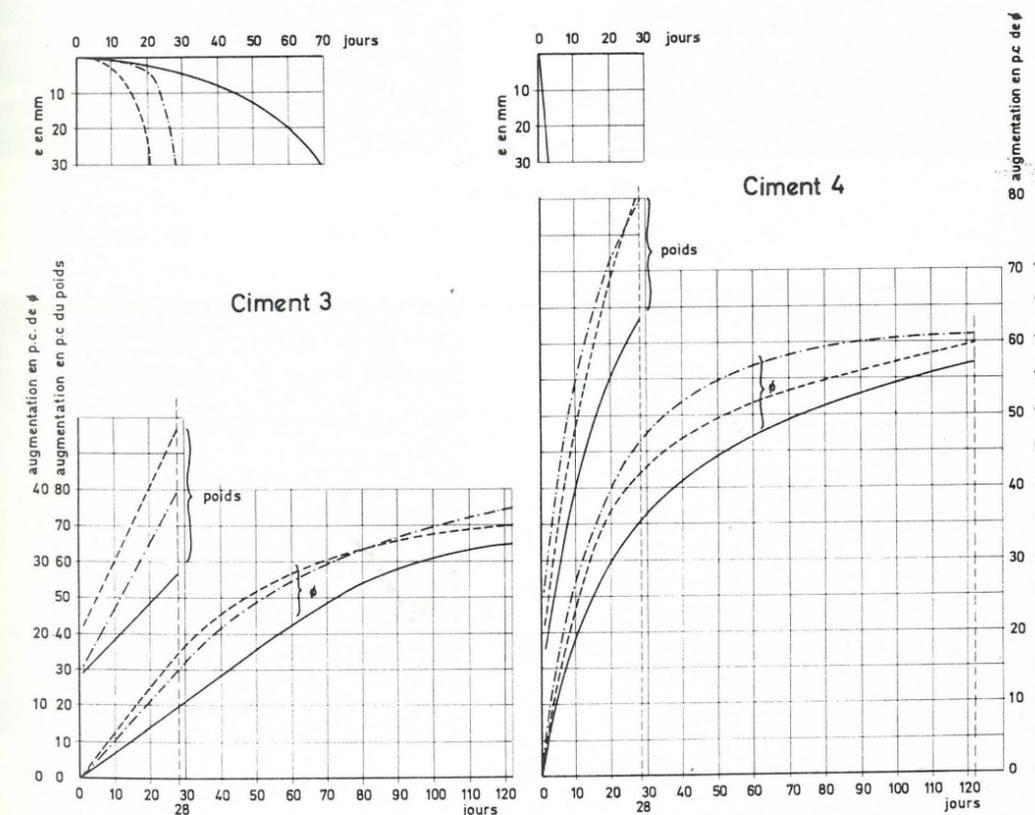


Planche 6.

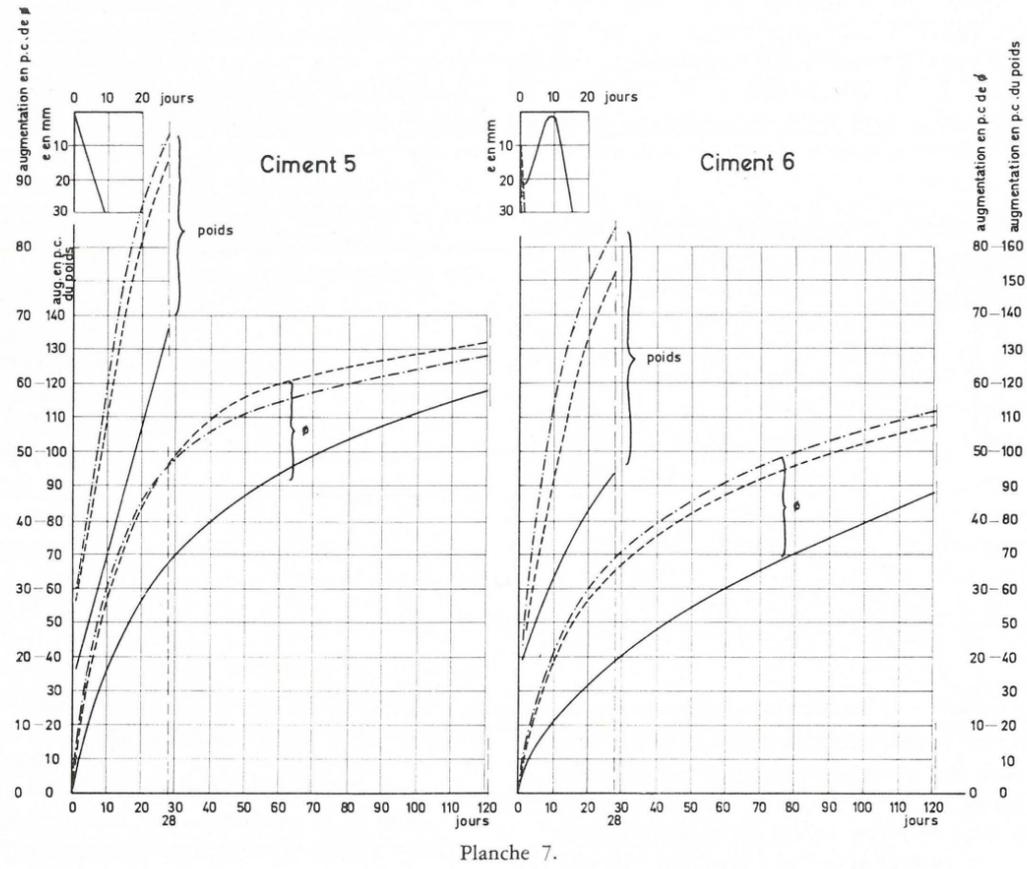


Planche 7.

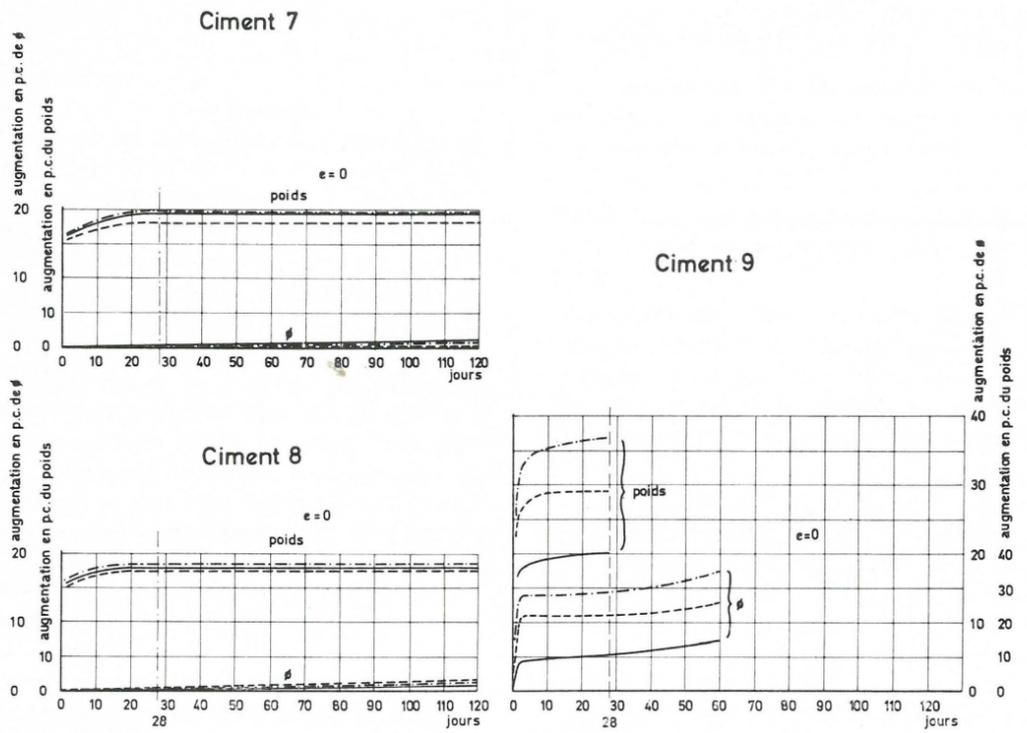
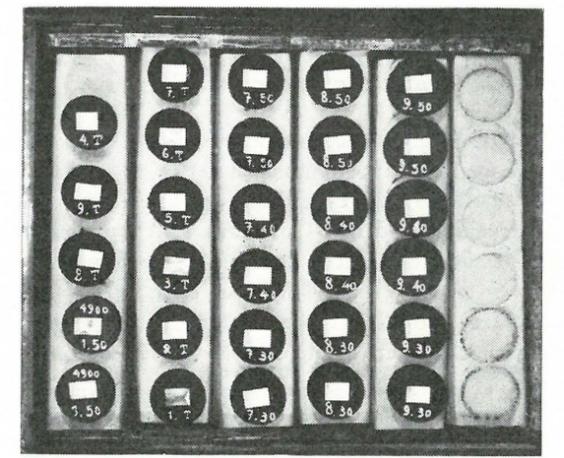
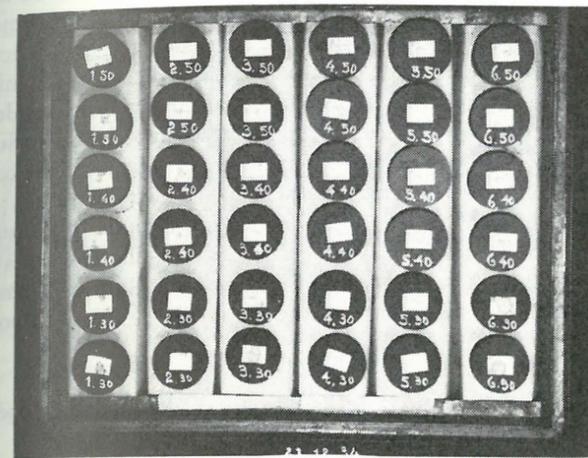
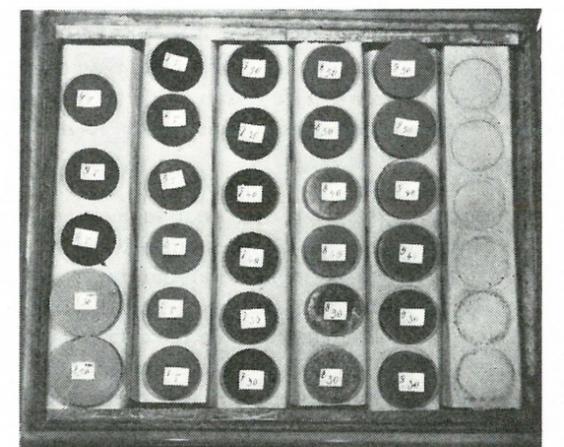
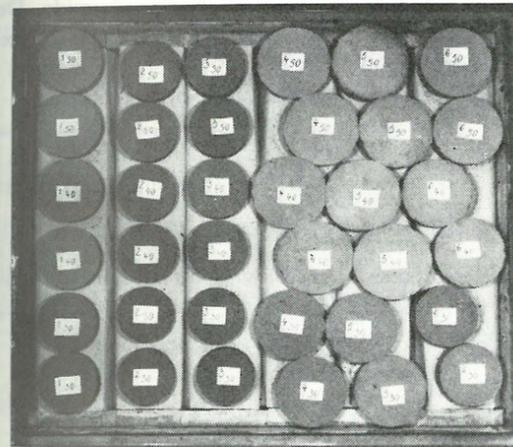


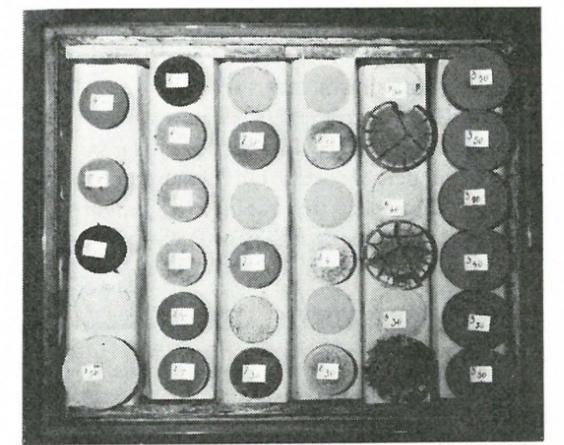
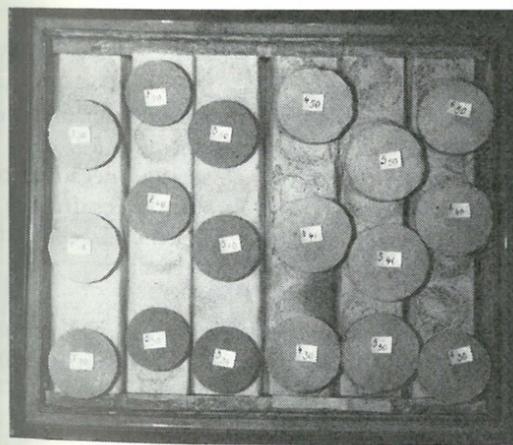
Planche 8.



3 jours après confection.



28 jours après confection.



4 mois après confection.

Planche 9.

photographies des éprouvettes après 3 jours, 28 jours et 4 mois de traitement.

#### 4. — Observations et commentaires

Malgré un gonflement assez important, les éprouvettes du ciment 9 ont apparemment durci ( $e = 0$ ). Mais vers le 28<sup>e</sup> jour, des fissures radiales sont apparues et elles se sont développées dans la suite. Au 120<sup>e</sup> jour, les éprouvettes étaient disloquées, la croûte superficielle restant relativement dure, mais l'intérieur étant à l'état de pâte molle. Les efforts faits pour rendre ce ciment résistant à l'essai d'Anstett n'ont donc pas été couronnés de succès.

Toutes les éprouvettes témoins ont durci normalement. Après 24 heures, l'aiguille de Vicat n'y laissait plus de trace ( $e = 0$ ). Leur gonflement a été inappréciable et leur poids s'est stabilisé au bout de quelques jours à une augmentation du poids initial de 20 à 25 %.

La quantité du ciment 10 a été insuffisante pour permettre de le soumettre à l'essai d'Anstett. Par contre le mélange 3 de ciment 2 et de trass a exigé un temps plus long pour le ramollissement complet ( $e = 30$  mm) que le ciment 2.

Un deuxième essai a été fait pour le mélange 3 sur les pâtes hydratées pendant 2 mois (au lieu de 14 jours) après broyage. On en distingue les éprouvettes tout à fait à droite de la photographie inférieure de la planche 9. Les résultats n'en diffèrent guère de ceux obtenus sur les pâtes broyées après 14 jours d'hydratation, ce qui a fait renoncer à des essais prévus après une durée d'hydratation encore plus longue.

Les méthodes définies et adoptées ont permis une comparaison sans contradiction et sans ambiguïté du comportement des divers ciments à l'essai Le Châtelier-Anstett. Elles ont confirmé, ce qui était connu, que c'est un test de tout ou rien. Les ciments qui y résistent sont, en raison de leur nature et de leur processus de durcissement, immunisés contre l'action des sulfates, qui peut même les renforcer. Pour les autres, l'essai est fatal. On verra dans la suite la signification de l'essai quant au comportement dans la mer. On remarquera dès à présent le ramollissement très rapide des ciments de haut fourneau 4 et 5 et du ciment perméallurgique 6.

### Chapitre V — ESSAIS DE RETRAIT

#### 1. — Définition des essais

Les retraités des divers ciments ont été mesurés en fonction du temps jusqu'à 365 jours, en pâte pure, en mortier et en béton.

a) La pâte de ciment est gâchée à la consistance normale. Elle est moulée sous forme de baguettes prismatiques de  $2 \times 2 \times 10$  cm. Le démoulage est effectué après 24 heures de durcissement dans la chambre humide. Sur leurs deux bases on scelle au ciment Portland deux petites plaques d'argent portant les repères de mesure. L'appareil employé pour mesurer les longueurs est celui de Bauschinger avec palpeur à vis micrométrique.

b) Les mortiers sont identiques à ceux désignés par 2 dans les essais de longue durée, c'est-à-dire composés de 450 kg de ciment par m<sup>3</sup> de sable du Rhin 0-2 mm et gâchés à consistance plastique avec 11 % d'eau en poids des matières sèches.

Les dimensions des éprouvettes et les modalités opératoires sont les mêmes que pour les pâtes.

c) Les bétons sont de même composition que ceux confectionnés pour les essais de longue durée (cf Chapitre II, paragraphe 3). Les éprouvettes sont des prismes de  $10 \times 10 \times 50$  cm. Elles sont démoulées après 24 heures de durcissement dans la chambre humide. Deux billes de verre sont centrées sur les deux bases et fixées par un cadre élastique. Les mesures sont effectuées au moyen de l'appareil Amsler à vis micrométrique.

Trois groupes d'éprouvettes ont été confectionnés, en vue de trois conservations dans des ambiances différentes.

L'un des groupes a été conservé à l'air d'une cave dont la température se maintenait à 16°C et dont le degré hygrométrique était 0,75.

Un autre groupe a été immergé dans l'eau potable à 16°C aussitôt après la mesure de départ.

Le troisième groupe a été immergé dans les mêmes conditions dans une solution aqueuse de 15 gr par litre de sulfate cristallisé de magnésium.

#### 2. — Résultats des essais

Les planches 10 à 18 reproduisent les diagrammes des retraités en mm par m pour les ciments 1 à 9 dans les différentes conditions d'essai. Les valeurs négatives correspondent à des gonflements. La quantité insuffisante de ciment 10 approvisionnée n'a pas permis la confection d'éprouvettes pour les mesures de retrait.

Ces diagrammes sont très significatifs. On constate qu'en général la longueur n'est pas tout à fait stabilisée à l'âge de 365 jours.

A cet âge, le retrait du mortier est en moyenne égal à 2/3 du retrait en pâte pure et celui du béton environ 1/10<sup>e</sup> dans l'air.

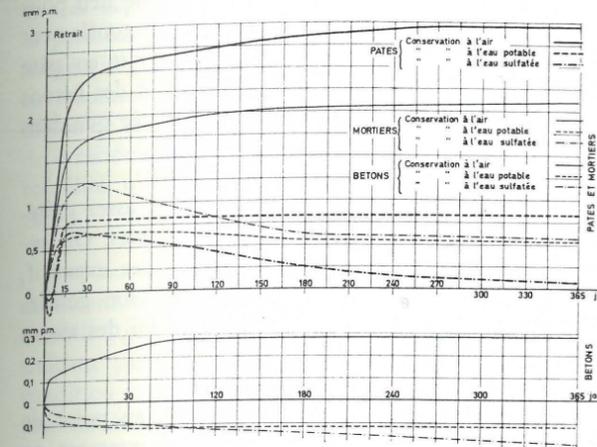


Planche 10. — Ciment 1.

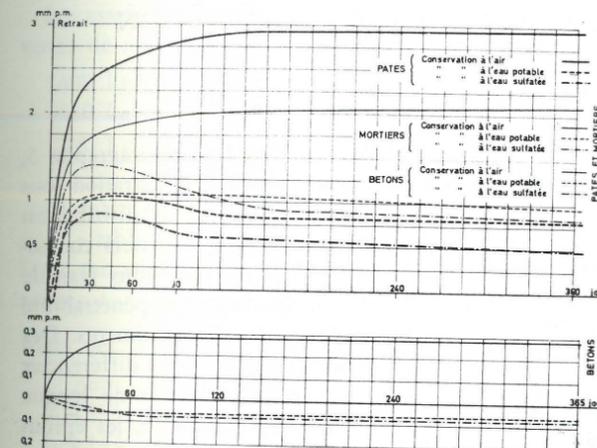


Planche 11. — Ciment 2.

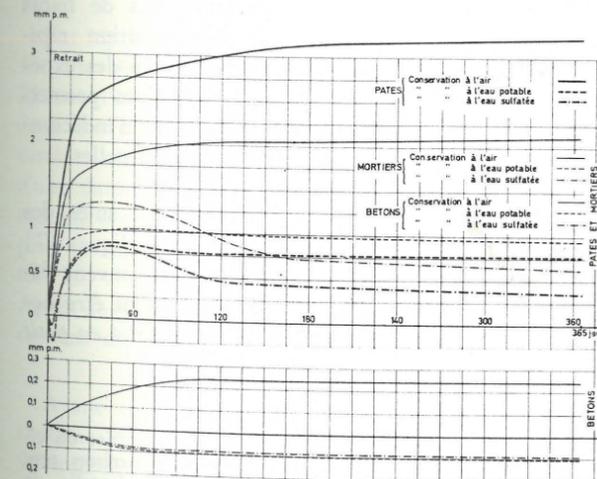


Planche 12. — Ciment 3.

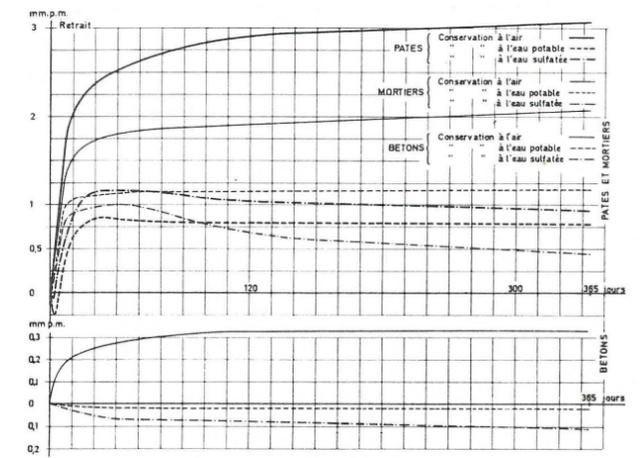


Planche 13. — Ciment 4.

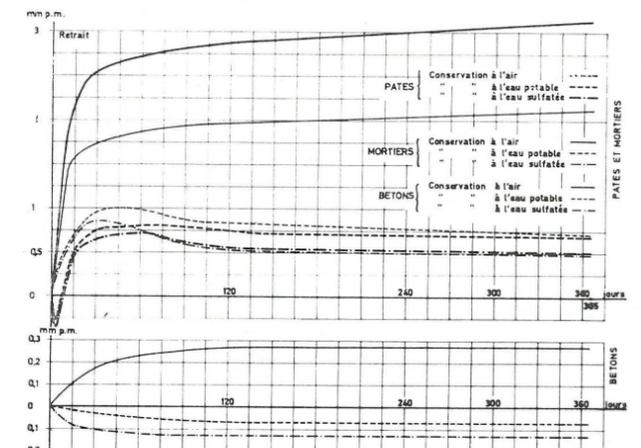


Planche 14. — Ciment 5.

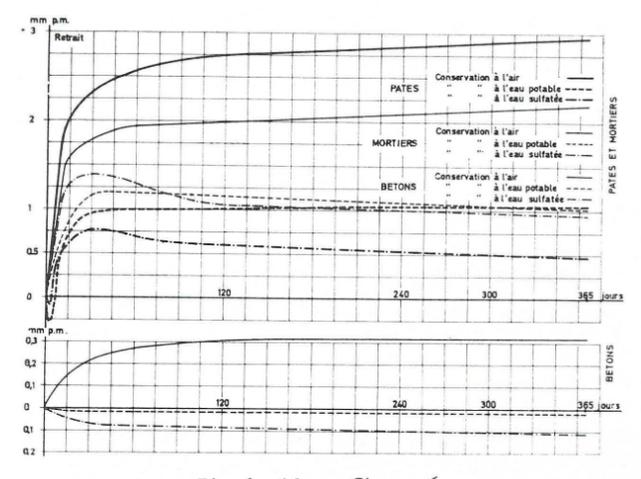


Planche 15. — Ciment 6.

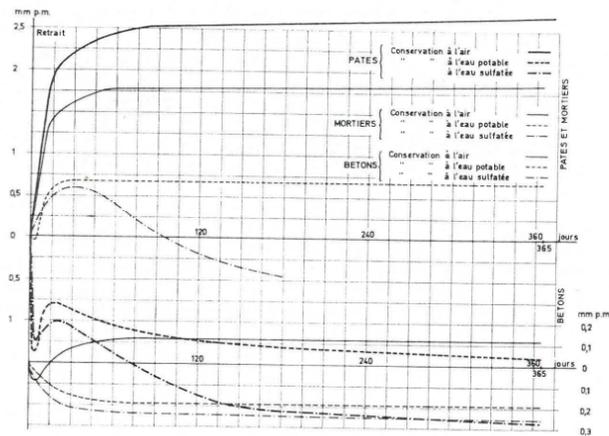


Planche 16. — Ciment 7.

Ciment 8

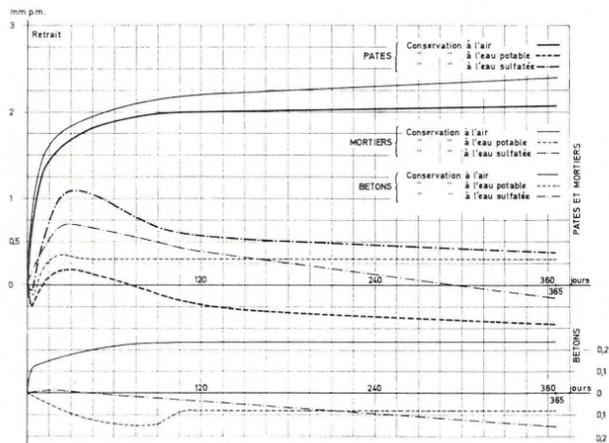


Planche 17. — Ciment 8.

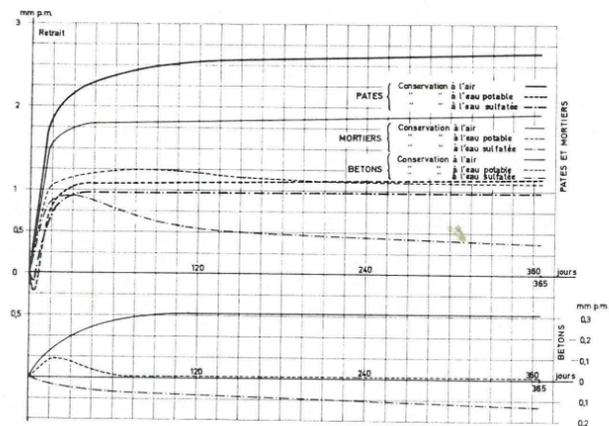


Planche 18. — Ciment 9.

L'immersion liquide produit en général du gonflement pour tous les bétons, mais pas pour les pâtes et les mortiers.

L'immersion dans la solution sulfatée donne lieu pour certains ciments (surtout pour le n° 1) à un gonflement qui diminue après un certain temps le retrait en pâte pure et en mortier. De même, le gonflement des bétons est généralement plus grand dans l'eau sulfatée que dans l'eau potable.

Les diagrammes des ciments 7 et 8 sont assez différents des autres, qui sont tous assez semblables. On remarque notamment que le ciment 7 est assez expansif, en pâte pure et en immersion\*. En béton, son gonflement en immersion est aussi supérieur à celui des autres ciments.

Ces propriétés ne sont pas indifférentes au point de vue du comportement dans le temps des ouvrages en béton, notamment en immersion marine. Elles influent sur la fissuration et sur la protection des armatures par le béton.

## Chapitre VI — ESSAIS DE FILTRATION

### 1. — Généralités

Ainsi qu'il est indiqué au Chapitre I, paragraphe 5, il était prévu au programme des essais de filtration sous pression d'eau distillée, d'eau potable de la distribution urbaine et d'eau sulfatée au travers de mortiers confectionnés au moyen des divers ciments. Leur objet était de déterminer si possible les caractéristiques de pénétrabilité conférées aux conglomerats par les divers ciments. Des essais d'absorption ne paraissent pas devoir différencier les ciments au départ et, comme les essais de longue durée se faisaient en immersion permanente, les éprouvettes devraient toutes se trouver en état de régime saturé. D'autre part, par suite de la marée, des ouvrages tels que les écluses et même éventuellement les murs de quai peuvent subir des pressions hydrostatiques donnant lieu à percolation. Or, on sait que la circulation de solutions agressives au travers des conglomerats de liants hydrauliques peut entraîner leur décomposition rapide. [6] Enfin, on voulait se rendre compte si des expériences de percolation de solutions agressives permettraient de mettre en évidence des différences d'indécomposabilité des ciments par des altérations éventuelles.

L'expérience acquise par le laboratoire au sujet des essais de perméabilité des conglomerats hydrauliques [7] avait établi que ces essais sont difficiles et souvent décevants. Les éprouvettes doivent nécessairement être homogènes; elles sont donc poreuses, et perméables *en petit*

\* Les mesures de longueur de l'éprouvette de mortier du ciment 7 conservée dans l'eau sulfatée ont été arrêtées prématurément par suite d'une dégradation accidentelle de l'éprouvette.

et très exposées au colmatage. Dans les ouvrages réels, la perméabilité résulte le plus souvent de défauts d'homogénéité, sans rapport avec les essais de perméabilité au laboratoire. Dans le cas présent, il s'agissait du problème de mettre en évidence, si possible, des différences de caractéristiques de divers ciments au sujet de l'imperméabilité qu'ils confèrent à des conglomerats comparables.

Il a donc été procédé à des essais préliminaires en vue de déterminer une composition donnant lieu à une perméabilité généralement modérée mais suffisante et n'entraînant pas un colmatage trop rapide. Cette dernière condition a fait abandonner la solution à 1,5 % de sulfate de magnésie cristallisé prévue au programme, qui produit le colmatage en un temps très court. On a adopté une concentration 5 fois moindre.

### 2. — Définition des essais

Les essais de filtration ont été effectués sur des éprouvettes de mortier de la composition suivante :

1400 kg de sable fin sec  
420 kg de ciment  
290 l d'eau

Le sable est du sable fin blanc siliceux de Mol, du type « sable de verrerie », de densité apparente 1,4 à l'état sec et dont l'analyse granulométrique est la suivante :

Jours des tamis	Refus cumulés
mm	%
0,295	0
0,147	50
Module de finesse	0,5

Ce mortier est de consistance terre humide et d'aspect assez raide.

Les éprouvettes sont des disques tronconiques de 115 mm de hauteur et dont les bases ont respectivement 235 et 195 mm de diamètre. Elles sont confectionnées dans des moules métalliques étanches, par couches successives de quelques centimètres compactées à l'aide d'une dame vibrante. Ce mode de mise en œuvre a été retenu, après de nombreux essais, en vue d'obtenir la plus grande uniformité possible des diverses éprouvettes. La vibration est appliquée jusqu'à léger ressuage. Après durcissement, le démoulage est effectué par retournement du moule et application de légers chocs.

Avant l'essai, les éprouvettes reçoivent à partir de chacune des bases des rainures cylindriques axiales de 90 mm de profondeur et respectivement de 30 mm de diamètre pour la petite base et de 75 mm de diamètre

pour la grande base (planche 19). Ces rainures sont réalisées par des foreuses tubulaires diamantées.

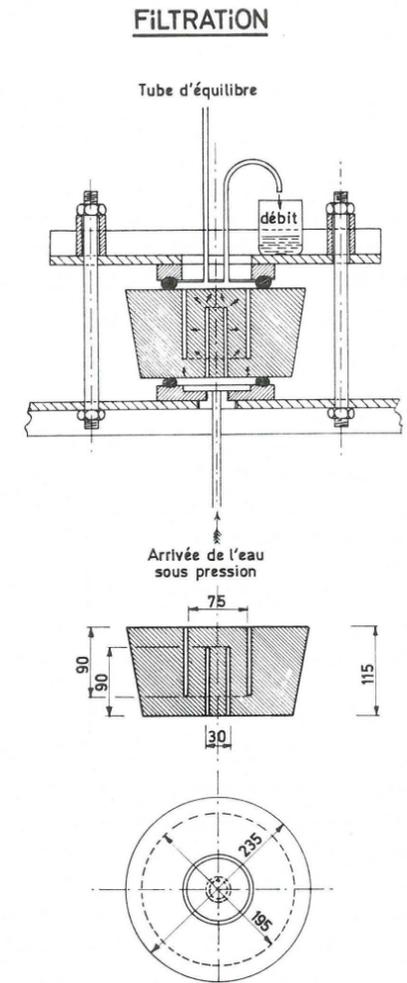


Planche 19.

Les éprouvettes ainsi préparées sont serrées entre deux plateaux métalliques avec interposition de joints toriques en caoutchouc de 10 cm de diamètre. L'eau sous pression arrive par le plateau inférieur; le filtrat est recueilli sous le plateau supérieur (pl. 19). La majeure partie du débit de filtration passe entre les deux rainures cylindriques par le mortier du cœur de l'éprouvette.

Les éprouvettes ont été confectionnées et essayées en même temps et dans les mêmes conditions. Elle ont été conservées dans l'air à 0,70 d'humidité en moyenne et à la température de 18° C.

Il a été fait usage de 3 liquides filtrants :

- eau distillée;
- eau de la distribution de la Ville de Liège;

c) eau distillée contenant en solution 3 grammes de sulfate de magnésie cristallisé par litre.

La composition moyenne de l'eau de la Ville de Liège est la suivante, en gr par l.

SiO <sup>2</sup>	0,0112
Al <sup>2</sup> O <sup>3</sup> + Fe <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	0,0088
CaO	0,207
MgO	0,01095
CO <sup>2</sup>	0,0196

La pression de l'eau filtrante était produite par un accumulateur hydraulique sans emploi de gaz. La pression de 1 kg/cm<sup>2</sup> était maintenue par une soupape à double siège et à ressort.

### 3. — Résultats des essais

On a déterminé les débits en fonction du temps pour les ciments 1 à 9 et pour les trois liquides. On a aussi analysé la variation de la teneur en CaO des filtrats pour les 3 liquides. De plus, pour les filtrats de la solution de sulfate de magnésie, on a aussi analysé les teneurs en SO<sup>3</sup>.

Le ciment 10 n'a pas été compris dans les essais pour la raison déjà indiquée d'insuffisance d'approvisionnement.

Les résultats de ces mesures sont indiqués sous forme de diagrammes aux planches 20 à 32. Pour les apprécier, il y a lieu de remarquer que les échelles des débits peuvent être différentes selon la nature du ciment et selon la nature du liquide filtrant. Les courbes des débits de filtration pour l'eau potable présentent une discontinuité à 260 heures. Elle correspond à un retournement des éprouvettes, en vue d'apprécier l'importance et le caractère du colmatage.

On remarque l'absence de diagrammes pour le ciment 7, pour la raison qu'il n'y a pas eu de débits mesurables. Les éprouvettes se sont seulement humectées.

A la planche 28, récapitulative des débits de percolation de l'eau potable, on remarque un colmatage assez rapide et quasi total des éprouvettes de tous les ciments, sauf 8 et 3.

La planche 29 fait la synthèse des diagrammes des débits de filtration de l'eau distillée. Le ciment 3 n'y figure pas; les débits sont trop élevés à l'échelle du diagramme. Il a fallu interrompre l'expérience pour ce ciment et pour ce liquide après une cinquantaine d'heures (cf. planche 22), parce que l'appareil de mise en pression ne parvenait pas à suivre des débits aussi importants.

Pour la plupart des autres ciments, (pl. 29), le débit atteint un maximum après une durée inférieure à 50 heures, pour diminuer ensuite et tendre vers une valeur sensiblement constante. Pour le ciment 1, le maximum n'est toutefois atteint qu'après environ 800 heures, pour diminuer ensuite vers une valeur stable, sensiblement la même que pour le ciment 2. Les ciments 4, 5 et 6 ont aussi des valeurs finales voisines.

La planche 30 indique la récapitulation des débits de filtration de l'eau sulfatée. Le ciment 3 se distingue de nouveau très fortement de tous les autres. Le ciment 6 est colmaté après une quinzaine d'heures, le 9 après environ 90 heures, 4 et 5 après 500 heures. Le colmatage de 8 est moins prononcé après la même durée. Quant aux ciments 1 et 2, ils présentent après 500 heures un débit assez faible mais sensiblement constant.

### 4. — Altérations des éprouvettes

On n'a pas constaté d'altération visible des éprouvettes pendant la durée des expériences, qui ont été arrêtées lorsque les débits de percolation avaient atteint des valeurs sensiblement constantes ou très faibles, sauf pour le 3 à l'eau distillée où il fallut, comme indiqué ci-dessus, arrêter l'essai beaucoup plus tôt, en raison du débit excessif.

Mais une altération progressive invisible a été mise en évidence par l'analyse chimique des filtrats, qui a montré un enlèvement par dissolution de constituants du ciment et une modification du liquide filtrant, correspondant à la fixation de certains de ses éléments par le ciment.

On a choisi comme éléments caractéristiques la teneur en CaO des divers filtrats et la teneur en SO<sup>3</sup> des filtrats d'eau sulfatée. Les diagrammes de variations de ces teneurs figurent aux planches 31 et 32.

En ce qui concerne la teneur en CaO, on remarque que les ciments 1 et 2 se distinguent assez bien des autres pour tous les liquides filtrants. La teneur en mgr par litre est la plus élevée et comme les débits sont généralement plus grands, les ciments 1 et 2 donnent lieu à une plus grande perte totale en chaux que les autres dans les mêmes conditions. C'est cependant le ciment 3 qui donne lieu aux plus grandes pertes totales en chaux à cause des débits considérables, notamment pour la percolation de l'eau distillée. On remarquera que la dissolution de chaux des ciments 1 et 2 est encore assez forte par l'eau potable, cependant assez dure, et particulièrement forte par l'eau sulfatée.

Cependant les ciments 1 et 2 et surtout le 3 retiennent le moins d'ions SO<sup>3</sup> agressifs, cependant que les filtrats

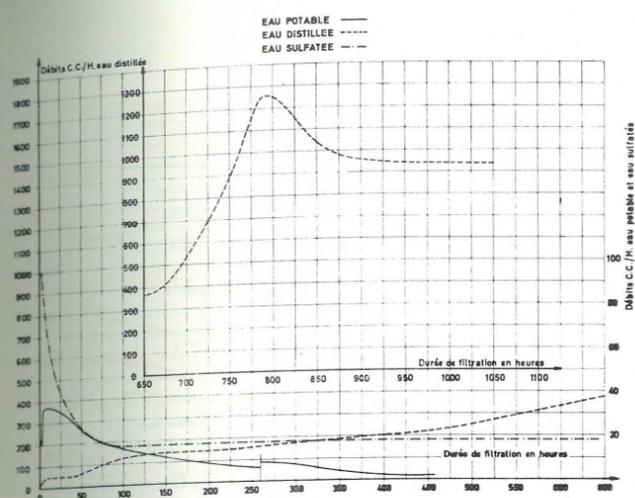


Planche 20. — Ciment 1 — Filtration.

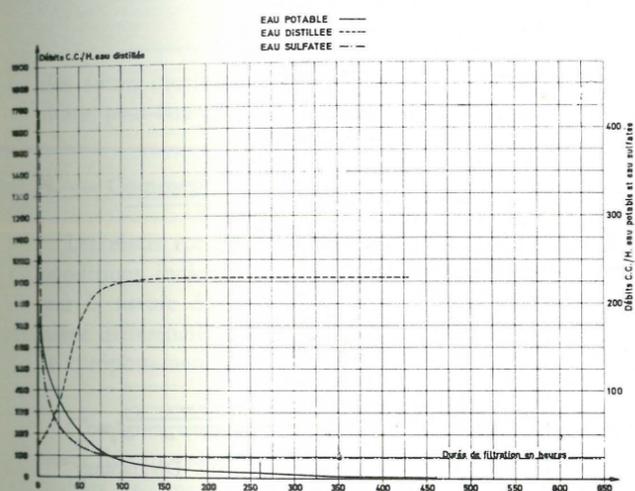


Planche 21. — Ciment 2 — Filtration.

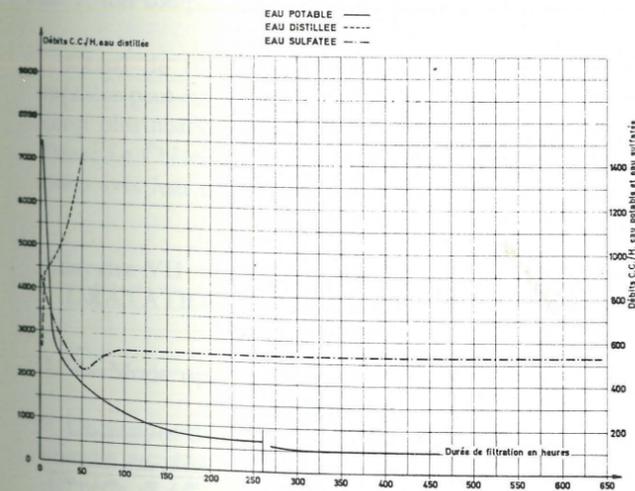


Planche 22. — Ciment 3 — Filtration.

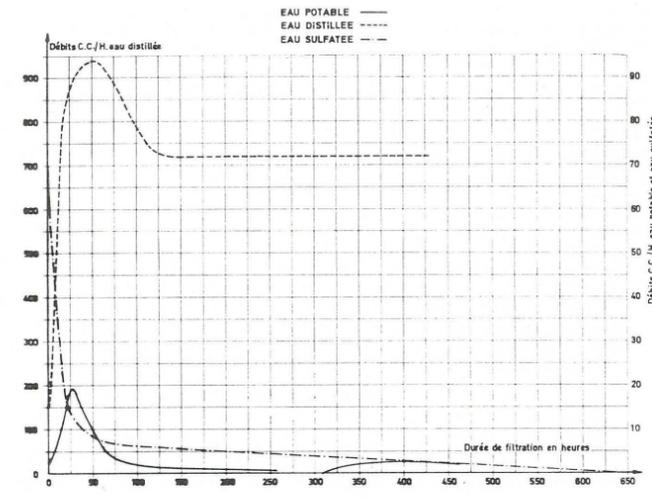


Planche 23. — Ciment 4 — Filtration.

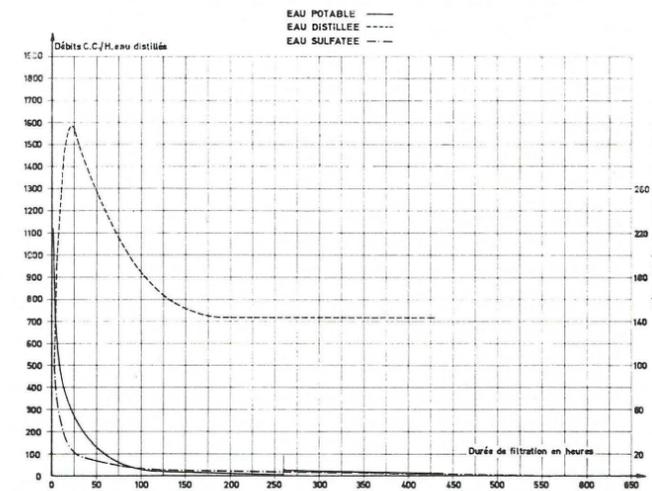


Planche 24. — Ciment 5 — Filtration.

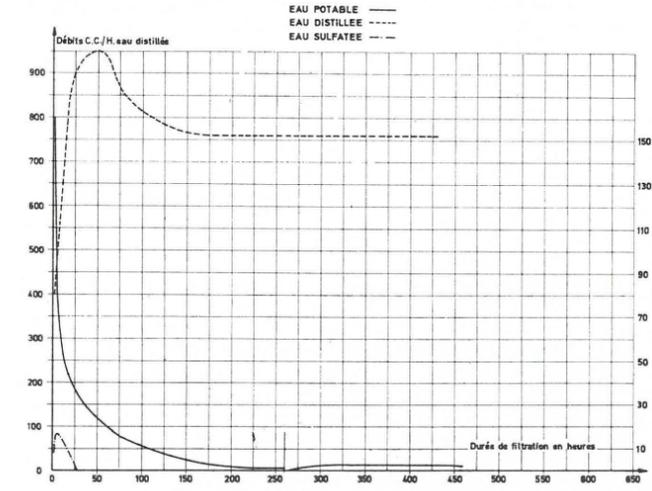


Planche 25. — Ciment 6 — Filtration.

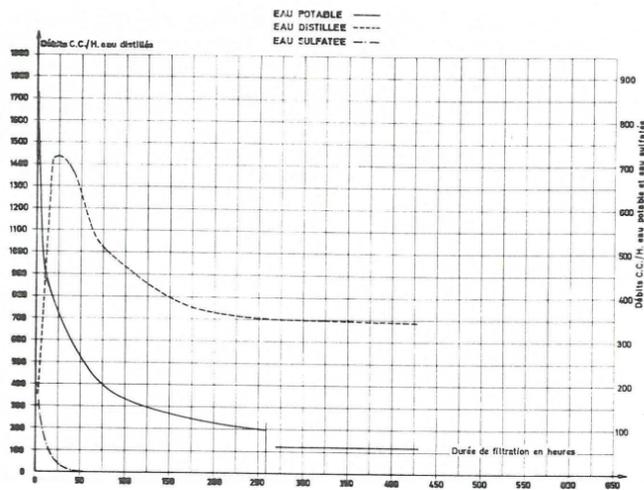


Planche 26. — Ciment 8 — Filtration.

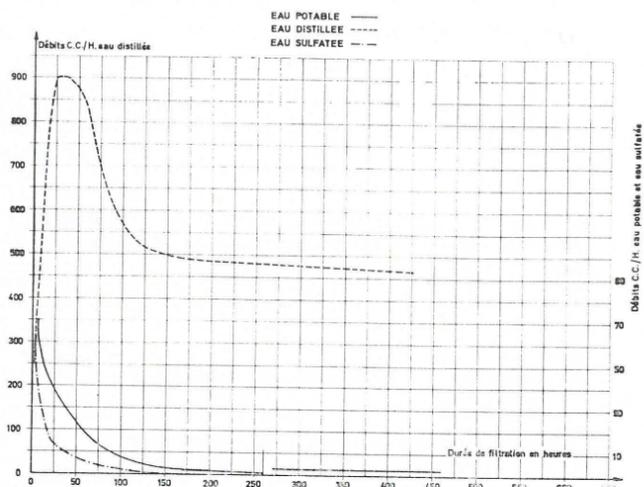


Planche 27. — Ciment 9 — Filtration.

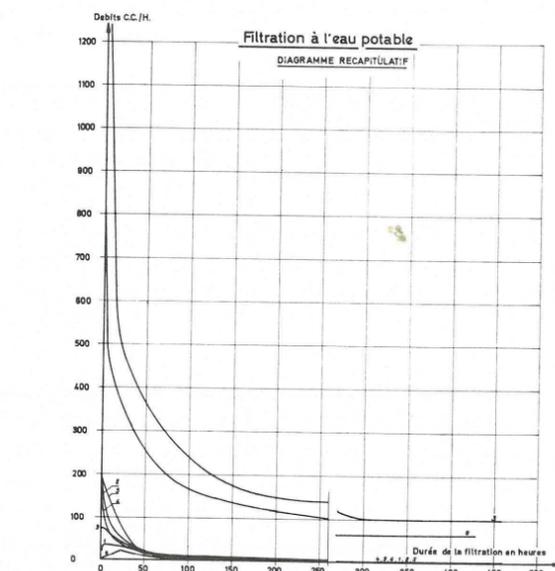


Planche 28.

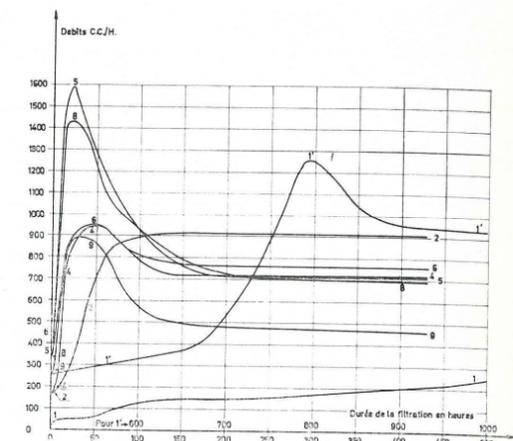


Planche 29. — Filtration à l'eau distillée. Diagramme récapitulatif.

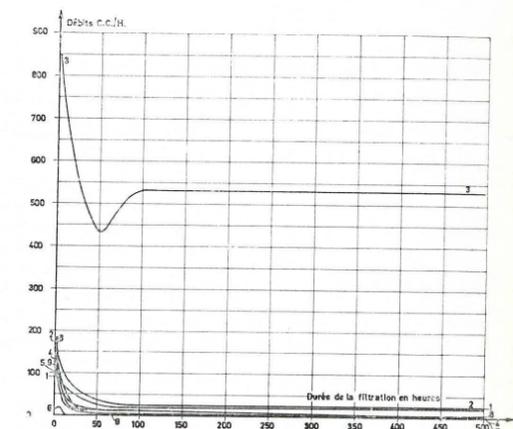


Planche 30. — Filtration à l'eau sulfaté. Diagramme récapitulatif.

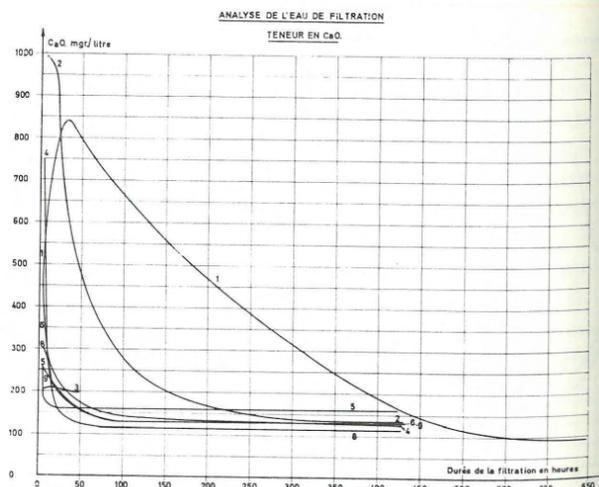


Planche 31. — Filtration à l'eau distillée.

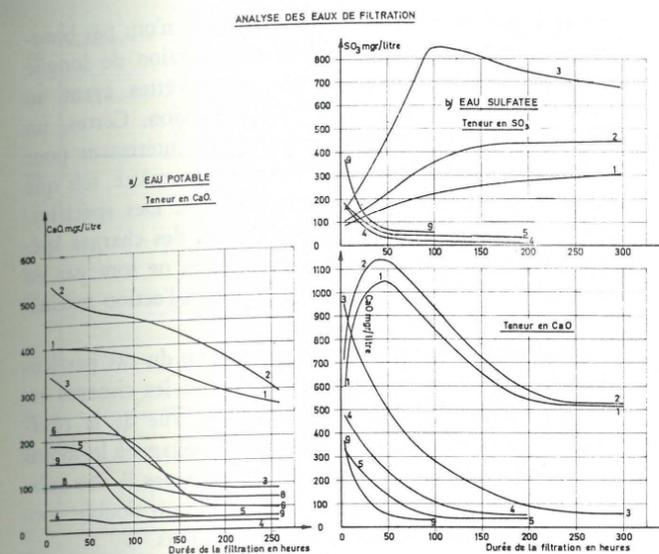


Planche 32. — Essai de filtration.

des autres mortiers en ont une teneur promptement réduite, peut-être par l'action du colmatage.

### 5. — Commentaires

Les essais comparatifs de filtration effectués dans les conditions indiquées sur des mortiers ne différant que par la nature de leurs ciments ont donné des résultats assez différenciés et qui ne sont pas sans rapports avec le comportement des divers ciments dans la mer.

C'est ainsi que les ciments 1 et 2 sont non seulement assez décomposables mais paraissent aussi les plus pénétrables. Le ciment 3 est de loin le plus perméable et pénétrable, mais il est sensiblement moins décomposable que les deux précédents. Les ciments 4, 5 et 6 sont moins pénétrables et moins décomposables, surtout le 6. Quant au 7, son comportement est tout à fait particulier.

L'essai de filtration exposé ci-dessus a donc, d'une manière peut-être imprévue, établi des distinctions beaucoup plus nuancées entre les divers ciments essayés que l'essai Le Châtelier-Anstett, et qui ne sont pas sans rapports avec leur comportement dans la mer.

## Chapitre VII — CHALEUR DÉGAGÉE PAR L'HYDRATATION EN 72 HEURES

### 1. — Mode opératoire

On remplit de pâte ou de mortier de ciment une boîte étanche en tôle mince étamée (fer blanc) de 8 cm de diamètre et de 14 cm de hauteur. Le couvercle est percé d'un trou permettant l'introduction d'un tube à essai en

verre dans la masse de la pâte ou du mortier. Tous les éléments sont pesés. La boîte remplie est introduite dans un vase de Dewar cylindrique, de 10 cm de diamètre intérieur et de 25 cm de profondeur. Le bulbe d'un thermomètre enregistreur gradué de 0 à 100° C est placé dans le tube à essai et le goulot du vase est fermé par un bouchon d'ouate.

On enregistre la courbe d'élévation de température de la pâte ou du mortier. Pour établir la correction des pertes de chaleur qui se produisent par le bouchon d'ouate et la tige métallique du thermomètre, on opère comme suit.

Après l'essai, l'éprouvette est placée dans une boîte étanche (pour éviter la dessiccation) et chauffée dans une étuve à une température un peu supérieure au maximum du diagramme enregistré. Elle est ensuite replacée dans les conditions de l'essai. On enregistre la courbe de refroidissement et on en déduit pour chaque température et dans les conditions de l'essai la vitesse de refroidissement.

Les valeurs en sont portées en tableau et permettent de corriger la courbe initiale de degré en degré à partir de l'origine. La courbe corrigée ainsi établie permet de calculer, de la manière indiquée ci-après, les quantités de chaleur dégagées dans les conditions de température de l'expérience enregistrées par la courbe expérimentale non corrigée. La méthode est donc pseudo-adiabatique, car, comme l'évolution de la température et la quantité de chaleur dégagée s'influencent réciproquement, les résultats seraient différents dans des conditions réellement adiabatiques. La courbe corrigée ne peut donc pas en principe être considérée comme réalisable. Elle conduit d'ailleurs souvent à une température corrigée supérieure à 100° C, qui entraînerait l'ébullition de l'eau non encore fixée. Le calcul des températures corrigées et des quantités de chaleur fait abstraction de tout changement d'état. Ces observations n'affectent pas les résultats comparatifs des expériences, qui sont effectuées dans des conditions identiques pour les divers ciments.

Pour passer des températures aux quantités de chaleur, on détermine la capacité calorifique des éprouvettes durcies en se servant du vase de Dewar comme calorimètre à eau. Environ 500 gr d'eau à 40° C sont introduits dans le vase et l'éprouvette à la température ambiante est plongée dans cette eau. Un thermomètre est placé dans le tube à essai et un second entre l'éprouvette et la paroi du vase, leur graduation est en dixièmes de degrés. On admet que l'état d'équilibre est atteint lorsque les deux thermomètres indiquent les mêmes températures. On observe ensuite la vitesse de refroidissement à partir de cette température d'équilibre, pour une correction d'ailleurs faible. La masse en eau du vase et du thermomètre a été appréciée à 50 gr.

La quantité de chaleur dégagée par l'hydratation du ciment après un certain nombre d'heures, en calories par gramme de ciment, est égale au produit de la capacité calorifique totale par l'élévation de température au temps considéré, divisé par le poids de ciment incorporé dans l'éprouvette.

Les essais ont été faits sur les produits suivants.

a) Pour tous les ciments, sur des mortiers composés de

1.000 gr de sable fin siliceux de Mol  
500 gr de ciment  
250 gr d'eau.

b) Pour tous les ciments, sauf 1 et 8, sur pâte à 30 % d'eau. Les ciments écartés donneraient des températures expérimentales supérieures à 100° C.

Les résultats en pâtes et mortiers diffèrent naturellement, les conditions d'hydratation étant différentes en ce qui concerne les quantités d'eau et les températures atteintes.

## 2. — Résultats des essais

Les planches 33 à 41 reproduisent les courbes de variation de température expérimentales et corrigées, tant pour les pâtes que pour les mortiers. Elles sont assez caractéristiques.

D'après cela, les quantités de chaleur d'hydratation dégagées en 72 heures, exprimées en calories par gramme de ciment, sont les suivantes.

Ciment	Calories/gr	
	en pâte	en mortier
1	—	81,1
2	78,4	57,9
3	49,1	41,1
4	76,1	64,1
5	38,7	31,5
6	44,4	37,7
7	23,1	17,0
8	—	115,5
9	38,4	28,9

## 3. — Commentaire

On pourrait être tenté de relever quelques anomalies individuelles dans ce tableau. Plutôt qu'à la méthode utilisée, elles sont dues probablement au fait que les ciments en question n'étaient nullement conditionnés en vue de satisfaire à des spécifications définies de chaleur dégagée. Les additions de réglage de la durée de prise peuvent avoir à ce sujet certains effets. Dans l'ensemble, les résultats sont d'ailleurs plausibles.

On peut considérer que ces expériences n'ont pas beaucoup de rapport avec les essais d'immersion de longue durée, entrepris sur des petites éprouvettes ayant au moins 28 jours d'âge lors de l'immersion. Certes, un faible dégagement de chaleur peut être intéressant pour des ouvrages massifs en eau marine ou saumâtre, tels que des écluses maritimes, des murs de quai. Des spécifications *ad hoc* ont figuré dans les cahiers des charges spéciaux de tels ouvrages en Belgique. Elles ne sont pas en contradiction avec une bonne résistance à l'action marine.

On constate en effet que, sous réserve du cas particulier du ciment 8, les ciments qui parmi les ciments essayés se classent le mieux au point de vue de la résistance à l'action marine sont ceux qui dégagent le moins de chaleur pendant l'hydratation. Il n'y a pas là une relation de cause à effet, mais simplement un double conséquence de la composition de ces ciments.

Un faible dégagement de chaleur ne serait contre-indiqué que s'il correspondait à un durcissement très lent et pour des bétons soumis à l'action marine dès le début du durcissement. Si le durcissement initial est suffisamment rapide, d'après les résultats des essais mécaniques, l'emploi de ciments à faible chaleur d'hydratation est très recommandable pour les bétonnages en grande masse afin d'éviter, en rapport avec des joints de construction convenablement disposés, des fissures de refroidissement et de retrait qui peuvent favoriser la pénétration de l'eau de mer et l'attaque du béton.

## TROISIEME PARTIE

### Essais et observations sur les mortiers et les bétons conservés dans divers milieux de 1934 à 1964

#### Chapitre VIII — PRELEVEMENTS DU 22 FEVRIER 1935 (après 5 mois d'immersion)

##### 1. — Opérations

Après 5 mois d'immersion, le 22 février 1935, trois séries complètes de mortiers et de bétons ont été retirées d'une part de la mer à Ostende, d'autre part des bacs d'immersion dans l'eau potable et dans l'eau sulfatée au laboratoire annexe de l'Institut du Génie Civil au Val-Benoît.

Les caisses marquées I, I', 1, 8 et 9 (cf. planche 4) fixées sur le plancher à claire-voie de l'estacade en A (cf. pl. 3) ont été détachées et amenées sur un ponton à la faveur de la marée basse à 8 heures du matin. Après démontage des caisses, les éprouvettes recouvertes d'une légère couche de vase ont été lavées à l'eau de mer, iden-

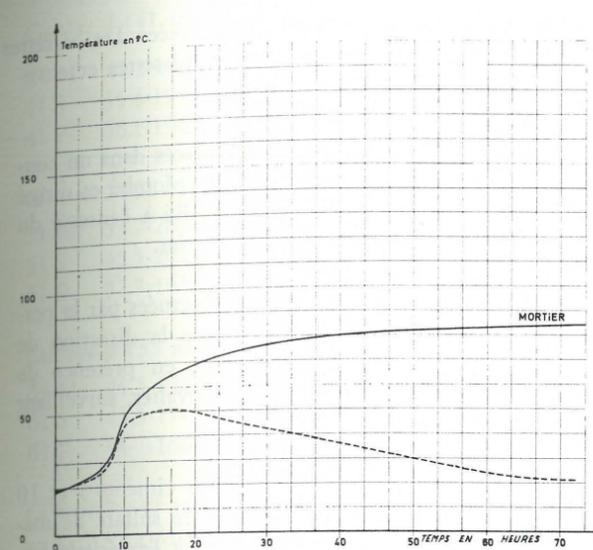


Planche 33. — Ciment 1.

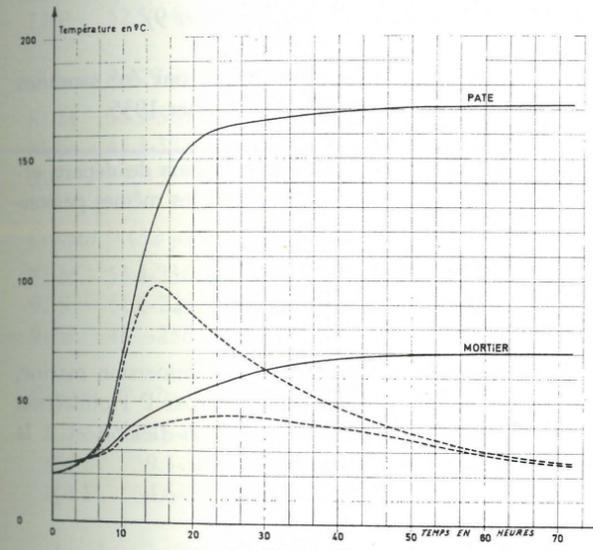


Planche 34. — Ciment 2.

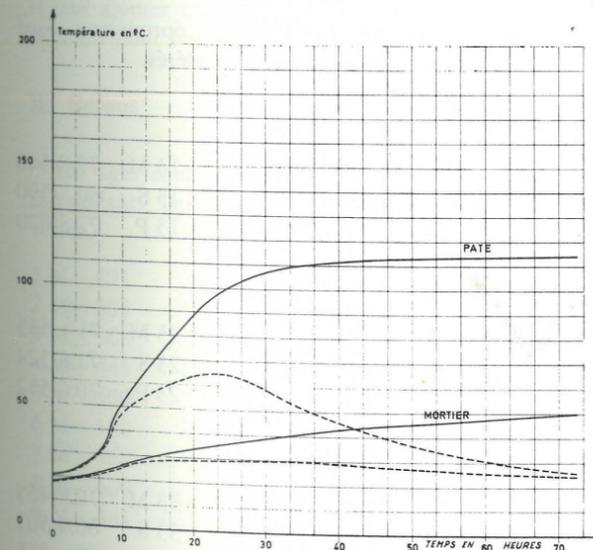


Planche 35. — Ciment 3.

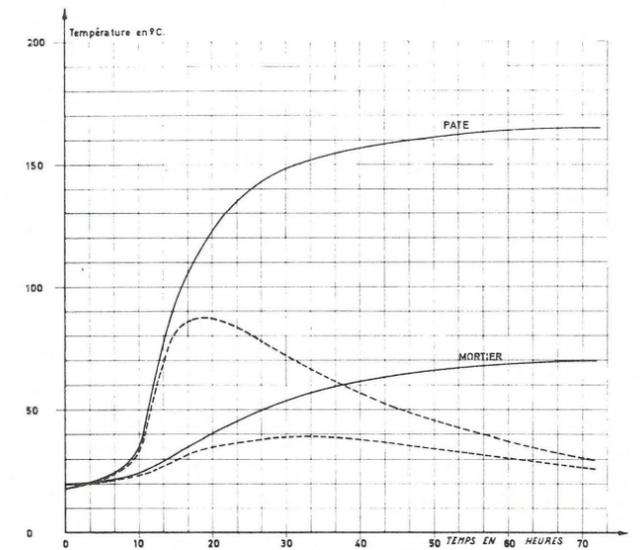


Planche 36. — Ciment 4.

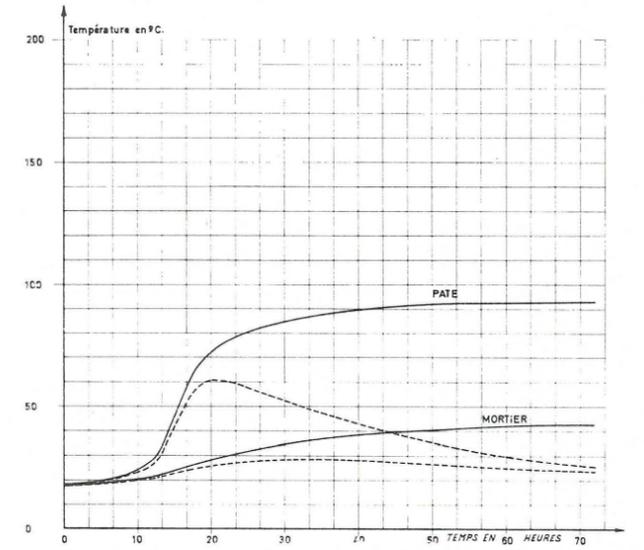


Planche 37. — Ciment 5.

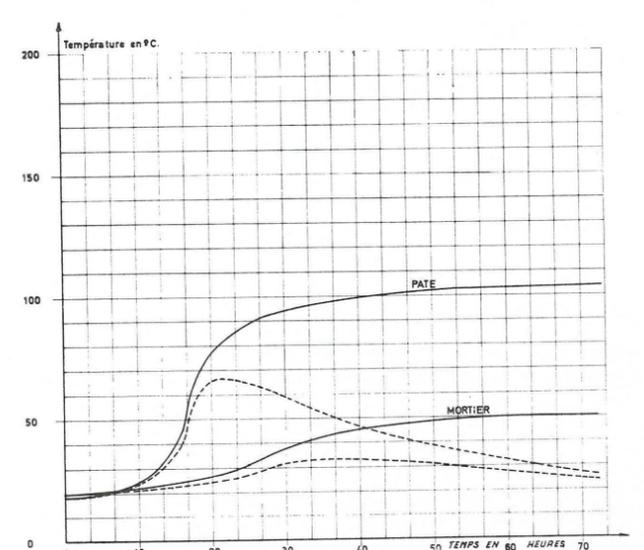


Planche 38. — Ciment 6.

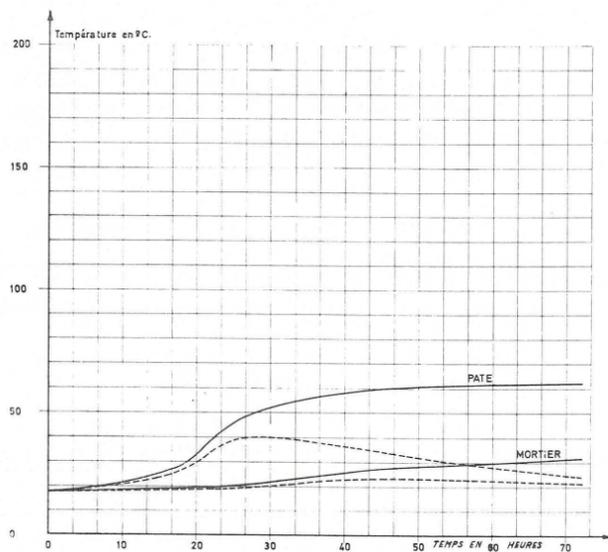


Planche 39. — Ciment 7.

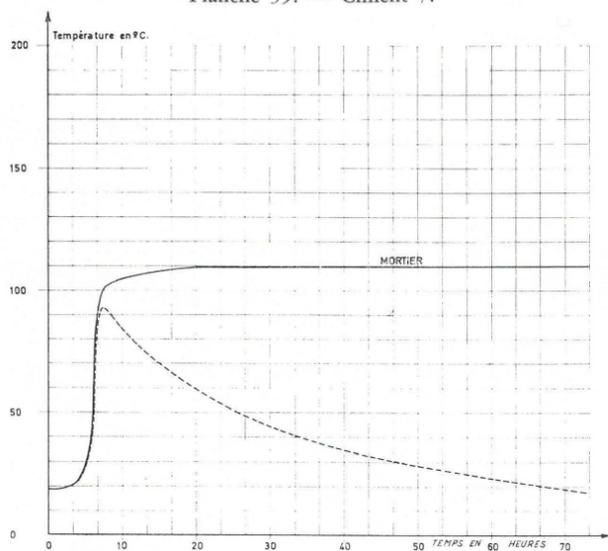
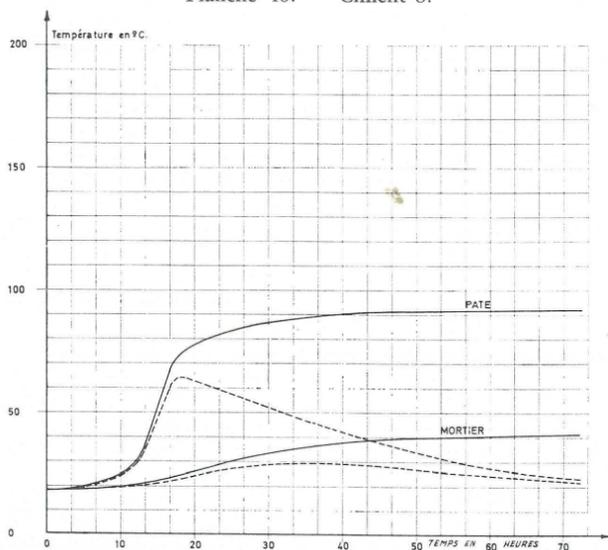


Planche 40. — Ciment 8.



Planches 41. — Ciment 9.

tifiées, emballées par groupes et étiquetées. Les barrettes de mortier ont été rangées dans des caissettes et enveloppées de sable des dunes mouillé.

Les mortiers et les bétons ont été placés dans un container disposé sur le ponton, qui a été plombé et dirigé vers la gare d'Ostende pour être expédié à l'adresse du laboratoire, où il est parvenu le 23 février.

Les opérations à Ostende ont été effectuées par le personnel de l'entreprise Van Huele, sous la direction de M.M. R. Dantinne et R. Jacquemin, en présence de M. Boehme, conducteur, et de M. Chevalier, surveillant des Ponts et Chaussées.

A Liège, les éprouvettes relatives aux ciments 9 et 10 ont été immergées dans une solution de sulfate de magnésie à 15 gr par litre et conservées à l'extérieur jusqu'à atteindre la même durée d'immersion que les ciments 1 à 8 (cf. Ch. II, paragraphes 7 et 9).

Les éprouvettes des ciments 1 à 8 ont été soumises aux essais mécaniques les 25 et 26 février 1935.

Ces essais ont été identiques aux essais de départ, effectués dans les mêmes conditions par les mêmes personnes (cf. Ch. III, paragraphes 3, 4 et 5).

## 2. — Résultats des essais mécaniques

On caractérisera par l'indicatif M l'immersion marine, par S l'immersion dans l'eau sulfatée, par P l'immersion dans l'eau potable. Les résistances à la flexion et à la compression sont exprimées en kg/cm<sup>2</sup>.

### A) Mortiers

Les résultats sont les moyennes de 4 éprouvettes. Sauf de rares exceptions, les écarts sont modérés.

#### Ciment 1 (50 jours + 5 mois)

11 M	34 -189	12 M	54.9-399	13 M	72.8-540
11 S	12.6-164	12 S	55.5-345	13 S	80 -590
11 P	34.6-228	12 P	58.5-440	13 P	72.8-670

#### Ciment 2 (47 jours + 5 mois)

21 M	34 -178	22 M	52.7-435	23 M	71 -535
21 S	21.5-199	22 S	57.6-434	23 S	71.8-524
21 P	36.3-199	22 P	53.2-430	23 P	70.6-552

#### Ciment 3 (44 jours + 5 mois)

31 M	37.6-172	32 M	51.2-273	33 M	70.8-465
31 S	28.4-167	32 S	53.4-336	33 S	66.4-501
31 P	37.1-208	32 P	49.2-356	33 P	67 -535

#### Ciment 4 (41 jours + 5 mois)

41 M	42.2-189	42 M	62.4-402	43 M	80.8-548
41 S	35.4-194	42 S	57.9-405	43 S	75.3-562
41 P	36.1-196	42 P	54.9-404	43 P	67.1-524

#### Ciment 5 (38 jours + 5 mois)

51 M	53.7-288	52 M	66.3-420	53 M	70.8-522
51 S	45.5-202	52 S	76.9-472	53 S	80 -521
51 P	37.7-165	52 P	62.4-383	53 P	72.9-469

#### Ciment 6 (35 jours + 5 mois)

61 M	41.5-148	62 M	59.4-298	63 M	73.9-465
61 S	43.3-176	62 S	60.2-300	63 S	75.2-489
61 P	34 -166	62 P	51 -314	63 P	64.4-457

#### Ciment 7 (32 jours + 5 mois)

71 M	52.5-234	72 M	77.6-496	73 M	88 -616
71 S	61.1-273	72 S	80.3-517	73 S	90.2-700
71 P	52.5-245	72 P	76.5-458	73 P	86 -605

#### Ciment 8 (29 jours + 5 mois)

81 M	38.9-369	82 M	48 -539	83 M	65.1-747
81 S	41.3-334	82 S	56.7-551	83 S	67.8-742
81 P	39.3-371	82 P	55 -579	83 P	67.4-787

#### Ciment 9 (32 jours + 5 mois)

91 M	53.4-236	92 M	69 -461	93 M	70.4-519
91 S	51.6-220	92 S	65.8-352	93 S	88.7-536
91 P	43 -238	92 P	61.5-419	93 P	75.9-566

#### Ciment 10 (29 jours + 5 mois)

101 M	43.3-143	102 M	61.9-272	103 M	68.6-344
101 S	39.3-144	102 S	58.8-307	103 S	70 -383
101 P	34.6-157	102 P	50.7-304	103 P	59 -390

Les âges indiqués en jours sont ceux des mortiers 2, il faut ajouter un jour pour les mortiers 1 et en retrancher un pour les mortiers 3.

### B) Bétons

Les âges sont les mêmes que ceux des mortiers correspondants. Les résultats sont les moyennes de 3 éprouvettes.

1 M	493	1 S	538	1 P	535
2 M	503	2 S	547	2 P	540
3 M	368	3 S	422	3 P	425
4 M	443	4 S	474	4 P	482
5 M	400	5 S	435	5 P	423
6 M	360	6 S	354	6 P	382
7 M	568	7 S	550	7 P	562
8 M	609	8 S	608	8 P	580
9 M	441	9 S	427	9 P	442
		10 S	404	10 P	433

## 3. — Constatations et commentaires

On n'a pas constaté d'altérations apparentes aux éprouvettes retirées de la mer.

Les éprouvettes de mortier 11 retirées de l'eau sulfatée ont les arêtes fortement émoussées; leur résistance à la flexion est très réduite. On observe la même chose sur les éprouvettes de mortier 21 retirées de l'eau sulfatée, mais d'une manière moins prononcée. Il n'y a pas d'altérations visibles de l'aspect des autres éprouvettes de mortier retirées de l'eau sulfatée, ni des cubes de béton.

Le béton 10 est le même que le béton 2, mais où l'on a substitué du sable fin des dunes à 25 % de sable du Rhin 0/2 (cf. Ch. II, paragraphe 9). On remarquera que ses résistances sont assez inférieures à celles du béton 2, plus que ne le rend plausible la légère différence d'âge, surtout pour l'immersion dans l'eau sulfatée.

## Chapitre IX — PRELEVEMENTS DU 20 AOÛT 1935 (après 11 mois d'immersion)

### 1. — Opérations

Le 20 août 1935, après 11 mois d'immersion, trois séries complètes d'éprouvettes de mortier et de béton ont été retirées des trois milieux de conservation.

A Ostende, on a retiré de la mer les caisses II, II', 2, 20 et 21 (cf. planche 4). Les opérations ont été effectuées de la même manière que le 22 février 1935, sous la direction de M.M. Campus, Dantinne et Jacquemin et en présence de M. Boehme.

Les essais mécaniques ont eu lieu au laboratoire les 21 et 22 août 1935.

### 2. — Résultats des essais mécaniques

(cf. Chapitre VIII, paragraphe 2)

#### A) Mortiers

##### Ciment 1.

11 M	30.1-186	12 M	52.1-427	13 M	76.2-576
11 S	4.78-43.7	12 S	38.1-264	13 S	87 -490
11 P	39.9-246	12 P	59.6-479	13 P	70.3-593

##### Ciment 2.

21 M	35.9-191	22 M	51 -434	23 M	71.5-551
21 S	10.9-139	22 S	62.4-408	23 C	84 -660
21 P	38.2-247	22 P	54.6-454	23 P	75.1-652

Ciment 3.

31 M	44.7-184	32 M	53.2-287	33 M	80.3-453
31 S	20.2-152	32 S	45 -301	33 S	77.4-508
31 P	37 -202	32 P	50.6-350	33 P	62.3-525

Ciment 4.

41 M	43.5-197	42 M	66.5-437	43 M	80 -522
41 S	5.77-107	42 S	45.5-367	43 S	78.2-576
41 P	39.5-193	42 P	57.3-424	43 P	69.4-561

Ciment 5.

51 M	53 -179	52 M	67.3-344	53 M	81.1-499
51 S	50.5-192	52 S	68.3-338	53 S	84.5-463
51 P	42.8-191	52 P	64.1-520	53 P	68.1-533

Ciment 6.

61 M	45.4-155	62 M	67.2-307	63 M	82.6-410
61 S	49.1-195	62 S	59.3-314	63 S	79.3-454
61 P	38.1-174	62 P	52.9-357	63 P	67.3-570

Ciment 7.

71 M	66.1-293	72 M	86.8-481	73 M	102.6-648
71 S	65.5-306	72 S	82.6-508	73 S	96.4-656
71 P	60.9-305	72 P	81.8-540	73 P	88.8-744

Ciment 8.

81 M	45.9-436	82 M	46.6-550	83 M	67.9-753
81 S	40 -340	82 S	59.5-608	83 S	66.8-693
81 P	38.5-348	82 P	58.2-683	83 P	74.3-774

Ciment 9.

91 M	61.1-263	92 M	74.3-425	93 M	78.6-512
91 S	51.6-247	92 S	68.4-411	93 S	82.3-549
91 P	44.4-225	92 P	55.6-367	93 P	72.8-545

Ciment 10.

101 M	49.6-185	102 M	70 -340	103 M	78.5-350
101 S	47.5-178	102 S	64.9-301	103 S	71.4-406
101 P	39.7-183	102 P	54.2-273	103 P	61.1-391

B) Bétons

1 M	519	1 S	535	1 P	532
2 M	505	2 S	527	2 P	523
3 M	420	3 S	428	3 P	430
4 M	472	4 S	488	4 P	468
5 M	466	5 S	445	5 P	432
6 M	428	6 S	388	6 P	410
7 M	594	7 S	594	7 P	579
8 M	659	8 S	623	8 P	599
9 M	491	9 S	459	9 P	459
		10 S	443	10 P	455

3. — Constatations et commentaires

On a constaté des dégradations apparentes aux éprouvettes suivantes retirées de l'eau sulfatée :

- 11 très fortes
- 12 légères
- 21 assez fortes
- 31 légères à assez fortes
- 41 très fortes

Les aspects sont représentés aux photographies de la planche 42. Les éprouvettes 13 S ne présentent pas de dégradations apparentes.

Ces altérations se répercutent très nettement sur les résistances à la flexion de ces mortiers.

En ce qui concerne les tableaux d'ensemble des résistances, on constate qu'ils sont encore assez réguliers. Mais on y remarque cependant déjà quelques anomalies. Elles ne sont pas encore assez caractéristiques pour faire l'objet à ce stade d'avancement des essais d'une discussion approfondie, qui ne sera vraiment étayée qu'après 11 ans d'immersion [8]. Cependant une constatation assez générale peut déjà être faite pour tous les ciments (sauf 1, 2 et 8), c'est la résistance à la flexion supérieure des éprouvettes de mortier retirées de la mer, supériorité qui n'existe pas pour la résistance à la compression. Ce phénomène est probablement dû à des croûtes superficielles cohérentes et résistantes. Vicat a déjà indiqué dans ses travaux sur la résistance des composés hydrauliques à l'action de l'eau de mer l'importance des « incrustations conservatrices » [9] H. Le Châtelier le mentionne [4, p. 175], mais il remarque ailleurs [op. cit., p. 186] que ces croûtes peuvent aussi ne constituer qu'une phase de la décomposition des ciments qui ne résistent pas à l'action de l'eau de mer. Tel n'est cependant pas le cas des ciments 6, 7 et 9, dont la résistance à la flexion est augmentée par rapport à celle des éprouvettes conservées dans l'eau potable, non seulement par l'immersion marine, mais aussi par la conservation dans l'eau sulfatée. Ceci ne peut s'expliquer que par une augmentation de la cohésion en surface.

4. — Examen des cylindres en béton contenant des armatures

A Ostende, les caisses m, m', a et a' ont été ouvertes et leur contenu retiré, examiné puis remis en place dans les caisses.

Les éprouvettes immergées dans la mer à mi-marée (caisses m et m') ne présentaient aucune dégradation. L'aspect des bétons était tout à fait sain. Les extrémités saillantes des barres d'acier étaient légèrement rouillées. En raison de ces constatations, il n'a pas paru utile

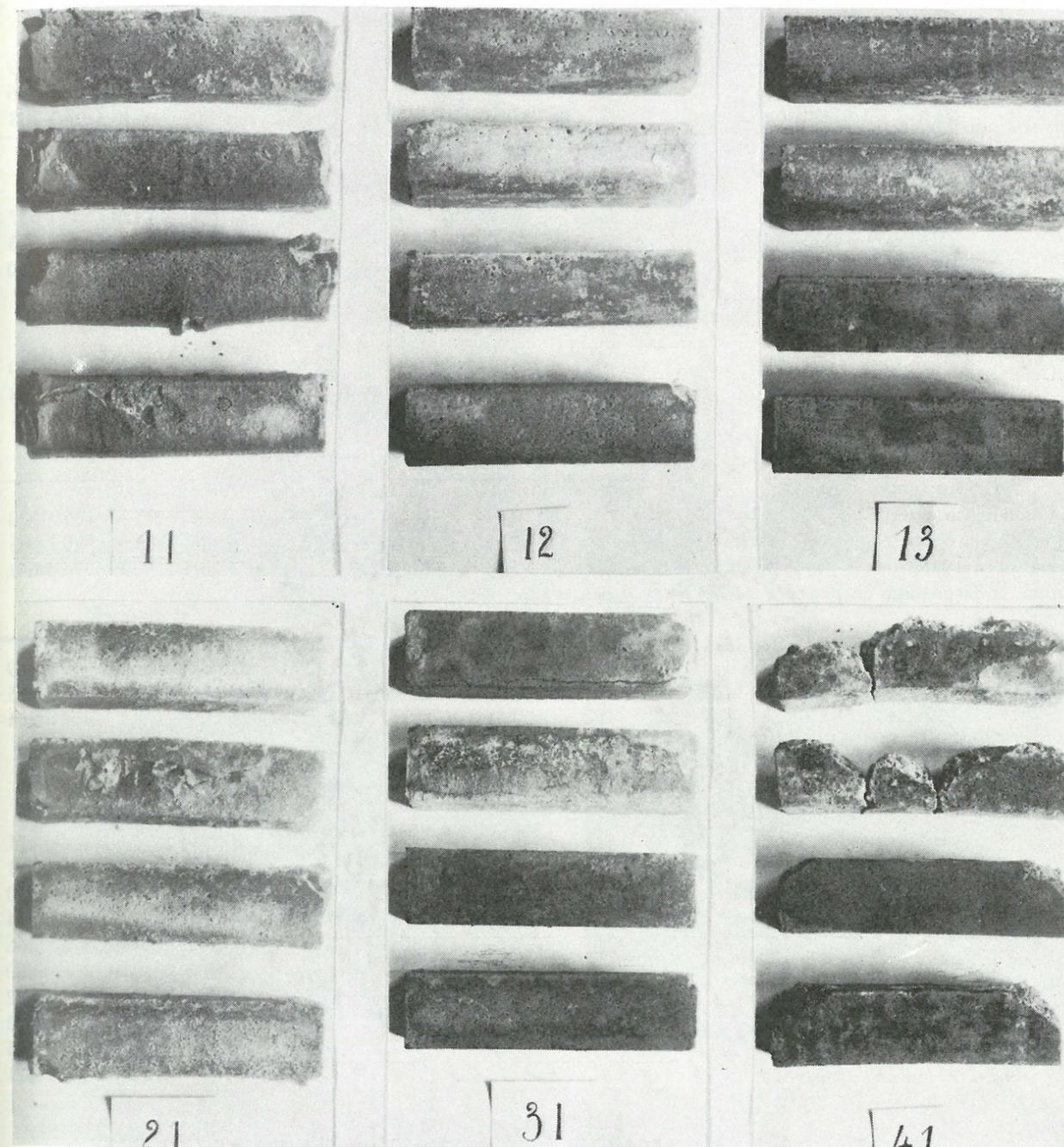


Planche 42. — Epreuves de mortier après 11 mois d'immersion dans une solution de sulfate de magnésie à 15 gr/litre.

d'examiner les éprouvettes immergées en permanence sous les plus basses mer (caisses b et b', immergées en B, pl. 3).

Quant aux éprouvettes des caisses a et a' placées sur une des palées de l'estacade au-dessus des plus hautes mers, les éprouvettes 1, 4, 6, 7 et 9 étaient intactes. Les éprouvettes 2, 3 et 5 montraient un réseau de fines gerçures superficielles à la base des cylindres sur une hau-

teur de quelques centimètres. L'éprouvette 8, en plus de ces gerçures, présentait une fissure circonférentielle très fine sur tout le pourtour du cylindre parallèlement à la base et à une distance de 4 à 5 cm de celle-ci. Ces altérations transversales étaient tout à fait indépendantes de la présence des armatures. Comme les cylindres étaient disposés debout et que les fonds des caisses pouvaient constituer des cuvettes, les bases ont pu s'imbiber d'eau

de pluie et subir des effets de gel. Les extrémités saillantes des barres étaient rouillées.

Les cylindres conservés au laboratoire n'ont montré aucune trace de dégradation du béton. Les extrémités des barres en saillie étaient rouillées, très fortement pour les cylindres enfouis dans du sable mouillé.

## Chapitre X — PRELEVEMENTS DU 24 AOÛT 1936 (après 23 mois d'immersion)

### 1. — Opérations

Le 24 août 1936, après 23 mois d'immersion, trois séries complètes d'éprouvettes de mortier et de béton ont été retirées des trois milieux de conservation.

A Ostende, on a retiré de la mer les caisses III, III', 3, 18 et 19. Les opérations ont été effectuées de la même manière qu'en 1935, sous la direction de M.M. Campus, Dantine et Jacquemin, en présence de M. Boehme.

Les essais mécaniques ont été effectués au laboratoire les 25 et 26 août.

### 2. — Résultats des essais mécaniques

#### A) Mortiers

##### Ciment 1.

11 M	28.4-184	12 M	51.8-397	13 M	80.1-623
11 S	—	12 S	—	13 S	75.5-597
11 P	42.2-265	12 P	60.3-542	13 P	83.7-724

##### Ciment 2.

21 M	31.2-186	22 M	53.3-423	23 M	72.9-626
21 S	—	22 S	32.4-377	23 S	92.3-650
21 P	41.2-273	22 P	62.6-525	23 P	80.5-665

##### Ciment 3.

31 M	39.8-160	32 M	59.2-307	33 M	83.1-462
31 S	32.8-220	32 S	46.0-377	33 S	86.1-619
31 P	47.2-227	32 P	55.6-417	33 P	71.9-601

##### Ciment 4.

41 M	51.7-224	42 M	68.2-432	43 M	94.4-582
41 S	—	42 S	39.5-407	43 S	83.4-643
41 P	45.1-244	42 P	61.9-453	43 P	74.3-636

##### Ciment 5.

51 M	54.5-234	52 M	78.4-388	53 M	90.5-514
51 S	61.4-241	52 S	78.3-383	53 S	94 -616
51 P	49.3-229	52 P	69 -497	53 P	79.4-603

##### Ciment 6.

61 M	51.1-191	62 M	74.3-330	63 M	93.3-489
61 S	54.9-224	62 S	71.2-437	63 S	90.2-556
61 P	42.5-220	62 P	58.6-433	63 P	68.5-588

##### Ciment 7.

71 M	70 -284	72 M	90.9-511	73 M	121-637
71 S	73.5-404	72 S	98.5-675	73 S	118-803
71 P	64.7-392	72 P	84.9-607	73 P	92.4-790

##### Ciment 8.

81 M	50.6-408	82 M	58.1-520	83 M	69.6-750
81 S	46.8-445	82 S	62.2-724	83 S	76.2-908
81 P	47.6-455	82 P	64.1-712	83 P	75.8-921

##### Ciment 9.

91 M	69.2-262	92 M	83.9-427	93 M	85.7-528
91 S	57.5-252	92 S	75.7-467	93 S	90.7-683
91 P	46.1-225	92 P	67.8-493	93 P	75.5-641

##### Ciment 10.

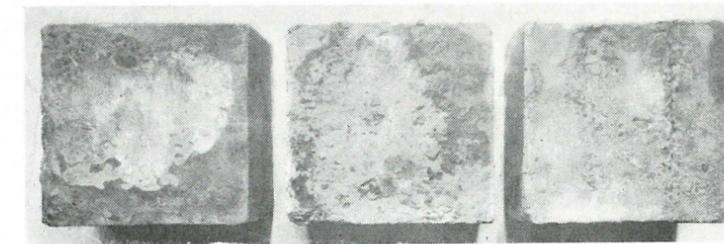
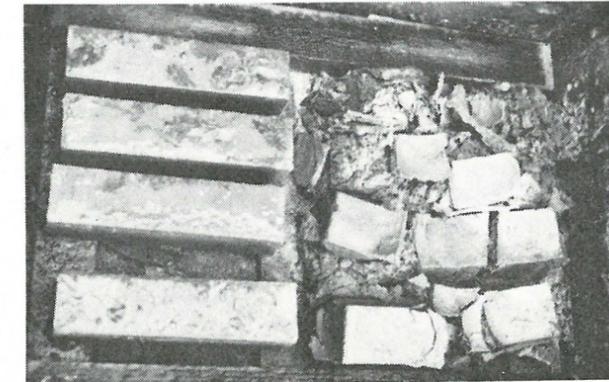
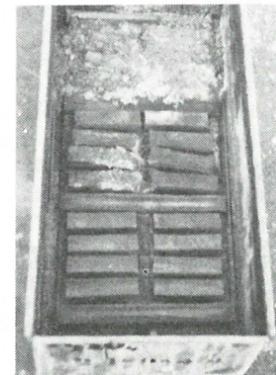
101 M	53.2-175	102 M	80.5-319	103 M	92.9-369
101 S	58.2-206	102 S	79.6-373	103 S	85.2-435
101 P	51.1-191	102 P	62.5-393	103 P	74.4-391

#### B) Bétons

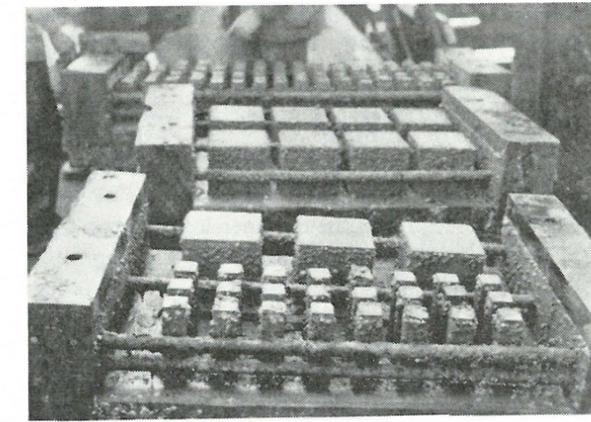
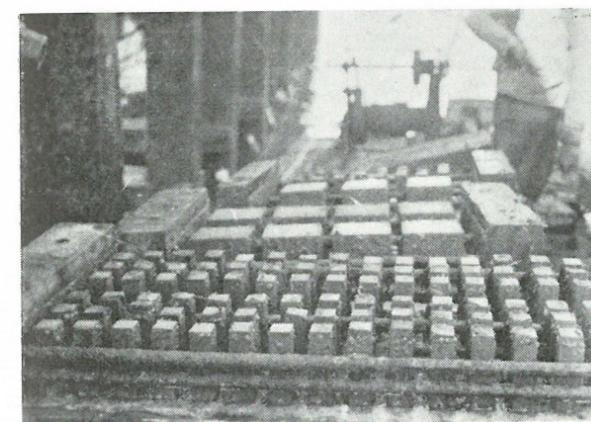
1 M	516	1 S	563	1 P	571
2 M	517	2 S	541	2 P	581
3 M	402	3 S	432	3 P	470
4 M	453	4 S	468	4 P	534
5 M	462	5 S	449	5 P	466
6 M	433	6 S	432	6 P	460
7 M	614	7 S	613	7 P	642
8 M	622	8 S	611	8 P	622
9 M	527	9 S	487	9 P	505
		10 S	363	10 P	471

### 3. — Constatations et commentaires

Les éprouvettes de mortier et de béton immergées à mi-marée dans le mer étaient recouvertes d'organismes marins. Elles ont été raclées et lavées soigneusement avant les essais. Ces éprouvettes ne présentaient pas de dégradations appréciables (pl. 43, fig. 4 et 5), même les mortiers maigres, sauf pour les éprouvettes 31 M, dont les arêtes étaient légèrement émoussées. Cependant, leur résistance à la flexion n'est pas très affectée, alors que celle des mortiers des ciments 1 et 2 pour tous les dosages est inférieure pour la conservation dans la mer à celle correspondant à la conservation en eau potable. C'est l'inverse pour tous les autres mortiers, sauf 31, ce qui



Eprouvettes conservées au laboratoire.



Eprouvettes conservées dans la mer.  
Planche 43. — Etat des éprouvettes après 23 mois d'immersion.

suggère à nouveau l'effet des « *incrustations conservatrices* » de Vicat (cf. Ch. IX, paragraphe 3).

Les éprouvettes immergées dans l'eau potable n'ont donné lieu à aucune remarque; leurs résistances ont généralement augmenté par rapport à l'année précédente.

Par contre, les dégradations déjà constatées à certaines éprouvettes conservées dans l'eau sulfatée ont pris de l'extension.

Mortier 11 S: réduit en bouillie (cf. pl. 43, fig. 1, partie supérieure gauche).

Mortier 12 S: état comparable à celui du mortier 11 S après 11 mois d'immersion (cf. pl. 43, fig. 1, partie moyenne gauche).

Mortier 13 S: les coins sont dégradés par expansion, état comparable à celui du mortier 12 S après 11 mois d'immersion (cf. pl. 43, fig. 1, partie inférieure gauche).

Mortier 21 S: réduit en bouillie (cf. pl. 43, fig. 1, partie supérieure droite).

Mortier 22 S, coins et arêtes détruits par expansion, état comparable à celui du mortier 21 S après 11 mois d'immersion (cf. pl. 43, fig. 1, partie moyenne droite).

Mortier 23 S, coins légèrement abîmés (cf. pl. 43, fig. 1, partie inférieure droite).

Mortier 31 S: l'état apparent est resté sensiblement le même qu'après 11 mois d'immersion (cf. pl. 43, fig. 2, gauche). La résistance à la flexion a d'ailleurs augmenté, comme aussi à la compression).

Mortier 32 S: coins et arêtes légèrement émousés.

Mortier 33 S: sans altérations apparentes.

Mortier 41 S: réduit en fragments souvent informes, sans consistance (cf. pl. 43, fig. 2, droite).

Mortier 42 S: dégradé aux coins et aux arêtes, aspect comparable à celui de 31 S (cf. pl. 43, fig. 2, gauche). La résistance à la flexion a diminué par rapport à l'année précédente.

Mortier 43 S intact.

Les autres éprouvettes de mortier conservées dans l'eau sulfatée ne montraient pas de dégradations apparentes; les résistances étaient assez élevées et généralement plus élevées à la flexion que pour la conservation dans l'eau potable.

Les éprouvettes de béton conservées dans l'eau sulfatée sont généralement sans altérations, à part le béton 10, identique au béton 2 sauf remplacement de 25 % de sable du Rhin 0/2 par du sable fin des dunes. Il a subi des attaques superficielles prononcées. Sur la photo 3 de la planche 43, le cube de gauche montre une face de moulage brossée et lavée, le cube du milieu une face lissée dans l'état de prélèvement, le cube de droite une face lissée après brossage et lavage. Les photographies accentuent plutôt l'aspect des dégradations. La résistance a diminué par rapport à l'année précédente.

Ces observations donnent, par leur gradation, une représentation très sélective de l'attaque et de la dégradation des divers conglomerats hydrauliques.

#### 4. — Examen des cylindres de béton contenant des armatures

Les éprouvettes cylindriques immergées à mi-marée ont été trouvées sensiblement dans le même état qu'une année auparavant. Il en a été de même des éprouvettes disposées au-dessus des plus hautes mers.

Les caisses b et b' immergées à la tête de l'écluse de la Marine (en B, pl. 3) ont été retirées. Les cylindres étaient entièrement recouverts d'organismes marins (pl. 43, photo 6). Après raclage et grattage, on a constaté que ces cylindres ne présentaient aucune dégradation. A noter que les extrémités saillantes des barres d'acier avaient un aspect de métal poli. Après remise en place des éprouvettes dans leurs caisses, celles-ci ont été remises à leurs places désignées.

Au laboratoire, aucune altération n'a été constatée à aucune cylindre. Les extrémités des barres des cylindres conservés sous sable mouillé d'eau potable ou d'eau sulfatée sont très corrodées.

(A suivre)

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 Deel)

*In 1934, werden de « Laboratoires d'Essais des Constructions du Génie Civil et d'Hydraulique fluviale » van de Universiteit te Luik door het Bestuur van Bruggen en Wegen belast met een omvangrijke vergelijkende studie aangaande het gedrag in het zeewater te Oostende van diverse cementsoorten welke toen op de Belgische markt werden aangetroffen.*

*Volgens het opgesteld programma, werden vooraf acht hydraulische middelen uitgekozen. Twee Portlandcementen, waaronder een snel verhardend cement en een normaal cement. Dit laatste is eveneens beproefd geworden met toevoeging van 50 % in gewicht gemalen tras. Vervolgens drie metaalcementen, namelijk een hoogovencement, met hoge weerstand en een normaal hoogovencement, alsmede een normaal permetaalcement. Ten slotte, een Belgisch overgesulfateerd cement. Als vergelijking werd er eveneens een vreemd cement aan toegevoegd: het aluminiumcement (smeltcement) Lafarge.*

*Op het uitdrukkelijk verzoek van een metaalcementfabriek, voegde men er tevens nog een speciaal hoogovencement aan toe, onder de benaming « zeecement ». Ten slotte werd, voor een deel van de proeven, ook nog een vreemd trasscement gebruikt.*

*De proeven werden voornamelijk uitgevoerd op prismatische mortelproefstukken van 4 × 4 × 16 cm en betonkubussen van 16 cm zijde. De mortels werden bereid volgens drie mengverhoudingen, namelijk 300, 450 en 600 kg cement per m<sup>3</sup> rivierzand 0/2 mm, over het algemeen natgemaakt met 11 % in gewicht water ten opzichte van de droge materialen. Het beton was van het klassiek type met 350 kg cement per m<sup>3</sup>, 800 l riviergrint 5/15 mm en 400 l zand 0/2 mm (E : C = 0,452).*

*Met dit beton werden bovendien cilinders vervaardigd van 15 cm diameter en 30 cm hoogte, met ingesloten staven van 1 cm diameter in zacht staal, evenwijdig met de omschrijvende van de cilinder geplaatst, op respectieve afstanden van 1, 2, 3 en 4 cm van het cilindervlak.*

*De gebruikte cementsoorten werden genomen op diverse bouwplaatsen of in de opslagplaatsen van de cementfabrieken. De diverse grint- en zandsoorten werden eveneens aan de stapels van de bouwplaatsen ontgenomen. Voor het vervaardigen van de talrijke proefstukken, diende een zeer systematisch programma gevolgd te worden. Al de proefstukken van een zelfde mortel (100)*

werden dezelfde dag vervaardigd. Er waren dus 3 dagen nodig per cementsoort (drie mengverhoudingen). In de loop van deze 3 dagen, werden eveneens 72 betonkubussen en 6 betoncilinders vervaardigd. Voor de 8 eerste cementsoorten, greep het werk plaats in 24 dagen, namelijk van 1 tot 24 augustus 1934, zonder onderbreking. Voor de beide laatste cementsoorten, greep de vervaardiging van de proefstukken plaats van 3 tot 7 september 1934. De verschillende cementsoorten zijn aangeduid door een volgnummer :

1. Snelverhardend Portlandcement.
2. Normaal Portlandcement.
3. Cement 2 met toevoeging van 50 % in gewicht gemalen tras.
4. Hoogovencement met hoge weerstand.
5. Normaal hoogovencement.
6. Normaal permetaalcement.
7. Overgesulfateerd cement Sealithor.
8. Aluminiumcement (smeltcement) Lafarge.
9. Zeecement.
10. Trasszement 50/50.

Voor de 9 eerste cementsoorten werden de volledige vergelijkende proeven uitgevoerd. Voor cement 10 heeft men zich enkel beperkt tot de proeven op mortelstaafjes.

Voor het vervaardigen van de proefstukken werd de numerieke volgorde gevolgd, zodat de cementsoorten welke de meest kwetsbare werden geacht in de agressieve milieus werden ondergedompeld op de meest gevorderde ouderdom. De onderdompelingen grepen plaats op 20 september 1934 (cementsoorten 1 t/m 8) en op 5 oktober 1934 (cementsoorten 9 en 10).

Deze onderdompelingsmilieu's waren de volgende. Te Oostende, werden de proefstukken, nadat zij in open-gewerkte, daartoe geschikte kisten waren geplaatst, bevestigd op een platform van het staketsel aan de ingang van de vloedkom van de vissershaven, ongeveer op halftijpeil. Men mag aannemen dat zij gemiddeld tijdens de twee derden van de tijd ondergedompeld bleven. In het Laboratorium werden proefstukken blijvend en in gelijk aantal ondergedompeld in bakken, gevuld enerzijds met drinkwater, anderzijds met een oplossing van 15 g gekristalliseerd magnesiumsulfaat per liter.

Het gezamenlijk aantal proefstukken volstond om tot vergelijkende mechanische proeven over te gaan op 7 verschillende ouderdommen, namelijk na 6 maand, 12 maand, 2 jaar, 4 jaar en 6 jaar, daarna op twee later vast te stellen ouderdommen. De voorziene mechanische proeven omvatten de breuk door buiging en onder druk

voor de mortels, en de breuk onder druk voor de betonkubussen.

Men vervaardigde in totaal

- 3.000 mortelstaafjes, waarvan er 840 in zee werden ondergedompeld;
- 696 betonkubussen, waarvan er 189 in zee werden ondergedompeld;
- 57 betoncilinders, waarvan er 18 in zee werden ondergedompeld.

Het zoutgehalte van het water in de havengeul te Oostende is wisselbaar, ten gevolge van de min of meer belangrijke afvoer van zoet water bij laagtij. Het verschil tussen eb en vloed bedraagt gemiddeld 3 m bij doodtij en 4 m 50 bij springtij. Het klimaat langs de belgische kust is tamelijk streng in de winter, en vorstdagen komen nogal vaak voor. Gedurende de dertigjarige waarnemingsperiode, zijn er 3 periodes van strenge koude geweest, namelijk in januari 1940, in februari 1956 en in januari en februari 1963. De uitzonderlijke stormvloed van 1 februari 1953 heeft aanzienlijke schade berokkend langs de kust. Zij bracht de verdwijning met zich van de kist met gewapend-betoncilinders, die blijvend beneden laagtij was ondergedompeld.

De bewerkingen in verband met het vervaardigen van de proefstukken, het plaatsen in de kisten en het onderdompelen konden zonder noemenswaardige incidenten doorgaan, volgens het vooropgezet programma. Hetzelfde geldt voor de 4 eerste monsternemingen, op de ouderdommen van 6 maand (22 februari 1935), 12 maand (20 augustus 1935), 2 jaar (24 augustus 1936) en 4 jaar (1 september 1938).

De vijandelijkheden van de 2<sup>e</sup> wereldoorlog hebben het gevolg van de operaties verstoord. Niettegenstaande de schade welke in de haven van Oostende werd aangericht, en alhoewel de laboratoria praktisch volledig vernield werden door de luchtbombardementen van 1944, werden de 3 laatste reeksen van proefstukken gaaf teruggevonden. De laatste monsternemingen grepen plaats na 11 jaar (8 en 9 oktober 1945), 20 jaar (26 september 1954) en 30 jaar (1 april 1964). Men had geen andere verliezen te boeken dan de reserves aan de diverse cementsoorten, van 20 kg ieder, die men dienstigheidshalve in gelaste metalen dozen had bewaard.

Hetgeen voorafgaat maakt de samenvatting uit van de hoofdstukken I en II.

Het hoofdstuk III bevat de resultaten van de keuringsproeven van de cementsoorten, op normale geslagen mortel alsmede op plastische mortel na 28 dagen. Het bevat eveneens de aanvankelijke mechanische proeven, uitgevoerd op de dag zelf van de onderdompeling, zowel op de mortelstaafjes als op de betonkubussen. Ten slotte bevat dit hoofdstuk de chemische analyses van de cementsoorten, volgens de voorschriften van het Bestuur van Bruggen en Wegen welke in 1934 in voege waren.

Al deze vergelijkings- en identificatieproeven tonen aan dat de gebruikte cementsoorten van uitmuntende kwaliteit waren en dat zij voldeden aan de thans geldende normen. Het cement nr 2, in het bijzonder, was veel eer een Portlandcement met hoge weerstand dan een normaal Portlandcement.

In het hoofdstuk III worden bovendien de kenmerken aangegeven van het tras dat voor het mengsel 3 werd gebruikt. De korrelsamenstellingen van het grint en van de zandsoorten komen voor in het Hoofdstuk II.

Alhoewel het vooropgezette doel van deze proeven essentieel van praktische aard was, is het niettemin nuttig gebleken eveneens over te gaan tot een vergelijkend onderzoek in verband met bepaalde kenmerken van de gebruikte cementsoorten, die door middel van de identificatieproeven van het Hoofdstuk III niet aan het licht treden.

Het Hoofdstuk IV is gewijd aan de proeven Le Chatelier-Anstett in verband met de weerstand tegen de sulfaten. Het gaat hier in feite om een proef « alles of niets », waaraan een klein aantal cementsoorten kunnen voldoen naargelang van hun aard en van hun verhardingsproces. Dit is namelijk het geval voor de cementsoorten 7 en 8, doch de metaalcementen 4, 5 en 6 dienen onder deze gerangschikt die het snelst ontbinden.

Het Hoofdstuk V zet de resultaten uiteen van krimpmetingen die tot na 365 dagen werden uitgevoerd op proefblokjes van zuiver deeg, mortel en beton, bewaard aan de lucht met 75 % vochtgehalte, in drinkwater en in sulfaathoudend water à 1,5 %. De krimp van de mortel is gemiddeld gelijk aan de 2/3<sup>e</sup> van de krimp van het zuiver deeg, deze van het beton, aan 1/10<sup>e</sup> daarvan. De betonsoorten die in drinkwater werden bewaard vertonen een negatieve krimp; dit zwellingsverschijnsel is nog meer uitgesproken in sulfaathoudend water. Het cement 7 gedraagt zich op een bijzondere wijze. Het vertoont minder krimp dan de andere cementsoorten en zwelt sterker wanneer het ondergedompeld is.

Het Hoofdstuk VI handelt over geforceerde filtratieproeven, doorheen speciale proefstukken uit tamelijk magere mortel (420 kg cement per m<sup>3</sup> fijn zand) onder een druk van 1 kg/cm<sup>2</sup>, van gedistilleerd water, (tamelijk hard) drinkwater en sulfaathoudend water à 3 ‰. Het is moeilijk de tamelijk ingewikkelde resultaten van deze proeven, die nochtans nogal selectief zijn, samen te vatten. Het cement 7 verschaft een praktisch volledige ondoorlatendheid. Het bindmiddel 3, daarentegen, voert tot een zodanig debiet dat de proef niet kon worden voortgezet. De cementsoorten 1 en 2 zijn betrekkelijk minder impermeabiliserend dan de andere, 4, 5, 6 en 8, waarvan de gedragingen tamelijk similair en van middelmatige aard zijn. De filtraten van de mortels 1, 2 en 3 bevatten het meest kalk ontnomen aan de bindmiddelen; deze mortels zijn tevens deze welke het minst ions SO<sub>4</sub> bevatten. De proeven konden niet langer dan circa 500 uren worden voortgezet, omdat na die tijd de meeste proefstukken min of meer gecolmateerd waren. Deze duur volstond niet opdat zichtbare alteraties zouden kunnen worden waargenomen onder de invloed van het sulfaathoudend water. De analyse van de filtraten wees niettemin op een interne chemische alteratie.

Het Hoofdstuk VII geeft de resultaten van de metingen van de hydratatie-warmte ontwikkeld in 72 uren voor de cementen 1 t/m 9, bepaald volgens een modaliteit van de zogenaamde thermofles-methode (of methode van de Dewar-recipiënt). De resultaten onderscheiden zich sterk van elkaar en, behoudens voor het aluminiumcement (smeltcement) 9, waarvan de hydratatie het meest warmte ontwikkeld, zijn de cementen die het best weerstaan aan de inwerking van het zee-water ook deze die het minst warmte ontwikkelen. Deze beide eigenschappen spruiten voort uit hun samenstelling. Zij zijn niet onverenigbaar voor de grote betonmassieven die men dikwijls in de bouwwerken aan zee aantreft: kaaimuren, sluiswanden, grote blokken, enz..., wanneer deze slechts na hun verharding aan de actie van de zee worden blootgesteld. Nochtans, indien de geringe warmteontwikkeling overeenstemt met een zeer trage verharding, is zij geenszins aangewezen voor de betonsoorten die van bij de aanvang van de verharding aan de actie van de zee worden blootgesteld, namelijk voor deze die rechtstreeks onder water worden gestort.

Het derde deel van het verslag handelt over de proeven en waarnemingen die werden uitgevoerd op de mortel- en betonproefstukken welke uit de drie bewaaringmilieu's werden gebaald bij de opeenvolgende monsternemingen van 1935 tot 1964. Het Hoofdstuk VIII betreft de monsterneming van 22.2.1935, na 5 maand onderdompeling. De proefstukken waren toen minstens 6 maand oud op het ogenblik van de proeven. Men stelt praktisch geen alteraties vast, behoudens enkele aan-

vankelijke sporen bij de mortels 11 en 21 die in sulfaat-houdend water werden bewaard.

Het Hoofdstuk IX betreft de monsterneming van 20.8.1935, na 11 maand onderdompeling. De alteraties van bepaalde mortelproefstukken, die in sulfaathoudend water werden bewaard (11, 12, 21, 31 en 41), hebben zich vermenigvuldigd en zijn duidelijker merkbaar geworden. De buigvastheden van de mortelproefstukken die uit de zee werden genomen liggen hoger dan deze van de overeenkomstige proefstukken die in drinkwater werden bewaard, dit wegens oppervlakkige incrustaties waarvan Vicat en Le Châtelier de functie, hetzij conservatief of als ontbindingsfaze, hebben omschreven. Aangaande de betonkubussen en de betoncilinders valt niets op te merken.

Het Hoofdstuk X handelt over de monsterneming van 24.8.1936, na 23 maand onderdompeling. De mortelproefstukken die uit de zee werden gebaald beginnen sporen van aantasting te vertonen voor de bindmiddelen 1, 2 en 3. In het sulfaathoudend water, hebben de reeds uitgesproken aantastingen na 11 maand onderdompeling voor de mortels met de cementsoorten 1, 2, 3 en 4 zich zodanig uitgebreid dat bepaalde proefstukken er volledig door vernield werden. Niets aan te merken voor wat de betonkubussen en de betoncilinders betreft, behoudens voor de kubussen van het beton 10, bereid met het cement 2, doch waarbij 25 % Rijnzand werd vervangen door fijn duinzand, en die oppervlakkige alteraties beginnen te vertonen tengevolge van de bewaring in het sulfaathoudend water.

(wordt vervolgt)

## ETUDE DES PONTS COURBES

par

**Marcel J. M. RENARD**

Ingénieur Civil des Constructions  
Aspirant du F.N.R.S.

### Première partie : BREVE ETUDE COMPARATIVE DE PLUSIEURS METHODES DE CALCUL DES PONTS COURBES

Nous avons étudié différentes méthodes de calcul des ponts courbes, dont nous donnons ci-après un bref résumé, ainsi que quelques résultats obtenus :

1) Théorie des ponts courbes; J. COURBON — Annales des Ponts et Chaussées — Sept.-Oct. 1961, p. 611.

2) Berechnung eines statisch unbestimmt gestützten und senkrecht zu seiner Ebene beliebig belasteten geschlossenen Kreisringes.  
W. SWIDA — Ingenieur Archiv XVIII (1950) p. 242.

3) Zur berechnung gekrümmter Brücken.  
C.MENN — Schweizerische Bauzeitung 1964 — Heft 12 p. 185.

4) Pont courbe considéré comme une poutre à axe brisé.  
W. WIERZBICKI. — Publications préliminaires du Congrès de l'A.I.P.C. — Août 1964, RIO DE JANEIRO p. 638.

5) Ein Beitrag zur Berechnung von gekrümmten Durchlaufträgern mit starrer und elastischer Torsionseinspannung über den Stützen.  
G. BRETTHAUER und F. NÖTZOLD — Der Bauingenieur (1964) Heft 10 p. 402.

Ces théories s'appliquent à des ponts dont les appuis n'ont qu'une seule liberté de rotation, dans le plan tangent, et ne permettent donc pas une rotation dans le plan radial sous l'effet des moments de torsion.

### NOTATIONS ET CONVENTIONS DE SIGNES (Fig. 1)

M : Moment de flexion  
C : Moment de torsion  
T : Effort tranchant  
EI : Rigidité flexionnelle  
GK : Rigidité torsionnelle  
S' : Section réduite  
 $\lambda_i$  : Ouverture angulaire d'une travée i  
 $r_i$  : Rayon de courbure de la travée i  
 $\theta$  : Abscisse angulaire de la section considérée

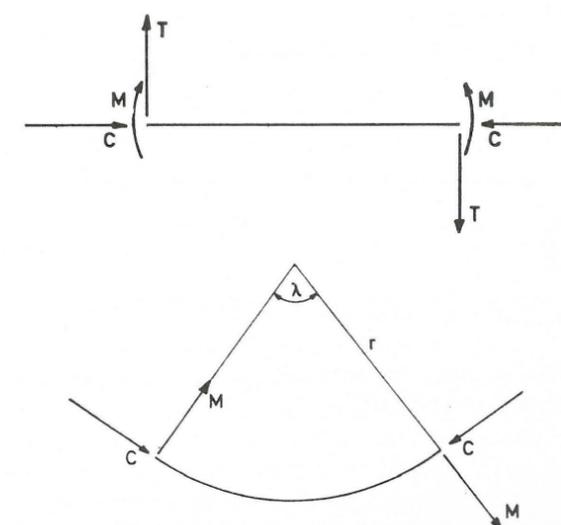


Fig. 1. — Sens conventionnel positif des éléments de réduction.