

**Association Belge pour l'Étude
l'Essai et l'Emploi des Matériaux**
(A. B. E. M.)

**ESSAIS DE RÉSISTANCE DES CIMENTS
A L'EAU DE MER.**

Exposé fait sous les auspices de l'Administration des Ponts et Chaussées,

PAR

M. CAMPUS,

Professeur et Directeur du Laboratoire du Génie civil
à l'Université de Liège.

PROCÈS - VERBAL

de la cent trente-sixième séance
tenue le 31 octobre 1945 à 16 heures

A L'HOTEL RAVENSTEIN
3, rue Ravenstein, à Bruxelles

BRUXELLES

AD. GOEMAERE, IMPRIMEUR DU ROI, ÉDITEUR

21, rue de la Limite

1945

PROCES-VERBAL

de la cent trente-sixième séance de l'Association Belge pour l'Etude, l'Essai et l'Emploi des Matériaux, tenue le 31 octobre 1945, à l'Hôtel Ravenstein, 3, rue Ravenstein, à Bruxelles.

La séance est ouverte à 16 heures.

Présidence : M. RABOZÉE.

ORDRE DU JOUR :

Communication de M. CAMPUS, Professeur et Directeur du Laboratoire du Génie Civil à l'Université de Liège sur : « Essais de résistance des ciments à l'eau de mer », sous les auspices de l'Administration des Ponts et Chaussées.

Membres présents : MM. Baude, Bijls, Blondiau, Campus, Contempré P., Contempré M., Dalimier, Dantinne, Delesenne, Demollin, De Grave, De Jaer, Dufosse, Dutron, De Geynst, Eggericx, Feron, Flipot, Herman, Jaspers, Lejeune, Lemaire, Lepingle, Paduart, Pohl, Rabozée, Santilman, Soete, Thuilleaux, Van Volsom, Vereecken, Verschelde.

Membres excusés : MM. Batta, Bockholtz, Chaufoureau, Daubresse, De Cuyper, Verschave.

La parole est donnée à M. CAMPUS pour l'exposé de sa communication sur :

Constatations récentes et précautions nouvelles à l'égard de la décomposition des mortiers et bétons dans l'eau de mer.

PAR

F. CAMPUS,

Professeur à l'Université de Liège,

R. DANTINNE,

Chef de travaux à l'Université de Liège, ET

E. VERSCHOORE,

Ingénieur en Chef-Directeur

J. DOOMS,

Ingénieur principal

J. VERSCHAVE,

Ingénieur

des Ponts et Chaussées.

CHAPITRE PREMIER.

Essais de résistance de ciments à l'eau de mer.

Au début de l'année 1934, le Ministère des Travaux Publics a chargé M. le Professeur F. Campus, de l'Université de Liège, d'examiner la résistance à l'eau de mer d'une gamme de ciments couramment employés en Belgique. Un programme de ces essais a été dressé d'accord avec M. E. Verschoore, Ingénieur en Chef-Directeur du Service spécial de la Côte, et avec M. G. De Cuyper, Ingénieur principal, Chef du Service spécial des Ouvrages d'Art, et portant sur les liants suivants :

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

Tous ces ciments ont été approvisionnés de commun accord par l'Administration des Ponts et Chaussées et le Laboratoire d'essais des constructions du Génie Civil de l'Université de Liège.

A. — Programme des essais.

Le nombre des essais prévus dans le programme primitif pour ces différents ciments et les résultats obtenus jusqu'ici sont tellement considérables, qu'il faut forcément se borner dans le cadre de ce rapport aux essais et aux résultats moyens les plus intéressants. Conformément au programme il a été procédé à la confection d'un grand nombre d'éprouvettes de mortier, de béton et de béton armé.

1) *Mortiers.*

Des éprouvettes de mortiers de trois dosages ont été confectionnées avec les différents liants et ont été conservées ou sont conservées encore maintenant dans l'eau potable, dans l'eau de mer et dans une solution de sulfate de magnésie de concentration triple de celle de l'eau de la Mer du Nord; c'est-à-dire dans une solution contenant 15 grammes de sulfate de magnésie par litre d'eau. Ces éprouvettes sont en forme de prismes de 4 × 4 × 16 cm.

Chaque essai se fait sur quatre éprouvettes permettant ainsi quatre essais de flexion et quatre essais de compression sur les fragments.

Les trois dosages de mortiers plastiques sont :

300 kg.	} de ciment pour 1.500 kg. de sable du Rhin 0-2 sec. (module de finesse 2,462).
450 kg.	
600 kg.	

Lors de leur confection la quantité d'eau de gâchage était 11 % du poids des matières sèches. Toutefois pour le liant X Trasszement, la quantité d'eau a dû être portée de 11 % à 13,1 % du poids des matières sèches afin d'obtenir la même travaillabilité et la même plasticité. Tous

ces mortiers contenaient le minimum d'eau compatible avec une mise en œuvre aisée et régulière.

Afin d'assurer la plus grande uniformité dans la composition des éprouvettes, toutes celles correspondant à un dosage et à un liant ont été confectionnées le même jour et en une seule gâchée. Elles ont été démoulées le lendemain et conservées à l'air humide jusqu'au 28^e jour après la confection de la dernière série. Alors elles ont été immergées par tiers dans l'eau potable, dans l'eau sulfatée au Laboratoire et dans l'eau de mer au port d'Ostende.

Le même jour une série complète d'éprouvettes a été soumise aux essais, les résultats de ces essais devant servir de point de départ pour l'observation de l'évolution des résistances pendant le séjour dans l'eau de mer.

Toutes les éprouvettes immergées ont été numérotées et classées de manière à les identifier facilement. Celles qui ont été immergées à la mer étaient placées dans des caisses à claire-voie en réservant un jeu d'environ 2 cm. entre chaque éprouvette, par un double réseau de lattes sur les fonds.

Comme durée de séjour dans l'eau il a été adopté de prendre sept délais : 5 mois — 11 mois — 23 mois — 47 mois — 6 ans. Les deux autres délais seraient déterminés suivant le tableau des résultats obtenus après 6 ans.

Le nombre total des éprouvettes de mortiers s'élevait donc à :

$$4 \times 3 \times 10 \times (7 \times 3 + 1) = 2.640, \text{ dont } 840 \text{ immergées à la mer :}$$

- 4 : nombre d'éprouvettes par essai.
- 3 : nombre de dosages.
- 10 : nombre de liants.
- 7 : nombre de délais de conservation.
- 3 : nombre de milieux de conservation.
- 1 : essai de départ.

2) Bétons.

Comme pour les mortiers on a également confectionné des éprouvettes en béton pour les trois milieux, eau potable — eau de mer — eau sulfatée — et pour sept âges. Ce sont des cubes de 16 cm. de côté ayant un poids d'environ 10 kg. et qui après chaque délai de conservation sont soumis aux essais de compression.

Le dosage de ces cubes est le suivant :

	Kg/m ³	% du poids du mélange sec
Gravier de Meuse 5/20	1.250	56,2
(module de finesse 6,375)		

	Kg/m ³	% du poids du mélange sec
Sable du Rhin 0/2	630	28,1
(module de finesse 2,462)		
Liant	350	15,7
Eau	158	7,1
	<hr/>	
	2.388	
ciment		
Rapport $\frac{\text{ciment}}{\text{eau}}$	2,21	

La proportion de sable et de gravier a été déterminée de façon que le mélange gravier — sable — ciment réponde le plus possible au point de vue granulométrique à la loi de Fuller Bolomey.

Les éprouvettes en béton de ce dosage ont été confectionnées seulement pour les neuf premiers liants à l'exception donc du « Trassement ». Pour ce dernier on n'a pas fait d'éprouvettes en béton.

Le nombre d'éprouvettes s'élevait donc à :

$$3 \times 9 \times (3 \times 7 + 1) = 594, \text{ dont } 189 \text{ immergées à la mer :}$$

- 3 : nombre d'éprouvettes par essai.
- 9 : nombre de liants.
- 3 : nombre de milieux de conservation.
- 7 : nombre de délais de conservation.
- 1 : essai de départ.

3) *Eprouvettes en béton armé.*

Des éprouvettes cylindriques normales américaines de 15 cm. de diamètre et de 30 cm. de hauteur ont également été immergées dans l'eau de mer ou sont conservées au laboratoire à l'air, dans l'eau potable et dans l'eau de mer artificielle. Elles sont pourvues de quatre armatures ligaturées formant les génératrices d'un cylindre de 10 cm. de diamètre excentré par rapport au moule, de 1,5 cm. de façon que l'une des armatures soit à 1 cm. de la surface, une seconde à 4 cm. et les deux autres à 2,5 cm. Trois séries de ces éprouvettes ont été placées à la mer, l'une immergée complètement, une seconde soumise au mouvement des marées et une troisième exposée à l'air salin. Ces éprouvettes ne sont pas soumises à des essais. Toutefois un examen attentif après chaque délai permet de juger de leur état de conservation.

4) *Autres essais.*

Divers essais de Laboratoire étaient également prévus en vue de l'identification des ciments. Parmi ceux-ci sont spécialement à noter

les essais qui permettent ou bien de juger de la résistance des ciments à l'eau de mer, ou bien dont il est intéressant de comparer les résultats avec les constatations faites aux éprouvettes de mortier et de béton. C'est le cas de l'analyse chimique des ciments et des essais Le Châtelier-Anstett.

B. — Premiers résultats des essais.

Depuis 1934 plusieurs essais ont déjà été faits et quoique le programme complet soit loin d'être achevé, les premiers résultats peuvent toutefois déjà donner des indications sur la tenue des divers ciments à l'eau de mer.

1) *Analyse chimique.*

Les méthodes d'analyse recommandées par la commission américaine de standardisation (Standard Methods of Chemical analysis — W. W. Scott) ont été suivies.

Perte au feu : calcination au creuset de platine fermé.

Si O₂ : insolubilisation par HCl concentré. Correction à l'acide fluorhydrique.

R₂O₃ : comprend les oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse. Double précipitation par l'ammoniaque.

Ca O : double précipitation par l'oxalate ammoniac.

Mg O et S O₃ : méthodes du cahier général des charges belge.

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

Alcalis : méthode de Lawrence Smith.

Le tableau suivant donne la composition des divers ciments :

TABLEAU I.

Analyse chimique.

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

2) *Essai Le Chatelier-Anstett.*

L'hydratation des ciments a été faite suivant trois modes différents, par addition et gâchage de 30, 40 et 50 % d'eau distillée. Les pâtes ainsi préparées ont été placées en atmosphère humide. Après 24 h. les pâtes à 40 et 50 % ont été immergées dans l'eau distillée. — 14 jours après gâchage elles ont été concassées en petits morceaux passant au tamis de 2,36 mm. de jour, et séchées à l'étuve à 50° C., puis additionnées de 50 % de leur poids de gypse hydraté, séché dans les mêmes conditions. Ces mélanges ont été réduits à la température ordinaire, en poudre homogène dans un petit désintégrateur à barres à la finesse du tamis de 900 mailles par cm². La poudre ainsi obtenue a été humectée par 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/cm², appliquée pendant deux minutes. Les éprouvettes, ainsi obtenues, suffisamment agglomérées pour être manipulables ont été mesurées (diamètre), pesées et déposées sur un support constitué par 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, le plan supérieur de la plaque de verre se trouvant à 10 cm. au-dessus de la surface de l'eau. Le tout était mis sous cloche avec joint hydraulique.

L'essai Le Chatelier-Anstett a été fait avec les neufs premiers ciments marqués I à IX suivant les trois modes différents et toutes les éprouvettes ont été faites en double soit 6 éprouvettes par ciment. Les éprouvettes ont été observées sous trois points de vue :

1° *Le gonflement*, qui a été évalué par l'augmentation du diamètre en pourcents du diamètre au démoulage. Le tableau donne cette augmentation après environ 120 jours.

2° *L'augmentation* du poids en pourcents du poids initial. Le tableau donne l'augmentation du poids après 28 jours environ, c'est-à-dire au moment où la plupart des éprouvettes n'étaient presque plus manipulables.

3° *La consistance* évaluée par l'enfoncement de l'aiguille de Vicat (1 mm² de section, 300 gr. de charge). Le tableau donne le nombre de jours après lesquels l'éprouvette était complètement traversée par l'aiguille (Tr.) ou bien, l'enfoncement en mm. après 120 jours.

Les résultats figurent dans le tableau suivant :

TABLEAU 2.

Essais Le Châtelier-Anstett.

Ciments	% d'eau d'hydratation	Augmentation du diam. en % par rapport au diam. primitif (80,2mm) après 120 j.	Poids primitif des éprouvettes	Augmentation du poids en % par rapport au poids primitif après 28 jours	Tr. Nombre de jours	Enfoncement de l'aiguille de Vicat après environ 120 jours	Observations	
I. P.A.D.R.	30 %	42,5	206	48,5	21	Tr.	} Relativement peu de résistance à l'essai Le Châtelier-Anstett.	
	40 %	42,5	198,5	90	10	»		
	50 %	44	192	105	10	»		
II. P.A.N.	30 %	29	204,5	50	62	»		
	40 %	31	198	68	16	»		
	50 %	37,5	191,5	82	10	»		
III. 2/3 P.A.N. + 1/3 Trass.	30 %	32,5	199,5	57	122	»		
	40 %	35	174	97	21	»		
	50 %	37,5	191,5	80	28	»		
IV. H.F.H.R.	30 %	57	209	127	3	»	} Très peu de résistance à l'essai Le Châtelier-Anstett.	
	40 %	60	202	162	1	»		
	50 %	61	186	160	1	»		
V. H.F.N.	30 %	59	206	137	9	»		
	40 %	66	200,5	187	1	»		
	50 %	64	196	194	1	»		
VI. Permét. N.	30 %	44	196	94	15	»		
	40 %	54	191	153	3	»		
	50 %	56	183	166	1	»		
VII. Sursulfaté	30 %	0,75	194	39	—	0	} Grande résistance à l'essai Le Châtelier-Anstett.	
	40 %	0,5	194	36,5	—	0		
	50 %	0,6	186	39	—	0		
VIII. C. Fondu Lafarge.	30 %	1,2	207	36	—	0		
	40 %	1,6	203,5	35	—	0		
	50 %	1,4	196	37	—	0		
IX. C. Marin	30 %	> 7,5	206	40	—	0		} (1)
	40 %	> 13	199	58	—	0		
	50 %	> 17,5	193	74	—	0		

(1) Après 120 jours, croûte superficiellement dure; l'intérieur ramolli à l'état e pâte; éprouvettes crevassées et disloquées.

3) *Essais de flexion et de compression des éprouvettes de mortier.*

Résultats résumés dans les tableaux 3-4-5-6-7-8.

TABLEAU 3.

Essais de flexion en mortier plastique.

Conservé en	}	1. Eau de mer.
		2. Eau sulfatée (15 gr. Mg. S O ₄ /litre d'eau).
		3. Eau potable.
Composition du mortier :	}	1.500 kg. sable du Rhin 0/2 sec.
		300 kg. liant.
		11 % d'eau du poids des matières sèches.
		(13,1 pour le mortier avec trasszement).

Résistance en kg/cm².

Ciments	Essais après 28 jours	Après :			
		5 mois	11 mois	23 mois	47 mois
		d'immersion			
I. P.A.D.R.	28,24	34	30,1	28,4	28,1
		12,6	4,78	0	0
		34,6	39,9	42,2	41,3
II. P.A.N.	31,6	34	35,9	31,2	32,8
		21,5	10,9	0	0
		36,3	38,2	41,2	45,6
III. 2/3 P.A.N. + 1/3 Trass.	25,6	37,6	44,7	39,8	22,9
		28,4	20,2	32,8	20,7
		37,1	37	47,2	46,4
IV. H.F.H.R.	36,1	42,2	43,5	49,6	54
		35,4	5,77	0	0
		36,1	39,5	45,1	47,2
V. H.F.N.	31,5	53,7	53	54,5	64,1
		45,5	50,5	61,4	63,1
		37,7	42,8	49,3	51,1
VI. Permét. N.	26,2	41,5	45,4	51,1	60,2
		43,3	49,1	54,9	57
		34	38,1	42,5	45,4
VII. Sursulfaté	37,6	52,5	66,1	70	79,7
		61,1	65,5	73,5	78,7
		52,5	60,9	64,7	70
VIII. C. Fondu Lafarge	49,4	38,9	45,9	50,6	51,8
		41,3	40	46,8	56
		39,3	38,5	47,6	52,9
IX. C. Marin	36,2	53,4	61,1	69,2	74,5
		51,6	51,6	57,5	63,3
		43	44,4	46,1	55,2
X. Trasszement	28,8	43,3	49,6	53,2	47,7
		39,3	47,5	58,2	48,7
		34,6	39,7	51,1	49,1

TABLEAU 4.

Essais de flexion en mortier plastique.

- | | | |
|--------------------------|---|--|
| Conservé en | } | 1. Eau de mer.
2. Eau sulfatée (15 gr. Mg. S O ₄ /litre d'eau).
3. Eau potable. |
| Composition du mortier : | } | 1.500 kg. sable du Rhin 0/2 sec.
450 kg. de liant.
11 % d'eau du poids des matières sèches.
(13,1 pour le mortier avec trassement). |

Résistance en kg/cm².

Ciments	Essais après 28 jours	Après :			
		5 mois	11 mois	23 mois	47 mois
		d'immersion			
I. P.A.D.R.	43,94	54,9	52,1	51,8	51,9
		55,5	38,1	0	0
		58,5	59,6	60,3	62,9
II. P.A.N.	50,4	52,7	51	53,3	61
		57,6	62,4	32,4	17,9
		53,2	54,6	62,6	64,6
III. 2/3 P.A.N. + 1/3 Trass. .	37,2	51,2	53,2	59,2	57
		53,4	45	46	40,7
		49,2	50,6	55,6	62,5
IV. H.F.H.R.	50,9	62,4	66,5	71,5	76,3
		57,9	45,5	39,5	26,7
		54,9	57,3	61,9	69
V. H.F.N.	53,7	66,3	67,3	78,4	86,9
		76,9	68,3	78,3	89,4
		62,4	64,1	69	70,7
VI. Permét. N.	40,6	59,4	67,2	74,3	77
		60,2	59,3	71,2	74,2
		51	52,9	58,6	63,1
VII. Sursulfaté	58,2	77,6	86,8	94,9	104,9
		80,3	82,6	98,5	102
		76,5	81,8	84,9	85
VIII. C. Fondu Lafarge	69,7	48	46,6	58,1	58,5
		56,7	59,5	62,2	73,3
		55	58,2	64,1	71,8
IX. C. Marin	54	69	74,3	83,9	89
		65,8	68,4	75,7	82,6
		61,5	55,6	67,8	71,2
X. Trassement	40,6	61,9	70	80,5	78,4
		58,8	64,9	79,6	82,9
		50,7	54,2	62,5	73,4

TABLEAU 5.

Essais de flexion en mortier plastique.

- | | | |
|--------------------------|---|---|
| Conservé en | } | 1. Eau de mer. |
| | | 2. Eau sulfatée (15 gr. Mg. S O ₄ /litre d'eau). |
| | | 3. Eau potable. |
| Composition du mortier : | } | 1.500 kg. sable du Rhin 0/2 sec. |
| | | 600 kg. de liant. |
| | | 11 % d'eau du poids des matières sèches. |
| | | (13,1 pour le mortier avec trassement). |

Résistance en kg/cm².

Ciments	Essais après 28 jours	Après :			
		5 mois	11 mois	23 mois	47 mois
		d'immersion			
I. P.A.D.R.	62,05	72,8	76,2	80,1	81,5
		80	87	75,5	74,8
		72,8	70,3	83,7	89,3
II. P.A.N.	61,75	71	71,5	72,9	85,1
		71,8	84	92,3	93,8
		70,6	75,1	80,5	90,1
III. 2/3 P.A.N. + 1/3 Trass.	54,4	70,8	80,3	83,1	66,7
		66,4	77,4	86,1	81,6
		67	62,3	71,9	72,9
IV. H.F.H.R.	64	80,8	80	89,9	89,6
		75,3	78,2	83,4	98,8
		67,1	69,4	74,3	83,1
V. H.F.N.	62,4	70,8	81,1	90,5	105,7
		80	84,5	94	109,2
		72,9	68,1	79,4	82,8
VI. Permét. N.	55,2	73,9	82,6	93,3	106,1
		75,2	79,3	90,2	95
		64,4	67,3	68,5	73,7
VII. Sursulfaté	71,8	88	102,6	121	112,7
		90,2	96,4	118	116,8
		86	88,8	92,4	97,5
VIII. C. Fondu Lafarge	79,6	65,1	67,9	69,6	67
		67,8	66,8	76,2	87,8
		67,4	74,3	75,8	89,2
IX. C. Marin	66,2	70,4	78,6	85,7	103,7
		88,7	82,3	90,7	108,2
		75,9	72,8	75,5	86,5
X. Trassement	51	68,6	78,5	92,9	95,3
		70	71,4	85,2	86,6
		59	61,1	74,4	78,1

TABLEAU 6.

Essais de compression en mortier plastique.

Conservé en } 1. Eau de mer.
 } 2. Eau sulfatée (15 gr. Mg. S O₄/litre d'eau).
 } 3. Eau potable.

Composition du mortier. } 1.500 kg. sable du Rhin 0/2 sec.
 } 300 kg. de liant.
 } 11 % d'eau du poids des matières sèches.
 } (13,1 pour le mortier avec trasszement).

Résistance en kg/cm².

Ciments	Essais après 28 jours	Après :			
		5 mois	11 mois	23 mois	47 mois
		d'immersion			
I. P.A.D.R.	178,4	189	186	184	129
		164	43,7	0	0
		228	246	265	263
II. P.A.N.	162,8	178	191	186	116
		199	139	0	0
		199	247	273	270
III. 2/3 P.A.N. + 1/3 Trass.	119,1	172	184	160	130
		167	152	220	126
		208	202	227	227
IV. H.F.H.R.	150	189	197	208	220
		194	107	0	0
		196	193	244	245
V. H.F.N.	129	228	179	234	229
		202	192	241	241
		165	191	229	230
VI. Permét. N.	84,7	148	155	191	192
		176	195	224	240
		166	174	220	222
VII. Sursulfaté	163,5	234	293	284	322
		273	306	404	540
		246	305	392	437
VIII. C. Fondu Lafarge	382,5	369	436	408	389
		334	340	445	469
		371	348	455	452
IX. C. Marin	177	236	263	262	319
		220	247	252	259
		238	225	225	225
X. Trasszement	126	143	185	175	159
		144	178	206	174
		157	183	191	203

TABLEAU 7.

Essais de compression en mortier plastique.

Conservé en .../... ..	}	1. Eau de mer. 2. Eau sulfatée (15 gr. Mg. S O ₄ /litre d'eau). 3. Eau potable.
Composition du mortier :	}	1.500 kg. sable du Rhin 0/2 sec. 450 kg. de liant. 11 % d'eau du poids des matières sèches. (13,1 pour le mortier avec trasszement).

Résistance en kg/cm².

Ciments	Essais après 28 jours	Après :			
		5 mois	11 mois	23 mois	47 mois
		d'immersion			
I. P.A.D.R.	357,5	399	427	397	291
		345	264	0	0
		440	479	542	552
II. P.A.N.	392	435	434	423	364
		434	408	377	273
		430	454	525	543
III. 2/3 P.A.N. + 1/3 Trass.	232,6	273	287	307	247
		336	301	377	379
		356	350	417	410
IV. H.F.H.R.	335	402	437	416	403
		405	367	407	272
		404	424	453	456
V. H.F.N.	341,5	420	344	388	380
		472	338	383	445
		383	520	497	499
VI. Permét. N.	211,5	298	307	330	360
		300	314	437	437
		314	357	433	427
VII. Sursulfaté	356,5	496	481	495	498
		517	508	675	671
		458	540	607	695
VIII. C. Fondu Lafarge	525,5	539	550	520	586
		551	608	724	696
		579	683	712	711
IX. C. Marin	325	461	425	427	469
		352	411	467	509
		419	367	493	508
X. Trasszement	236	272	340	319	337
		307	301	373	312
		304	273	393	390

TABLEAU 8.

Essais de compression en mortier plastique.

Conservé en	}	1. Eau de mer. 2. Eau sulfatée (15 gr. Mg. S O ₄ /litre d'eau). 3. Eau potable.
Composition du mortier :	}	1.500 kg. sable du Rhin 0/2 sec. 600 kg. de liant. 11 % d'eau du poids des matières sèches. (13,1 pour le mortier avec trassement).

Résistance en kg/cm².

Ciments	Essais après 28 jours	Après :			
		5 mois	11 mois	23 mois	47 mois
		d'immersion			
I. P.A.D.R.	542	540	576	623	549
		590	490	597	421
		670	593	724	733
II. P.A.N.	498,5	535	551	626	540
		524	660	650	520
		552	652	665	740
III. 2/3 P.A.N. + 1/3 Trass.	392	465	453	462	345
		501	508	619	595
		535	525	601	605
IV. H.F.H.R.	509	548	522	553	517
		562	576	643	641
		524	561	636	651
V. H.F.N.	395	522	499	514	546
		521	463	616	604
		469	533	603	609
VI. Permét. N.	325	465	410	489	503
		489	454	556	579
		457	570	588	581
VII. Sursulfaté	501	616	648	637	644
		700	656	803	808
		605	744	790	782
VIII. C. Fondu Lafarge	628,5	747	776	750	756
		742	693	908	898
		787	774	921	911
IX. C. Marin	399,5	519	512	528	578
		536	549	683	655
		566	545	641	623
X. Trassement	336	344	350	369	410
		383	406	435	435
		390	391	391	439

4) Essais de compression sur éprouvettes en béton.

TABLEAU 9.

Essais de compression sur éprouvettes en béton.

Conservé en	}	1. Eau de mer.
		2. Eau sulfatée (15 gr. Mg. S O ₄ /litre d'eau).
		3. Eau potable.
Composition du béton en poids.	}	gravier 5/20 1.250 kg/m ³ .
		sable 0/2 630 »
		liant 350 »
		eau 158 »

Résistance en kg/cm².

Ciments	Essais de départ 28 jours	Après :			
		5 mois	11 mois	23 mois	47 mois
		d'immersion			
I. P.A.D.R.	425	493	519	516	473
		538	535	563	534
		535	532	571	611
II. P.A.N.	450	503	505	517	491
		547	527	541	622
		540	523	581	674
III. 2/3 P.A.N. + 1/3 Trass.	321	368	420	402	430
		422	428	432	462
		425	430	470	515
IV. H.F.H.R.	359	443	472	453	538
		474	488	468	538
		482	468	534	590
V. H.F.N.	304	400	466	462	531
		435	445	449	511
		423	432	466	508
VI. Permét. N.	234	360	428	433	499
		354	388	432	463
		382	410	460	493
VII. Sursulfaté	424	568	594	614	716
		550	594	613	666
		562	579	642	621
VIII. C. Fondu Lafarge	556	609	659	622	769
		608	623	611	659
		580	599	622	671
IX. C. Marin	337	441	491	527	580
		427	459	487	561
		442	459	505	533

C. — Conclusions.

1) *Résistance à l'eau de mer.*

L'examen des éprouvettes de mortier et de béton et les résultats des essais de flexion et de compression après quatre ans d'immersion à l'eau de mer, donnent déjà quelques indications intéressantes au sujet de la résistance des divers ciments aux attaques corrosives. Les éprouvettes retirées de l'eau de mer après 47 mois d'immersion ne montraient aucune destruction importante. Certaines éprouvettes présentaient cependant des altérations visibles. Les éprouvettes de mortier de ciment P. A. D. R. (I) au dosage de 300, 450 et 600 kg. présentaient de légères dégradations sur les faces et sur les arêtes. A l'essai de flexion ces éprouvettes ont donné des résistances sensiblement égales à celles obtenues lors des essais précédents, mais des résistances plus faibles à la compression. Cela résulte de ce que l'altération toute superficielle n'était pas suffisante pour provoquer une diminution sensible de la section, mais était suffisante pour altérer les conditions de contact avec les plateaux de la presse dans l'essai de compression.

Les mêmes remarques sont à faire sur les éprouvettes de mortier de ciment P. A. N. (II), l'altération des faces étant cependant relativement moindre.

Quant aux éprouvettes de mortier de ciment ($2/3$ P.A.N. + $1/3$ trass.) (III), l'altération était plus profonde et parfaitement visible sur les arêtes surtout au dosage le plus faible 300 kg. ciment/m³. Les résultats montrent d'ailleurs pour ces éprouvettes une sérieuse diminution de résistance à la flexion.

Le mortier de Trasszement (X) à 300 kg/m³ accuse également une légère perte à la flexion et à la compression; il présentait une altération légère des arêtes.

Quant aux mortiers de ciments métallurgiques (IV, V, VI, VII et IX), on constate que les résistances à la flexion des éprouvettes conservées dans l'eau de mer sont supérieures à celles des éprouvettes conservées dans l'eau potable. C'est généralement l'inverse pour la résistance à la compression, du moins en ce qui concerne les mortiers. Ceci résulte peut-être du fait que moins résistants en surface, à durcissement plus lent, ces mortiers ont subi une plus forte érosion superficielle et qu'ainsi le contact entre les plateaux de la presse et la surface de l'éprouvette est moins parfait, ce qui a grande influence sur la charge de rupture à la compression.

Les phénomènes se présentent de la même manière pour les bétons,

mais moins marqués à cause de la présence des pierrailles et de la teneur relativement plus forte en ciment du mortier de liaison. La comparaison de ces résultats à ceux des éprouvettes conservées au laboratoire dans des bacs remplis d'eau sulfatée immobile, met en évidence une action particulière de l'immersion marine sur les éprouvettes, provenant vraisemblablement de l'immersion et de l'émersion alternées, qui résultent du jeu de la marée, ainsi que des courants, du sable en suspension dans l'eau et des organismes marins. A ce point de vue, les dispositions expérimentales adoptées peuvent être considérées comme très satisfaisantes et propres à mettre en évidence la complexité des influences qui interviennent dans le phénomène de l'attaque des mortiers et bétons par l'eau de mer.

2) *Résistance dans l'eau potable.*

Les éprouvettes conservées dans l'eau potable ont accusé une augmentation de résistance pendant les 23 premiers mois d'immersion, résistance qui semble être plus ou moins stationnaire depuis lors.

3) *Résistance dans l'eau sulfatée.*

Les éprouvettes de mortier de ciment P. A. D. R. (I), de ciment P. A. N. (II) et de ciment H. F. H. R. (IV) sont ou bien complètement détruites (dosage à 300 kg/m^3) ou bien accusent des attaques et une diminution totale ou notable de résistance (dosage à 450 et 600 kg/cm^3).

Cette diminution de résistance semble toutefois être précédée d'un stade de durcissement. Les essais ultérieurs à un âge plus avancé devront éclaircir ce point.

Les éprouvettes de mortier en ciment III (2/3 P. A. N. + 1/3 trass) sont aussi fortement attaquées avec gonflement (dosage à 300 kg/m^3) ou présentent une diminution de résistance. Les éprouvettes avec trassément (X) ont également légèrement rétrogradé (dosage à 300 kg/m^3).

Les autres types de ciment accusent généralement une augmentation de résistance.

Les éprouvettes avec le plus faible dosage sont les premières à être attaquées ou détruites. C'est que la porosité joue un grand rôle au point de vue résistance des mortiers et bétons à l'eau de mer. Quant aux éprouvettes en béton, aucune dégradation appréciable n'a été constatée jusqu'à présent.

Les essais ultérieurs devront instruire sur ce point.

CHAPITRE II.

Constatations au sujet de quelques constructions le long de la côte belge. — Précautions.

Pour illustrer les premiers résultats des essais en cours au Laboratoire de Liège, dont il a été question au chapitre I^{er}, il nous a paru intéressant de communiquer dans ce rapport quelques constatations et expériences pratiques faites à plusieurs constructions le long de la côte belge.

Pour les travaux du nouveau port de pêche d'Ostende entamés en 1922 et terminés en 1929, on a eu recours au béton et au béton armé dans la plupart des constructions en contact avec l'eau de mer : écluse, murs de quai, etc...

Pour le béton de l'écluse notamment on avait adopté la composition suivante :

240 kg. de chaux,
114 kg. de trass,
280 litres de sable,
750 litres de gravier de 7 à 80 mm.

excepté pour les radiers des têtes de l'écluse, dont le dosage du béton était :

250 kg. de ciment P. A. N.,
150 kg. de trass,
400 litres de sable,
800 litres de gravier de 7 à 80 mm.

Dès le début, le béton de cette écluse paraissant fortement attaqué par l'eau de mer et après quelques années la décomposition accompagnée du gonflement caractéristique commençait à progresser rapidement, surtout dans les parties des bajoyers soumises aux oscillations de la marée. Ces désagréations ont aussi été constatées dans les bétons constamment immergés.

Au début de l'année 1934 les désagréations étaient telles que l'on dut prévoir la mise hors service de l'ouvrage et la construction d'une nouvelle écluse fut décidée.

Si le béton de chaux n'a pas résisté à l'attaque de l'eau de mer, il semble qu'il faille incriminer le dosage insuffisant et surtout l'insuffisance d'extinction de la chaux.

Pour les ouvrages exécutés dans le suite il n'a plus été utilisé comme liant que du ciment.

Le dosage en ciment a été aussi sensiblement augmenté.

C'est ainsi que lors de la construction d'un mur de quai le long du chenal du port d'Ostende en 1932-1933, la composition du béton en contact avec l'eau de mer a été fixée comme suit :

350 kg. de ciment P. A. N.,

100 litres de laitier finement moulu,

350 litres de sable dont le module de finesse était inférieur à 2,5 (tamis standard Tyler),

850 litres de gravier du Rhin de 3 à 25 mm.

L'addition de laitier avait surtout pour but d'augmenter la compacité du béton.

Jusqu'ici ce béton semble donner complète satisfaction ; aucune altération appréciable n'est constatée aux surfaces visibles. Au début de l'année 1935, au moment où une série importante de grands travaux s'annonçait pour les divers ports de la côte, le problème de la composition du béton a été réexaminé afin d'arriver à un dosage qui donnait les meilleures garanties. Le double objectif était de réduire autant que possible la proportion de chaux libre et d'augmenter la compacité du béton.

Après plusieurs essais de laboratoire la composition du béton a finalement été fixée comme suit :

1) *400 kg. de ciment* renfermant moins de 35 % de Clinker, donc ciment de haut fourneau, ciment permétallurgique, etc...

2) *450 litres de sable*. Ce sable est un mélange d'une partie de sable des dunes (sable fin ayant un module de finesse de 1,1 environ) et de trois parties de sable du Rhin ou de Meuse de 0-3 mm. (module de finesse 2,5 environ). Le module de finesse est calculé avec les refus de la série de tamis « Tyler ».

3) *750 litres de gravier* de Rhin ou de Meuse de 5 à 30 mm. ou de pierraille (5-20) de porphyre.

Ce type de béton a été employé pour toutes les constructions importantes exécutées depuis 1935 par le Service Spécial de la Côte, entre autres pour la nouvelle écluse du port de pêche d'Ostende, pour les travaux du prolongement du bassin à flot du même port de pêche, pour

des centaines de mètres de murs de quai aux ports d'Ostende, de Zeebrugge et de Nieuport.

Ces constructions sont naturellement trop récentes pour qu'on puisse déjà émettre un jugement *définitif* quant à la tenue de ce béton à l'eau de mer.

Toutefois le choix du liant avec sa faible teneur en Clinker, la forte teneur du béton en ciment et sa grande compacité sont certainement des facteurs qui font prévoir les meilleurs résultats.

Lors d'une dernière visite de ces constructions et d'un examen des surfaces sujettes à la marée, il a été constaté, en faisant sauter quelques éclats, que l'eau de mer ne parvient pas même à y pénétrer d'un demi-millimètre.

Pour les derniers murs de quai construits depuis 1937 aux ports d'Ostende et de Zeebrugge, on a eu recours à la vibration sur coffrages métalliques des pieux et palplanches afin d'augmenter encore davantage la compacité. La densité de ce béton atteint jusque 2.400 à 2.450 kg. par mètre cube, armatures déduites.

Parmi les précautions prises nous mentionnons encore tout spécialement le renforcement de la surveillance et du contrôle de la fabrication, de façon à réaliser exactement les dosages prévus.

Nous sommes, en effet, convaincus que tous les ciments de bonne fabrication bien dosés, même les chaux hydrauliques, sont susceptibles de donner lieu à des bétons résistants à l'eau de mer, du moment que les conditions de fabrication en chantier se rapprochent de celles du laboratoire.

A côté des essais multiples pour la réception des ciments il importe de citer les examens sévères que doivent subir les matières inertes, sable — gravier — pierraille. Un degré de propreté presque absolu est requis. Le gravier ne peut contenir plus de 3 % de poussier par rapport aux vides, quelle qu'en soit la nature. La même chose compte pour le sable qu'on soumet à des essais colorimétriques et à des essais de lévigation.

Lors de l'exécution des grands travaux pendant la période 1935-1939 des centaines de tonnes de gravier malpropre ont été refusées.

Pendant la mise en œuvre du béton, des cubes de 20 cm. de côté et de petites poutres Emperger non-armées de 55 cm. de longueur furent constamment fabriquées et soumises aux essais en vue de la vérification des résistances à la compression et à la flexion. Avec l'emploi du ciment

de haut fourneau ordinaire, les résistances moyennes à la compression du béton non-vibré étaient de :

64 kg/cm² après 3 jours,
145 kg/cm² après 7 jours,
280 kg/cm² après 28 jours.

L'emploi des ciments permétallurgiques spéciaux et des ciments sur-sulfatés a donné lieu à des bétons ayant une plus forte résistance à la compression et à la flexion. Les augmentations de résistance après 28 jours sont sensiblement proportionnelles à celles données au tableau 9 du chapitre I^{er}.

Ce type de béton que nous considérons comme optimum pour les travaux à la mer est employé depuis 1935 pour toutes les constructions nouvelles dont le bétonnage et le durcissement se sont opérés à sec.

Pour les épis et les travaux de défense de l'estran sujets à la marée pendant l'exécution et où un bétonnage à sec est pratiquement impossible, nous avons continué à avoir recours au ciment Portland artificiel à durcissement rapide, quoique ce ciment à haute teneur en Clinker doit être moins résistant à l'action chimique de l'eau de mer.

La mise en œuvre de ce ciment est imposée du fait que l'érosion provoquée par les vagues et les courants marins commence déjà à s'exercer quelques heures après la fabrication du béton.

Le dosage du béton généralement appliqué pour les épis sur l'estran est le suivant :

400 kg. de ciment P. A. D. R.,
150 litres de laitier finement moulu,
400 litres de sable,
750 litres de gravier ou pierraille.
