

Communication présentée aux Journées internationales d'études 1961 de l'Association belge pour favoriser l'étude des Verres et des Composés siliceux (Bruxelles).

# Essais de résistance des mortiers et bétons à la mer (1934-1964)

par F. CAMPUS

Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège, Belgique

## 1. — Organisation de l'expérience.

A la demande de l'Administration des Ponts et Chaussées de Belgique, on a immergé en septembre 1934, dans le chenal d'accès au port de pêche d'Ostende, 840 éprouvettes de mortier plastique de  $4 \times 4 \times 16$  cm et 189 cubes de béton de 16 cm de côté. L'âge moyen était d'un mois lors de l'immersion. Le lendemain, des nombres égaux d'éprouvettes étaient immergées respectivement dans l'eau potable et dans une solution de sulfate de magnésium cristallisé à 15 grammes par litre. Ces éprouvettes étaient destinées à servir de témoins. Divers ciments ont été employés pour préparer ces éprouvettes ; ils avaient été prélevés par l'Administration des Ponts et Chaussées ou par les Laboratoires dans des fournitures de ciment approvisionnées sur des chantiers.

Ces ciments sont définis ci-après par leurs numéros d'ordre et leur nature.

- I) Ciment portland artificiel à durcissement rapide.
- II) Ciment portland artificiel normal.
- III) Mélange de deux tiers du ciment II et d'un tiers de trass moulu contrôlé.
- IV) Ciment de haut fourneau à haute résistance.
- V) Ciment de haut fourneau normal.
- VI) Ciment permétallurgique normal.
- VII) Ciment sursulfaté.
- VIII) Ciment alumineux fondu.
- IX) Ciment marin (permétallurgique spécial).
- X) Trasszement 50/50.

Les mortiers étaient composés de 1500 kg de sable du Rhin 0/2 mm et de 300, 450 ou 600 kg de ciment. Ces mortiers sont repérés par deux chiffres, le premier désignant le ciment et le deuxième le dosage. Par exemple, les mortiers du ciment V à 300, 450 ou 600 kg de ciment par m<sup>3</sup> de sable sont désignés respectivement par les repères 51, 52 et 53. La quantité d'eau de gâchage était de 11 % du poids des matières sèches pour

tous les ciments, sauf le X (13,1 %). Les bétons avaient la composition suivante :

gravier de Meuse 5/20 mm ... ..	1250 kg
sable du Rhin 0/2 mm ... ..	630 kg
ciment ... ..	350 kg
eau ... ..	158 kg

Pour l'immersion dans la mer, les éprouvettes ont été placées dans de robustes caisses en bois à claire voie. La base des caisses était à la cote + 1,35 au-dessus du zéro d'Ostende. L'amplitude de marée varie entre 3 et 5 m environ, sans dépasser 8 m. Le niveau moyen est aux environs de 2,50. La hauteur maximum des lames à l'endroit de l'immersion est d'environ 1 m. Le résidu sec de l'eau de mer à cet endroit est d'environ 35 g par litre. La teneur en SO<sup>3</sup> d'environ 2,15 g par litre, celle de l'ion Cl d'environ 18 g par litre. Le pH est de 7,5 à 8 environ.

On a aussi confectionné avec chacun des bétons six éprouvettes cylindriques de 15 cm de diamètre et 30 cm de hauteur, armées de 4 barres d'acier longitudinales de 10 mm de diamètre, distantes de la surface extérieure du cylindre respectivement de 1, 2, 3 et 5 cm. Ces six éprouvettes ont été conservées comme suit :

- une immergée dans la mer comme les cubes ;
- une conservée dans du sable imprégné d'eau douce ;
- une conservée dans du sable imprégné d'eau sulfatée ;
- une conservée à l'air dans le laboratoire.
- une immergée dans la mer sous marée basse ;
- une conservée à l'air marin.

## 2. — Essais effectués et résultats.

Outre les essais de réception des ciments, les mesures initiales de résistance mécanique des mortiers et des bétons, ainsi que divers essais spéciaux (retrait, perméabilité, etc...), des prélèvements d'échantillons ont été effectués dans la mer après 5 mois, 11 mois, 23 mois, 47 mois, 11 ans et 20 ans. Ces échantillons ont été l'objet de divers essais en même temps que les éprouvettes correspondantes conservées dans l'eau sulfatée et dans l'eau douce.

Ces essais ont fait l'objet de rapports détaillés complets qui forment un dossier volumineux. Il est impossible, vu l'espace restreint, d'en donner un compte rendu quelque peu détaillé. On renvoie aux publications plus développées déjà effectuées. Il reste une série complète d'éprouvettes que l'on se propose d'étudier après 30 années, en 1964. L'état des éprouvettes après 20 ans, constaté lors du prélèvement de 1954, permet de croire qu'il n'est pas utile de prolonger l'expérience au-delà d'une durée de 30 ans. Les tableaux 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 reproduisent les résultats des essais mécaniques de flexion et de compression sur les barrettes de mortier et de compression sur les cubes de béton lors des divers prélèvements. Ils procurent une vue globale assez nette. Cependant leur interprétation détaillée demande beaucoup d'explications, qu'il est impossible d'exposer, en raison de l'espace restreint. A ce sujet encore, il faut se référer aux publications plus détaillées citées dans la bibliographie.

En résumé, des dégradations croissantes avec la durée ont affecté les éprouvettes de mortier, dans une moindre mesure les cubes de béton. Les résistances désignées par o pour les éprouvettes de mortier marquent leur destruction totale ou quasi. Pour les autres, moins affectées, des altérations de forme géométrique, d'état de surface et de dimensions ont influé considérablement sur les résistances mécaniques, dont les déterminations sont, on le sait, très sensibles à la perfection géométrique des éprouvettes. Les résultats des essais mécaniques sont donc toujours « pessimistes » quant à l'état d'altération chimique ou vrai du matériau. Les résultats obtenus sur les cubes de béton à 20 ans sont caractéristiques à ce sujet. Après cette durée d'immersion, les cubes des ciments les plus riches en chaux (I, II et III) étaient fortement dégradés aux arêtes et aux sommets, aussi assez friables en surface. Ils ne permettaient plus d'effectuer un essai valable de compression sur cube, qui aurait donné des résistances très faibles. Aussi a-t-on extrait de tous les cubes conservés dans l'eau marine et dans l'eau sulfatée des cylindres de 100 cm<sup>2</sup> de base et de 10 cm de hauteur, géométriquement parfaits. Les résultats en ont été des résistances remarquables, avec des ruptures explosives. Les cubes conservés pendant 20 ans dans l'eau douce ont présenté tous des résistances inférieures, alors qu'il y a sensiblement équivalence des deux types d'éprouvettes.

On peut remarquer que les cylindres sont moins dégradés que les cubes correspondants. Seuls les cylindres des bétons I, II et III, étaient assez altérés superficiellement, sur quelques millimètres d'épaisseur, mais beaucoup moins que les cubes. Un des cylindres du béton I était corrodé à tel point que l'armature la plus voisine de la surface (1 cm) était dénudée sur environ 5 cm. Mais

aucune éprouvette cylindrique ne présentait de fissures parallèles aux armatures. Les cylindres autres que ceux immergés dans la mer à mi-marée sont restés inaltérés.

### 3. — Conclusions sommaires.

1) Dans les essais d'immersion marine, l'action chimique de l'eau de mer exerce certes un effet, mais qui n'est prédominant que pour les ciments très riches en chaux et pour les conglomerats peu compacts, tels que les mortiers.

2) Dans l'immersion marine au niveau moyen de la mer, comportant une éersion à chaque marée, les actions atmosphériques, notamment le gel, et les actions marines mécaniques (vagues, courants, etc...) et biologiques, jouent également un rôle, comme le prouve l'altération des prismes de mortier de ciments très résistants à l'action chimique.

3) Dans les dégradations très prononcées, toutes ces actions se combinent et aggravent mutuellement leur action propre.

4) Les bétons suffisamment compacts de tous les ciments, même riches en chaux, résistent bien dans la masse et y acquièrent même des résistances plus élevées que dans l'eau douce. Mais les bétons de ciment riches en chaux sont vulnérables aux dégradations superficielles, surtout aux arêtes et aux sommets vifs.

5) Les armatures de béton armé ne semblent pas particulièrement exposées à la corrosion, même sur la hauteur de marée, pourvu qu'elles soient recouvertes d'une épaisseur convenable de béton suffisamment compact. Cette épaisseur varie avec le degré de vulnérabilité en surface du ciment. Elle doit aussi être en rapport avec le diamètre de l'armature et avec le danger de dégradation superficielle du béton par les chocs et frottements.

6) Les ciments à base de laitier granulé basique, pauvres en chaux, de qualité connue et contrôlée sont très adéquats pour les travaux à la mer, qu'il s'agisse de bétons ou de mortiers. La quantité de ciment devra être suffisante en vue du résultat à atteindre dans chaque cas.

### 4. — Comparaison à des cas de corrosion de béton par les eaux atmosphériques, les eaux d'égouts et les eaux industrielles.

Dans les cas qui viennent d'être examinés de corrosion marine, l'attaque est toujours produite par l'action chimique du milieu agressif, même si elle a pu être amplifiée par d'autres circonstances (atmosphériques et mécaniques marines). Dans les barrettes de mortier de petites dimensions, elle a pu se développer dans toute la masse, grâce aussi à

TABLEAU 1. — ESSAIS DE FLEXION EN MORTIER PLASTIQUE A 300 kg DE CIMENT PAR M<sup>3</sup> DE SABLE

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

Conservation : 1 = Eau de mer ; 2 = Eau sulfatée ; 3 = Eau potable ; \* Eprouvettes dégradées.

TABLEAU 2. — ESSAIS DE FLEXION EN MORTIER PLASTIQUE A 450 kg DE CIMENT PAR M<sup>3</sup> DE SABLE

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

Conservation : 1 = Eau de mer ; 2 = Eau sulfatée ; 3 = Eau potable ; \* Eprouvettes dégradées.

TABLEAU 3. — ESSAIS DE FLEXION EN MORTIER PLASTIQUE A 600 kg DE CIMENT PAR M<sup>3</sup> DE SABLE

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

Conservation : 1 = Eau de mer ; 2 = Eau sulfatée ; 3 = Eau potable ; \* Eprouvettes dégradées.

TABLEAU 4. — ESSAIS DE COMPRESSION EN MORTIER PLASTIQUE A 300 kg DE CIMENT PAR M<sup>3</sup> DE SABLE

Ciment	Indicatif du mortier	Conser- vation	Résistance en kg/cm <sup>2</sup>						
			au départ	après une immersion de					
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans
I	11	1	203,5	189	186	184	129	—	—
		2		164	43,7	—	—	—	—
		3		228	246	265	263	299	227,5
II	21	1	200	179	191	186	116	—	—
		2		199	139	—	—	—	—
		3		199	247	273	270	286	278,1
III	31	1	160	172	184	160	130	—	—
		2		167	152	220	126	221	255,8*
		3		208	202	227	227	256	327,3
IV	41	1	163	189	197	208	220	95	—
		2		194	107	—	—	—	—
		3		196	193	244	245	247	250,2
V	51	1	160	228	179	234	229	—	—
		2		202	192	241	241	254	270,8
		3		165	191	229	230	247	532,5
VI	61	1	116	148	155	191	192	—	—
		2		176	195	224	240	270	303,7
		3		166	174	220	222	272	282,2
VII	71	1	185	234	293	284	322	—	—
		2		273	306	404	540	546	433,8
		3		246	305	392	437	502	444,1
VIII	81	1	358	369	436	408	389	310	259,8*
		2		334	340	445	469	424	186,4
		3		371	348	455	452	368	137,7
IX	91	1	179	236	263	262	319	—	—
		2		220	247	252	259	330	334
		3		238	225	225	225	365	279,6
X	101	1	116	173	185	175	159	—	—
		2		144	178	206	174	225	238,4
		3		157	183	191	203	256,7	250,1

Conservation : 1 = Eau de mer ; 2 = Eau sulfatée ; 3 = Eau potable ; \* Eprouvettes dégradées.

TABLEAU 5. — ESSAIS DE COMPRESSION EN MORTIER PLASTIQUE A 450 kg DE CIMENT PAR M<sup>3</sup> DE SABLE

Ciment	Indicatif du mortier	Conser- vation	Résistance en kg/cm <sup>2</sup>						
			au départ	après une immersion de					
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans
I	12	1		399	427	397	291	—	—
		2	392	345	264	—	—	—	—
		3		440	479	552	542	576	479,8
II	22	1		435	434	423	364	117	—
		2	375	434	408	377	273	274	330,4*
		3		430	454	525	543	570	512
III	32	1		273	287	307	247	—	—
		2	314	336	301	377	379	352	306,1*
		3		356	350	417	410	435	384,5
IV	42	1		402	437	416	403	360	—
		2	361	405	367	407	272	438	(533,5)*
		3		404	424	453	456	525	473,5
V	52	1		420	344	388	380	468	348,2*
		2	360	472	338	383	445	418	531,9
		3		383	520	497	499	517	557,1
VI	62	1		298	307	330	360	280	343,5*
		2	256	300	314	437	437	423	517,4
		3		314	357	433	427	498	478,6
VII	72	1		496	481	495	498	344	486,5*
		2	389	517	508	675	671	671	629,8
		3		458	540	607	695	710	574,8
VIII	82	1		539	550	520	586	661	653,2
		2	484	551	608	724	696	585	252
		3		579	683	712	711	606	162,7
IX	92	1		461	425	427	469	413	498,3*
		2	329	352	411	467	509	538	484,2
		3		419	367	493	508	526	522,9
X	102	1		272	340	319	337	—	—
		2	244	307	301	373	312	424	382
		3		304	273	393	390	467	443,8

Conservation : 1 = Eau de mer ; 2 = Eau sulfatée ; 3 = Eau potable ; \* Eprouvettes dégradées.

TABLEAU 6. — ESSAIS DE COMPRESSION EN MORTIER PLASTIQUE A 600 kg DE CIMENT PAR M<sup>3</sup> DE SABLE

Ciment	Indicatif du mortier	Conser- vation	Résistance en kg/cm <sup>2</sup>						
			au départ	après une immersion de					
				5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans
I	13	1		540	576	623	549	—	—
		2	527	590	490	597	421	472	577,5
		3		670	593	724	733	733	631,6
II	23	1		535	551	626	540	405	—
		2	522	524	660	650	520	661	717,2
		3		552	652	665	740	745	757,2
III	33	1		465	453	462	345	—	—
		2	457	501	508	619	595	602	528,2
		3		535	525	601	605	630	547,1
IV	43	1		548	522	553	517	454	363,1
		2	483	562	576	643	641	602	598,2
		3		524	561	636	651	728	674
V	53	1		522	499	514	546	591	454,5
		2	467	521	463	616	604	600	663,4
		3		469	533	603	609	685	658,6
VI	63	1		465	410	489	503	433	400
		2	386	489	454	556	579	562	600,4
		3		457	570	588	581	622	676,7
VII	73	1		616	648	637	644	705	485,2
		2	567	700	656	803	808	829	672,5
		3		605	744	790	782	860	836,2
VII	83	1		747	776	750	756	828	799,2
		2	600	742	693	908	898	850	449,4
		3		787	774	921	911	948	346,1
IX	93	1		519	512	528	578	623	612,3*
		2	426	536	549	683	655	663	610,5
		3		566	545	641	623	744	604,4
X	103	1		344	350	369	410	—	—
		2	305	383	406	435	435	459	436,6
		3		390	391	391	439	480	471,1

Conservation : 1 = Eau de mer ; 2 = Eau sulfatée ; 3 = Eau potable ; \* Eprouvettes dégradées.



TABLEAU 7. — ESSAIS DE COMPRESSION SUR EPROUVETTES EN BETON

Ciment	Conser- vation	Essai de départ (âge variable) kg/cm <sup>2</sup>	Résistance en kg/cm <sup>2</sup>					
			après une immersion de					
			5 mois	11 mois	23 mois	47 mois	11 ans	20 ans
I	1	467	493	519	516	473	287	710,7*
	2		538	535	563	534	535	753,7*
	3		535	532	571	611	536	636,7
II	1	470	503	505	517	491	339	698,3*
	2		547	527	541	622	585	817,3*
	3		540	523	581	674	605	625,3
III	1	358	368	420	402	430	298	495 *
	2		422	428	432	462	478	534,3*
	3		425	430	470	515	478	481,7
IV	1	396	443	472	453	538	524	685,3*
	2		474	488	468	538	576	743 *
	3		482	468	534	590	587	583
V	1	334	400	466	462	531	588	636,7*
	2		435	445	449	511	539	649 *
	3		423	432	466	508	557	590,7
VI	1	286	360	428	433	499	548	686 *
	2		354	388	432	463	513	651,7*
	3		382	410	460	493	517	548
VII	1	402	568	594	614	716	812	863 *
	2		550	594	613	666	612	522 *
	3		562	579	642	621	639	709
VIII	1	551	609	659	622	769	702	504,3*
	2		608	623	611	659	291	240,3*
	3		580	599	622	671	316	200
IX	1	341	441	491	527	580	580	708 *
	2		427	459	487	561	478	634,7*
	3		442	459	505	533	469	560

Conservation : 1 = Eau de mer ; 2 = Eau sulfatée ; 3 = Eau potable ; \* Eprouvettes cylindriques.

une assez faible compacité. Dans les bétons de bonne compacité normale, l'attaque procède de la surface vers l'intérieur. Même dans le cas de béton armé, la dénudation d'un tronçon d'armature a été réalisée de la sorte, comme conséquence de la progression de l'attaque du béton de la surface vers l'intérieur.

L'auteur a connu des cas identiques de corrosion profonde d'égouts en béton armé et de dénudation des armatures sous l'effet de l'écoulement d'eaux industrielles de décapage très riches en acide sulfurique. Le béton était cependant composé d'un ciment réputé inattaquable aux eaux sulfatées. De telles attaques graves par l'effet d'eaux sulfatées très corrosives ont été observées aussi par l'auteur dans des constructions importantes. Elles ont entraîné la destruction rapide d'un tunnel de chemin de fer construit sous un terril de charbonnage de la région de Liège et abîmé fortement les fonds des trémies de grands silos à charbon d'une usine métallurgique de la même région.

D'autres dégradations constatées dans des égouts parcourus par des eaux principalement pluviales, c'est-à-dire très douces, consistaient en écaillages au droit des armatures. Le plus souvent il s'agissait d'armatures situées trop près de la surface et recouvertes d'un béton pas assez compact. La rouille de l'armature, par l'expansion résultante, provoquait l'écaillage du béton. Le même processus a été constaté à d'importantes constructions en béton armé après des durées de 10 à 15 ans, notamment sur de fortes poutres triangulées extérieures de la toiture de grands halls d'usines et à la surface intérieure et même extérieure de grands réfrigérants hyperboliques.

Cependant, dans ce dernier cas, des écaillages se sont produits également à des endroits où il n'y avait pas d'armatures. D'autre part, l'auteur a observé assez souvent des fissures parallèles à des armatures assez voisines de la surface et non rouillées. Des phénomènes de retrait, de contraction empêchée, le gel ainsi que le gonflement du mortier, peuvent provoquer des fissurations et des écaillages superficiels. Lorsque les fissures sont engendrées par la présence d'armatures, celles-ci peuvent alors être corrodées par l'humidité de l'atmosphère. La rouille produite fait ensuite progresser le processus de destruction. Ce dernier processus, d'origine mécanique, ne se rencontre que dans la corrosion atmosphérique.

Octobre 1960

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) F. CAMPUS : Quelques observations et un cas particulier de corrosion de béton. — Bulletin de la Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industriels. Juin 1931.
- (2) F. CAMPUS : Essais sur la résistance des mortiers et des bétons à l'eau de mer. Synthèse des résultats de 1934 à 1945. — Annales des Travaux Publics de Belgique, n° 4, août 1947.
- (3) F. CAMPUS : Processus divers d'altération des ouvrages en béton armé. Publication finale du 5<sup>e</sup> Congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentiers. Lisbonne 1956.
- (4) F. CAMPUS, R. DANTINNE, M. DZULYNSKI et K. GAMSKI : Essais de résistance des mortiers et bétons à l'eau de mer. Résultats après 20 ans d'immersion. — Annales des Travaux Publics de Belgique, n° 5, octobre 1960-61.

## RESUME DE LA DISCUSSION

Réponses de F. Campus aux questions posées :

### 1. - Réponse à M. Ridet :

Pratiquement, le seul cas de mise en charge hydraulique des ouvrages maritimes est celui des écluses. Les maçonneries doivent en être nécessairement étanches.

Les bétons doivent donc être particulièrement bien confectionnés, compacts et étanches. On admet souvent que les bétons à la mer doivent contenir 450 kg de ciment par m<sup>3</sup>. Les essais d'Ostende montrent que 350 kg suffisent à condition que la granulation et la confection soient bonnes. Une trop grande richesse en ciment peut avoir des inconvénients au point de vue du retrait avant la mise sous eau.

Pour les autres ouvrages, tels que les murs de quai, il est nécessaire et possible d'éviter la mise en charge par le jeu de la marée, mais même dans ce cas, la compacité et l'étanchéité superficielle sont essentielles.

### 2. - Réponse à M. Petit :

La référence bibliographique (2), parue dans le n° 4 d'août 1947 des « Annales des Travaux Publics de Belgique », contient les analyses chimiques élémentaires des divers ciments utilisés pour les expériences d'immersion marine. On peut, d'après les formules connues, en déduire la composition minéralogique.

Le facteur de la composition est incontestable au point de vue de la résistance à l'action marine. La tenue des divers mortiers en est une preuve édifiante, si elle est encore nécessaire. Elle est confirmée par la tenue des cubes en béton. Mais ceux-ci établissent aussi que la compacité et l'étanchéité peuvent pallier dans une mesure variable les effets de la susceptibilité chimique d'une manière déterminée pour les divers ciments.

La richesse en ciment doit être suffisante, en relation avec une bonne granulation inerte, mais pas excessive, afin d'éviter les fissures et les gerçures superficielles de retrait avant la mise sous eau.