



Comportement d'éprouvettes de mortiers et de bétons à la mer

Mohamed Boutouil

Doctorant, LMFGC, Université du Havre

Daniel Caminade

Maître de conférences, LMFGC, Université du Havre

Daniel Levacher

Professeur des Universités, LMFGC, Université du Havre

Franck Schoefs

Doctorant, agrégé, LMG, Université de Nantes

Résumé

L'étude de la durabilité des bétons soumis à l'action du milieu marin, a fait l'objet en 1974 d'un programme de recherche spécifique.

Cet article présente les résultats obtenus pour 14 ciments à différentes teneurs en C_3A et SO_3 , sur le comportement à long terme :

- des mortiers : essais de traction et de compression à 15 ans.
- des bétons : mesure de la vitesse du son à 20 ans.

Les résultats confirment les bonnes qualités des ciments avec ajout de laitiers (ex. CPAL et CLK).

1- Introduction

Pour concevoir des ouvrages en béton, béton armé ou béton précontraint destinés à être utilisés dans un milieu agressif tel que le milieu marin, on doit s'assurer au préalable que le matériau de base (le béton), possède des qualités durables pour la vie des ouvrages.

La durabilité du béton peut être appréciée comme sa capacité à conserver ses caractéristiques dimensionnelles et mécaniques (résistance, élasticité) qui permettront d'éviter les désordres (fissures, éclatements, épaufrures...) qui, en facilitant la pénétration des constituants de l'eau de mer, pourraient entraîner la ruine de l'ouvrage par destruction du béton ou par corrosion des armatures et des câbles de précontrainte.

La durabilité du béton en milieu marin dépend des conditions d'exposition, de la constitution du béton (compacité, granularité, dosage en ciment) et de la qualité de ces constituants, principalement le ciment.

En France, la Commission Permanente des Liants hydrauliques et Adjuvants du Béton, COPLA, a homologué une catégorie de ciment destinée aux structures exposées à l'action de la mer ou des embruns : le ciment prise mer.

Ces ciments sont caractérisés par de faibles teneurs en aluminat tricalcique ($C_3A < 10\%$) et en sulfates ($SO_3 < 2.5\%$).

Afin d'étudier le comportement de divers ciments et de mesurer l'influence des teneurs en C_3A et SO_3 sur la durabilité du béton en milieu marin, la COPLA a entrepris en 1974 un programme d'essais sur une longue durée : vingt ans.

2- Programme d'essais (COPLA)

Le programme initial de la COPLA était d'étudier l'évolution de mortiers et de bétons constitués à partir de ciments (voir tableau 1) sélectionnés sur trois sites : Le Havre, La Rochelle et Marseille. Actuellement, seul le site du Havre continue les essais.

Type de ciment	Teneur en		Année de fabrication	bétons				
	C_3A %	SO_3 %		C (kg)	G (kg)	S (kg)	E (l)	E/C
1 : CPA 400	< 5	# 2.5	1974	350	1160	719	160	0.457
1 Bis : CPA 325	< 5	# 2.5	1974	350	1160	702	160	0.457
2 : CPA 325	# 8	# 2.5	1974	350	1160	697	168	0.48
3 : CPA 325	# 8	# 3.5	1974	350	1160	684	173	0.494
4 : CPA 400	# 8	# 3.5	1974	350	1160	695	168	0.48
5 : CPA 400	# 8	# 4.5	1974	350	1160	690	172	0.491
6 : CPA 400	# 14	# 3.5	1974	350	1160	685	172	0.491
7 : CPA 325	# 10	# 2.5	1974	350	1160	684	175	0.5
8 : CPAL 325 20 % laitiers	> 14	NC	1974	350	1160	690	170	0.485
9 : CPF 325 30 % laitiers	> 14	NC	1974	350	1160	676	175	0.5
10 : CPF 325 30 % laitiers	# 10	NC	1974	350	1160	695	165	0.471
11 : CLK 325 80 % laitiers	à faible teneur en CaO (# 48.57 %)		1974	350	1160	680	172	0.491
12 : Cim. Prompt	NC	NC	1976	450	1061	572	215	0.477
13 : CPAZ 400	NC	NC	1978	350	1140	700	175	0.5

NC : non connu

Tableau 1 : liste des ciments retenus pour les essais.

2-1 Eprouvettes de mortier

Réalisées en mortier normalisé et conservées en eau de mer (après 28 jours), elles font l'objet d'essais de traction par flexion et d'essais de compression (7 j, 28 j, 90 j, 1 an, 2 ans, 5 ans, 10 ans, 15 ans et 20 ans)

2-2 Eprouvettes de béton

Les épreuves prismatiques (20*20*80 cm) et cylindriques (16*32 cm) ont été confectionnées avec des bétons dosés à 350 kg de ciment et comportant 1160 kg de graviers. Le dosage en sable et en eau a été ajusté en vue d'obtenir une ouvrabilité identique (# 6 cm d'affaissement au cône d'Abrams).

Outre les 12 ciments testés initialement (éprouvettes confectionnées en 1974), deux autres catégories ont été ajoutées en 1976 et 1978 avec des compositions de bétons légèrement différentes.

Le tableau 1 donne les indications essentielles sur la nature des ciments testés et sur la composition des bétons correspondants.

Sur toutes les éprouvettes de béton, on mesure la vitesse du son par auscultation dynamique (28 j, 90 j, 1 an, 2 ans, 5 ans, 10 ans, 15 ans et 20 ans) grâce à un appareil prototype mis au point par le CETE de Rouen.

Il est prévu à l'échéance de 20 ans de procéder à des essais de traction par flexion et de compression sur les prismes 20*20*80 cm.

Les essais mécaniques sur les cylindres 16*32 cm sont répertoriés sur le tableau 2.

Type d'essais → Mode de conservation ↓	Traction par fendage	Compression
Eau douce	28 jours et 20 ans	28 jours et 20 ans
Embruns	2 ans	2 ans
Zone de marnage	2 ans, 10 ans et 20 ans	2 ans, 10 ans et 20 ans

Tableau 2 : Essais mécaniques et leurs échéances.

2-3 Analyse des résultats

Les résultats présentés ici portent sur l'analyse des essais réalisés sur :

- 1- les mortiers (essais de traction et compression à 15 ans)
- 2- les bétons (mesures des vitesses du son à 20 ans)

Les comparaisons sont faites pour chacun des ciments en prenant pour base les valeurs à 90 jours qui semblent plus adéquates pour juger des évolutions à long terme que la valeur traditionnelle à 28 jours.

3- Evolution des résistances des mortiers

La comparaison est effectuée sur une période de 15 ans. En outre il faut noter que les éprouvettes correspondant aux ciments 6 et 8 à fortes teneurs en C_3A_2 , conservées en milieu marin ont été détruites en moins de 2 ans et ne sont pas analysées ici. Sur les figures 1 et 2, les catégories non représentées ont des rapports de résistances (R/R_{90j}) très peu différents de 1.

3-1 Evolution des résistances moyennes en compression (figure 1)

A part le ciment n° 1 (CPA 325) qui accuse une perte allant jusqu'à 20 % à 15 ans, on constate une stabilisation et une amélioration des caractéristiques, à long terme, des mortiers. Le gain de résistance concerne surtout des ciments contenant une proportion notable de laitier, ce qui semble cohérent avec ce que l'on sait de l'évolution de ce type de ciment. Parmi les ciments CPA, les catégories 4 et 5 semblent être affectées, à moyen terme (5 et 10 ans), par le mode de conservation en eau de mer. Les teneurs élevées en SO_3 (supérieures à 3 % : 3.4 et 4.46 % respectivement) seraient à l'origine de ce comportement.

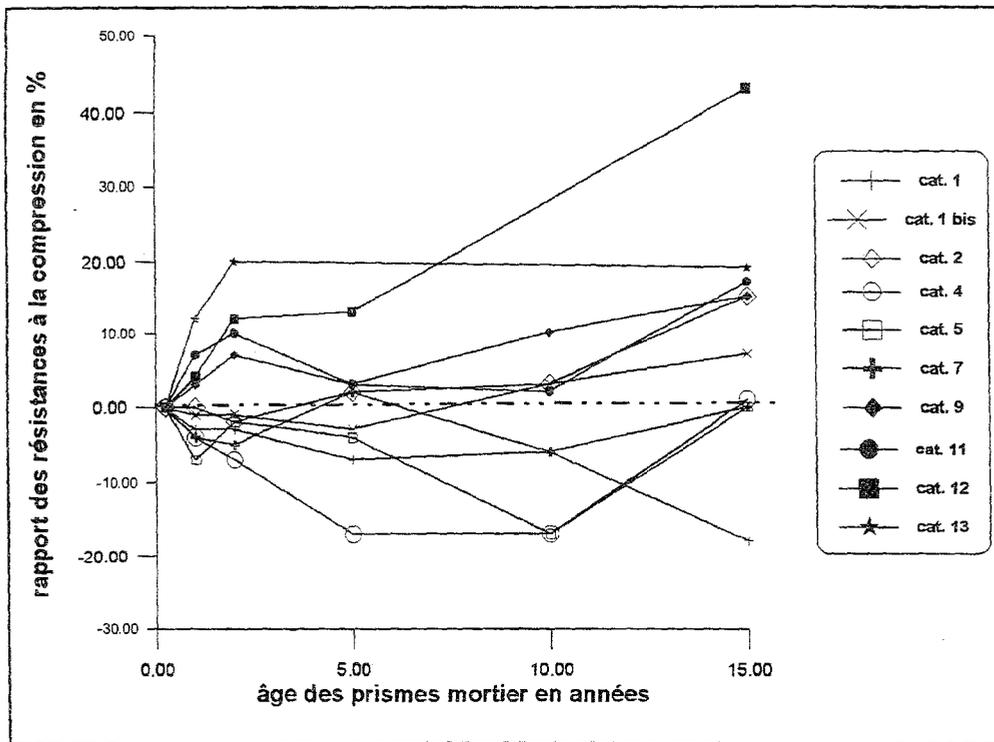


Figure 1 : Evolution du rapport des résistances à la compression (R / R 90 j)

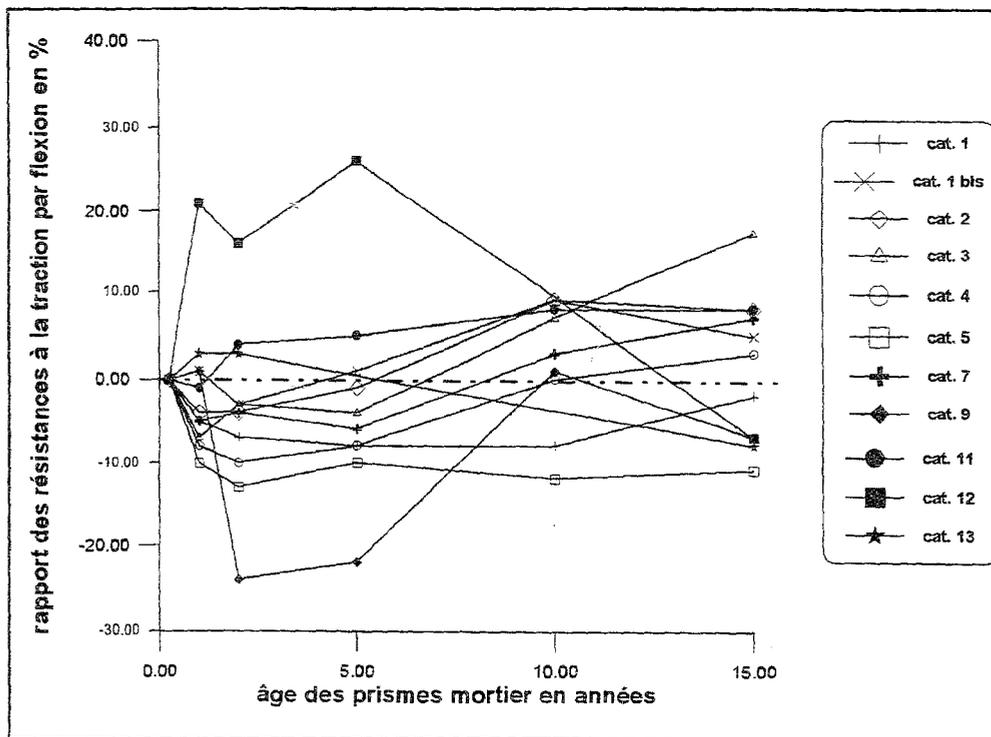


Figure 2 : Evolution du rapport des résistances à la traction par flexion (R / R 90 j)

3-2 Evolution des résistances moyennes à la traction par flexion (figure 2)

Les résultats obtenus sont ici beaucoup plus dispersés et il semblerait que les ciments CPA évoluent, en général, plus favorablement que les ciments aux laitiers.

Par ailleurs, pour la majorité des ciments, on constate que les résistances à la flexion semblent être légèrement plus affectées par l'eau de mer que les résistances à la compression. Cette dégradation est visible dès 90 j. Toutefois, à partir de 2 ans, on observe une tendance au confortement que l'on peut expliquer par l'hypothèse de la formation d'une couche de surface qui constituerait une protection pour les éprouvettes. La couche de surface est constituée d'aragonite/calcite (CaCO_3) et/ou de brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et mesure moins d'un mm d'épaisseur après 20 ans d'exposition à l'eau de mer.

En s'intéressant au cas de la catégorie 5, on constate que la dégradation observée en compression est confirmée par une perte de résistance à la traction. Cette catégorie possède la teneur la plus élevée en SO_3 : 4.46 %.

Parmi les ciments aux laitiers, la catégorie 11 présente un comportement caractérisé par un gain en résistance à la traction et confirme la bonne tenue à l'eau de mer de ce ciment à 80 % de laitiers.

3-3 Analyse de la dispersion des résultats

Compte tenu de la dispersion habituellement observée pour ce type d'essais et tout particulièrement pour les essais de traction par flexion, nous avons réalisé une analyse de cette dispersion par l'intermédiaire du coefficient de variation C.O.V. Il est défini par le rapport de l'écart-type σ à la moyenne m : $\text{C.O.V} = \sigma/m$.

Pour les essais de traction, ce coefficient est compris entre 5 et 10 % et, est un peu plus faible, que pour les essais en compression où il varie de 5 à 15 %. Les valeurs atteintes indiquent une dispersion raisonnable des valeurs mesurées, eu égard au type d'essai réalisé.

4- Evolution des vitesses de transmission du son

La mesure des vitesses du son a été réalisée grâce à un appareil prototype mis au point par le CETE de Rouen. Les mesures effectuées permettent de suivre globalement, et sans détruire les éprouvettes, l'évolution des bétons et en particulier de mettre en évidence l'apparition de modifications internes de la structure telles que des fissures ou des micro-fissures qui entraînent une chute notable de la vitesse de propagation du son.

On compare ici l'évolution du comportement des bétons (éprouvettes cylindriques 16*32 cm), conservés en eau douce et en zone de marnage, sur une période de 20 ans.

4-1 Eprouvettes conservées en eau douce (figure 3)

Pour la plupart des échantillons, on constate une augmentation modérée de la vitesse du son. Cette augmentation est particulièrement visible entre 90 j et 2 ans. Elle correspondrait au durcissement du béton qui s'avérera par la suite influencé par la conservation en zone de marnage.

Après 2 ans, les variations de la vitesse du son sont assez légères et ne dépassent guère les 5 %.

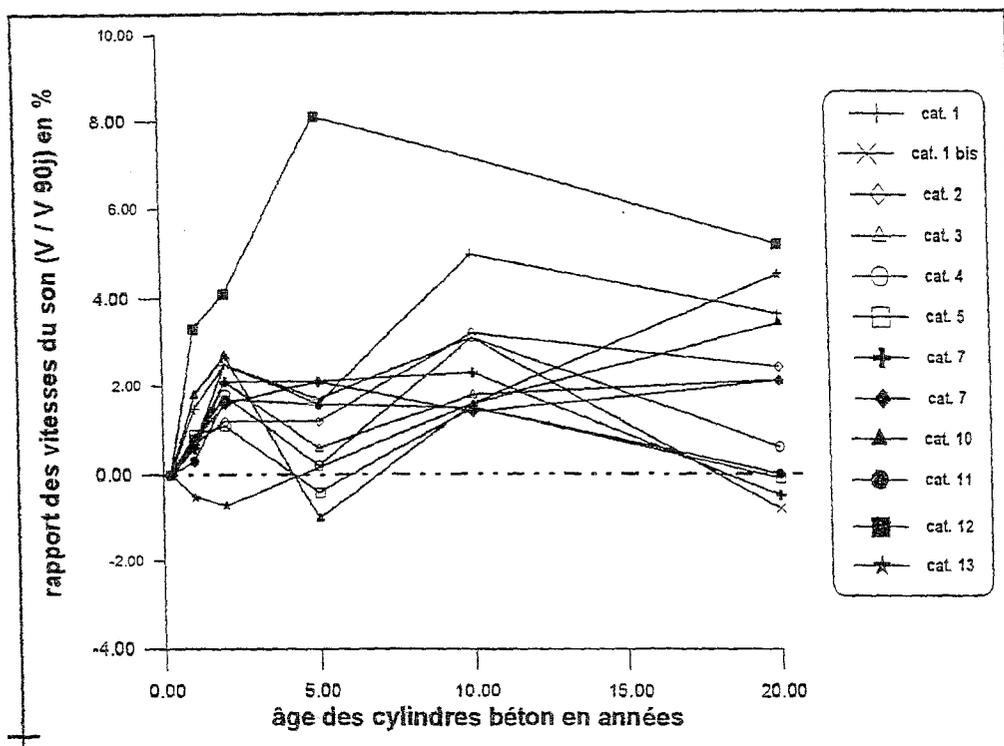


Figure 3 : Evolution du rapport des vitesses du son (échantillons en eau douce)

4-2 Eprouvettes conservées en zone de marnage (figure 4)

Les ciments de type CPA subissent en général, une chute de la vitesse de transmission du son, alors que les ciments aux laitiers voient cette vitesse augmenter. Il semblerait que ces ciments supportent mieux l'action du milieu marin.

En outre, l'évolution de la vitesse du son fait apparaître une moindre augmentation de celle-ci entre 90 j et 2 ans que dans le cas de la conservation en eau douce, montrant ainsi que le durcissement semble être influencé par la conservation en zone de marnage.

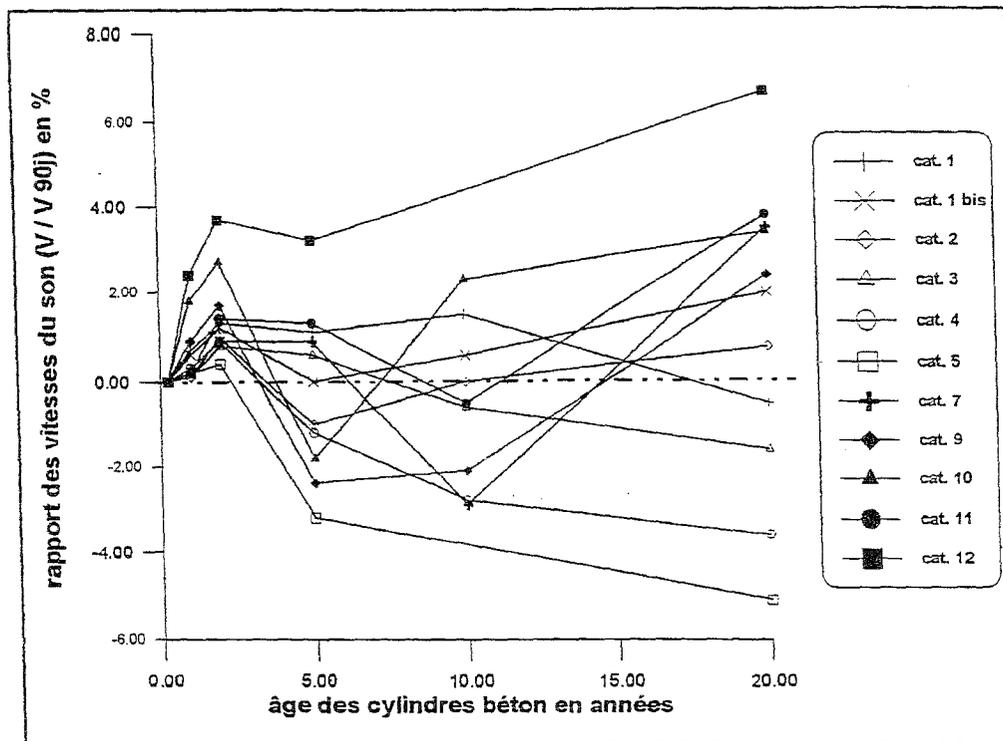


Figure 4 : Evolution du rapport des vitesses du son (échantillons en zone de marnage)

5- Conclusion (tableau 3)

Le suivi du comportement en eau de mer des quatorze ciments a mis en évidence des résultats prévisibles sur la sensibilité des ciments aux attaques chimiques suivant les teneurs en C_3A et SO_3 (voir tableau 3). En effet, les échantillons en ciment à teneur très élevée en C_3A (# 14 %) ont été complètement détruits après deux ans (ciments 6 et 8). Une teneur en SO_3 supérieure à 3 % a engendré une mauvaise tenue à l'eau de mer (ciments 4 et 5). Par rapport aux valeurs obtenues à 90 j, on a constaté une diminution des caractéristiques mécaniques des mortiers (résistances à la compression et à la traction par flexion) et de la vitesse de transmission du son dans les bétons. Les ciments avec ajouts de laitiers de hauts fourneaux ont montré une bonne résistance à l'action agressive de l'eau de mer. Les essais à 20 ans qui comportent des essais complets de compression et de traction, y compris les prismes 20*20*80 cm, devraient permettre une appréciation plus précise de l'évolution des caractéristiques à long terme des bétons soumis à l'action du milieu marin.

ciments → types d'essais ↓	1	1 bis	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Mortiers (15 ans)							D		D					
- Compression	--	+	++	=	=	=	E	=	E	++	=	++	++	++
- Traction	=	+	+	++	+	--	T	+	T	-	=	+	-	-
Bétons : vitesse du son (20 ans)							R		R					
- Eau douce	++	-	++	+	=	=	U	=	U	+	+	=	++	+
- Marnage	=	-	=	-	-	--	T	+	T	+	+	+	++	NC

++ : forte augmentation, > 10 % pour les mortiers, > 5 % pour les bétons

+ : augmentation, entre 2 et 10 % pour les mortiers, 1 et 5 % pour les bétons

= : faible variation en plus ou moins, entre 0 et 2 % pour les mortiers, 0 et 1 % pour les bétons

- : diminution

-- : forte diminution

Tableau 3 : Variation de la grandeur mesurée à 15 ans (résistances) ou à 20 ans (vitesse du son) par rapport à celle à 90 j

Références bibliographiques

A.M. PAILLÈRE, M. RAVERDY, J.MULLET, « Influence du ciment sur la dégradation du béton en milieu marin ». Bull. Liaison LCPC 135, jan-fév 1985, pp. 5-10

A.M. PAILLÈRE, M. RAVERDY, « Etude de longue durée, de l'influence de la composition minéralogique des ciments sur la tenue à l'eau de mer. Essai dans l'eau de mer artificielle et dans la Manche ». 3^e conférence CANMET/ACI, Nice, mai 1994

M. BOUTOUIL, « Comportement d'éprouvettes de mortiers et de bétons à la mer ». Mémoire de DEA, Université de Nantes (LMG), Université du Havre (LMFGC), 1995, 85 p

P. POITEVIN, « Durability of plain and reinforced concrete in marine structure-French practice ». K. and B. mather international conference/ACI Atlanta, 1987, pp. 281-303