
Effet des déchets de marbre sur la durabilité des bétons en milieu marin

R. Chaid^{1*} — R. Jauberthie² — M-T. Abadlia¹ et A. Talah³

¹ Unité de recherche : Matériaux - Procédés et Environnement,
Université de Boumerdès 35000 Boumerdès, Algérie

*chaidr@yahoo.fr

² Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique

EA 3913, INSA, Rennes, France

³ Laboratoire de Bâti dans l'Environnement,
USTHB BP 32, 16111 El Alia Alger, Algérie

RÉSUMÉ. Cette étude a pour objectif la valorisation de résidus minéraux comme ajout dans les matériaux de construction à matrice cimentaire. Elle s'inscrit dans une démarche de développement durable. L'utilisation de résidus industriels récupérés et recyclables en remplacement partiel du ciment Portland dans le béton permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et se traduit par la fabrication d'un béton avec un impact environnemental moindre. En mettant à profit différentes techniques expérimentales, une attention particulière est accordée au comportement de la poudre de marbre finement broyée associée au ciment Portland avec addition de calcaire. Cette étude confirme l'amélioration des propriétés physico-chimiques des bétons avec ajout de poudre de marbre, ce qui est de bon augure quant à son utilisation en tant qu'ajout cimentaire.

ABSTRACT. The aim of this study is the valorisation of mineral residues as addition in building materials with cementitious matrix. It joins in an approach of sustainable development. The use of recyclable industrial waste as a partial replacement of Portland cement in concrete allows reducing greenhouse gas emissions (GGE) and is results in the manufacturing of a concrete with less environmental impact. By turning to good account various experimental techniques, a particular attention is given to the behaviour of marble powder finely crushed associated with the Portland cement with addition of limestone. This study confirmed the improvement of the physical and chemical properties of concretes with addition of marble powder, what omen good perspective for its use as cementitious addition.

MOTS-CLÉS : BHP, marbre, durabilité, eau de mer.

KEYWORDS: HPC, marble, durability, sea water.

1. Introduction

La fabrication du ciment et du béton, comme c'est le cas pour de nombreux matériaux industriels, consomme une quantité considérable d'énergie, engendre l'émission d'importantes quantités de gaz à effet de serre, contribue à l'épuisement progressif des ressources naturelles et entraîne la production de certains résidus que l'on doit éliminer. Afin d'assurer la croissance de ces matériaux de construction indispensables, l'approche du développement durable doit être intégrée à leur production, ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et sociales.

A cet effet, il est judicieux de penser à incorporer des ajouts cimentaires qui peuvent contribuer au développement durable et améliorer les performances des bétons et particulièrement ceux exposés à un environnement chimiquement agressif.

La durabilité des matériaux cimentaires est devenue aujourd'hui l'un des principaux enjeux pour les maîtres d'ouvrages. L'amélioration de cette propriété a pour objectif direct d'optimiser les formulations des matériaux et leurs procédés de mise en œuvre. Hormis la conséquence immédiate de réduction des coûts, les retombées à long terme sur l'environnement ne sont pas négligeables (Delmi et *al.*, 2004).

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'apport de la poudre de marbre issue des déchets de marbreries sur les propriétés physicochimique, microstructural et éventuellement la durabilité des bétons mûris dans l'eau de mer s'affranchissant de leur effet granulaire.

Dans l'eau de mer les sels dissous sont principalement des chlorures et des sulfates. L'attaque du béton est le résultat de réactions séparées mais plus ou moins simultanées entre les sulfates et chlorures et les constituants du ciment. Le chlore peut s'insérer dans le réseau cristallin des C-S-H. Il fait disparaître les fibres et crée une structure alvéolaire : il se forme un treillis dont les mailles deviennent de plus en plus lâches quand la quantité de chaux dissoute augmente (Gagné et *al.*, 1993).

Le mécanisme de ces dégradations fait intervenir de nombreux paramètres en relation avec les caractéristiques du ciment et du béton, la nature de l'agent agressif et les conditions d'exposition. Nous considérerons ici quelques uns des facteurs qui conditionnent la résistance chimique du béton vis-à-vis de l'eau de mer.

2. Matériaux utilisés

2.1. Le ciment

Le ciment Portland utilisé a une surface spécifique Blaine SSB de 3 830 cm²/g. C'est un CEM II/A 42,5 clinker avec ajout de 10 % de calcaire. Il est commercialisé par le groupe égyptien Orascom (Algerian Cement Company).

La composition et les caractéristiques de ce ciment sont les suivantes :

Éléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	RI	PAF
%	60,06	20,99	5,39	3,76	0,90	2,20	0,56	0,34	4,60	4,42
Minéraux	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF						
%	61,50	16,10	7,25	11,32						

Tableau 1. Composition chimique et minéralogique du ciment CEM II/A 42,5

Résistances (MPa)	Age (jours)		
	2j	7j	28j
Compression	27,8	39,2	47,9
Flexion	6,2	7,3	9,0

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques du ciment CEM II/A 42,5

2.2. La poudre de marbre (PM)

La poudre de marbre utilisée est un déchet de marbreries. L'analyse chimique réalisée par fluorescence X (tableau 3) donnée en oxydes révèle un taux assez élevé de calcium (près de 40 % en oxyde), associée à de la magnésie et de silice en faibles teneurs.

Éléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
%	39,431	1,245	0,382	0,174	2,554	0,184
Éléments	P ₂ O ₅	Na ₂ O	ZnO	SrO	ZrO ₂	
%	0,005	0,096	0,021	0,020	0,005	

Tableau 3 : Composition chimique de la poudre de marbre.

Les caractéristiques granulométriques sont mesurées au granulomètre laser CILAS 1 180 et reportées en figure 1. La poudre de marbre a une surface spécifique Blaine de **12 000** cm²/g. Le point essentiel qui émerge des résultats granulométriques se résume par une grande finesse, en se basant sur le coefficient d'uniformité (Cu), apparaît une granulométrie très serrée pour la poudre de marbre.

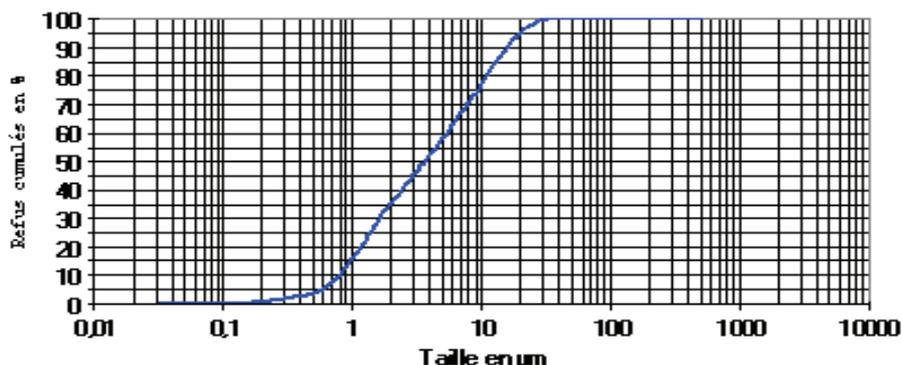


Figure 1. Distribution granulométrique de la poudre de marbre.

2.3. Les granulats

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par la mise au point de compositions optimales des différents granulats. Les gros granulats sont des graviers concassés de la carrière Jaubert (Algérie), essentiellement calcaire.

Pour ce travail, après des essais préliminaires concernant aussi bien la rhéologie des mélanges de béton que la résistance mécanique à 28 jours, le choix s'est porté sur les granulats de classe 3/8 et 8/15. Quant au sable utilisé, 76% provient d'Akbou et 24% de Boussaâda (Algérie), le module de finesse final après homogénéisation vaut 2,60.

2.4. L'adjuvant

Pour empêcher la formation néfaste de floes suite à l'ajout de poudre de marbre sur broyée, l'incorporation d'un superplastifiant réducteur d'eau est nécessaire. A cet effet, l'Adjuvant utilisé est le Viscocrete 3045, c'est un plastifiant réducteur d'eau non chloré, à base de polycarboxylates modifiés et prêt à l'emploi, il assure une bonne maniabilité jusqu'à 1h30. Il est possible de réduire le rapport eau/ciment à moins de 0,3 (Schutter et Apers, 2007).

Dans les bétons fluides le Viscocrete 3045 améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants.

3. Programme expérimental

Les compositions des bétons avec et sans poudre de marbre retenues pour le programme expérimental sont reportées dans le tableau 4. Il est à noter que les teneurs en ajout de poudre de marbre (PM) et de superplastifiant après optimisation sont respectivement : 10 % et 2 % de la masse de ciment.

Constituants		Compositions	
		BC	BPM
Ciment	kg/m ³	400	360
Sable	kg/m ³	612	612
Gravier (3/8)	kg/m ³	108	108
Gravier (8/15)	kg/m ³	1064	1064
Eau	l/m ³	136	136
Adjuvant	l/m ³	7,2	7,2
PM	kg/m ³	-	40

Tableau 4. *Composition des bétons*

Les éprouvettes de béton subissent une cure appropriée selon le type d'essai. Le milieu de conservation est l'eau de mer. Les caractéristiques physiques, mécaniques et microstructurales des bétons avec et sans ajout de poudre de marbre sont comparées.

En outre, différentes techniques de caractérisation minéralogique ont été mises en œuvre parmi lesquelles figure la diffraction X (DRX), l'essai de perméabilité aux ions chlore (ASTM C 1202) et la microscopie électronique à balayage (MEB) associée à une micro analyse (EDS).

Pour nos différents essais la légende suivante est adoptée.

Types de béton

- ✓ BC : Béton de Contrôle.
- ✓ BPM : Béton avec Poudre de Marbre.

4. Résultats et analyses

4.1 Microstructure interne

Les mécanismes d'hydratation de C_3S et C_2S donnent principalement des silicates de calcium hydratés accompagnés de Portlandite. Les observations effectuées par microscopie électronique à balayage pour les échantillons conservés 1 an dans l'eau de mer (figure 2) présentent une morphologie particulièrement dense. En ce qui concerne les pâtes avec ajout de poudre de marbre, les amas de CSH sont très denses ce qui induit une grande compacité.

On note une teneur de portlandite similaire pour les pâtes de ciment que se soit avec ou en sans poudre de marbre. L'ettringite se présente en très fines aiguilles, la présence de l'ettringite est moindre pour la pâte de ciment contenant de la poudre de marbre, cela est certainement dû à la forte compacité de cette dernière comparée à celle de ciment seul.

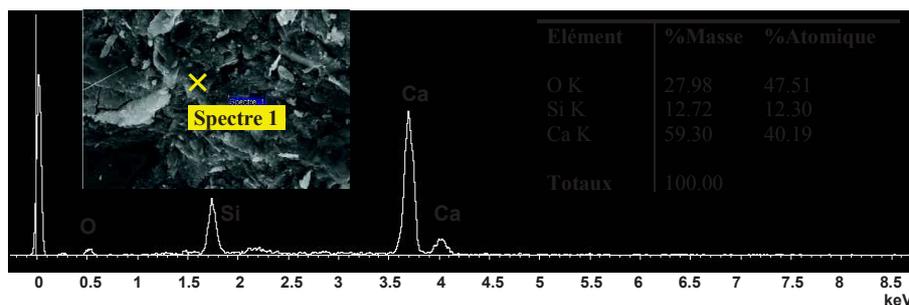


Figure 2. Observation au MEB et EDS des CSH (éprouvette conservée 365 j dans l'eau de mer).

L'analyse physico-chimique montre que les réactions d'hydratation correspondantes aux différentes pâtes font apparaître différentes phases plus ou moins bien cristallisées sur les diffractomètres de rayon X. Les composés identifiés après une conservation de 3 mois sont représentés sur les figures 3 et 4.

L'hydratation des mélanges conduit à la formation de portlandite CH et d'un gel silico-hydraté C-S-H pour toutes les compositions étudiées. Le diffractomètre de l'échantillon de pâte ciment indique que l'ettringite $C_3A.3CaSO_4.31H_2O$ est présente dans la pâte durcie au bout d'une période de trois mois. Ce composé n'apparaît plus de façon significative dans la pâte ciment contenant de la poudre de marbre, ce résultat corrobore les observations aux MEB évoquées précédemment.

Enfin, on peut noter la présence importante et croissante de la calcite provenant de l'ajout minéral calcaire et celui du marbre.

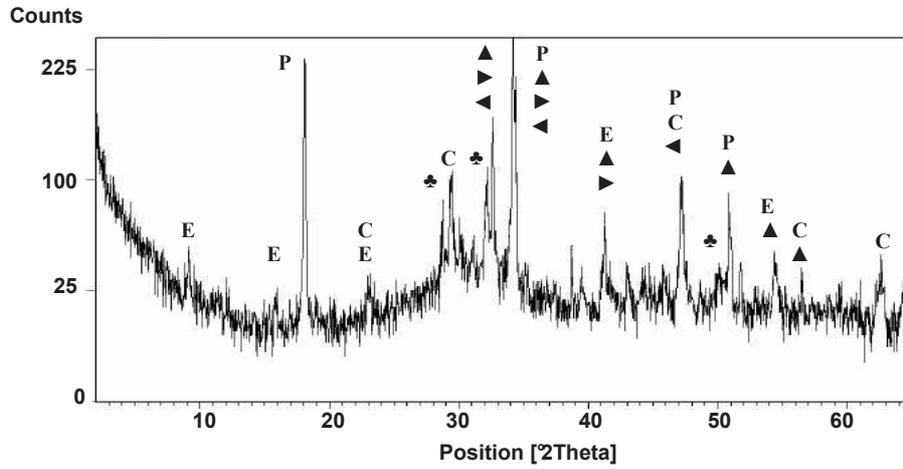


Figure 03. Radiogramme des pâtes durcies du CEM II 42.5.

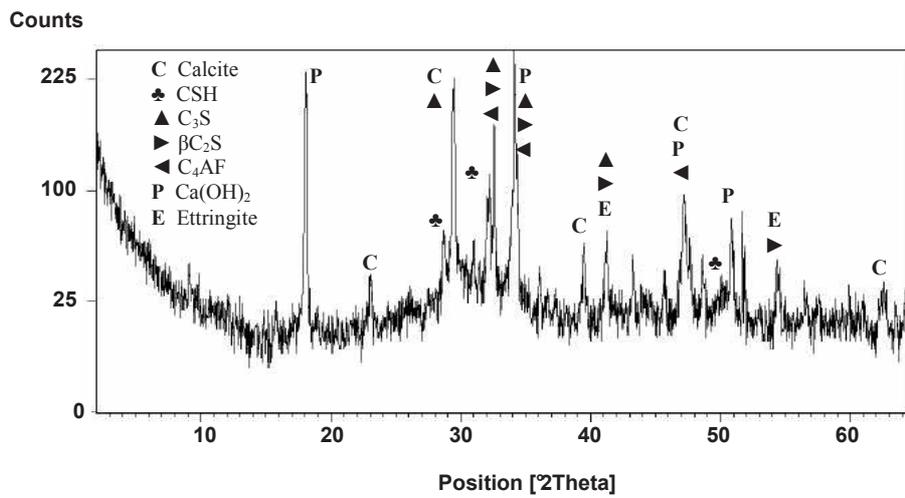


Figure 04. Radiogramme des pâtes durcies du CEM II 42.5 avec ajout de poudre de marbre.

4.2 Résistance mécanique

La figure 05 présente la variation de la résistance en compression des deux séries de bétons en fonction de la durée de conservation dans l'eau de mer.

Nous pouvons constater que la résistance en compression du béton avec ajout est supérieure à celle de béton de contrôle indiquant que la poudre de marbre contribue à la résistance en compression plus que ce que l'hydratation du ciment considéré seul pouvait apporter.

Notons que la finesse favorise l'effet physique de la poudre de marbre. En effet, la présence d'un grand nombre de particules submicroniques dans la matrice cimentaire autour des grains de ciment multiplie les possibilités de germination des produits hydratés et développe la complexité microstructurale et l'efficacité des liaisons (Bessa et *al.*, 2004).

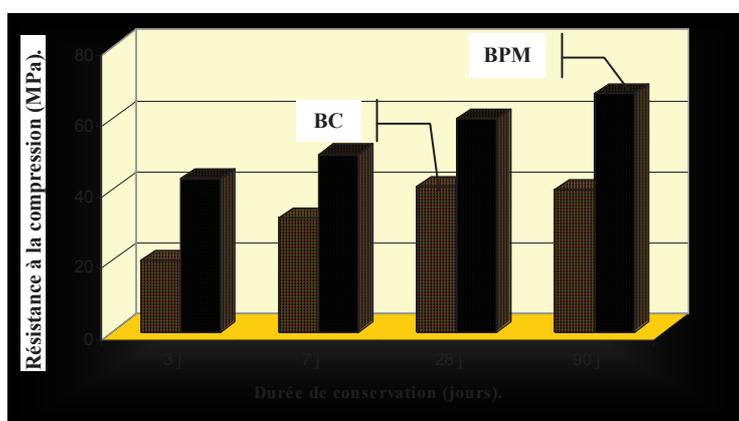


Figure 05. Évolution des résistances à la compression en fonction de la durée de conservation pour les éprouvettes de béton conservées dans l'eau de mer.

4.3 Peau du béton

L'échange Mg^{2+} contenu dans l'eau de mer et Ca^{2+} du ciment conduit à la formation de la brucite $Mg(OH)_2$, ainsi que le montre l'analyse des zones superficielles des éprouvettes de pâtes de ciment ayant séjournées trois mois en eau de mer (figures 06 et 07).

Nous constatons qu'en général la dégradation de la peau augmente avec la porosité. Cependant, la différence entre les deux séries est très importante indiquant que la dimension des cristaux de la brucite formés influence la résistance chimique des pâtes.

En effet, nous observons, que les M- H présents sur la peau des pâtes de ciment de contrôle (PC) ont des dimensions importantes. D'autre part, ceux observés sur la peau des pâtes avec ajout de poudre de marbre (PPM) sont de petites dimensions et très proches les uns des autres ce qui présente des porosités significativement moins élevées.

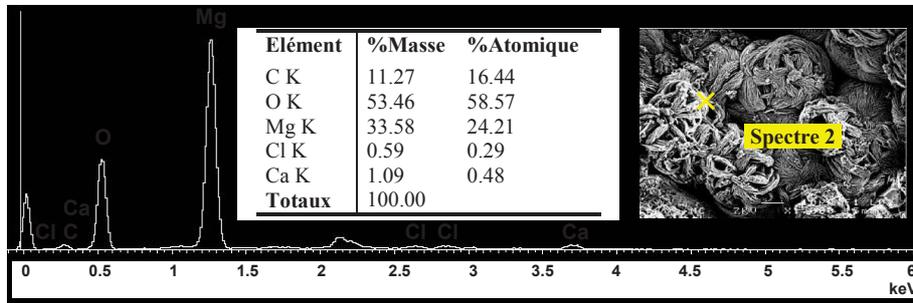


Figure 06. Observation au MEB et EDS de la surface des éprouvettes de pâte de ciment sans ajout conservées 90 j dans l'eau de mer.

Ceci explique les résultats des résistances à la compression discutés précédemment, la capacité à résister à l'attaque de l'eau de mer dépend du remplissage de la porosité par les produits hydratés. Il en résulte que la porosité de la peau constitue un critère d'évaluation de la résistance chimique des bétons.

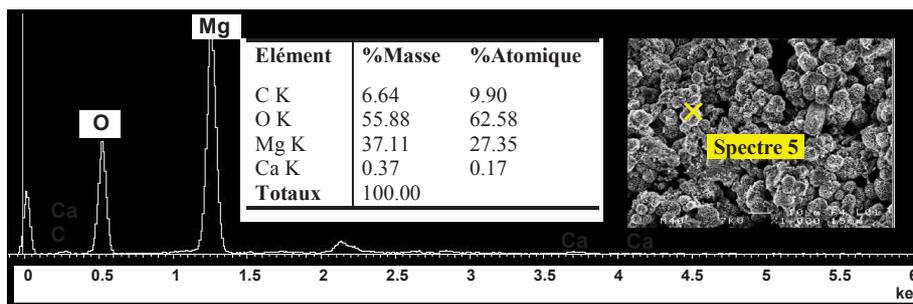


Figure 07. Observation au MEB et EDS de la surface des éprouvettes de pâte de ciment avec ajout de poudre de marbre conservées 90 j dans l'eau de mer.

4.4 Perméabilité

L'histogramme présentant l'évolution de l'intensité du courant en fonction du temps des différents bétons (Figure 08), nous laisse conclure que le béton de poudre de marbre s'est avéré plus résistant à la migration des ions chlore. L'incorporation de la poudre de marbre dans le béton se traduit par la réduction de la taille de pores dans la pâte de ciment hydratée et donc par une diminution de la perméabilité et du taux d'infiltration des chlorures.

Ainsi, sur une plage de temps de six heures, le coefficient de diffusion est diminué quel que soit l'âge de l'essai. Dans le BPM, la quantité de ciment moins importante a conduit cette fois-ci à un coefficient de diffusion plus faible que le BC. Ceci prouve bien l'influence importante de la poudre de marbre sur le coefficient de diffusion des bétons.

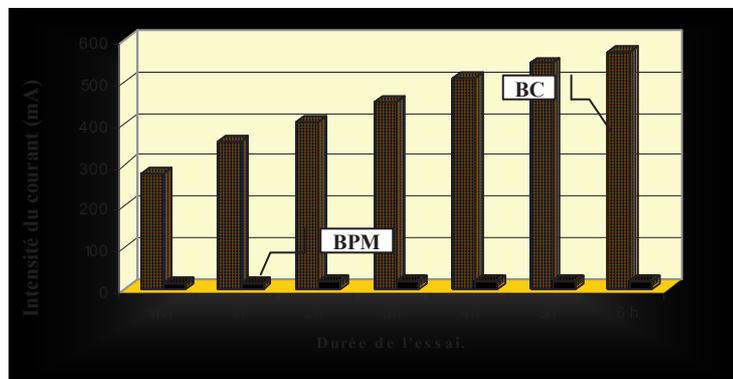


Figure 08. Evolution de l'intensité du courant en fonction du temps des différents bétons.

5. Conclusion

Le remplacement partiel du ciment par la poudre de marbre ne contribue pas à former un volume important de nouveaux produits hydratés capables de réduire la porosité des bétons même si la résistance en compression peut être plus ou moins améliorée.

La contribution de la poudre de marbre a donc un rôle structurant des liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique, cette contribution structurante se traduit en termes de durabilité par une réduction de la porosité et une meilleure résistance à l'agression chimique, la diffusion des ions chlore est systématiquement diminuée et la perméabilité superficielle réduite.

6. Bibliographie

- Bessa A., Bigas J-P., Gallias J-L., « évaluation de la contribution liante des additions minérales à la porosité, à la résistance en compression et à la durabilité des mortiers », 12ième Rencontres Universitaires de Génie Civil 2004 - ville & Génie – Civil.
- Delmi M., Aït-Mokhtar A., Amiri O., « Contribution à la modélisation des processus d'hydratation d'un matériau cimentaire », 12ième Rencontres Universitaires de Génie Civil 2004 - ville & Génie – Civil.
- De Schutter G., Apers J., « le béton à hautes performances », Bulletin FEBELCEM – fédération de l'industrie cimentaire Belge, D/2007/0280/03.
- Gagné R., Aïtcin P-C. and Lamoth P., « Chloride-ion permeability of different concretes », In : Proceedings of the 6th International Conference on durability of building materials and components, Omiya, Japan, E & FN Spon, London, ISBN 0-419-18690-5, 1993, p. 1171-1180.