

This article was downloaded by: [University of Boumerdes]

On: 20 May 2013, At: 06:40

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



European Journal of Environmental and Civil Engineering

Publication details, including instructions for authors and subscription information:
<http://www.tandfonline.com/loi/tece20>

Impact de la poudre de marbre conjuguée au calcaire du CEM II sur la durabilité du béton

Rabah Chaid ^a, Raoul Jauberthie ^b, Jahid Zeghiche ^c & Fetoum Kherchi ^d

^a Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites, Université de Boumerdès, 35000, Boumerdès, Algérie E-mail:

^b Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique EA 3913, INSA, Rennes, France

^c University of AL-BAHA, Kingdom of Saudi Arabia

^d Laboratoire de Bâti dans l'Environnement, USTHB, BP 32, 16111, El Alia Alger, Algérie
Published online: 04 Oct 2011.

To cite this article: Rabah Chaid, Raoul Jauberthie, Jahid Zeghiche & Fetoum Kherchi (2011): Impact de la poudre de marbre conjuguée au calcaire du CEM II sur la durabilité du béton, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 15:3, 427-445

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2011.9693335>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae, and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand, or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Impact de la poudre de marbre conjuguée au calcaire du CEM II sur la durabilité du béton

Rabah Chaid¹ — Raoul Jauberthie² — Jahid Zeghiche³
Fetoum Kherchi⁴

1. Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites, Université de Boumerdes
35000 Boumerdes, Algérie
chaidr@yahoo.fr

2. Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique
EA 3913, INSA, Rennes, France

3. University of AL-BAHA, Kingdom of Saudi Arabia

4. 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. Elle regroupe les résultats obtenus et celui des matériaux minéraux et composites. 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 cementious matrix. It joins in an approach of sustainable development. It gathers results obtained experimentally. 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 cementious addition.

MOTS-CLÉS : BHP, marbre, durabilité, sulfate.

KEYWORDS : HPC, marble, durability, sulphate.

DOI:10.3166/EJECE.15.427-445 © 2011 Lavoisier, Paris

1. Introduction

La gestion des déchets et sous-produits industriels est aujourd'hui un enjeu technique, économique et environnemental pour la société dans son ensemble et les entreprises en particulier. Celles-ci doivent notamment, par exemple à travers une analyse du cycle de vie de leurs produits ou services, intégrer dans leur procédé la gestion des résidus et sous-produits. D'où l'intérêt des études techniques et environnementales pouvant faciliter cette gestion, notamment dans le génie civil (Cyr *et al.*, 2005).

En termes d'énergie nécessaire à sa production, le ciment se classe au troisième rang de tous les matériaux, devancé seulement par l'acier et l'aluminium. Pour chaque tonne de ciment Portland produite, environ une tonne de dioxyde de carbone (CO₂), provenant principalement de la transformation du calcaire en chaux, ainsi que de la production d'énergie (électrique, thermique, transport) nécessaire à ce procédé, est relâchée dans l'atmosphère.

L'utilisation de résidus industriels et la diminution de la demande en ressources naturelles (comme le calcaire et le minerai de fer) sont autant d'autres avantages bien réels. Il importe également de noter que le béton à base d'ajouts cimentaires présente généralement une durée de vie plus longue que le béton « traditionnel » (Bellaloui *et al.*, 2002).

Les milieux les plus agressifs pour les bétons sont souvent les milieux salins et très souvent les milieux sulfatiques qui représentent donc un risque majeur d'agression chimique pour ces matériaux. Une enquête de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) réalisée en 1989 indique que l'attaque par les sulfates est la deuxième cause mondiale de dégradations relevées sur 800 000 ouvrages d'art.

Etant donné la structure plus dense des bétons à hautes performances (BHP), ces matériaux affichent un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par la pénétration de substances agressives, telles que les chlorures, le dioxyde de carbone, les acides et les sulfates. Si cette dernière est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard.

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. Selon la nature des ajouts cimentaires considérés, un comportement différent peut conditionner l'évolution des mélanges de béton avec une incidence sur leur durabilité. Cette étude confirme l'amélioration des propriétés physico-chimiques des bétons avec poudre de marbre, ce qui laisse de bons augures quant à son utilisation en tant qu'ajout cimentaire.

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).

Les caractéristiques de ce ciment fournies par l'ACC 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

Autres propriétés physiques

- masse volumique spécifique 3,07 kg/m³ ;
- masse volumique apparente 1 050 kg/m³ ;
- consistance normale (E/C) 0,30 ;
- retrait à 28 jours 950 µm/m ;
- début de prise 150 min ;
- fin de prise 285 min ;
- expansion 1,00 mm.

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

Le diffractogramme (figure 1) réalisé sur le ciment anhydre montre bien la présence des différentes phases cristallines : les quatre minéraux essentiels (C₃S,

β C₂S, C₃A et C₄AF) responsables de la prise et du durcissement, le gypse (CaSO₄·2H₂O) régulateur de prise et l'ajout de fillers calcaire.

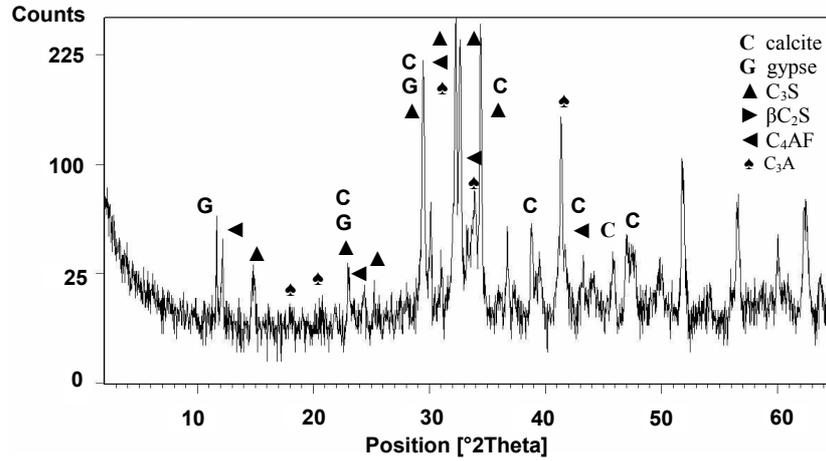


Figure 1. Diffractogramme X du ciment CEM II/A 42,5 ($\lambda_{k\alpha}$ Cu)

2.2. La poudre de marbre (PM)

La poudre de marbre utilisée est un déchet de marbrerie. Observée sur le diffractogramme (figure 2) elle est constituée essentiellement de calcite (CaCO₃).

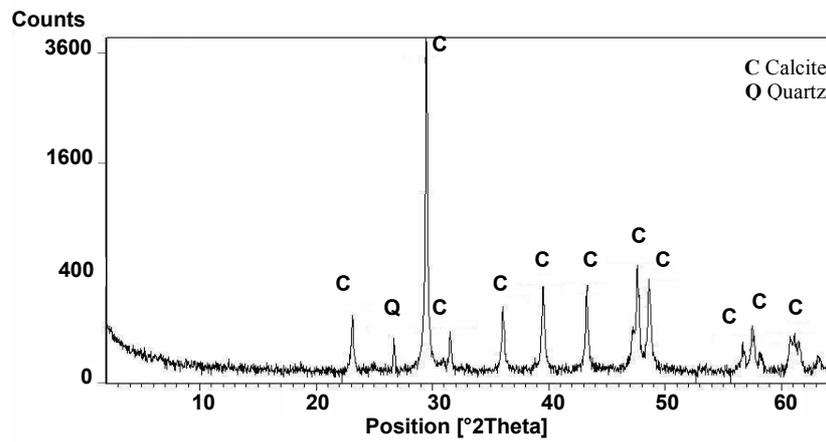


Figure 2. Diffractogramme X de la poudre de marbre ($\lambda_{k\alpha}$ Cu)

La micro-analyse effectuée aussi bien sur une large plage que sur des points à donne des compositions chimiques identiques (figure 3).

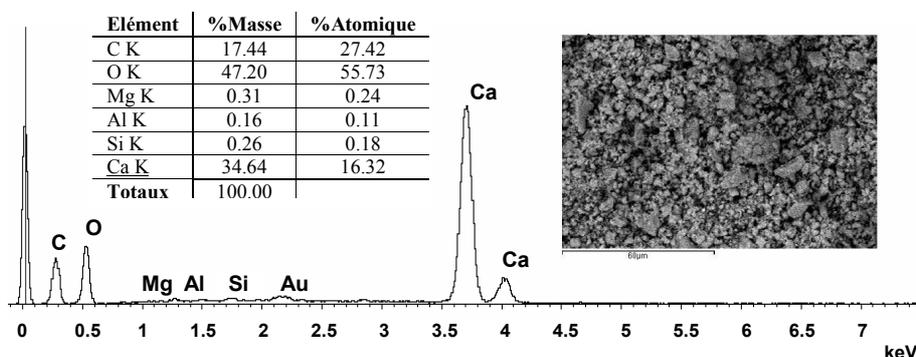


Figure 3. Micro-analyse EDS de la poudre de marbre

Les caractéristiques granulométriques sont mesurées au granulomètre laser CILAS 1 180 et reportées en figure 4. 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, paramètre étayé par le pourcentage élevé passant à 4 µm soit 50 % et la majorité à 10 µm à savoir 77 %. Environ 95 % des particules se caractérisent par un diamètre inférieur à 20 µm. En se basant sur le coefficient d'uniformité (Cu), apparaît une granulométrie très serrée pour la poudre de marbre.

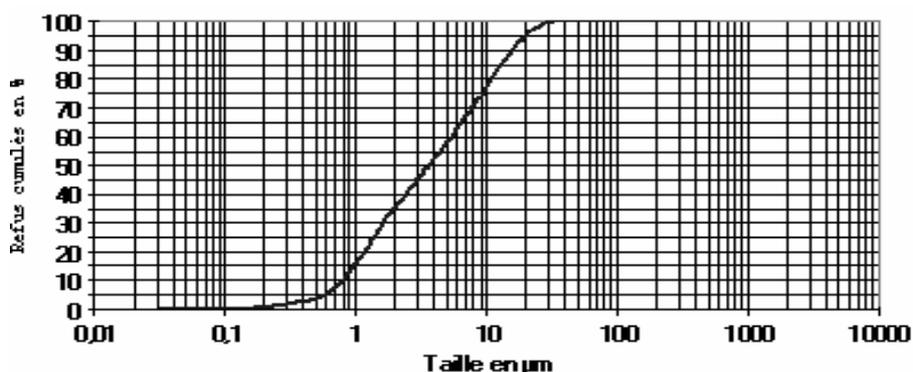


Figure 4. Distribution granulométrique de la poudre de marbre

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 son écrasement en tant que matériau durci, le choix s'est porté sur les granulats de classe 3/8 et 8/15.

Quant au sable utilisé, c'est un sable composé de 76 % sable Akbou et 24 % sable Boussaâda (Algérie), le module de finesse final après homogénéisation vaut 2,60.

2.4. L'adjuvant

Pour empêcher la formation néfaste de flocculats à la suite de l'ajout de poudre de marbre surbroyée, l'incorporation d'un superplastifiant réducteur d'eau est nécessaire. Les molécules du superplastifiant se fixent par adsorption sur l'interface entre le grain de ciment et l'eau de gâchage. Une fois adsorbé, le superplastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment. Ce faisant, les grains se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité. La structure moléculaire du superplastifiant – sous la forme de longues chaînes – renforce également cet effet.

Les molécules fixées les unes aux autres pour former des spirales avec des ramifications dans différentes directions s'enroulent entre les grains de ciment et empêchent de la sorte leur rapprochement réciproque. Grâce aux structures de polymères modernes « en forme de peigne », il est possible de réduire le rapport eau/ciment à moins de 0,3 (De Schutter *et al.*, 2007).

A cet effet, l'adjuvant utilisé est le viscocrete 3 045, 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 1h 30.

Il est utilisé pour la fabrication de :

- béton plastique ;
- béton à faible rapport E/C avec ou sans fumée de silice ;
- bétons pompés sur de longues distances.

Dans les bétons fluides le viscocrete 3 045 améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants.

Données techniques

- Masse volumique : 1,11 kg/l ;
- pH : 5 ± 1 ;
- Extrait sec : $36,4 \pm 1,8$ % ;
- Teneur en ions chlore $\leq 0,1$ % ;
- Teneur en $\text{Na}_2\text{O} \leq 2,5$ % ;
- Plage d'utilisation de 0,25 à 2,5 % du poids du liant.

3. Programme expérimental

Les compositions des bétons avec et sans poudre de marbre retenues pour le programme expérimental sont reportées dans le tableau 3. 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 3. *Composition des bétons*

Pour nos différents essais la légende suivante est adoptée.

Types de béton

- **BC** : béton de contrôle ;
- **BPM** : béton avec poudre de marbre.

La procédure de malaxage pour confectionner les éprouvettes de béton est la suivante :

1) les granulats et le liant (ciment + PM) sont mélangés à sec pendant une minute ;

2) l'eau de gâchage est ajoutée avec un tiers du volume de superplastifiant et le malaxage se poursuit pendant 2,5 minutes ;

3) le superplastifiant restant est ajouté avec un malaxage final d'une minute.

Les éprouvettes de béton sont conservées dans leur moule en salle humide (20 °C, 95 % HR) pendant 24 heures. Elles subissent ensuite une cure appropriée selon le type d'essai. Le milieu de conservation est une eau sulfatée de concentration 5 % de gypse. Pour chaque essai, trois éprouvettes sont préparées et nous considérons la moyenne des résultats obtenus.

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 sont mises en œuvre parmi lesquelles figurent la diffraction des rayons X (DRX), l'analyse thermique différentielle et gravimétrique (ATD-ATG) et la microscopie électronique à balayage (MEB) associée à une micro-analyse (EDS).

4. Résultats et analyses

L'objet de cette étude porte sur la durabilité du béton vis-à-vis des sulfates. La résistance du béton aux attaques sulfatiques est un facteur important pour sa durabilité.

L'origine de la contamination du béton est diverse, elle est interne lorsque les constituants du matériau même sont sources de sulfates (granulats contenant du plâtre ou des sulfures, ciment au gypse utilisé comme retardateur de prise...); elle est externe lorsque le béton est dans un environnement pollué par des sulfates (réseaux d'assainissement, pollution industrielle, eaux souterraines et de mer...). Ils sont alors transférés à l'intérieur de la matrice cimentaire par diffusion, c'est l'attaque du béton par les sulfates. Les sulfates peuvent altérer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques, expansion ou perte de propriétés liantes des CSH.

4.1. Résistance mécanique

On note que les résistances en compression de béton avec ajout de poudre de marbre de granulométrie très serrée (figure 4) élaboré dans le cadre de nos travaux et quel que soit l'échéance, sont toutes supérieures au béton de contrôle. Nous avons donc affaire à des bétons de hautes performances. Cette qualité n'est en rien affectée par le milieu environnant (figure 5).

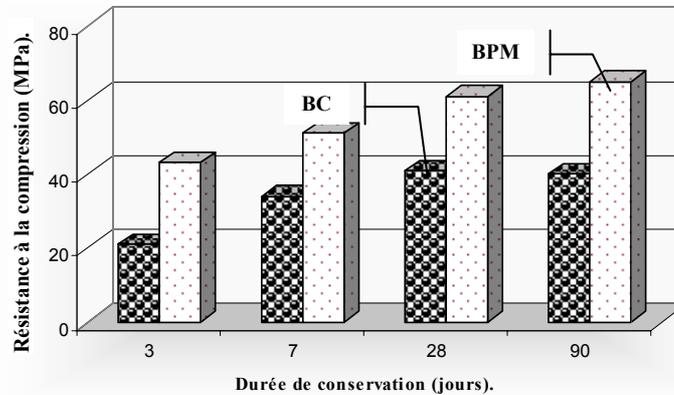


Figure 5. Évolution des résistances à la compression des éprouvettes de béton en fonction de la durée de conservation

4.2. Absorption capillaire

Dans un deuxième temps, nous déterminons l'absorption capillaire des échantillons. Pour ce faire, des éprouvettes de forme cubique $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ sont confectionnées. Elles sont conservées 28 jours dans l'eau puis séchées à l'étuve à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante préalablement aux mesures de capillarité.

Puis les faces latérales sont enduites par une résine époxydique afin d'assurer un écoulement unidirectionnel et empêcher l'évaporation. L'accroissement de la masse des éprouvettes due à la montée capillaire (figure 6) est suivi en fonction du temps.

Le coefficient d'absorption capillaire est calculé à partir de la relation suivante :

$$CA = \frac{\Delta M}{S \sqrt{t}} \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{1/2} \quad [1]$$

- CA : coefficient d'absorption ;
- ΔM : différence de masse entre deux temps $M(t) - M(t_0)$;
- S : surface de contact ;
- t : temps.

Les résultats obtenus confirment bien la faible capacité d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de marbre comparée au béton de contrôle. Ceci est un indice d'une compacité accrue de ces bétons. Outre leurs résistances mécaniques élevées ils présentent des avantages en termes de durabilité. La poudre de marbre

entrant dans leur composition permettra de ralentir la pénétration des agents agressifs et notamment les ions sulfates au cœur des bétons.

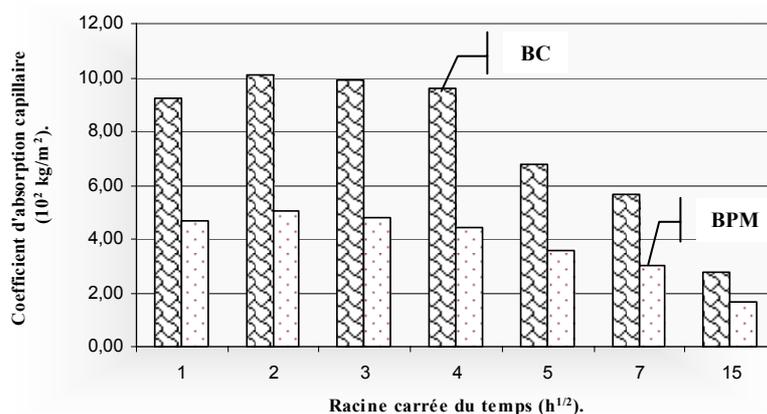


Figure 6. Évolution du coefficient d'absorption capillaire

4.3. Mesure de la perméabilité à l'oxygène

Cette méthode est applicable aux corps d'épreuve moulés et aux carottes dans les limites de la tolérance dimensionnelle imposée par l'appareil. Elle permet de mesurer des perméabilités entre 10^{-15} et 10^{-20} m² (Concrete Society, 1987).

Principe de l'essai

L'essai consiste à soumettre un corps d'épreuve cylindrique à un gradient de pression constant d'oxygène. La perméabilité est déterminée à partir de la mesure du flux en régime permanent.

Le démoulage des échantillons cylindres (5 spécimens) est effectué à un jour et les éprouvettes sont ensuite conservées dans la salle de cure humide (humidité relative 95 ± 5 %) à 20 °C. après 28 jours de cure humide les éprouvettes sont ensuite soumises à un préconditionnement en appliquant la procédure suivante :

- à la fin de la cure, deux pesées initiales sont effectuées, une pesée hydrostatique et une pesée dans l'air ; ceci fournit le volume apparent et la masse initiale ;
- les échantillons sont séchés pendant plusieurs jours à 80 °C dans une étuve, jusqu'à atteindre une masse constante finale, correspondant à un taux de saturation nul ;
- les échantillons sont alors sortis de l'étuve puis conservés à 20 °C pour les ramener à température ambiante.

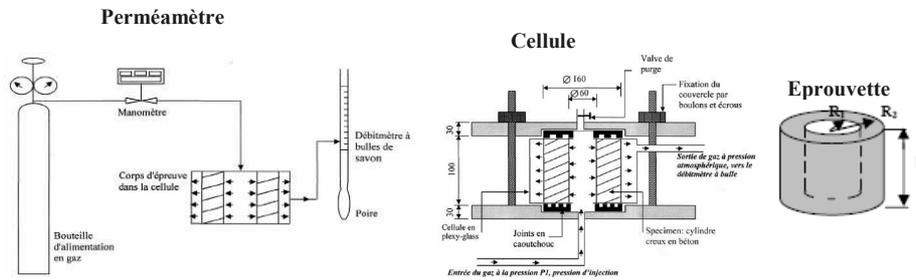


Figure 7. Schéma de fonctionnement du perméamètre (Talah, 2005)

L'essai de perméabilité peut alors avoir lieu. Cet essai est effectué pour trois valeurs de pression (2, 4 et 6 bars absolus) pour les cinq échantillons. Une moyenne de ces valeurs est calculée. Les trois échantillons parmi les cinq qui ont une valeur de perméabilité la plus proche de cette moyenne sont sélectionnés. Ils sont considérés comme plus représentatifs du matériau que les autres (AFPC, 1997).

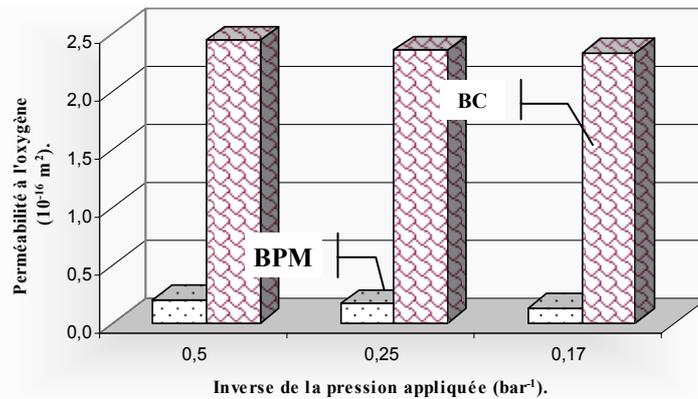


Figure 8. Perméabilité à l'oxygène des bétons

La valeur de la perméabilité est calculée en utilisant la formule de Poiseuille suivante :

$$K_a = \frac{2 \mu Q P_1 L}{A(P_1^2 - P_0^2)} \quad [2]$$

où

- Q : débit volumique mesuré à la pression atmosphérique en m^3/s ;
- p_0 : pression atmosphérique en bar ;
- L : épaisseur d'échantillon en m ;
- A : section d'échantillon en m^2 ;
- p_1 : pression appliquée à l'amont en bar ;
- μ : viscosité de l'oxygène ($2,02 \cdot 10^{-5}$ Pa.s, à 20°C).

K_a est déterminé à partir d'une régression linéaire des différentes mesures de perméabilité apparentes effectuées pour différentes pressions d'admission selon l'inverse de la pression moyenne (Abbas, 1999).

Indifféremment de la pression, l'ajout de poudre de marbre finement broyée conduit à une baisse significative du coefficient de perméabilité à l'oxygène. Par exemple, à une pression de 6 bars il passe de $2,3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ pour le béton de contrôle à $1,3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ pour le béton avec ajout de poudre de marbre.

4.4. Microstructure interne

Plusieurs aspects de la durabilité du béton sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durcie. Pour comprendre les propriétés physico-chimiques du béton qui gouvernent sa durabilité, il est important de comprendre la structure de base de la pâte de ciment hydratée.

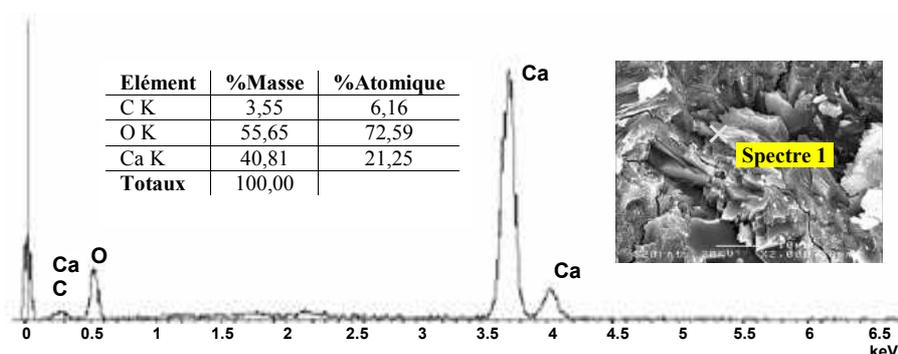
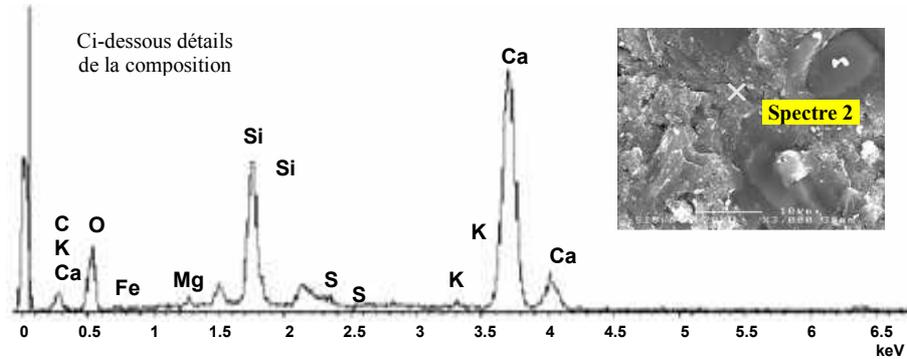


Figure 9. Observation au MEB et EDS de la portlandite

Des observations au microscope électronique à balayage nous ont permis de préciser la structuration des pâtes de ciment avec et sans ajout. En ce qui concerne les pâtes sans ajout de marbre, certains pores sont remplis de cristaux d'hydroxyde de calcium, qui se présentent sous les formes habituelles de prismes et de plaquettes juxtaposés (figure 9).



Détails de composition

Elément	% Masse	% Atomique
C K	15,3	24,28
O K	44,16	53,57
Mg K	0,41	0,33
Al K	1,15	0,83
Si K	9,64	6,66
S K	0,92	0,56
K K	0,22	0,11
Ca K	27,62	13,37
Fe K	0,86	0,30
Totaux	100,00	

Figure 10. Observation au MEB et EDS des CSH

La microstructure des liants durcis contenant de la poudre de marbre présente une structure plus homogène. Les fibres de silicates hydratés sont empilées et collées les unes aux autres et présentent des orientations multidirectionnelles (figure 10). Leur faible microporosité est un frein à la formation de l'ettringite sous forme d'aiguilles.

De ce qui vient d'être mentionné, la porosité de la pâte est un facteur important lié directement aux nombreuses propriétés du béton telles que :

- caractéristiques mécaniques ;
- perméabilité au gaz et à l'eau ;
- diffusivité ;
- durabilité.

Donc, un béton faiblement poreux est en général plus durable, la faible porosité empêche la pénétration de l'eau et d'agents potentiellement agressifs (sulfates, chlorures, CO_2 ...).

L'analyse physico-chimique montre que les réactions d'hydratation correspondant 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 dans l'eau séléniteuse sont représentés sur les figures 11 et 12.

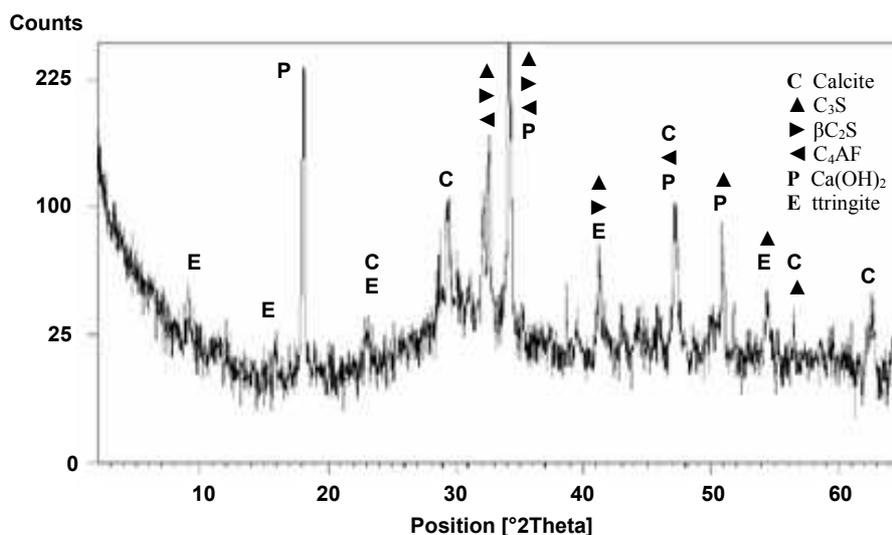


Figure 11. *Diffractogramme X des pâtes durcies du CEM II 42.5*

L'hydratation des mélanges conduit à la formation de portlandite CH , de calcite CC et d'un gel silico-hydraté C-S-H pour toutes les compositions étudiées. Les trois pics principaux de diffraction du silicate hydraté ne sont pas clairement identifiés, ce qui traduit le faible degré de cristallisation de ce composé. Le diffractomètre de l'échantillon de pâte ciment indique que l'ettringite $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 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.

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence une attaque sulfatique initiée par le gypse entraînant une faible précipitation d'ettringite, composé le plus stable dans des milieux dont le pH est supérieur à 10,5. Dans l'échantillon sans ajout de marbre, il semble que l'attaque sulfatique de la pâte soit favorisée. Cette réaction s'effectue alors dans un milieu où la stabilité de l'ettringite est renforcée.

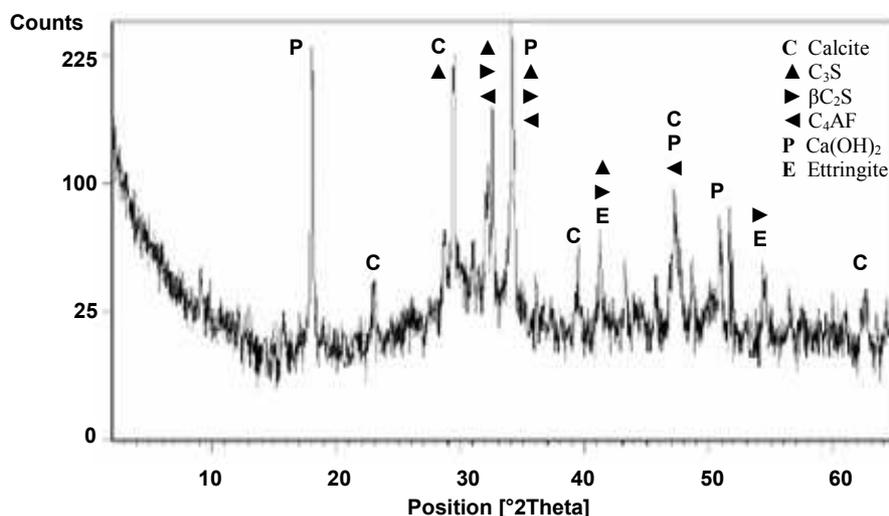


Figure 12. Diffractogramme X des pâtes durcies du CEM II 42.5 avec ajout de poudre de marbre

Enfin, on peut noter la présence importante et croissante de la calcite provenant de la carbonatation des phases hydratées et principalement de la portlandite dans les échantillons, de l'ajout minéral calcaire et celui du marbre. L'analyse thermique différentielle doit permettre de vérifier les indications obtenues par diffraction X.

4.5. Analyse thermique

Les thermogrammes (figures 13 et 14) montrent essentiellement 3 pertes de masse qui caractérisent respectivement la perte des molécules d'eau de $C_xS_yA_tH_z$ et de $C_6AS_3H_{32}$ sans différenciation, la déshydratation de la portlandite et la décarbonatation de $CaCO_3$ (initiale et $CaCO_3$, néoformé). Par contre, par cette méthode, nous ne décelons pas la présence de monocarboaluminate C_4ACH_{11} ni celle d'alumine hydratée.

L'effet endothermique à la température de 450 à 550 °C, exprime la présence des cristaux hydratés de chaux restant libres (Abadlia *et al.*, 1999) et (AFGC, 2002).

On enregistre le départ de la majeure partie de l'eau libre pour la pâte du CEM II seul à une température supérieure (146 °C) par rapport à celle enregistrée pour la pâte de ciment avec ajout de poudre de marbre (127 °C). À l'inverse, la quantité d'eau dégagée est un peu plus élevée (24,23 %) au lieu de (19,10 %), conséquence de la finesse de la poudre de marbre, dont la demande en eau est plus élevée et en parallèle la température d'évaporation est plus basse.

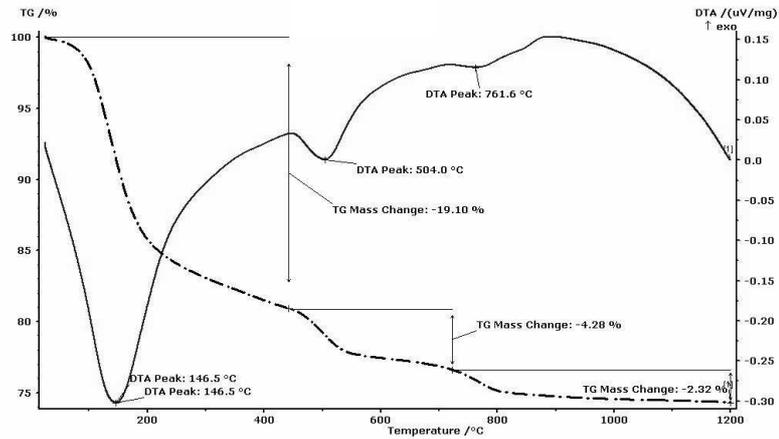


Figure 13. Thermogramme des pâtes durcies du CEM II 42.5

La formation de la portlandite pour la pâte de ciment avec ajout est plus faible, à la suite de la substitution partielle du ciment par la poudre de marbre. La déshydratation pour la première est 4,28 % contre 3,28 % pour la seconde.

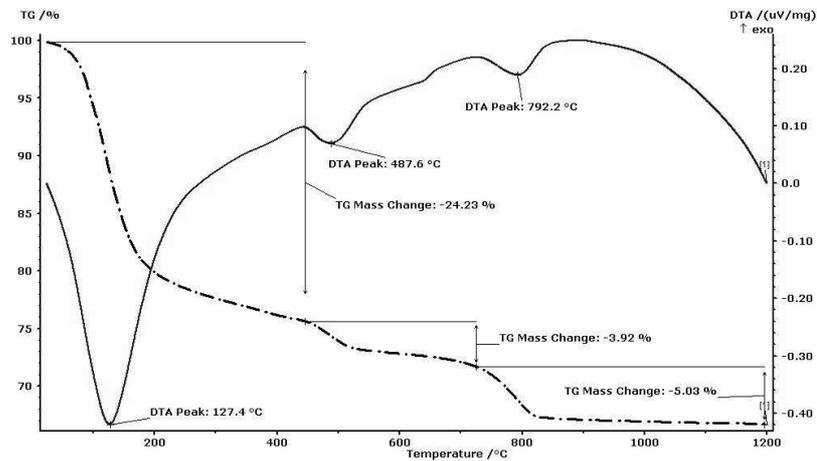


Figure 14. Thermogramme des pâtes durcies du CEM II 42.5 avec ajout de poudre de marbre

Enfin, dans l'intervalle de température 740-840 °C se produit la décarbonatation progressive des carbonates. Dans ce cas le pic endothermique pour la pâte de ciment avec ajout est plus accentué, la poudre de marbre ajoutée entraîne une perte de masse de 5,03 % au lieu de 2,32 % pour la pâte de ciment sans ajout.

Ces observations confirment en particulier l'effet filler de la poudre de marbre finement broyée. Les propriétés des bétons et pâtes de ciment, en termes de résistance en compression, absorption capillaire et perméabilité au gaz sont améliorées. L'incidence de la poudre de marbre sur leurs microstructures, en terme de densification de la matrice et modification de la porosité est très marquée.

4.6. Peau des bétons

La figure 15 montre les observations faites sur les surfaces des éprouvettes de béton conservées dans l'eau séléniteuse (BC et BPM) et l'eau de robinet (E). Les observations au microscope électronique à balayage mettent en évidence soit les dégradations de la surface par passage de certains éléments vers la solution soit des cristallisations de nouvelles phases (Chaid *et al.*, 2006). La micro-analyse permet de confirmer leurs compositions chimiques (tableau 4).

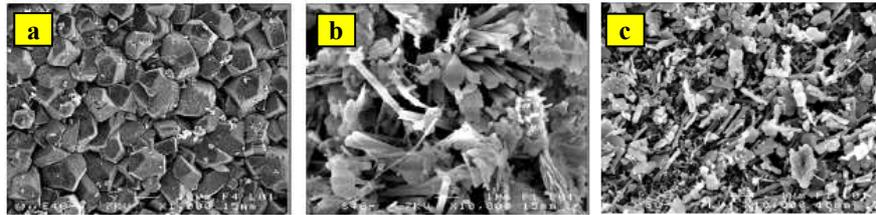


Figure 15. Observation au MEB de la surface des éprouvettes de béton

La figure 15a présente les observations réalisées sur les surfaces des éprouvettes des deux bétons conservées dans l'eau de robinet. Les cristaux de calcite sont bien formés avec des facettes de formes régulières et des tailles qui dépassent les 10 µm, aucun autre dépôt de matière n'est remarqué.

Par contre, pour les éprouvettes de béton conservées dans l'eau séléniteuse (figures 15b et 15c), la surface est recouverte de cristaux de calcite de formes irrégulières, différentes de celles observées sur les éprouvettes de béton conservées dans l'eau de robinet. Il est donc évident que ce sont des faces cristallines de développement, la portlandite s'est carbonatée. De plus, on observe des dépôts d'aiguilles de gypse et d'ettringite sur la surface : ceci correspond à la sulfatation sur les cristaux de portlandite.

En particulier, les cristallites observées sur les éprouvettes de béton de contrôle (15c) sont de petites tailles, la présence de gypse et d'ettringite est accrue, ce qui explique peut-être la forte dégradation de ces bétons comparée aux bétons de poudre de marbre (15b).

Visiblement, l'ajout de poudre de marbre favorise la carbonatation de la portlandite (probablement croissance cristalline sur les germes fournis par les fines), ce qui freine la formation du gypse et de l'ettringite. Par conséquent, la dégradation de la surface au contact du milieu séléniteux est limitée.

Elément	15a		15b		15c	
	%Masse	%Atomique	%Masse	%Atomique	%Masse	%Atomique
C K	10,21	20,73	19,08	30,25	16,09	24,22
O K	26,90	41,00	33,12	40,33	53,05	59,67
Ca K	62,89	38,27	22,62	10,83	17,99	8,08
Si K			17,11	12,25	9,07	5,81
S K			1,18	0,73	1,85	1,01
Al K			6,30	4,69	1,76	1,17

Tableau 4. EDS de la surface des éprouvettes de béton

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.

Le béton avec ajout de poudre de marbre avec une SSSB de 12 000 cm²/g présente des avantages intéressants par rapport au béton de contrôle : résistances mécaniques plus élevées, durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques, l'absorption d'eau capillaire est systématiquement diminuée et la perméabilité réduite. Ceci doit conduire à une amélioration de la résistance au gel bien que ce point reste à vérifier.

En plus de son impact écologique évident, la récupération des déchets de poudre de marbre et leur intégration dans les bétons présente de grands avantages en termes d'entretien à long terme à la suite de l'amélioration de la durabilité des ouvrages.

6. Bibliographie

- Abadlia M.-T., Bali A., « Les causes de la corrosion chimique des bétons et amélioration de leur durabilité », *Revue : Algérie Equipement*, n° 22, 1999, p. 27-31.
- Abbas A., Carcassès M., Ollivier J.-P., "Gas permeability of concrete in relation to its saturation", *Materials and Structures*, vol. 32, January-February 1999, p. 3-8.
- AFPC 97, AFPC-AFREM, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM *Durabilité des bétons*, Toulouse, 1997.
- Bellaloui A., Tagnit-Hamou A., Ballivy G., Web des Presses scientifiques du CNRC, 2002.
- Chaid R., Jauberthie R., Bali A., Abadlia M.-T., « Apport des fillers calcaires à la durabilité des BHP en milieu sulfatique », *Matériaux & Techniques*, EDP-Sciences, vol. 94, 2006, p. 199-207.
- Concrete Society Working Party, Permeability Testing of Site Concrete, Technical Report n° 31, The Concrete Society, London, 1987, p. 95.
- Cyr M., Aubert J.E., Husson B., Julien S., Clastres P., « Gestion des résidus minéraux dans les matériaux cimentaires », 23^e Rencontres universitaires de génie civil, *Risque et Environnement*, 2005.
- De Schutter G., Apers J., « Le béton à hautes performances », *Bulletin FEBELCEM – fédération de l'industrie cimentaire belge*, D/0280/03, 2007.
- Documents scientifiques et techniques, Bétons fibrés à ultra hautes performances, Recommandation provisoires, AFGC – Groupe de travail BFUP, janvier 2002.
- Talah A., Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu chlorhydrique, Thèse de magister, USTHB-Alger, juin 2005.

Received: 13 January 2010

Accepted: 18 October 2010