

INDICATEURS DE DURABILITÉ DES BÉTONS AVEC AJOUT DE POUDRE DE VERRE EN MILIEU MARIN

CONCRETE DURABILITY INDICATORS WITH GLASS POWDER ADDITION IN MARINE ENVIRONMENT

RABAH CHAÏD¹, HAMID ZEROUB¹ ET DAMIEN RANGEARD²

¹Unité de recherche : Matériaux - Procédés et Environnement, Université M'hamed Bougara, Avenue de l'Indépendance, 35 000 Boumerdès, Algérie.

²Laboratoire des Matériaux du Génie Civil et Génie Mécanique, INSA-Rennes, 20 Avenue des Buttes de Coësmes, CS 14315 35043 Rennes Cedex, France.

RÉSUMÉ

Une grande partie des caractéristiques mécaniques et de durabilité des matériaux à matrice cimentaire provient des performances du ciment hydraté, matrice cohésive qui enrobe le squelette granulaire. D'une manière générale, l'évolution des constituants solides de la matrice cimentaire, par dissolutions ou précipitations, lors d'agressions chimiques externes peut être mise en relation avec celle de la solution interstitielle, elle-même reliée aux échanges ioniques avec l'extérieur et au type d'ajout cimentaire utilisé.

Notre étude consiste à formuler un béton en substituant 30% de ciment par de la poudre de verre finement broyée et à observer expérimentalement ses dégradations dans un environnement marin.

Les mécanismes de dégradations ont été reliés au développement de la microstructure du matériau. Ils sont observés au microscope électronique à balayage (MEB) et quantifiés par diffraction des rayons X (DRX). Ces examens ont été complétés par une analyse thermique, des mesures de perméabilité aux ions chlorures et au gaz oxygène.

Mots clés : Béton, Verre, Perméabilité, Microstructure, Mer.

ABSTRACT

Most mechanical properties and durability of cementitious materials are related to the performance of the hydrated cement that coats the granular skeleton. In this paper, concrete is formulated by substituting 30% of cement by finely ground glass powder.

The experimental study consists of investigating the effect of conservation in the sea water on the performance of concrete. The mechanisms of concrete damage have been related to the development of the microstructure of the material.

The degradations were observed using scanning electron microscope (SEM) and quantified by x-ray diffraction (XRD). In addition, thermal analysis, chloride ions permeability and gas permeability tests were performed. The results have shown that glass powder present a pozzolanic activity and hence it affects favorably the microstructure of the paste which becomes denser and less permeable.

Keywords: Concrete, Glass, Permeability, Microstructure, Sea.

1. INTRODUCTION

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et autres agents agressifs. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline), leur pouvoir pouzzolanique et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux [1].

Obtenu essentiellement de la fusion du sable à 99 % de silice, le verre se place comme un matériau digne du terme « pouzzolanique ». Comme la demande et l'utilisation du verre s'accroît, les déchets de verre augmentent par voie de conséquence. Plusieurs alternatives de réutilisation du verre existent. D'après certaines études, toutes ces débouchés, qui nécessitent un pré conditionnement (y compris un broyage), ont un développement limité et ne parviennent pas à absorber les quantités de verre récupérées. Afin d'apporter une solution durable à la problématique du verre entreposé, une autre piste potentielle et encourageante est envisageable. Elle consiste à le valoriser dans la formulation des bétons.

En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités. Celles-ci ont encouragé de nouvelles études [2, 3].

La diminution de la porosité, grâce à la réduction du rapport E/C par adjonction de superplastifiant qui déflocule les grains de ciment et assure une maniabilité suffisante, ainsi que l'élargissement de leur spectre granulaire grâce à l'ajout d'éléments ultrafins, confèrent à l'ensemble une forte compacité au béton et une grande durabilité vis-à-vis des milieux qualifiés chimiquement d'agressifs [4].

Notre étude a pour objectif la valorisation de résidus minéraux comme substituant dans les matériaux de construction à matrice cimentaire. Elle s'inscrit dans une démarche de développement durable. Cet article rapporte les résultats de la microstructure des bétons réalisés avec un ciment CEM II seul servant de référence et un ciment substitué partiellement par du verre finement broyé et conservés dans l'eau de mer.

L'évolution des phases cristallines est suivie par diffraction X et les minéraux sont observés au Microscope Electronique à Balayage (MEB), la micro analyse qui lui est associée permet de confirmer leurs compositions chimiques.

Ces déterminations concernent aussi bien les formations superficielles dues aux bains de conservation que les formations internes initiales et leurs évolutions dans le temps. En parallèle à ces essais, nous avons suivi l'évolution

de la perméabilité des bétons aux ions chlorures et au gaz oxygène.

2. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Les différentes éprouvettes de béton préparées sont conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24 h. Elles sont ensuite mises dans un bain de conservation (eau de mer). La durée de conservation a été fixée à 7j, 28j et 3 mois.

L'évolution des différentes phases cristallines présentes dans le béton ou nouvellement formées est suivie par diffraction des rayons X. Le diffractomètre utilisé est équipé d'une anticathode en Cuivre et un filtre au Nickel ($K\alpha$ Cu, $\lambda = 0,154\text{nm}$), l'enregistrement est de type pas à pas (pas de $0,02^\circ 2\theta$).

Pour confirmer les résultats obtenus par l'analyse de DRX, nous avons procédé à des observations au microscope. L'appareil utilisé est un microscope électronique à balayage destiné à l'observation d'échantillons secs et rendus conducteurs par dépôt d'Or-Palladium superficiel et à l'analyse par un spectromètre de dispersion d'énergie.

3. MATÉRIAUX UTILISÉS

3.1 - Le ciment

Le ciment Portland utilisé est un CEM II /A-L 42,5 (L=18 % de calcaire) dont les caractéristiques chimiques, minéralogique et physico-mécaniques sont présentées respectivement dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1 : Compositions chimique et minéralogique du ciment CEM II 42,5.

Table 1: Chemical and mineralogical compositions of cement CEM II 42.5.

Éléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	RI	CaO ₁	PAF
%	60,78	18,13	4,42	3,03	1,84	2,34	0,64	0,13	0,20	1,00	8,36
Minéraux	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF				
%	57		19		05		13				

Tableau 2 : Caractéristiques physico-mécaniques du ciment.
Table 2: Physico-mechanical properties of the cement.

<i>Caractéristiques physiques</i>	Début de prise	2h30
	Fin de prise	4h00
	Masse spécifique	3,1 g/cm ³
	SSB	3555 cm ² /g
	Chaleur d'hydratation	456,60 (j/g)
<i>Caractéristiques mécaniques</i>	Age (jours)	Résistance à la compression (MPa)
	7	36,78
	14	41,07
	28	45,07

3.2 - Les granulats

a) Le sable

Pour la confection de nos bétons, on a utilisé un sable corrigé, composé de celui de Baghliia et de Boussaâda (Algérie), de nature respective : calcaire et siliceuse. Le tableau 3, résume les caractéristiques physiques des différents sables.

Noter, qu'un sable avec un module de finesse élevé est préférable pour la confection des bétons de hautes performances (BHP) en vue de réduire la quantité d'eau de gâchage [5].

Tableau 3 : Caractéristiques physiques des sables utilisés.
Table 3: Physical characteristics of the sand used.

Types de sables	Ma (g/cm ³)	Ms (g/cm ³)	ESP (%)	Mf
Sable de Boussaâda	1,48	2,66	68	0,96
Sable de Baghliia	1,53	2,73	73,2	3,86

Le module de finesse prédéfini du sable utilisé étant : $Mf = 2,8$, il est composé de 63,44% de sable grossier et 36,56% de sable fin.

b) Les graviers

Pour la confection de nos bétons, les graviers utilisés sont d'origine calcaire, leurs caractéristiques physiques et mécaniques sont présentées dans le tableau 4.

Des études précédentes ont confirmé qu'on obtient les meilleurs résultats avec des granulats de dimension maximale comprise entre 13 et 14 mm [6].

Des études récentes recommandent un rapport gravier/sable (G/S) compris entre 1,5 et 2 [7].

Tableau 4 : Caractéristiques des graviers.
Table 4 : Features gravel.

Types de gravies	Ma (g/cm ³)	Ms (g/cm ³)	Los Angeles
Gravier 3/8	1,36	2,63	26,70
Gravier 8/15	1,45	2,63	25,5

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats par voie sèche sont représentés sur la figure 1.

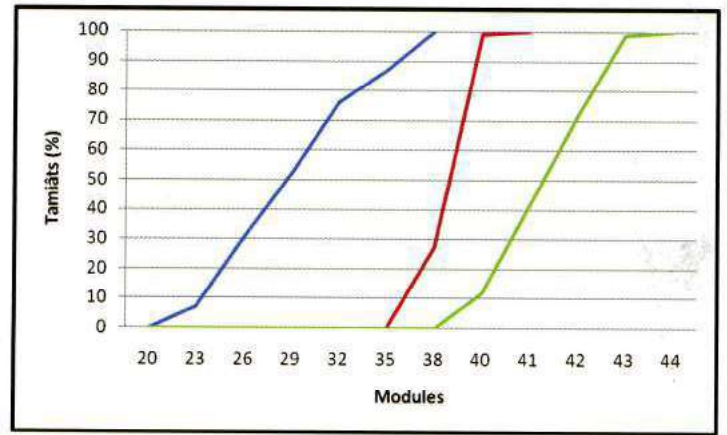


Figure 1 : Courbes granulométriques des granulats.
Figure 1: Grading curves of aggregate.

3.3 - Le superplastifiant

Le superplastifiant est un adjuvant réducteur d'eau, non chloré, à base de polycarboxylate modifié et prêt à l'emploi. Il se présente sous la forme d'un liquide ocre clair. Il assure un maintien de maniabilité jusqu'à 1h30.

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

3.4 - La poudre de verre

Provenant essentiellement de verre sodocalcique, la poudre de verre est obtenue après broyage des débris de verre. Les dimensions de ses particules sont inférieures à 80µm.

Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre de verre sont illustrées dans les tableaux 5 et 6.

Tableau 5 : Composition chimique de la poudre de verre.
Table 5: Chemical composition of the glass powder.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
%	72,84	0,98	0,55	9,66	1,76	0,25	0,43	12,69	0,01	0,04	0,79

Tableau 6 : Caractéristiques physiques de la poudre de verre.
Table 6: Physical characteristics of the glass powder.

Masse Volumique (g/cm ³)	2,5
Surface Spécifique (cm ² /g)	8000
Couleur	Blanc grisâtre
Activité pouzzolanique	28,5 g [Ca(OH) ₂ /g(PV)]

La granulométrie de la poudre de verre déterminée au granulomètre laser est reportée figure 2. Le point essentiel qui émerge des résultats granulométriques se résume par une grande finesse, paramètre étayé par le pourcentage élevé passant à 8 µm soit 50 % et environ 90 % des particules se caractérisent par un diamètre inférieur à 25 µm. En se basant sur le coefficient d'uniformité (Cu), le verre ainsi broyé se caractérise par une granulométrie très serrée.

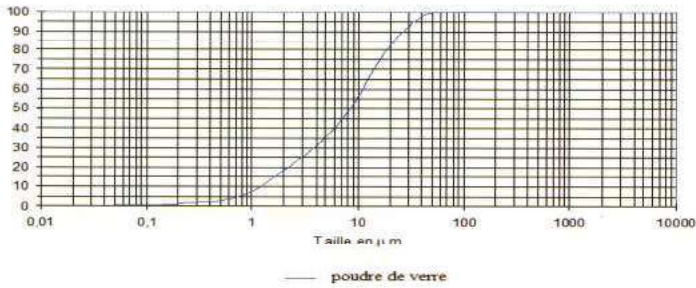


Figure 2 : Analyse granulométrique de la poudre de verre.
Figure 2: Particle size analysis of the glass powder.

L'absence de raies de diffraction dans le diffractogramme aux rayons X (figure 3) de la poudre de verre confirme son état vitrifié (amorphe), ce qui explique son effet pouzzolanique observé dans ce qui suit.

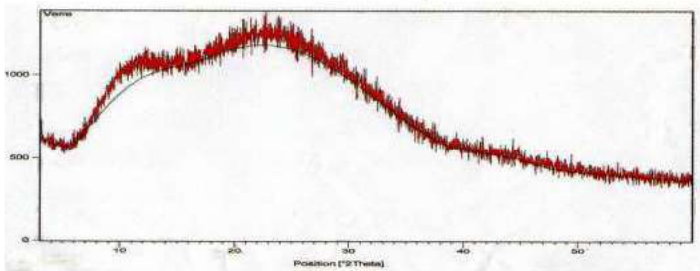


Figure 3 : Diffractogramme X de la poudre du verre.
Figure 3: X-Ray diffraction of the powder of the glass.

4. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

4.1 - Composition des bétons

Les compositions des bétons avec et sans poudre de verre retenues pour le programme expérimental après optimisation sont reportées dans le tableau 7. Il est à noter que les teneurs en ajout de poudre de verre (PV) et de superplastifiant après des essais préalables d'optimisation sont respectivement : 30 % et 2 % de la masse du ciment.

Tableau 7 : Compositions des bétons.
Table 7: Compositions of concretes.

Constituants		Compositions	
		BR	BPV
Ciment	kg/m ³	400	280
Sable	kg/m ³	700	700
Gravier (3/8)	kg/m ³	148	148
PR Gravier (8/15)	kg/m ³	938	938
Eau	l/m ³	120	120
Adjuvant	l/m ³	8	5,6
PV	kg/m ³	-	120

Dans tout ce qui suit la légende suivante a été adoptée :

a) Pour les bétons ;

- **BR** : Béton de Référence (sans ajout)

- **BPV** : Béton avec Poudre de Verre

b) Pour les pâtes ;

- **PR** : Pâte de Référence (sans ajout)

- **PPV** : Pâte avec Poudre de Verre

4.2 - Formations superficielles

Pour les éprouvettes de pâte de ciment sans ajout immergées dans l'eau de mer, la surface est fortement dégradée, contrairement à celle avec ajout de poudre de verre, où l'on constate des cristaux de calcite, de petite taille et par voie de conséquence une imperméabilité de la surface meilleure [8]. L'échange de Mg²⁺ contenu dans l'eau de mer et Ca²⁺ du ciment a conduit à la formation de la brucite Mg(OH)₂ (hydroxyde de magnésium), ainsi que le montre l'analyse des zones superficielles des éprouvettes de pâtes de ciment ayant séjourné trois mois dans l'eau de mer [9].





Figure 4 : Observation au MEB de la surface externe des pâtes après trois mois de conservation dans l'eau de mer.

Figure 4: SEM observation of the outer surface of the pasta after three months of storage in seawater.

4.3 - Microstructure interne

L'observation au MEB nous a permis d'examiner la microstructure des hydrates formés au sein des pâtes après 3 mois de durcissement (figure 5). Une microstructure relativement améliorée dans les pâtes avec ajout de poudre verre a été remarquée avec des interfaces relativement plus densifiées et riches en C-S-H, caractéristiques des BHP avec ajouts cimentaires actifs [10].

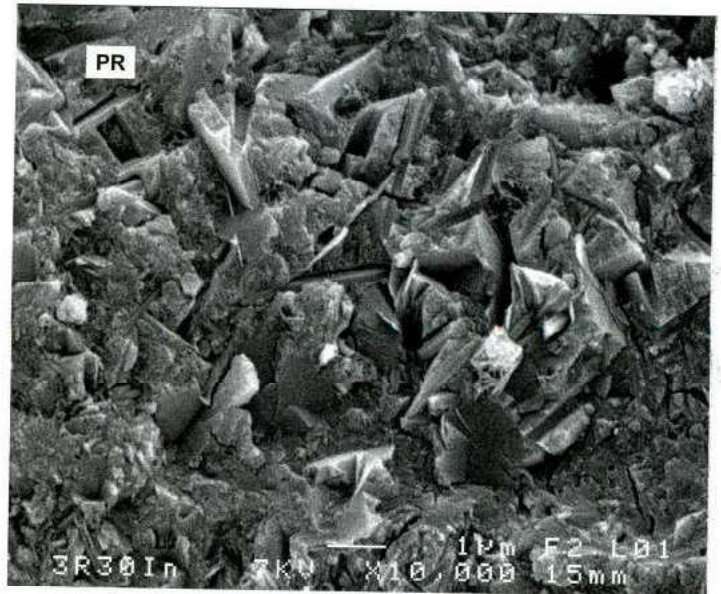


Figure 5 : Observation au MEB de la microstructure interne des pâtes.

Figure 5: SEM Observation of the internal microstructure of pasta.

Toutefois, on peut distinguer quelques plaquettes de chaux. La présence d'ettringite (aiguilles) n'est visible que dans les cavités mais la matrice étant très dense, elle ne favorise pas l'épanouissement de cette phase. La pâte de ciment avec ajout de poudre de verre se caractérise par la présence de composés hydratés très massifs aux différentes échéances, ce qui explique l'imperméabilité plus importante des bétons remarquée dans ce qui suit.

Tel que souligné par Scherer (1999), l'endommagement du béton est fréquemment attribuable à la formation de nouvelles phases solides (souvent expansives) dans la structure poreuse du matériau. Sous l'effet des pressions internes, le béton subit des déformations importantes qui mènent souvent à sa fissuration et à la ruine de l'ouvrage [11].

À ce titre, les phénomènes de détérioration chimique sont à bien des égards similaires aux mécanismes de dégradation des bétons par le gel (qui résultent très souvent de la formation de la glace dans les pores du matériau). Les problèmes d'altération chimique ont cependant tendance à être plus complexes étant donné que la nature des phases formées varie en fonction des conditions existantes [12].

4.4 - Analyse aux rayons X

L'analyse par diffraction de rayons X (figures 6 et 7) illustre l'influence du milieu de conservation sur les différentes formations. Les hydrosilicates de calcium formés (habituellement appelés C-S-H) sont semi-cristallisés ou amorphes et difficilement identifiables par diffraction X. Seules quelques raies apparaissent mais elles sont superposées aux raies des autres phases cristallines.

L'hydratation des composés anhydres des phases cristallines (intérieur des éprouvettes) des pâtes de ciment avec ajout de poudre de verre, se trouve freinée, contrairement à celles de la pâte de référence. Ceci est la conséquence de la densification de la matrice.

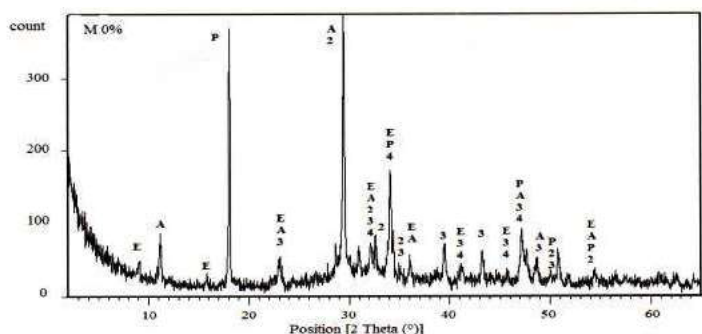


Figure 6 : Diffractogramme X de la pâte de ciment sans poudre de verre après 90 jours de conservation.

Figure 6: X-Ray diffraction of the cement paste without glass powder after 90 days storage.

Les hydroaluminates de calcium sont cristallisés sous la forme de C_4AH_{13} ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$) pour l'ensemble des pâtes et sont détectés par certaines raies de diffraction X. On note l'absence de raies de diffraction X du gypse qui est totalement consommé pendant l'hydratation et contribue à la formation d'ettringite.

L'ettringite et la portlandite sont visibles sur tous les diagrammes de pâtes de ciment, même après trois (03) mois de conservation dans les différents milieux. Toutefois, leurs pics diminuent considérablement dans les pâtes avec ajout de poudres de verre.

Dans cette étude, en plus d'une qualification des phases en présence, la finesse de la poudre de verre permet une première appréciation semi-quantitative des évolutions des phases hydratées et anhydres ainsi que des phases amorphes par comparaison des surfaces des « halos » résultants (bosse caractéristique d'une phase amorphe ou possédant un ordre local à petite échelle sur un diffractogramme des rayons X).

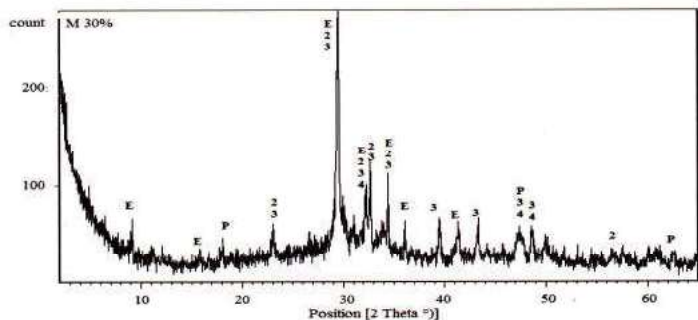


Figure 7 : Diffractogramme X de la pâte de ciment avec poudre de verre après 90 jours de conservation.

Figure 7: X-Ray diffraction of the cement paste with glass powder after 90 days storage.

L'aire de l'halo pour le béton avec ajout de poudre de verre est largement supérieure en comparaison avec celle du béton de référence. La réaction de la poudre de verre finement broyé et de la chaux a conduit à la formation d'un C-S-H parfaitement bien défini par son spectre, dont le halo le plus important est situé à $3,05 \text{ \AA}$ [13].

Ici, la portlandite est en plus faible quantité en présence de poudre de verre et ceci pour les mêmes raisons. Nous pouvons constater que la poudre de verre contribue à réduire la quantité de portlandite des pâtes de ciment, l'effet pouzzolanique est net.

4.5 - Analyses thermodifférentielles et thermogravimétriques

Des analyses thermodifférentielles et thermogravimétriques (ATD et ATG) ont été effectuées pour compléter l'étude microscopique et l'analyse aux rayons X dans l'objectif d'étayer les discussions concernant la nature des formations observées.

Une prise d'essai de 200 mg de pâte a été analysée suivant un chauffage linéaire depuis la température ambiante jusqu'à $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ avec une vitesse de $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$.

Les figures 8 et 9 montrent les courbes d'ATD et d'ATG correspondantes. On remarque quatre pics et/ou pertes de masses importantes distinctes. Ils sont liés à des changements structurels produits par des transformations physico-chimiques complexes dans les pâtes au cours de chauffage.

Un gain de masse entre 400°C et 520°C (figure 8) semble être lié à la carbonatation d'une partie de la portlandite. Dans le même intervalle pour la figure 9, on constate une perte de masse correspondant à la déshydroxylation de la Portlandite [13].

Une deuxième perte de masse très importante, aux alentours de 670 à 700°C , correspond à la seconde phase de déshydratation des C-S-H, ainsi que la formation du β C2S [14].

Au-delà de $700 \text{ }^\circ\text{C}$ (la figure 8), le troisième pic bien accentué correspond à la décarbonatation de la calcite $CaCO_3$ en CaO et CO_2 . Au contraire, la substitution de 30 % de ciment par la poudre de verre est bien illustrée par un faible pic (figure 9).

Enfin, vers $530 \text{ }^\circ\text{C}$ un pic exothermique est présenté pour les pâtes pures et très faiblement marqué pour les pâtes avec ajout de poudre de verre. Il correspond probablement à une transformation allotropique.

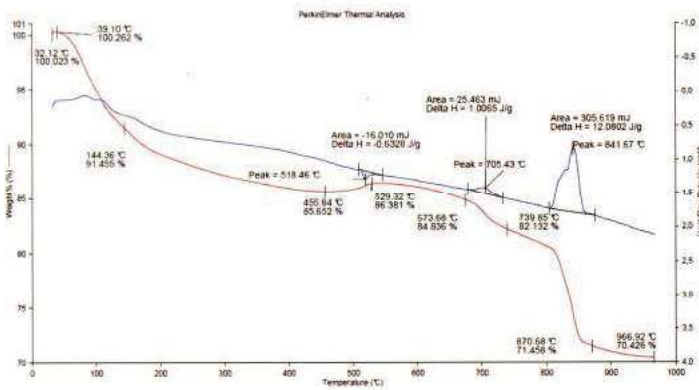


Figure 8 : Thermogramme des pâtes du ciment sans ajout.
Figure 8: Thermogram of cement pastes without addition.

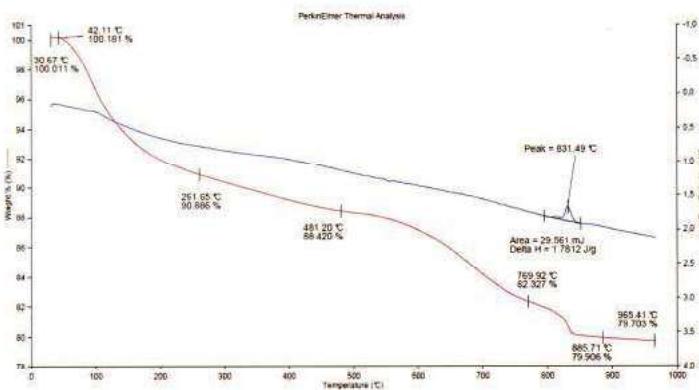


Figure 9 : Thermogramme des pâtes du ciment avec ajout de poudre de verre.
Figure 9: Thermogram of cement pastes with added glass powder.

Noter, que l'analyse thermogravimétrique ne permet pas vraiment de discerner la décomposition de l'ettringite de celle des C-S-H car ils se décomposent tous aux alentours de la même température.

La perte de masse liée à la déshydroxylation de la portlandite est insignifiante avec la pâte de ciment contenant le verre. Il n'y a que très peu de portlandite présente comme il est signalé précédemment.

4.6 - Etude de la perméabilité

a) Pénétration des ions chlorures

Les ions chlorures provenant de l'eau de mer pénètrent dans le béton par diffusion ou par absorption capillaire sous l'effet de différents phénomènes. Au cours du temps, ces chlorures diffusent dans la solution interstitielle du béton, atteignent les armatures. Dans toutes ces problématiques, les mécanismes de transport des agents agressifs doivent être étudiés [15].

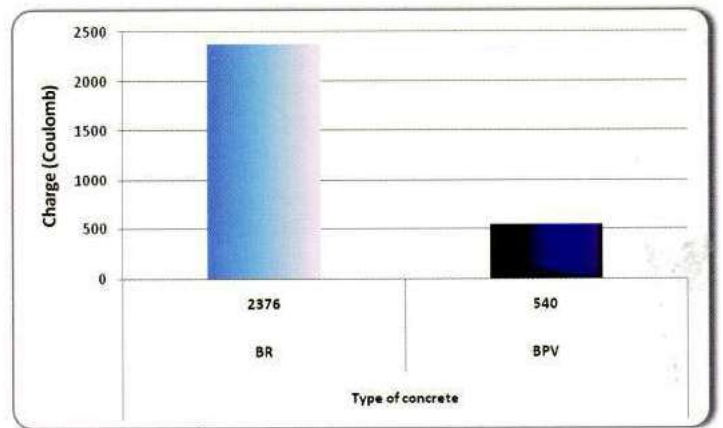


Figure 10 : Variation de la charge du courant à travers les bétons.

Figure 10: Change in current load through the concrete.

Tableau 8 : Pénétration des ions chlorures basée sur la charge passante.

Table 8: Penetration of chloride ions based on the bandwidth load.

Charge passée (coulombs)	Pénétration des ions Chlore
> 4000	Élevée
2000 - 4000	Moyenne
1000 - 2000	Faible
100 - 1000	Très faible
< 100	négligeable

En se référant au tableau 8 qui donne une classification qualitative de la pénétration des ions chlorures à travers le béton, on constate que cette pénétration est très faible concernant le béton à base de poudre de verre et est qualifiée de moyenne pour le béton de référence.

Les résultats obtenus dépendent à la fois de la microstructure du béton ainsi que la conductivité de la solution interstitielle [16]. Un béton de même microstructure peut montrer une augmentation des résistances à la pénétration des ions chlorures si la conductivité de la solution interstitielle est grande [17, 18].

Toutefois, la figure 10 montre que le béton à base de poudre de verre présente une pénétrabilité des ions chlorure très faible par rapport au béton de référence ; cela confirme que la poudre de verre agit avantageusement sur la microstructure et par la suite sur la résistance chimique des bétons (durabilité).

b) Perméabilité aux gaz

La perméabilité aux gaz est une propriété de transfert qui est fréquemment utilisée pour caractériser la durabilité du béton. Ainsi, la mesure de la perméabilité à l'oxygène est

une mesure fiable, relativement simple et utilisable pour le classement des bétons ou encore pour une évaluation de leur durabilité potentielle. De ce point de vue, elle peut constituer un bon indicateur de durabilité.

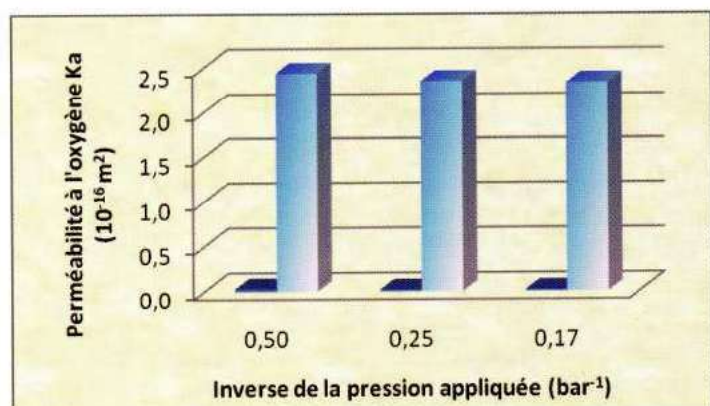


Figure 11 : Evolution de la perméabilité à l'Oxygène des bétons.

Figure 11: Evolution of the Oxygen permeability of concrete.

La perméabilité au gaz, propriété du matériau régissant le transfert selon la loi de Darcy, est un indicateur de durabilité plus fin que la porosité. La perméabilité dépend en effet à la fois de la porosité mais aussi de la géométrie de la microstructure [9].

Comme le montre la figure 11, et ceci quelle que soit la pression, l'ajout de la poudre de verre dans le béton diminue fortement la porosité du milieu. Il a pour conséquence la déconnection des pores existants rendant ainsi le milieu plus étanche et limitant le transfert des fluides dans le béton.

CONCLUSION

Les bétons avec ajouts cimentaires ont retrouvé un gain d'intérêt dans le cadre du développement durable de nouveaux produits cimentaires plus respectueux de l'environnement. Dans notre étude, la valorisation des déchets de verre à raison de 30% de la masse de ciment lors de la formulation des bétons, conduit entre autre à l'amélioration de la microstructure et la réduction des propriétés de transfert.

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'Oxygène et diffusion des ions chlorures) ont permis de montrer que les bétons avec et/ou sans poudre de verre ont des comportements très différents.

- La diffusion des ions chlorures diminue nettement lorsque de la poudre de verre est introduite. La microstructure observée explique ce phénomène.

- La perméabilité (à l'Oxygène) des BPV s'est révélée être inférieure à celle des BR. Ceci résulte de la densification de la matrice et par voie de conséquence, les propriétés de transfert sont limitées.

L'exploitation des résultats d'ATG - ATG montre que l'incorporation de la poudre de verre entraîne une diminution de la perte de masse pour la phase de déshydroxylation de la portlandite : la quantité de portlandite est plus faible. Elle a probablement réagi par effet pouzzolanique avec la poudre de verre.

La contribution de la poudre de verre à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : un effet physico-chimique et microstructural et un effet chimique. D'une part, elle est susceptible de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés. D'autre part, par son caractère pouzzolanique ou hydraulique latent, elle réagit en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés.

Du point de vue environnemental, la poudre de verre en substitution à une partie du ciment, permet de limiter la libération directe du gaz à effet de serre dans le processus de fabrication du ciment.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une coopération intergouvernementale entre l'Algérie et la France (Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement ; Université de Boumerdès et Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique ; INSA-Rennes).

Nous tenons à remercier le Laboratoire des Sciences Chimies et Matériaux Inorganiques, INSA-Rennes pour leurs soutiens logistiques et humains.

Références bibliographiques

- [1] Tagnit-Hamou A. et Nkinamubanzi P-C., «Les ajouts cimentaires et le développement durable», Note trimestrielle d'information du Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction, n° 08, 2002, p. 9-11.
- [2] Kojima T., Takagi N. and Haruta K., "Expanding characteristics of mortar in glass powder produced from waste bottles", 11th international conference on Alkali Aggregate Reaction, Quebec 2000.
- [3] Norme ACI (American concrete institute) 116R-90 (ACI 1990b).

- [4] Yammine J., «Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques», Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, ENSC - 2007, n°81.
- [5] Behim M. et Ali Boucetta T., «Effet des additions micronisées sur L'écoulement des bétons autoplaçant (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre)», SBEIDCO, ENSET - Oran (Algérie), 12-14 Octobre 2009.
- [6] Bentalha M., «Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone -Microstructure», Thèse doctorat d'état, Université Mentouri, Constantine, 2007.
- [7] Chaid R., Jauberthie R., Boukhaled A. et Talah A., «Endommagement, déformations et microstructure des BHP de pouzzolane», SBEIDCO - 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET - Oran (Algeria), 2009.
- [8] Mehta P-K., «Performance of concrete in marine environment», ACI SP-65, pages 1-20, 1980.
- [9] Chaid R., Jauberthie R. et Talah A., «Action de l'eau de mer sur la durabilité des bétons de poudre de marbre», INVACO2 : Séminaire International, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, Rabat - Maroc, 23 - 25 Novembre 2011.
- [10] Chaid R., Jauberthie R., Abadlia M-T. et Bali A., «Caractéristiques physico-mécaniques et microstructurale des BHP de laitier», Revue : Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Édition ESKA, Avril - Juin 2007, N° 2- 3, p. 49-56.
- [11] Scherer K-R., Cross-cultural patterns, In : Levinson D., Ponzetti J. & Jorgenson P. (Rds), Encyclopedia of Human Emotions, Vol. 1, p. 147 - 156, New York, Macmillan, 1999.
- [12] Zuber B., and Marchand J., "Predicting the volume instability of hydrated cement systems upon freezing using poro-mechanics and local phase equilibria" Materials and Structures / Matériaux et Constructions, 37(268), 257-270, 2004.
- [13] Nonnet E., Lequeux N. and Boch P., "Elastic properties of high alumina cement castables from room temperature to 1600 °C", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 19, 1575-1583, 1999.
- [14] Platret G., «suivi de l'hydratation du ciment et de l'évolution des phases solides dans les bétons par analyse thermique, caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons», Méthodes de mesure et d'essai de laboratoire, In Méthode d'essai n° 58, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2002.
- [15] Alonso C., Andrade C., Castellote M., and Castro P., "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar", Cement & Concrete Composites, vol. 30, p. 1047-1055, 2000.
- [16] Schwarz N. and Neithalath N., "Influence of a fine glass powder on cement hydration: comparison to fly ash and modeling the degree of hydration", Cement & Concrete Composites, vol. 38(4), p. 429-36, 2008.
- [17] Schwarz N., Cam H. and Neithalath N., "Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash", Cement & Concrete Composites, vol. 30, p. 486-496, 2008.
- [18] Abbas M., Carcassès M. and Ollivier J-P., "The importance of gas permeability in addition to the compressive strength of concrete", Magazine of Concrete Research, vol. 52, p. 1-6, 2000.