

Liège, Belgique  
7-8 Novembre 2018

## EFFET DU VERRE RECYCLÉ ET DU LAITIER GRANULÉ SUR LA DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

ALI-BOUCETTA Tahar<sup>A</sup>, LAIFA Walid<sup>B</sup>, BEHIM Mourad<sup>A</sup>, CASSAGNABERE Franck<sup>C</sup> et MOURET Michel<sup>C</sup>

A Laboratoire Matériaux, Géo – Matériaux et Environnement, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie

B Institut de Gestion des Techniques Urbaines, Université de Constantine 3 – Salah Bounider – Constantine, Algérie

C Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA de Toulouse, Université Paul Sabatier, France

**Résumé** : Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, stables et homogènes. Ces propriétés peuvent être obtenues par l'emploi de superplastifiant et l'augmentation du volume de pâte. Pour y parvenir économiquement, du filler calcaire comme addition minérale est souvent utilisé.

Cette communication rapporte une étude expérimentale visant à étudier l'effet de deux additions minérales en remplacement du filler calcaire (FC), sur la durabilité des bétons autoplaçants (BAP). Il s'agit de la poudre de verre (PV) issue de la récupération de bouteilles de verre de même couleur et du laitier granulé de hauts fourneaux (LG), sous-produit de l'industrie sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba, Algérie). Six bétons ont été désignés à cet effet avec deux classes de résistances différentes, un BAP d'ouvrage et un BAP à haute performance (BAPHP) et évalués à l'absorption par capillarité, la diffusion des ions chlorure et la carbonatation accélérée. De plus, une évolution des phases de la matrice cimentaire par analyse thermogravimétrique (ATG) a été effectuée sur des pâtes (à base d'un liant binaire ou ternaire) saines et carbonatées.

Les résultats obtenus montrent un intérêt certain de l'emploi de la poudre de verre et du laitier granulé comme addition dans les BAP en remplacement du filler calcaire. Notamment grâce à l'effet pouzzolanique du verre ou hydraulique du laitier qui permet de produire une quantité supplémentaire en C-S-H améliorant ainsi le réseau poreux du béton par le raffinement et la segmentation de la porosité. L'emploi d'un liant ternaire combiné à la fumée de silice améliore davantage les propriétés de transferts des BAPHP.

**Mots-clés** : béton autoplaçant, poudre de verre, laitier granulé, durabilité.

---

## 1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, stables et homogènes. Ces propriétés peuvent être obtenues par l'emploi de superplastifiant et l'augmentation du volume de pâte pour assurer une bonne dispersion des gros granulats sans aucune tendance à la ségrégation. Pour y parvenir, l'emploi du filler calcaire comme addition est souvent utilisé (Zhu et al., 2005 ; Diederich et al., 2013 et Elyamany et al., 2014). Le laitier granulé de haut fourneau d'El-Hadjar (Annaba, Algérie) est utilisé dans l'industrie cimentaire pour la production du CEM II 42,5 mais à un faible taux de l'ordre de 20 % en moyenne (NA 442, 2005) en raison de son faible pouvoir hydraulique (Behim et al., 2011), alors que les bouteilles en verre coloré ne sont pas recyclées. La valorisation de ces sous-produits et déchets dans les BAP comme additions, pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante.

L'intérêt de la valorisation des sous-produits industriels et déchets ménagers, est justifiée par leurs abondances en quantités importantes, sans l'existence de circuit de récupération, de recyclage et de valorisation. En Algérie, la production annuelle du laitier est estimée à 500.000 tonnes/an (Behim et al., 2011). Les estimations faites par les services du ministère Algérien de l'environnement font état de la possibilité de récupération de 50.000 tonnes/an de verre en Algérie (METAP, 2005). Sachant qu'une bouteille en verre met au moins 4.000 ans pour se dégrader.

Sur le plan technique de nombreux auteurs conviennent que le verre entraîne un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique s'il est utilisé sous forme de poudre (Frohard et al., 2014 ; Aliabdo et al., 2016 et Du et al., 2017). L'emploi du laitier granulé dans les bétons autoplaçants, pourrait entraîner également un comportement bénéfique en relation avec son pouvoir hydraulique latent. En outre, la valorisation du verre à bouteilles et du laitier granulé comme additions fines dans les BAP pourrait être avantageuse d'un point de vue de durabilité (Rozière et al., 2009 ; Shi et al., 2009 et Matos et al., 2016). En effet, c'est dans cette optique que s'inscrit notre démarche. Le but de ce travail est de mettre en évidence les effets de la poudre de verre et du laitier granulé sur la durabilité des bétons autoplaçants (BAP) et de hautes performances (BAPHP). Pour cela plusieurs essais ont été conduits, notamment l'absorption par capillarité, la diffusion des ions chlorure et la carbonatation accélérée.

## 2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

### 2.1 Matériaux

#### 2.1.1 Ciments

Deux types de ciment ont été utilisés au cours de cette étude élaborée à partir d'un même clinker. Un ciment C1 de type CEM II/A 42.5 conforme à la norme algérienne NA 442 (NA 442, 2005) utilisé pour la formulation des BAP, de densité absolue de  $3000 \text{ kg/m}^3$  et une SSB de  $3480 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Un ciment C2 de type CEM I 52.5 conforme à la norme algérienne NA 442 (NA 442, 2005) utilisé pour la formulation des BAPHP, de densité absolue  $3150 \text{ kg/m}^3$  et une SSB de  $5949 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

#### 2.1.2 Le filler calcaire

Le filler calcaire (FC) est un déchet de concassage de roche calcaire essentiellement composé de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), provenant des carrières de production de granulats pour béton.

#### 2.1.3 La poudre de verre

La poudre de verre (PV) est obtenue par récupération de bouteilles de verre de même nature et de même couleur, dispersées dans les décharges sauvages dans la nature (montagne, bord de mer etc.). Elles sont nettoyées puis finement broyées. Le verre est un matériau essentiellement vitreux, outre la fraction vitreuse, la PV présente des traces de fer métallique (tableau 1). Ces traces peuvent être attribuées à l'étape de broyage mécanique du verre réalisée avec un broyeur à boulets en acier.

#### 2.1.4 Le laitier granulé

Le laitier granulé (LG) est produit par le complexe sidérurgique d'El Hadjar (Annaba, Algérie), trempé à l'eau, se présente sous forme de sable de granulométrie de 0 – 5 mm. La teneur en verre est d'environ 97%, mais présente une faible réactivité hydraulique (Behim et al., 2011). Le LG contient de faibles quantités de fer et de calcite (tableau 1).

#### 2.1.5 La fumée de silice

La fumée de silice (FS) utilisée est un additif à base de silice micronique pour bétons en milieux agressifs, de couleur grise avec un dosage recommandé de 15 à 30 kg/m<sup>3</sup> de béton et cela quel que soit le dosage en ciment. La FS est un matériau essentiellement vitreux.

Les compositions chimiques et les caractéristiques physiques des additions sont données au tableau 1.

<b>Compositions chimiques (%)</b>					
<b>Oxydes</b>	<b>FC</b>	<b>LG</b>	<b>PV</b>	<b>FS</b>	
<b>CaO</b>	55,91	40,69	10,75	0,02	
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,11	8,17	0,95	0,03	
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,06	4,15	0,41	0,05	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,40	34,41	76,93	99,01	
<b>MgO</b>	0,18	4,56	0,29	0,01	
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,05	0,10	2,38	0,04	
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0	0,89	0,26	0,15	
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,04	0,36	0,01	0,001	
<b>PAF</b>	42,68	-	0,30	-	
<b>Caractéristiques physiques</b>					
	<b>Unité</b>	<b>FC</b>	<b>LG</b>	<b>PV</b>	<b>FS</b>
<b>Densité abs</b>	(kg/m <sup>3</sup> )	2450	2910	2550	2240
<b>Densité app</b>	(kg/m <sup>3</sup> )	857	1215	795	500
<b>Surface spécifique</b>	(cm <sup>2</sup> /g)	7581	5539	5661	23.10 <sup>4</sup>
<b>d<sub>50</sub></b>	(µm)	0,74	0,88	0,85	-
<b>*I<sub>28</sub></b>	-	0,74	0,88	0,85	1,05
<b>*I<sub>90</sub></b>	-	0,76	1,13	1	1,14

Tableau 1. Caractéristiques physiques et compositions chimiques des additions

\*I<sub>28</sub> et I<sub>90</sub> : Indices d'activités à 28 et 90 jours (NF P 18-508, 2012) et indice d'efficacité hydraulique pour le LG (NF EN 15167-1, 2012).

#### 2.1.6 Le superplastifiant

Dans cette étude, deux adjuvants ont été utilisés, un réducteur d'eau à base de polycarboxylates modifiés (SP1) et un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération à base de copolymère acrylique (SP2). Le tableau 2, regroupe les données techniques des deux adjuvants.

	<b>Densité</b>	<b>pH</b>	<b>Extrait sec</b>	<b>Teneur en Ion Cl</b>	<b>Teneur en Na<sub>2</sub>O eq</b>	<b>Plage d'utilisation</b>
<b>SP1</b>	1,11±0,02	5 ± 1	36,4±1,8%	≤ 0,1 %	≤ 2,5 %	0,25 à 2,5%
<b>SP2</b>	1,06±0,01	6 ± 1	30,2±1,3%	≤ 0,1 %	≤ 1%	0,2 à 3 %

Tableau 2. Données techniques des deux adjuvants

### 2.1.7 Les granulats

Les sables utilisés dans cette étude sont de deux natures différentes, le premier est un sable roulé de dune, siliceux et fin. Le deuxième est un sable concassé, de roche naturelle calcaire. Le gravillon et le gravier sont des granulats concassés, de même nature minéralogique que le sable concassé. Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le tableau 3.

Essais	Unité	Sable roulé	Concassé		
			Sable	Gravillon	Gravier
Densité app	g/cm <sup>3</sup>	1,44	1,37	1,45	1,5
Densité abs	g/cm <sup>3</sup>	2,5	2,5	2,59	2,59
d/D	-	0/2	0/4	3/8	6,3/15
MF	-	2,03	3,02	-	-
ES	%	86	89	-	-
Absorption	%	1,5	2,7	1,4	1,4
Los Angeles	%	-	-	-	28

Tableau 3. Caractéristiques physiques des granulats

## 2.2 Formulation des bétons

L'étude porte sur six bétons de compositions et de résistances en compression différentes, un béton d'ouvrage (BAP) et un béton autoplacant à haute performance (BAPHP), de résistance en compression respectivement 40 et 80 MPa à 28 jours. L'approche de formulation est empirique, basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant sur des critères recommandés par l'AFGC (AFGC, 2008). Ces critères se résument au rapport (G/S) qui doit être proche de 1, au volume de pâte qui doit être de 330 à 400 litres / m<sup>3</sup>, au dosage en ciment qui est de 350 kg/m<sup>3</sup> pour les BAP et 450 pour les BAPHP. Le dosage en superplastifiant doit garantir la fluidité du mélange. L'optimisation du squelette granulaire a été réalisée par la méthode de Dreux - Gorisse avec ajustement du rapport G/S proche de 1 afin d'assurer la stabilité et l'écoulement des mélanges. Le tableau 4, regroupe les compositions des bétons d'étude.

	Unités	BAPFC	BAPLG	BAPPV	BAPHPFC	BAPHPLG	BAPHPPV
CEM I	kg/m <sup>3</sup>	350	350	350	-	-	-
CEM II		-	-	-	450	450	450
Eau Eff	kg/m <sup>3</sup>	175	175	175	158	158	158
FC		200	-	-	100	-	-
LG		-	200	-	-	100	-
PV		-	-	200	-	-	100
FS		-	-	-	30	30	30
S 0/3	kg/m <sup>3</sup>	530	542	532	538	542	538
S 0/4		282	290	285	285	288	285
G 3/8		207	212	210	212	215	212
G 6.3/16		515	528	288	524	529	526
SP1		7	7	7	-	-	-
SP2		-	-	-	12.18	12.18	12.18
E/L	-	0,32	0,32	0,32	0,27	0,27	0,27
G/S	-	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Étalement	mm	725	715	690	690	670	655
Stabilité	%	16,76	10,78	6,11	7,86	6,04	5,81
L-Box	-	0,83	0,85	0,85	0,80	0,83	0,85

Tableau 4. Compositions des bétons d'étude

## 2.3 Méthodes expérimentales

### 2.3.1 Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai a été réalisé suivant la recommandation de l'AFPC-AFREM (AFREM, 1997), sur trois éprouvettes cylindriques 15x30 cm qui ont été sciées après 56 jours de conservation sous l'eau, de manière à obtenir trois disques de  $(50 \pm 1)$  mm d'épaisseur pour chaque type de béton. L'essai consiste à suivre par pesées successives la quantité d'eau absorbée par un échantillon de béton préalablement séché à des échéances de 0, 15, 30 mn, 1, 2, 4, 8 et 24h.

### 2.3.2 Essai de migration des ions chlorure

L'essai a été réalisé selon le mode opératoire NT BUILD 492 (NT BUILD 492, 1999), sur trois échantillons de chaque type de béton de dimensions 11x5 cm, après 56 jours de conservation sous eau à une température de 20°C. Il consiste à appliquer une différence de potentiel entre deux électrodes placées parallèlement aux faces de l'échantillon. À la fin de l'essai, l'échantillon est fendu en deux et un indicateur colorimétrique à base de nitrate d'argent est pulvérisé, permettant de déterminer la profondeur de pénétration des ions chlorures par nuance de couleur, la zone contaminée reste claire, alors que la zone non contaminée devient foncée.

### 2.3.3 Essai de carbonatation accélérée

L'essai de carbonatation accélérée a été réalisé conformément au mode opératoire AFREM (AFREM, 1997), sur deux éprouvettes prismatiques de 7x7x28 cm. Après une conservation de 56 jours sous l'eau, les éprouvettes ont été conditionnées en étuve à 40°C pendant 48 heures avant d'être placées dans l'enceinte de carbonatation, à 20°C et 65 % d'humidité relative, dans un mélange gazeux composé de 50 % d'air et 50 % de CO<sub>2</sub>. La profondeur carbonatée obtenue par pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine sur un échantillon fraîchement obtenu par fendage d'une épaisseur de 3 cm aux échéances de (7, 14, 21, 28 et 65 jours). La couleur de la zone dégradée reste inchangée, alors que celle de la partie saine prend la couleur rose – violet.

### 2.3.4 Analyse thermogravimétrique (ATG)

Le but principal de l'ATG est de suivre la variation de masse en fonction de la température. Pour cela, un échantillon de poudre de masse égale à environ 200 mg, dont le broyage a été réalisé manuellement au mortier d'agate, est placé dans un creuset cylindrique en quartz sous atmosphère inerte où il subit une montée en température de la valeur ambiante jusqu'à 1000°C, avec un pas de 10°C/min. Il est possible de calculer la quantité de portlandite restante en utilisant l'équation (1) ci-dessous :

$$\text{Quantité de portlandite restante} = \text{Perte de masse} \times \frac{\text{masse molaire de portlandite}}{\text{masse molaire d'eau}} \quad (1)$$

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Absorption d'eau par capillarité

La figure 1 présente les résultats de la mesure des coefficients d'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps, des BAP et BAPHP, après une cure humide de 28 jours. Ce dernier caractérise la capacité d'absorption d'un béton dans le temps. Plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption et par conséquent le coefficient d'absorption sont faibles.

Les résultats présentés sur la Figure 1, montrent que le coefficient d'absorption ( $C_a$ ) des bétons aux différentes échéances augmente avec la racine carrée du temps. Toutefois, on distingue deux allures de courbure différente. En effet, il apparaît, d'une part une évolution linéaire du coefficient d'absorption en

fonction de la racine carrée du temps jusqu'à 24 heures (fin de l'essai), ce qui correspond au cas du BAP FC. D'après Bessa-Badreddine (Bessa-Badreddine, 2004), plus les pores sont plus gros, plus la pente de la droite est élevée. D'autre part, certains mélanges présentent une variation du coefficient d'absorption en fonction de la racine carrée du temps qui correspond à une succession de segments linéaires caractérisés par une diminution de pentes, tels que les BAP LG et PV et ceux de la série des BAPHP. Cette diminution est le résultat d'un ralentissement du phénomène d'absorption. Toujours d'après le même auteur, la régression des pentes est assimilée à deux causes probables : la première stipule que la remontée capillaire a atteint toute la hauteur de l'éprouvette, or, nous avons pu remarquer lors de l'essai que la surface supérieure des éprouvettes n'était pas humide au bout de 24 heures, signe que la durée de l'essai n'était pas suffisante pour que la remontée capillaire traverse la hauteur de l'éprouvette. La deuxième cause, qui est la plus plausible, est l'existence de plusieurs familles de pores. En effet, dès que la remontée capillaire est accomplie dans les plus gros pores capillaires au bout d'un certain temps, l'absorption se poursuit dans les pores de plus en plus fins et de ce fait, la cinétique d'absorption de ces bétons est ralentie, ce qui explique la diminution de la pente.

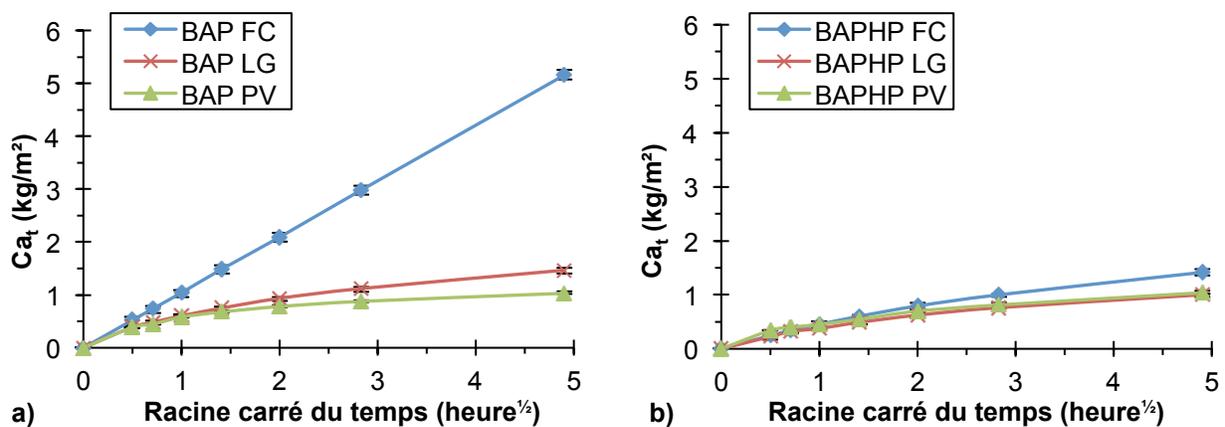


Figure 1. Absorption d'eau par capillarité : a- BAP et b- BAPHP

La sorptivité ( $S$ ) des différents mélanges est présentée sur la Figure 2, elle désigne la vitesse d'absorption par remontée capillaire des bétons.

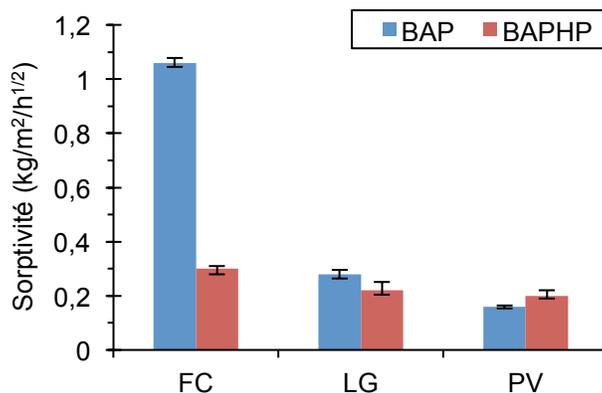


Figure 2. Sorptivité des BAP et BAPHP

La vitesse d'absorption des BAP à base de FC est nettement supérieure à celle des BAP à base de la PV et du LG, ceci pourrait traduire la difficulté à laquelle est confrontée l'eau lors de sa remontée capillaire. L'utilisation du verre et du laitier réduit significativement la sorptivité par amélioration de la structure poreuse. En effet, la surface des pores capillaires est tapissée par les C-S-H produits lors des réactions pouzzolanique ou hydraulique (Du et al., 2017 ; Matos et al., 2016 et Hadj-Sadok et al., 2011).

La série des BAPHP se distingue par une cinétique d'absorption plus faible que celle des BAP et en particulier ceux à base de laitier et de verre, ce qui peut être expliqué par l'emploi de la fumée de silice conjointement avec le laitier et la poudre de verre, ce qui est validé par d'autres travaux (Matos et al., 2016 et Bessa-Badreddine, 2004).

### 3.2 Diffusion des ions chlorure

Les résultats du coefficient de migration pour les différents bétons testés sont représentés sur la Figure 3. Les résultats obtenus montrent que le coefficient de migration dépend de la nature de l'addition. Tange-Jepsen et al. (Tange-Jepsen et al., 2001) ont apporté des indications sur les niveaux de résistance à la pénétration des ions chlorures mesurés à 28 jours. Les limites présentées par les auteurs sont rapportées sur la Figure 3. Cette classification montre que le BAP FC qui se caractérise par un coefficient de diffusion supérieur à  $16.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , n'est pas adapté à un environnement marin (Tange Jepsen et al., 2001). Pavoine et al. (Pavoine et al., 2014) rapportent que l'utilisation du filler calcaire n'a pas d'impact significatif sur la pénétration des ions chlorures. Les bétons à base de poudre de verre et de laitier développent une bonne résistance voire même une résistance accrue à la pénétration des chlorures. En effet, plusieurs auteurs (Matos et al., 2016 ; Pavoine et al., 2014 et Omran et al., 2016) relatent l'effet bénéfique de la poudre de verre sur l'augmentation de la résistance à la pénétration des ions chlorures. Ces auteurs relient ce résultat à l'amélioration du réseau poreux, de l'effet de remplissage des particules de verre et à la conversion de la portlandite en C-S-H. Saillio (Saillio, 2012) révèle que les bétons au laitier sont plus résistants à la pénétration des ions chlorure à long terme, en raison de leur structure poreuse plus tortueuse et plus fine.

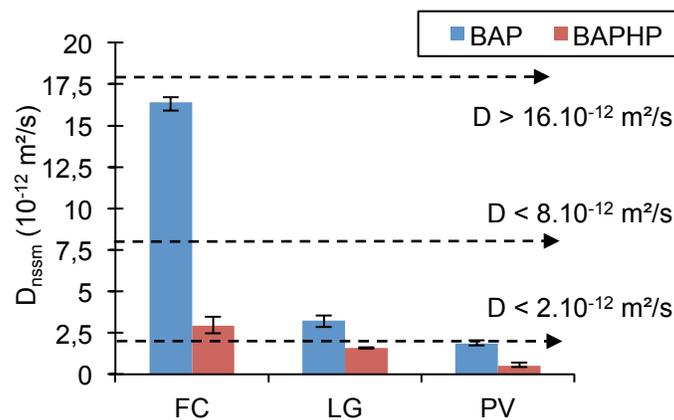


Figure 3. Coefficient de migration non-stationnaire des BAP et BAPHP

La combinaison de la fumée de silice dans les BAPHP réduit davantage leurs pénétrations des ions chlorures, ceci est due essentiellement à la réaction pouzzolanique et au gain supplémentaire en C-S-H qui favorise la densification de la microstructure (Iqbal Khan et al., 2011).

### 3.3 Carbonatation accélérée

La Figure 4, illustre l'évolution de l'épaisseur carbonatée des différents bétons en fonction de la racine carrée du temps.

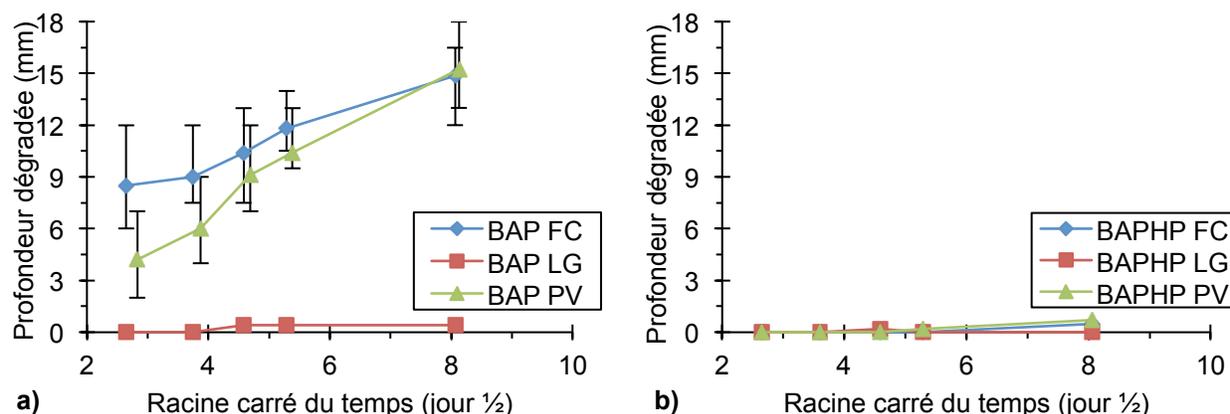


Figure 4. Profondeur de carbonatation : a- BAP et b- BAPHP

L'emploi des additions minérales n'a pas été réalisé par substitution du ciment, mais par ajout en maintenant le dosage en ciment constant pour chaque type de béton (BAP et BAPHP). Plusieurs auteurs (Bouikni et al., 2009 et Qiang et al., 2013) affirment, que l'emploi du laitier diminue la résistance des bétons à la carbonatation, ceci est vraisemblable lorsqu'on substitue le ciment par le laitier, la quantité de portlandite diminue. C'est justement la portlandite qui se carbonate en premier et constitue une barrière diffusionnelle ce qui a pour conséquence un ralentissement voire un stoppage du mécanisme de carbonatation par augmentation de la compacité. Néanmoins l'ajout de la poudre de verre réduit fortement la résistance à la carbonatation au même titre que le filler calcaire. Zidol (Zidol, 2014) a évalué la résistance à la carbonatation des bétons contenant de la poudre de verre à différents dosages. Il rapporte que la poudre de verre semble être moins résistante à la carbonatation par rapport au laitier pour un même taux d'incorporation. Plusieurs auteurs (Matos et al., 2016 et Frohard, 2014) arrivent à la même conclusion, ils démontrent que la profondeur de carbonatation des mélanges à base de poudre de verre est supérieure à celle du ciment portland. La cinétique de carbonatation (qui correspond à la pente des droites) du BAP PV est plus importante que celle du BAP FC (2.1 et 1.2 mm/jour<sup>1/2</sup> respectivement), ceci rejoint les résultats trouvés par Frohard (Frohard, 2014) qui affirme que la poudre de verre accroît significativement la cinétique de carbonatation des bétons.

On s'attendait à ce que la densification de la matrice à la suite de la réaction pouzzolannique de la PV limite la diffusion du CO<sub>2</sub> et donc ralentit le phénomène de carbonatation. Tel n'est pas explicitement le cas, pour le BAP PV, ce qui laisserait croire que la carbonatation de ce dernier n'est pas le résultat de la carbonatation de la portlandite restante, mais, probablement la carbonatation de l'oxyde de sodium présent en quantités importantes dans le verre qui s'est transformé en carbonate ou bicarbonate de soude par fixation du dioxyde de carbone.

Le BAP LG et les BAPHP (LG, FC et PV) n'ont présenté aucune dégradation significative. Les profondeurs carbonatées mesurées au cours du suivi de l'essai sont de l'ordre de l'erreur de la mesure et par conséquent peuvent être négligées. L'utilisation de la fumée de silice combinée aux autres additions et en particulier avec le filler calcaire et le verre, conduit au raffinement des pores et à la densification de la microstructure de la pâte de ciment par effet pouzzolannique (Iqbal Khan et al., 2011), ce qui ralentit la diffusion du CO<sub>2</sub>.

### 3.4 Analyse thermogravimétrique

Une analyse thermogravimétrique (ATG) a été réalisée sur des pâtes saines et carbonatées après passage en enceinte de carbonatation pendant une année. Ces pâtes sont issues des six bétons où chaque pâte respecte la même composition que celle de la matrice cimentaire qui compose le béton. La

Figure 5 présente les résultats de la teneur en portlandite des pâtes issues des BAP et BAPHP obtenues par application de l'équation (1).

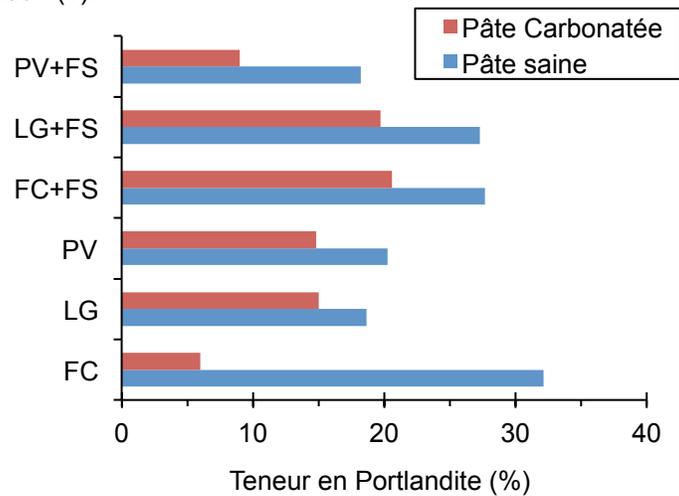


Figure 5. Teneur en portlandite des pâtes issues des BAP et BAPHP

Les résultats obtenus et présentés sur la Figure 5, montrent que la teneur en portlandite des pâtes carbonatées est inférieure à celle des pâtes saines et ceci pour des raisons différentes. Dans un premier temps, la diminution de la teneur en portlandite des pâtes de la série des BAPHP n'est pas le résultat d'une carbonatation. En effet, d'après la Figure 4 ces bétons n'ont présenté aucun signe de carbonatation visible. Cette diminution de portlandite pourrait être expliquée alors par une probable réaction pouzzolanique ce qui conduirait à la formation de quantités de C-S-H supplémentaires.

La présence de portlandite dans la pâte PV (Figure 5) conforte l'hypothèse que la carbonatation du BAP PV n'est pas le résultat de la carbonatation de la portlandite, mais probablement celle d'un autre composé. En effet, la perte de la teneur en portlandite de la pâte à base de PV après passage à l'enceinte de carbonatation est estimée à 26,85 %, tendit que celle de la pâte à base de FC est de 81,33 %.

#### 4. CONCLUSION

On peut tirer les conclusions suivantes :

- La poudre de verre et le laitier granulé réduisent significativement la sorptivité et la pénétration des ions chlorures dans le béton par amélioration de la finesse de la structure poreuse. Ceci est rendu possible par la quantité supplémentaire en C-S-H produit lors des réactions pouzzolanique et hydraulique.
- L'emploi du laitier en addition, fournit au béton une résistance élevée à la carbonatation et cela même pour une longue durée d'exposition au CO<sub>2</sub>.
- La carbonatation du BAP PV est probablement due à la carbonatation de l'oxyde de soude (Na<sub>2</sub>O) contenu dans le verre qui s'est transformé en carbonate ou bicarbonate de soude par fixation du dioxyde de carbone.
- L'influence de la FS en mélange avec le FC sur les paramètres de durabilité est bien meilleure qu'avec les autres (LG et la PV).

#### RÉFÉRENCES

- AFGC. (2008), *Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants*, 2<sup>é</sup> éd., Paris, France.
- AFREM. (1997), *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*, *Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons*.

Aliabdo A.A., Elmoaty A.E.M.A. et Aboshama A.Y. (2016), Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, *Const. Build. Mater*, 124: 866–877.

Behim M, Cyr M et Clastres P. (2011), Physical and chemical effects of El Hadjar slag used as an additive in cement-based materials, *EUR J ENVIRON CIV EN*, 15: 1413-1432.

Bessa-Badreddine A. (2004), *Étude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France.

Bouikni A, Swamy R.N et Bali A. (2009), Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag, *Const. Build. Mater*, 23: 2836–2845.

Diederich P, Mouret M et Ponchon F. (2013), Simple tools for achieving self-compacting ability of concrete according to the nature of the limestone filler, *Const. Build. Mater*, 48: 840–852.

Du H et Tan K.H. (2017), Properties of high volume glass powder concrete, *Cem. Concr. Comp*, 75: 22-29.

Elyamany H.E, Elmoaty A.E.M.A. et Mohamed B. (2014), Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete, *Alexandria Engineering Journal*, 53: 295–307.

Frohard F. (2014), *Durabilité des éco-bétons : Impact d'additions cimentaires alternatives sur la corrosion des armatures des bétons armés*, Thèse de Doctorat, Université de Paris-Est et Université de Sherbrooke, Canada.

Hadj-Sadok A, Kenai S, Courard L et Darimont A. (2011), Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag, *Const. Build. Mater*, 25: 1018-1025.

Iqbal Khan M et Siddique R. (2011), Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties, *Resources, Conservation and Recycling*, 57: 30-35.

Matos A.M. et Sousa-Coutinho J. (2016), Waste glass powder in cement: macro and micro scale study, *Adv. Cem. Res*, 28: 423-432.

METAP, Le coût de la dégradation de l'environnement côtier en Algérie, (2005)

NA 442. (2005), *Ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*.

NF EN 15167-1. (2006), *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité*.

NF P 18-508. (2012), *Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité*.

NT BUILD 492. (1999), *Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride migration coefficient from non steady state migration experiments, Nordtest method*.

Omran A et Tagnit-Hamou A. (2016), Performance of glass-powder concrete in field applications, *Const. Build. Mater*, 109: 84-95.

Pavoine A, Harbec D, Chaussadent T, Tagnit-Hamou A et Divet L. (2014), Impact of alternative cementitious material on the mechanical and transfer properties of concrete, *ACI Materials journal*, 111: 251-261.

Qiang W, Peiyu Y, Jianwei Y et Bo Z. (2013), Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete, *Const. Build. Mater*, 47: 1414–1420.

Rozière E, Loukili A et Cussigh F. (2009), A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation, *Const. Build. Mater*, 23: 190-199.

Saillio M. (2012), *Interactions physiques et chimiques ions-matrice dans les bétons sains et carbonatés. Influence sur le transport ionique*, Thèse de doctorat, Université Paris-est-marne-la-vallée, France.

Shi H.S, Xu B.W. et Zhou X.C. (2009), Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete, *Const. Build. Mater*, 23: 1980-1985.

Tange-Jepsen M, Munch-Petersen C et Bager D. (2001), Durability of resource saving “green” types of concrete, *featured at the proceedings FIB-symposium*, Concrete and Environment, Berlin, Germany, 220-229.

Zhu W et Gibbs J.C. (2005), Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res*, 35: 1457–1462.

Zidol A. (2014), *Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre*, Thèse de doctorat ès sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Canada.