

Liège, Belgique
8-9 Novembre 2018

ÉTUDE DE L'EFFET DES FIBRES SUR LE RETRAIT EMPÊCHÉ ET LA DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

LAIFA Walid^A, ALI BOUCETTA Tahar^B, BEHIM Mourad^B et TURATSINZE Anaclet^C

A Institut de gestion des techniques urbaines- Université de Constantine 3, Algérie.

B Laboratoire Matériaux, Géo – Matériaux et Environnement, Département de génie Civil – Université Badji Mokhtar Annaba 23000– BP 12 - Annaba – Algérie.

C Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA – Université Paul Sabatier, 135 Avenue du Rangueil Toulouse- France.

Résumé : Les bétons autoplaçants se caractérisent par une fluidité qui leur permet de se mettre en place sans vibration, c'est ce qui les distingue des autres bétons. L'incorporation des fibres dans les BAP peut entraîner une perte de plasticité compromettant ainsi leur principale caractéristique, leur capacité d'écoulement, surtout avec les fibres végétales. En effet, les fibres naturelles ont un pouvoir d'absorption d'eau important, et une surface rugueuse pour certaines, contrairement aux fibres synthétiques qui se caractérisent par une absorption d'eau quasi nulle et une surface lisse. Cependant, le contour rugueux des fibres végétales améliore l'adhérence avec la matrice cimentaire, ce qui se traduirait par un meilleur contrôle de la fissuration et éventuellement l'amélioration de certaines propriétés mécaniques au jeune âge. Les fibres végétales présentent aussi l'avantage d'être des matériaux locaux, d'origine naturelle, renouvelable, biodégradable et nécessitent peu d'énergie pour leur production, contrairement aux fibres synthétiques de polypropylène par exemple.

Le but de notre travail est de formuler un BAP fibré avec deux types de fibres : une fibre synthétique de polypropylène comme fibre témoin et une fibre végétale de DISS comme matériau d'étude et d'analyser l'influence de ces fibres sur les propriétés des BAP à l'état durci (essai de retrait empêché à l'anneau, carbonatation, absorption capillaire et porosité accessible à l'eau).

Les résultats obtenus sur les bétons fibrés montrent que les fibres améliorent le comportement des BAP vis-à-vis de la fissuration. Cependant, L'introduction des fibres entraîne une diminution de la compacité des bétons.

Mots-clés : béton autoplaçant, fibre de polypropylène, fibre de diss, retrait, durabilité

1. INTRODUCTION

Les bétons autoplaçants (BAP) se caractérisent par une grande fluidité et se mettent en place par gravité. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de plastifiant et l'augmentation du volume de pâte (AFGC., 2008). L'utilisation des additions minérales est nécessaire pour obtenir un volume de pâte suffisant. De nombreuses études ont montré les effets favorables des additions minérales sur les propriétés des BAP à l'état frais (Nehdi M et Rahman M., 2000) et à l'état durci (EL Barak M., 2005), notamment les fillers calcaires (FC) qui sont les plus utilisés. L'utilisation des fibres dans les bétons permet de leur conférer une meilleure résistance à la propagation de la fissuration, de diminuer la fragilité du composite et dans certaines conditions, d'augmenter la résistance mécanique (Ghavami K., 2005) et (Toledo Filho R.D et al., 2005). S'agissant des fibres végétales, leur introduction dans le béton est restée timide malgré les multiples avantages économiques, écologiques et techniques qu'elles pourraient procurer (Savastano Jr et al., 1999). Parmi les fibres végétales utilisées, on peut citer le chanvre, la paille, le sisal et le bambou, mais très peu d'études ont été consacrées à la fibre de diss (Merzoud M et al., 2008). Le diss (Figure 1) est une graminée répandue à l'état sauvage principalement dans les montagnes (Est d'Algérie).



Figure 1. Fibre de diss

Localement appelé « diss », son nom scientifique est *Ampélodesmos mauritanicus*. Cette plante présente aussi une absorption d'eau très importante et largue des substances ayant pour effet de retarder la prise du ciment (Merzoud M et al., 2008). Le but de cette étude est de mettre en évidence l'influence de la fibre de diss sur les caractéristiques des BAP à l'état durci. Ces propriétés seront comparées à celles d'un béton renforcé par des fibres en polypropylène qui servira ainsi de matériau témoin.

Ce travail est structuré comme suit : la première partie consiste à formuler un BAP avec addition de filler calcaire (BAPFC). Le dosage du FC est fixé à 30 % par rapport à la masse du ciment. La deuxième partie est consacrée à la formulation des BAP renforcés par les fibres de diss (D) et les fibres de polypropylène (PP).

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

2.1 Matériaux

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment de type CEM II/A de classe 42.5, dont la masse volumique apparente ρ_{app} est égale à 1013 kg/m^3 tandis que la masse volumique absolue ρ_{abs} est égale à 3060 kg/m^3 . Sa finesse Blaine est de $3726 \text{ cm}^2/\text{g}$ et sa composition minéralogique est: $C_3S = 59.66\%$, $C_2S = 16.45\%$, $C_3A = 9.14\%$ et $C_4AF = 11.02\%$.

Les compositions chimiques et les caractéristiques physiques de l'addition sont données dans le tableau 1.

Oxydes (%)	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	ρ _{app} ³ kg/m ³	ρ _{abs} ³ kg/m ³	SSB cm ² /g
FC	55.51	0.11	0.50	0.06	0.20	0.08	0.01	42.5	857	2450	7581

Tableau 1. Compositions chimiques et caractéristiques physiques de l'addition

Le filler calcaire (FC) est composé essentiellement de calcite (CaCO₃), Il est obtenu par broyage de pierres calcaires récupérées des stations de concassage des granulats pour béton (Ali-Boucetta T et al., 2013).

L'adjuvant employé est un plastifiant - réducteur d'eau à base de polycarboxylates modifiés, de masse volumique 1110 kg/m³, de pH = 5 ± 1, de teneur en ions chlore ≤ 0.1 %, de teneur en Na₂O eq ≤ 2.5% et l'extrait sec = 36.4 ± 1.8 (%). La plage d'utilisation recommandée varie de 0.25 à 2.5% du poids du ciment.

Les sables utilisés dans cette étude sont de deux natures différentes. Le premier est un sable roulé de dune, siliceux et fin ; le second 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 caractéristiques des granulats sont données dans le tableau 2 et les courbes granulométriques sont présentées sur la figure 2.

Caractéristiques	Unité	Sable roulé	Concassé		
			Sable	Gravillon	Gravier
Masse volumique apparente	kg /m ³	1358	1425	1390	1370
Masse volumique absolue	kg /m ³	2540	2520	2500	2500
d/D	-	0/1.25	0/4	4/8	5/15
Module de finesse	-	1,65	3,67	-	-
Équivalent de sable	%	86	89	-	-
Coefficient d'absorption	%	1.5	2.7	1.4	1.4
Los Angeles	%	-	-	-	28

Tableau 2. Caractéristiques des granulats

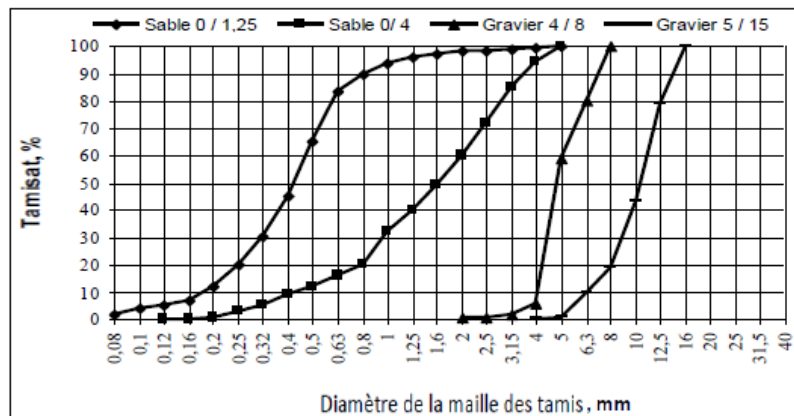


Figure 2. Courbes granulométriques des granulats

Les fibres utilisées dans cette étude sont de deux natures, synthétique de polypropylène et végétale de diss. L'observation de la fibre de diss au MEB, montre que son contour n'est pas lisse comme celui de la fibre de polypropylène, mais présente des aspérités ainsi qu'une remarquable rugosité (Figure 3). En raison de sa structure poreuse, la fibre végétale a une absorption d'eau très importante (Thuault A et al., 2014). Un essai de traction directe réalisé sur des échantillons de fibre de diss de longueur 150 mm, de

largeur 8 mm et de 0.2 mm d'épaisseur a permis de mettre en évidence une résistance en traction de 100 MPa (Figure 4), ce qui est une performance intéressante pour une fibre d'origine végétale.

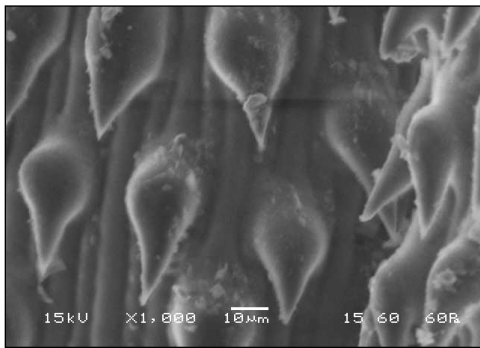


Figure 3. Microstructure de la fibre de diss après broyage (LMDC, Toulouse)



Figure 4. Essai de traction directe: courbe contrainte déformation de la fibre de diss

Type de fibre		Polypropylène	Diss
Longueur, mm		12	12
Section transversale, μm^2		30	400000
Densité, g/cm^3		0.9	1.23
Résistance à la traction, MPa		-	100
Module d'élasticité, MPa		3500	6693
Absorption d'eau, %	Non traitée (à l'état brut)	-	88
	Traitée à l'eau bouillante	-	82

Tableau 3. Caractéristiques des fibres

2.1.1 Traitement des fibres de diss

Les études qui ont été conduites sur les fibres végétales (Page J., 2017) et (Merzoud M et al., 2008) montrent qu'il est nécessaire de les traiter avant leur utilisation dans le béton, afin d'éliminer des substances organiques ayant pour effet de retarder la prise du ciment. Ce traitement n'affecte pas la surface de la fibre, il consiste à broyer et à faire bouillir les fibres de diss dans l'eau pendant quatre heures. Elles sont ensuite rincées et séchées avant leur utilisation.

2.2 Méthodes expérimentales

2.2.1 Essai de porosité accessible à l'eau

Cet essai a été réalisé selon la recommandation AFREM (AFREM., 1997), ainsi trois éprouvettes cylindriques de dimensions (11x22) cm ont été utilisées pour chaque test, après 28 jours de cure (figure 5). La porosité accessible à l'eau, exprimée en pourcentage est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} * 100 \quad (1)$$

- M_{eau} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve immergé dans l'eau.
- M_{air} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air.
- M_{sec} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve sec.



Figure 5. Mesure de la porosité accessible à l'eau

2.2.2 Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C (AFREM., 1997). Les échantillons testés sont des disques en béton de dimensions (15x5) cm (figure 6).

Les échéances de mesure sont les suivantes : ¼, ½, 1, 2, 4, 8 et 24 heures (figure 6). Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$Ca = \frac{M_x - M_0}{A} \text{ en kg/m}^2 \quad (2)$$

M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg),

M_0 : masse initiale de l'éprouvette (kg),

A : section de l'éprouvette (m²).

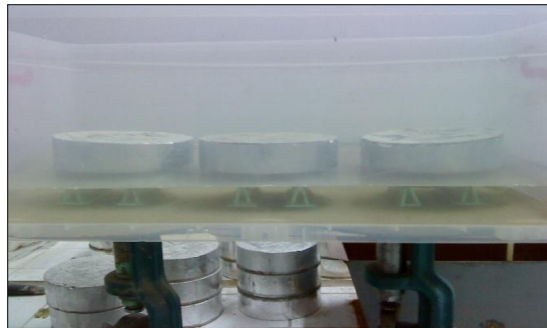


Figure 6. Photographie de l'essai d'absorption capillaire

2.2.3 Essai de carbonatation accéléré

L'essai a été conduit selon le mode opératoire AFREM (AFREM., 1997), qui consiste à utiliser deux éprouvettes prismatiques de (7x7x28) cm. Ces éprouvettes ont été conservées sous l'eau pendant 28 jours et conditionnées en étuve à 40°C pendant 48 heures. Ensuite, elles sont 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 CO₂.



Figure 7. BAP fibrés, après 28 jours de conservation en cellule de carbonatation

2.2.4 Essai de retrait empêché

L'objectif de l'essai de retrait empêché est de suivre le développement de la contrainte de traction dans une éprouvette en béton coulé autour d'un cœur annulaire en acier rigide (Figure 8) et ce jusqu'à la fissuration du matériau cimentaire. L'anneau en acier a pour rôle de bloquer partiellement les variations dimensionnelles du matériau cimentaire ce qui entraîne, en contrepartie, le développement des contraintes de traction et la fissuration (ASTM C 1581 – 04., 2005).



Figure 8. Essai de retrait empêché à l'anneau (LMDC, Toulouse)

Les éprouvettes annulaires sont démoulées 24 heures après le coulage et conservées dans une salle climatisée à 20°C et 50 % d'humidité relative. Les déformations sont suivies au cours du temps grâce à deux jauges extensométriques, opposées et collées à mi-hauteur suivant le cercle à l'intérieur du noyau central. Pour cet essai, trois BAP ont été utilisés : BAP avec addition de filler calcaire sans fibres (BAPFC), renforcé de 0.6 kg/m³ de fibre de polypropylène (BAPFCP) et renforcé de 0.8 kg/m³ de fibre de diss (BAPFCD).

3. FORMULATION DES BAP

L'approche de formulation des BAP qui a été utilisée est expérimentale. Elle s'appuie sur des critères recommandés par l'AFGC (AFGC., 2008). Ces critères se résument au rapport (Gravier / Sable) qui doit être proche de 1, au volume de la pâte qui doit être de 330 à 400 l / m³, au dosage en ciment qui se situe entre 300 et 350 kg / m³, au dosage d'addition qui doit être compris entre 100 et 200 kg / m³ et au dosage en plastifiant qui doit garantir la fluidité du mélange. Les dosages en granulats et l'eau sont estimés à partir de la méthode de Dreux Gorisse, mais les dosages définitifs sont déterminés en apportant les corrections nécessaires sur des gâchées expérimentales. Ainsi, un béton de référence (BAPR) a été formulé sans aucune addition en visant un étalement de 60 à 70 cm. A partir de la composition du BAPR,

nous avons introduit 30 % d'addition de filler calcaire par rapport à la masse du ciment. Le BAP avec addition (BAPFC) a été renforcé de fibres de polypropylène (PP) et de diss (D). Le dosage en fibre de PP recommandé par le fabricant est 600 g/m³ de béton. Dans le but de garder les mêmes taux volumiques de fibres et vu les différences des masses volumiques des fibres de polypropylène et de fibres de diss, le dosage massique de la fibre de diss dans les BAP a été majoré par un coefficient (K = 1.37) qui est égal au rapport des masses volumiques des deux types de fibres.

Fibre	Dosage	
	g/m ³	%
Polypropylène (PP)	600	0.066
Diss (D)	800	0.066

Tableau 4. Taux de fibres utilisé dans les BAP

Plusieurs résultats nous ont incité à travailler avec la fibre de diss pré-mouillée afin d'éviter une grande perte d'étalement. Le pré-mouillage est réalisé par la conservation des fibres de diss sous l'eau pendant une heure. Les formulations des bétons sont regroupées dans le tableau 5.

Composant	Unités	BAPFC	BAPFCP	BAPFCD
Fibre PP	kg/m ³	0	0.6	/
	%	0	0.066	/
Fibre Diss	kg/m ³	0	/	0.8
	%	0	/	0.066
FC	kg/m ³	105	105	105
Ciment	kg/m ³	350	350	350
Eau	kg/m ³	175	175	175,7
Adjuvant	kg/m ³	7	7	7
E/L	-	0.38	0.38	0.38
S 0/1,25	kg/m ³	385	385	385
S 0/4	kg/m ³	481	481	481
G 4/8	kg/m ³	132	132	132
G 5/15	kg/m ³	658	658	658

BAPFC – Béton autoplaçant avec filler calcaire (sans fibre)

BAPFCP – Béton autoplaçant avec filler calcaire et fibre de polypropylène (PP)

BAPFCD – Béton autoplaçant avec filler calcaire et fibre de diss (Diss)

Tableau 5. Compositions des BAP fibrés

4. RÉSULTATS

4.1 Porosité accessible à l'eau

L'ajout des fibres (PP et diss) entraîne une légère augmentation de la porosité des bétons qui est supérieure à celle du BAP sans fibres (Page J., 2017). Cette augmentation est plus distinguée pour les BAP renforcés de fibres de PP (figure 9). Le nombre de fibres de PP est supérieur à celui des fibres de diss, ce qui favorise la formation de pores et de vides dans les BAP. Cela signifie que la compacité du béton diminue (EL HILALI A., 2009).

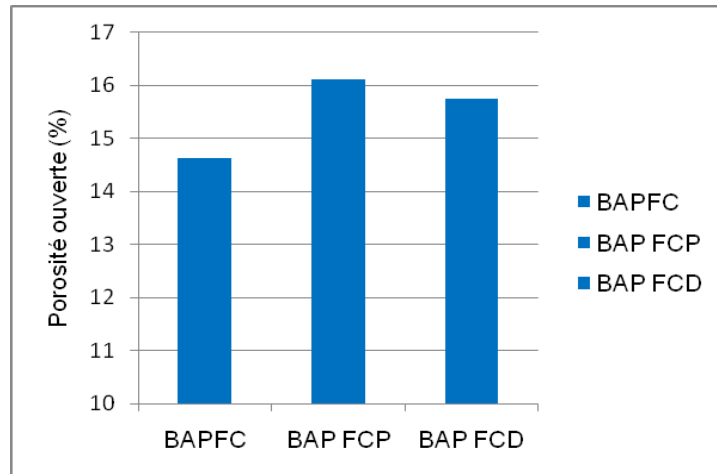


Figure 9. Porosité ouverte des BAP fibrés

4.2. Absorption capillaire

Les résultats du coefficient d'absorption capillaire des BAP fibrés avec addition du FC sont présentés sur la figure 10. Les BAP fibrés ont des coefficients d'absorption comparables à ceux du BAP sans fibres. Mais au delà de 3 heures, les BAP fibrés présentent une absorption capillaire légèrement supérieure à celle du BAP sans fibres. Ce qui indique que les fibres influent sur la capacité d'absorption d'eau du béton, en modifiant son réseau poreux (Mohamed A S., 2011).

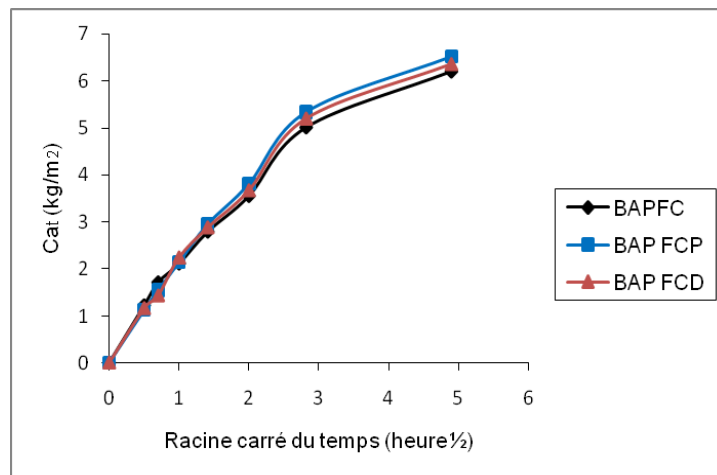


Figure 10. Coefficient d'absorption d'eau des BAPFC fibrés

4.3. Carbonatation accélérée (profondeur dégradée)

Les profondeurs carbonatées des BAP fibrés ont été mesurées à des échéances de 7, 14, 21, 28 et 365 jours. Cela après un temps de cure humide de 28 jours.

Les résultats présentés sur la figure 11, montrent que les BAP renforcés de fibres (PP ou diss) présentent des profondeurs carbonatées supérieures à celles du BAP sans fibres. L'introduction des fibres entraîne une diminution de la compacité des bétons (EL HILALI A., 2009). L'emploi des fibres dans les BAP modifie le réseau poreux du matériau en créant une porosité supplémentaire à l'interface fibre – matrice cimentaire (Page J., 2017), ce qui conduit à une augmentation de la sensibilité du béton vis-à-vis d'attaques externes tel que la carbonatation.

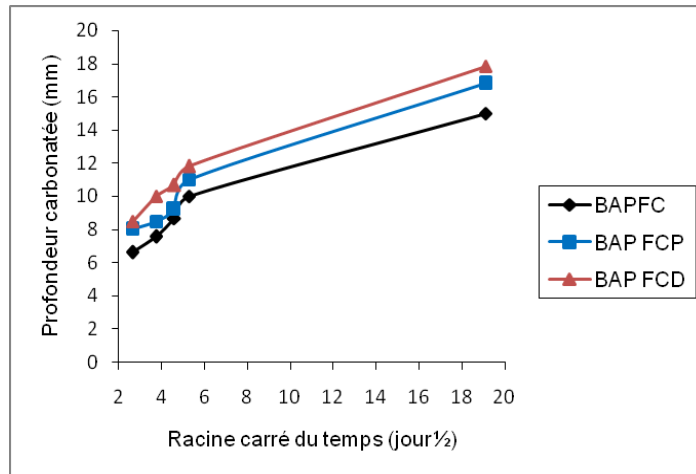


Figure 11. Profondeur dégradée des BAPFC fibrés due à la carbonatation

4.4. Retrait empêché

La figure 12 montre l'évolution dans le temps de la déformation mesurée sur la surface intérieure de l'anneau en acier. Cette déformation est une conséquence de l'étreinte du béton sur l'anneau métallique. Étant ainsi partiellement empêchée il en résulte le développement d'une contrainte de traction en concurrence avec le développement de la résistance du matériau. A une échéance donnée, cette contrainte contrebalance la résistance du matériau et une fissure apparaît. Les résultats montrent que toutes les fibres permettent de diminuer l'étreinte du matériau cimentaire sur l'anneau métallique.

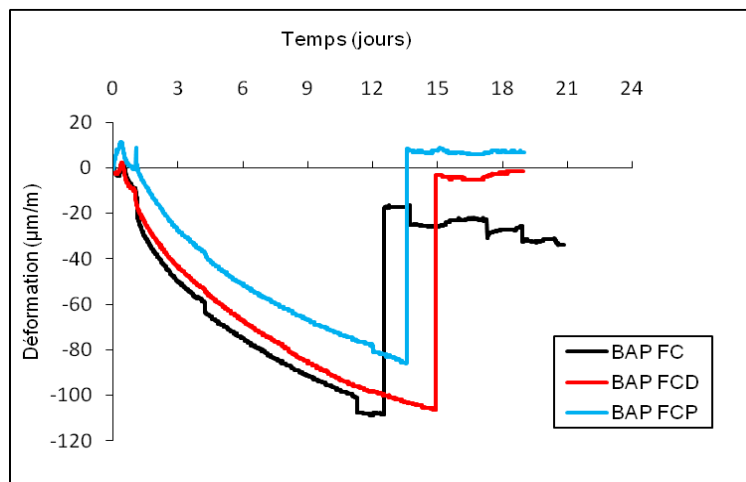


Figure 12. Évolution dans le temps de la déformation de l'anneau métallique sous l'étreinte due aux variations dimensionnelles de retrait du BAP

Le BAP renforcé par des fibres de PP exerce une étreinte moins intense que celle induite par un BAP renforcé par des fibres de diss. La diminution soudaine de la déformation (chute supérieure à 30 μm/m) est une conséquence de la fissuration du béton qui entraîne spontanément une relaxation de l'anneau métallique. Dans ce sens, le BAP témoin (BAP FC sans fibres) a une sensibilité à la fissuration en conditions de retrait empêché plus élevée que les autres BAP (fissuration après 12 jours de fabrication). Les fibres végétales permettent de retarder significativement l'échéance de la fissuration (Ghavami K., 2005).

5. CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent l'influence des fibres sur deux caractéristiques le béton autoplaçant: sa durabilité et sa résistance à la fissuration en conditions de retrait empêché.

L'incorporation des fibres dans les BAP affecte la porosité (paramètre fondamental de la durabilité). C'est pourquoi il était nécessaire de vérifier quelques caractéristiques de durabilité telles que l'absorption capillaire, la carbonatation et la porosité accessible à l'eau.

Les résultats obtenus sur la porosité et l'absorption capillaire des BAP renforcés de fibres de PP sont pratiquement identiques à ceux obtenus sur les BAP avec fibres de Diss. Cependant, les BAP renforcés de fibres de diss ont des profondeurs carbonatées supérieures à celles du BAP renforcés de fibres PP ce qui peut être expliqué par le fait que la fibre de Diss est caractérisée par une section rugueuse et irrégulière ce qui se traduit par une porosité supplémentaire dans les BAP.

Enfin, on notera le potentiel de la fibre de diss qui permet de retarder significativement l'échéance de la fissuration à 16 jours au lieu de 14 jours pour les fibres de polypropylène. Dans ces conditions, on peut affirmer que les fibres végétales peuvent constituer une alternative intéressante pour améliorer la résistance à la fissuration prématurée des matériaux cimentaires.

RÉFÉRENCES

AFREM. (1997), Durabilité des bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, *Compte-rendu des journées techniques*, laboratoire matériaux et durabilité des constructions, Toulouse, France.

Ali-Boucetta T., Behim M. & Laifa W. (2013), Valorisation du laitier granulé et de la poudre de verre dans les bétons autoplaçants (BAP), *Revue des Sciences et de la Technologie, Synthèse*, Université d'Annaba, Algérie, 27 : 33.

Association Française du Génie Civil (AFGC), Les BAP. (2008), Recommandations provisoires. 63p.

ASTM C 1581 – 04. (2005), Standard test method for determining age of cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage.

EL Barak M. (2005), Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des BAP à l'état frais. *Thèse de doctorat*, Université Toulouse III, France, 220p.

EL HILALI A., Décembre (2009), Étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales, *Thèse doctorat*, université de Cergy Pontoise, France, 122p.

Ghavami K. (2005), Bamboo as reinforcement structural concrete elements, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 27(6), 637 – 649.

Merzoud M, Dheilily R.M, Goullieux A, Queneudec M & Habita M.F. (2008), Optimisation of Lignocellulosic Composite formulated with a local resource :The Diss (*Ampelodesma mauritanica*), *Proceeding of the 7th International Congress*, Dundee Scotland, U.K Edition IHS BRE presse, ISBN-13: 978-1-84806-037-1, 651-660.

Mohamed A S Mohamed. (2011), Influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP, *Thèse doctorat*, université de Cergy Pontoise, France, 189p.

Nehdi M. & Rahman M. (2000), Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 (10), 1663-1669.

Page J. (2017), Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée, *Thèse doctorat*, université de Caen Normandie, 131p.

Savastano Jr. H., Agopyan V., Nolasco A.M. & Lia P. (1999), Reinforced cement components for roofing, *Constructions and Building Materials*, Vol. 13(8), 433 – 438.

Thuault. A, S. Eve, D. Blond, J. Breard, et M. Gomina. (2014). Effects of the hygrothermal environment on the mechanical properties of flax fibres. *Journal of Composite Materials*, 48 : 1699-1707.

Toledo Filho R.D., Ghavami K., Sanjan M.A. & England G.L. (2005), Restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 27(5), 534- 544.