



JNB'2017
Journées nationales du béton de Tunisie

DURABILITÉ DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DE DÉCHETS DE MARBRE ET DE CARRELAGE EXPOSÉS À L'ATTAQUE DU SULFATE

DURABILITY OF SELF-COMPACTING CONCRETE MADE WITH MARBLE AND TILE WASTES AND EXPOSED TO SULFATE ATTACK

Mohsen TENNICH^(1,2), Mongi BEN OUEZDOU⁽¹⁾, Abderrazek KALLEL^(1,3)

⁽¹⁾ Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis,
Laboratoire Génie Civil, LR03ES05, BP 37, 1002 Tunis, Tunisie

⁽²⁾ Direction Générale des Etudes Technologiques,
Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Radès, BP 172, 2098 Radès Médina, Tunisie

⁽³⁾ Salman bin Abdulaziz University, College of Engineering,
Civil Engineering Department, BP 655, 11942, Al-Kharj, KSA

E-mails : mohsentennich@yahoo.fr
mongi.benouezdou@gmail.com
a.kallel@hotmail.com

1. INTRODUCTION

L'utilisation du béton autoplaçant (BAP) est recommandée pour les travaux des grands projets (bâtiments, ponts...) où on peut avoir de ferrailage dense et des coffrages des formes complexes. Les structures de ces projets nécessitent des performances mécaniques élevées et une durabilité de leur béton utilisé.

L'étude de l'incorporation des déchets industriels tunisiens (D1: Déchets de marbre, D2: Déchets de carrelage de marbre et D3:

Déchets de tuiles de gravier) dans le BAP a été publiée dans un précédent article [1]. Ceci a été consacré à l'évaluation de l'effet de ces déchets industriels à travers une bonne formulation pour assurer des comportements rhéologiques à l'état frais qui répondent aux exigences de l'EFNARC [2] et d'obtenir des performances mécaniques suffisantes à l'état durci.

Pour compléter cette évaluation, nous devons également considérer la durabilité à long terme de ces bétons comme l'exposition à l'attaque de sulfate externe, qui est l'une des agressions les plus



sévères pour les bétons. En effet, cette attaque présente un effet chimique sur le béton et a des impacts négatifs sur sa durabilité. Dans ce contexte, la présente étude a été initiée pour une meilleure compréhension de la durabilité des bétons autoplaçants à base des déchets de marbre et de carrelages (BAPDs) à travers une comparaison des résultats obtenus aux ceux d'un béton autoplaçant témoin (BAPT) et d'un béton ordinaire vibré (BOV). Depuis la moitié du XIX^e siècle, Vicat [3] a étudié la détérioration chimique du BOV causée par la présence d'ions sulfate dans l'eau de mer. Il a montré que les sels de magnésium $MgCl_2$ et $MgSO_4$ sont les plus agressifs pour le béton. De nombreuses autres études ont été faites sur la durabilité des BOV. Pour le BAP qui diffère du BOV par l'ajout de certains types des additions afin d'augmenter le volume de sa pâte pour assurer sa fluidité à l'état frais, il ya plusieurs études sur la durabilité de ce béton sous l'effet de l'attaque de sulfate externe. Khelifa [4] a étudié la durabilité du béton exposé à l'attaque du sulfate externe. Les échantillons de BAP ont été immergés dans une solution de Na_2SO_4 et soumis pendant six mois aux différents cycles d'immersion / séchage. L'auteur a observé que la dégradation de l'échantillon par attaque externe au sulfate dépend du type de ciment utilisé et aussi du rapport eau / ciment. Senhadji *et al.* [5] ont étudié l'attaque au sulfate d'échantillons dont le ciment est partiellement substitué par des proportions de filler calcaire entre 10% et 30%. Les résultats des essais ont montré que les échantillons qui présentaient les plus hauts niveaux de filler de calcaire étaient plus sensibles aux attaques de sulfate. Siadet *et al.* [6] ont étudié les effets des additifs minéraux (filler de calcaire, cendre volante et pouzzolane naturelle) sur le comportement du BAP immergé dans une solution de sulfate de sodium. Selon leurs résultats, la pouzzolane naturelle est l'additif le plus bénéfique pour un BAP dans un environnement riche en sulfate de sodium. Deepthy et Mathews [7] ont étudié la durabilité du BAP à base des cendres volantes du BAP comme additif par immersion d'échantillons dans des solutions avec différentes proportions d'ions sulfate et de chlorure. Les résultats expérimentaux montrent que les résistances à la compression des échantillons immergés diminuent avec l'augmentation de

la concentration des solutions de sulfate et de chlorure. De même, il ya perte de poids de ces échantillons et ils sont proportionnels à la durée de l'exposition.

Dans cet article, deux essais de l'attaque de sulfatique externe des bétons, préparés à l'avance, ont été réalisés. Pour le premier essai, les échantillons ont été immergés dans une solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4 concentrée à 5%) à une température de 20 ± 2 ° C tandis que pour le second essai, les échantillons ont été exposés à un environnement pollué de dioxyde de soufre (SO_2) dans une salle de charge des batteries des véhicules. L'évaluation du comportement des bétons à l'attaque de sulfate externe est surveillée en suivant les variations de masse des échantillons et leurs modules d'élasticités dynamiques déterminées par l'essai ultrasonique [8].

2. MATÉRIAUX CONSTITUTIFS

Les principaux matériaux utilisés dans cette recherche sont :

- Un ciment Portland CEM I 42,5 produit par l'usine CAT-Jeloud Jeloud à Tunis selon la norme NT47.30.
- Un gravier concassé fourni de carrière Jebel Ressas avec une dimension nominale maximale de 16 mm et un sable de silice alluvionnaire d'une carrière Borj Hfaiedh d'une taille maximale de 4 mm. Les caractéristiques de ces granulats sont définies dans la norme NT 21.30.
- Les additifs utilisés sont :
 - Le filler de calcaire témoin (T) produit par le groupe « Omya » qui est choisi pour fabriquer le BAPT.
 - Les fillers des déchets industriels fournis par les usines COGEMAC et SICAS-Tunis. Ceux-ci sont classés de trois types (D1: Déchet de marbre, D2: Déchet de carrelage marbré et D3: Déchet de carrelage en gravier). Ces déchets sont plus grossiers que filler de calcaire témoin [1]. Leurs caractéristiques chimiques sont présentées dans le Tableau 1.
- Un superplastifiant, réducteur d'eau polyvalent (SIKA VISCOCRETE TEMPO 12).

Les caractéristiques de ces matériaux sont les mêmes que dans le précédent article [1].

Filler	T Calcaire Témoin	D1 Marbre	D2 Carrelage Marbre	D3 Carrelage Gravier
Composition chimique				
CaO (%)	55.44	49.46	47.09	53.08
Al ₂ O ₃ (%)	0.02	0.46	0.58	0.66
Fe ₂ O ₃ (%)	0.01	0.66	0.06	0.10
SiO ₂ (%)	1.09	7.36	3.78	4.28
MgO (%)	0.38	0.23	4.62	0.10
SO ₃ (%)	0.07	0.08	0.41	0.29
K ₂ O (%)	0.02	0.11	0.09	0.08

Tableau 1. Analyse chimique des quatre fillers



Composants	Type du béton					
	BOV	BAPT	BAPD1	BAPD2	BAPD3	
Sable (kg/m ³)	737.9	791.3	789.7	800.8	808.7	
Gravier (kg/m ³)	1119.4	800.2	798.6	809.8	817.7	
Ciment (kg/m ³)	350	350	350	350	350	
Filler calcaire : T (Kg/m ³)	-	250	-	-	-	
Déchet Marbre : D1 (Kg/m ³)	-	-	200	-	-	
Déchet carrelage marbre : D2 (Kg/m ³)	-	-	-	200	-	
Déchet carrelage gravier : D3 (Kg/m ³)	-	-	-	-	150	
Eau (Kg/m ³)	180.9	180.1	175.1	190	180.2	
Dosage de superplastifiant (%)	0.4	1.0	1.2	1.3	1.0	

Tableau 2. Compositions des différents bétons

3. FORMULATIONS RETENUES ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Trois types des BAPDs avec les déchets industriels (D1, D2 et D3) ont été préparés pour évaluer leur résistance à l'attaque de sulfate externe. La durabilité de ces BAPDs a été comparée à un BAPT et un BOV. La formulation de ces bétons est réalisée en utilisant le logiciel « Béton Lab Pro2 » et leurs ajustement par des essais à l'état frais qui répondent aux exigences de l'EFNARC [2]. Les cinq compositions optimisées choisies sont présentées dans le Tableau 2.

Les échantillons utilisés dans cette étude sont de forme cubique (70x70x70mm), obtenus après sciage d'éprouvettes prismatiques (70x70x280mm). Avant le sciage, ces éprouvettes ont été fabriquées et durcis dans de l'eau maintenue à 20 °C ± 2°C pendant 28 jours. Après sciage, les échantillons ont été séchés à une température de 60 °C.

Pour chaque essai, trois échantillons ont été préparés pour chaque type de béton et exposés à une attaque par le sulfate externe. Les essais suivants effectués sont :

- L'attaque par le sulfate sous forme liquide : Les échantillons ont été immergés dans la solution de sulfate de sodium (Na₂SO₄ à 5%, 10H₂O) qui est considérée comme une condition sévère d'attaque de sulfate externe pour le béton.

- L'attaque par le sulfate sous forme gazeuse : Les échantillons ont été exposés à un environnement pollué en dioxyde de soufre (SO₂) d'une salle de chargement des batteries.

La solution de sulfate de sodium utilisé a été renouvelée tous les 30 jours et les mesures de temps des variations de masse et de la vitesse de propagation du son ont été prises tous les 60 jours jusqu'à une vingtaine de mois d'exposition. Dans cette période d'essai, il y avait l'apparition de dégradations dans certains échantillons d'essai.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Essai d'immersion dans une solution de sulfate de sodium (Na₂SO₄ à 5%, 10H₂O)

Les échantillons immergés dans la solution de sulfate de sodium n'ont présenté aucun signe de dégradations jusqu'au 7^e mois. Quelques dégâts ont été observés à partir du 8^e mois sur les échantillons de bétons BOV, BAPD3 et BAPD2 présentés à la Figure 1. Après une immersion pendant 20 mois dans une solution de Na₂SO₄, les échantillons BOV ont été fissurés avec un gonflement.



Figure 1. Dégradations des éprouvettes des bétons après immersion dans une solution de Na₂SO₄



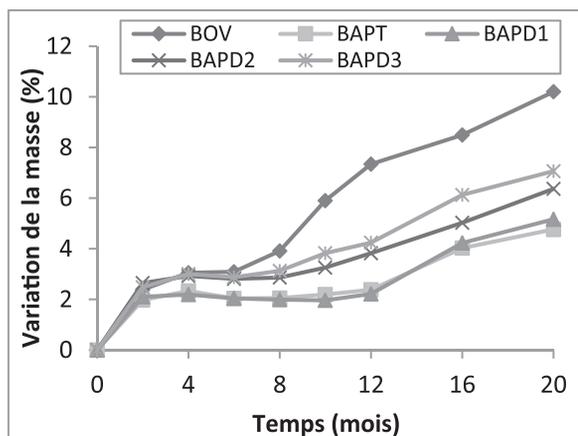


Figure 2. Evolution de la masse des échantillons dans une solution de Na_2SO_4

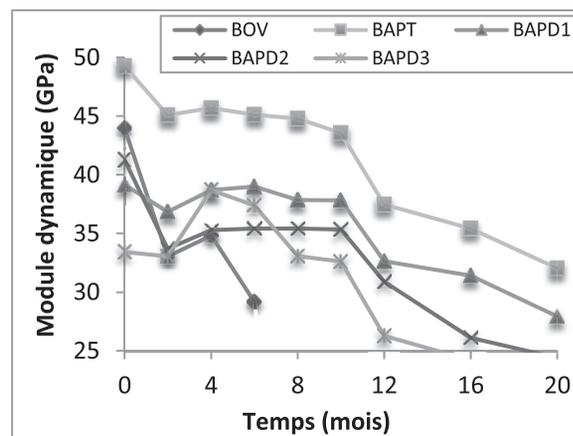


Figure 3. Evolution de module dynamique des échantillons dans une solution de Na_2SO_4

Ces résultats peuvent être expliqués par l'action du sulfate sur les aluminates contenus dans la pâte (ciment seul ou avec des déchets industriels contenant plus d'alumine que le filler calcaire). La réaction de sulfate entraîne la formation de l'ettringite qui provoque un gonflement et par conséquent une fissuration du béton [4, 9].

Les résultats de la variation de masse des échantillons immergés dans la solution de sulfate de sodium sont présentés à la Figure 2. Un gain massique a été observé pour tous les bétons pendant les quatre premiers mois et les variations varient de 2,2% pour le BAPD1 à 3% pour le BAPD3. Ce gain massique est dû à l'absorption d'eau par les échantillons.

Au-delà de 4 mois d'immersion, on a observé que le gain de masse devient plus important pour les échantillons du BOV et de BAPD3 avec diminution simultanée du module d'élasticité dynamique (Figure 3). Pour BAPD1 et BAPT, le gain massique et la diminution du module d'élasticité dynamique sont généralement faibles jusqu'à 20 mois d'immersion dans la solution de Na_2SO_4 . Ces résultats se coïncident aux résultats de M. Regourd [10] qui explique la réaction de sulfate sur le béton par la formation de l'ettringite après une formation de gypse secondaire (Eq. 1). Cette ettringite formée cause de gonflement dans la pâte de béton et donc la fissuration du béton attaqué.

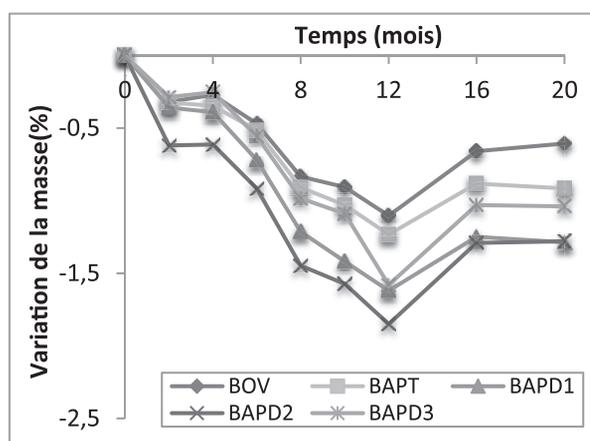


Figure 4. Evolution de la masse des échantillons à la salle de charge des batteries

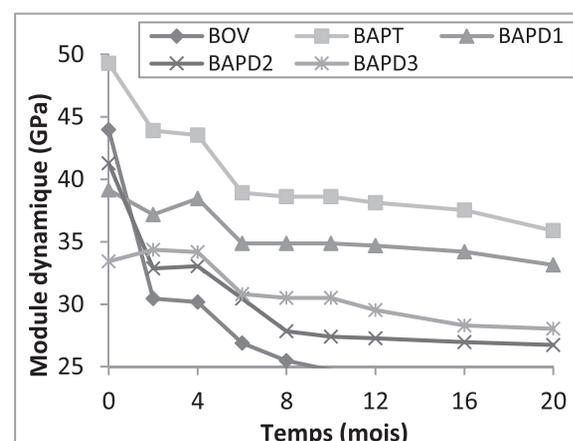
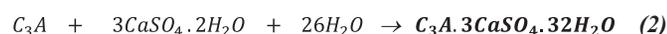
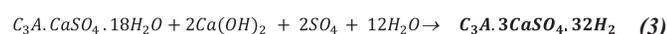


Figure 5. Evolution de module dynamique des échantillons à la salle de charge des batteries

La formation d'ettringite peut provenir de la réaction C_3A anhydre résiduelle avec le gypse secondaire formé (Eq. 2) :

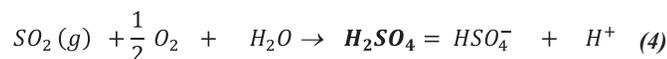


Ou d'aluminates hydratés (Eq. 3) :



4.2. Essai d'exposition dans la salle de chargement des batteries

L'attaque sulfatique externe peut être sous forme gazeuse sous l'effet de la propagation du dioxyde de soufre (SO_2) dans l'air après la dissolution de l'acide sulfurique (H_2SO_4) dans la salle de charge des batteries (Eq. 4).

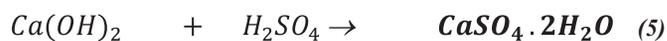


Aucune fissuration n'a été observée pour les échantillons étudiés mais on a observé des altérations en poudre sur les facettes des échantillons. Ces altérations se développent durant une année d'essai et justifient les résultats de la perte de masse des échantillons pour les différents bétons étudiés (Figure 4).





Au-delà d'une année d'exposition des échantillons, un gain massique pour tous les types de béton a été constaté. Ce comportement peut être expliqué par l'attaque de sulfate à l'intérieur des échantillons et non plus sur leurs facettes externes. Selon I. Mouallif *et al.* [11], la réaction de sulfate conduit à la formation de l'ettringite secondaire (Eq. 3) après la formation du gypse secondaire (Eq. 5). Cette ettringite cause le gonflement et donc un gain de masse de l'échantillon sous l'effet de l'humidité dans la salle de charge des batteries.



Les résultats de la variation de module élasticité dynamique pour différents bétons (Figure 5) montrent que le BOV a été le plus attaqué par la dissolution de l'acide sulfurique dans la salle de charge des batteries, résultant à la diminution de son module élasticité dynamique au-dessous de 25 GPa après 10 mois d'exposition. En ce qui concerne les BAPs, on a constaté que le BAPD1 était le plus résistant à cette attaque de sulfate externe. Les modules d'élasticité dynamique de tous les BAPDs sont restés supérieurs à 25 GPa après 20 mois d'exposition dans la salle de charge des batteries.

5. CONCLUSION

A partir de cette étude expérimentale on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les BAPDs ont une résistance suffisante à la dégradation chimique sévère de la solution de Na_2SO_4 . Le gain de masse des BAPs était entre 5% et 7% pendant 20 mois d'immersion alors que pour le BOV, il était supérieur à 10%. De même, le module élasticité dynamique des BAPDs est resté supérieur à 25 GPa pendant 14 mois d'exposition (pour BAPD3) tandis que pour le BOV, il a diminué au-dessous de 25 GPa après seulement 8 mois d'exposition.
- La dégradation chimique par le sulfate sous forme liquide semble influencée par la finesse du filler et par la quantité d'aluminates existant dans la pâte du béton.
- Les BAPDs sont plus résistants que le BOV pour l'attaque par le dioxyde de soufre (SO_2) dans l'air. La diminution de leurs modules dynamiques d'élasticité a été de 15% à 35% pour une période d'exposition de 20 mois alors que pour le BOV ; Cette diminution était de 44% après seulement 5 mois d'exposition.
- L'incorporation des déchets industriels des usines de marbre et de carrelages dans la formulation du BAP a un effet positif sur la durabilité de ce béton. En augmentant la compacité et en réduisant l'interconnexion des pores dans les BAPDs,

ils réduisent la pénétration des ions de sulfates qui peuvent exister dans l'air ou dans les eaux agressives.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Tennich, A. Kallel, M. Ben Ouedou "Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes", *Construction and Building Materials*, Volume 91 (2015), pp. 65-70.
- [2] EFNARC. The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, Production and Use. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005.
- [3] L. Vicat, "Recherches sur les causes physiques de destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer", *Bulletin de la société d'encouragement pour l'industrie nationale* (1857).
- [4] M.R. Khelifa, "Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants", thèse de Doctorat, U. de Constantine et U. d'Orléans, Juin 2009.
- [5] Y. Senhadji, M. Mouli, H. Khelafi and A. S. Benosman, "Sulfate attack of Algerian cement-based material with crushed limestone filler cured at different temperatures", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 34 (2010), pp. 131-143.
- [6] H. Siad, S. Kamali-Bernard, H.A. Mesbah, G. Escadeillas, M. Mouli and H. Khelafi "Characterization of the degradation of self-compacting concretes in sodium sulfate environment: Influence of different mineral admixtures", *Construction and Building Materials*, Volume 47 (2013), pp. 1188-1200.
- [7] R. Deepthy et M.P. Mathews, "Durability study of self-compacting concrete using manufactured sand", *International Journal of Research in Engineering & Technology*, Vol. 2, Issue 9, Sep 2014, pp. 45-50.
- [8] CONTROLS, "Instruction manual-auscultation sonique", Rev: 02/01, N°: 58-E0049/A, p. 25.
- [9] R. Gagné, "Durabilité et réparations du béton", Université de Sherbrooke, pp. 160-185, 1998.
- [10] M. Regourd, "Durability, physico-chemical and biological processes related to concrete, Durability of Concrete structures", CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, May, pp. 49-71, 1983.
- [11] I. Mouallif, S. Lasfar, A. Latrach, M. Chergui and N. Barbe, "Influence du vieillissement sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton", 21^e Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, pp. 26-30, août 2013.

