

Evaluation de La Durabilité du Béton Pouzzolanique Fibré dans des Milieux Acides

A.H. MOHAMMED BELHADJ^a, A. MAHI^b, R. DERBAL^c,

a. Smart Structures Laboratory (SSL), Univ Ctr. of Ain Temouchent, Po Box 284, 46000, Algeria, Email: mb_ah1@yahoo.fr

b. Laboratoire Matériaux Structures et Thermiques (LMST), Université des Sciences et de la Technologie d'Oran USTOMB, Algérie, Email: mahiabdeldkader@yahoo.fr

c. Civil Engineering Department, Univ Ctr. of Ain Temouchent, Algeria. Email: r.derbal@yahoo.fr

Résumé :

La haute résistance à la compression, la bonne résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, la flexibilité de l'emploi et l'abondance de matières premières font du béton le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de la construction. Malgré ces avantages, le béton est un matériau caractérisé par une faible résistance à la traction, une faible résistance aux chocs et aux fissures ; propriétés nocives qui affectent la durabilité et la sécurité des structures.

Pour tenter de remédier à ces inconvénients, plusieurs méthodes ont été utilisées, telles que le béton armé, le béton précontraint, etc. Aujourd'hui, le béton fibré est un processus très ingénieux. L'objectif de cette étude est de définir le comportement du béton avec ajout de la pouzzolane renforcé de fibres en environnement agressif. Le travail consiste à préparer plusieurs séries d'échantillons du béton en utilisant la pouzzolane sous forme d'une poudre très fine (passant au tamis 60 μm), puis on a variés les types des fibres utilisés: polypropylène, polyéthylène et métalliques, avec un rapport $E / C = 0,39$. Ensuite Les éprouvettes en bétons de dimensions de $7 \times 7 \times 7 \text{cm}^3$ ont été conservé dans l'eau saturé en chaux jusqu'à l'âge de 7, 14 et 28 jours, puis elles ont été placé dans des solutions d'acide chlorhydrique Hcl et d'acide sulfurique H_2SO_4 avec une concentration de 5% pour chaque milieu. L'évaluation de la durabilité de ces bétons ainsi que le comportement mécanique ont été obtenu par la mesure de la perte de masse et la résistance en compression mécanique.

Les résultats obtenus ont montrés que l'ajout de la pouzzolane et des fibres polypropylène présentent un bon comportement mécanique vis-à-vis les attaques des acides forts par rapport à ceux avec des fibres métalliques.

Abstract :

High compressive strength, good fire resistance, thermal and sound insulation, flexibility of use and abundance of raw materials make concrete the most used material in all areas of construction. Despite these advantages, concrete is a material characterized by low tensile strength, low resistance to shocks and cracks; harmful properties that affect the durability and safety of structures.

In an attempt to overcome these disadvantages, several methods have been used, such as reinforced concrete, prestressed concrete, etc. Today, fiber concrete is a very ingenious process. The objective of this study is to define the behavior of concrete with the addition of fiber-reinforced pozzolana in an aggressive environment. The work consisted in preparing several sets of samples of the concrete using pozzolan in the form of a very fine powder (passing through a 60 μm sieve), then the types of fibers

used were varied: polypropylene, polyethylene and metal, with a E / C ratio = 0.39. Then the concrete specimens of dimensions $7 \times 7 \times 7 \text{cm}^3$ were kept in water saturated with lime until the age of 7, 14 and 28 days, then they were placed in solutions of hydrochloric acid Hcl and acid sulfuric H_2SO_4 with a concentration of 5% for each medium. The evaluation of the durability of these concretes as well as the mechanical behavior were obtained by the measurement of the loss of mass and the resistance in mechanical compression.

The results obtained showed that the addition of pozzolan and polypropylene fibers have a good mechanical behavior vis-à-vis the attack of strong acids compared to those with metal fibers

Mots clefs : Pouzzolane – fibres métalliques – fibres polypropylène – fibres polyéthylène acides forts.

1 Introduction

Le béton est un matériau composite dont la matrice est fissurable et fragile. Pour améliorer ses performances mécaniques (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.) on peut aujourd'hui faire le choix d'ajouter des fibres au béton. Ce procédé a fait l'objet de nombreuses études et de nombreux retours d'expériences, qui ont permis de développer leur compatibilité avec le béton en fonction des effets recherchés. Houari [1], après des essais de flexion, trouve que l'ajout de 1% de fibres métalliques a fait augmenter fortement la résistance à la flexion, concorde avec d'autres résultats [2], ainsi que Behbahani [3], montre que l'utilisation de fibres d'acier de plus de 1% serait à l'origine d'une légère diminution de la résistance à la flexion. En outre les fibres améliorent la résistance à la détérioration du matériau due à la fatigue, à l'impact, au retrait et aux contraintes thermiques résultats trouvés par Lie [4] et Kalifa [5].

Le renforcement par des fibres a pour objectif majeur d'améliorer le comportement vis à vis à la traction afin de retarder, de limiter ou d'éviter une rupture quasi-fragile [6]. Le béton armé de fibres peut être utilisé pour améliorer les performances des éléments de structure en béton comme les poutres, les colonnes et les planchers en profondeur, en termes de réduction des fissures, de ténacité et de ductilité [7]. La recherche de nouveaux bétons renforcés par fibres se poursuit aujourd'hui [8]

[9-10]. Les fibres présentent des caractéristiques physiques et mécaniques différentes selon leur nature. Chaque type de fibre a une influence particulière sur le comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des utilisations spécifiques [11]. Les fibres habituellement utilisées dans les composites cimentaires sont d'origines métallique (fibres d'acier), minérale (fibres de verre) ou pétrochimique (fibres de polypropylène). Elles sont utilisées à la fois pour des applications courantes (dallages en béton, chapes en mortier, enduits, préfabrication) mais également pour les Bétons Fibrés Ultra Performants BFUP [11-12].

Sous certaines conditions, Le béton peut être confronté à des milieux agressifs, ces environnements agressifs peuvent changer certains facteurs physiques et chimiques et causer un danger significatif pour le béton [13-14]. Les environnements acides ou sulfatiques susceptibles d'être agressifs pour le béton peuvent se décrire de la manière suivante :

- Attaque acide : dissolution de la chaux hydratée avec formation de gypse.
- Attaque sulfatique : réaction entre les aluminates du ciment et le gypse pour former de l'ettringite [15-16].

Notre travail consiste à préparer plusieurs séries d'échantillons du béton en utilisant la pouzzolane sous forme d'une poudre très fine (passant au tamis $60 \mu\text{m}$), puis on a variés les types des fibres utilisés : polypropylène, polyéthylène et métalliques, avec un rapport $E / C = 0,39$. Ensuite Les éprouvettes en bétons de dimensions de $7 \times 7 \times 7 \text{cm}^3$ ont été conservé dans l'eau saturée en chaux

pendant 28 jours, pour être placé dans des solutions d'acide chlorhydrique HCl et d'acide sulfurique H₂SO₄ jusqu'à l'âge de 7, 14 et 28, avec une concentration de 5% pour chaque milieu. L'évaluation de la durabilité de ces bétons ainsi que le comportement mécanique ont été obtenu par la mesure de la perte de masse et la résistance en compression mécanique.

2 Démarche Expérimentale

2.1 Ciment

Le ciment est un ciment portland composé à la pouzzolane naturelle de la classe CPJ-CEM II/A 42,5 selon la norme NA 442/2000 [17], de la cimenterie de Béni Saf en Algérie.

Dans les tableaux 1 et 2 on retrouve les analyse chimique et minéralogique du ciment utilisé.

Tableau 1 : Composition chimique du ciment CPJ CEMII /A 42.5

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Perte au feu	Insolubles	Total
26.65	56.80	5.52	3.22	1.03	2.45	2.42	1.9	99.99

Tableau 2 : Composition minéralogique du ciment CPJ CEMII /A 42.5.

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO libre
51.74	24.50	8.78	10.51	0.91

2.2 Fibres

Les fibres utilisées pour préparer les différentes éprouvettes des bétons sont : les fibres polyéthylènes, (Figure 1), les fibres polypropylènes, (Figure 2), et les fibres métalliques, (Figure 3), Leurs propriétés sont résumées dans le tableau 3.



Figure 1 : Fibres polyéthylènes (longueur 50 mm)



Figure 2 : Fibres polypropylènes (longueur 6 mm)



Figure 3 : Fibres métalliques (longueur 30 mm)

Tableau 3. Propriétés des fibres.

Type de fibre	Métallique	Polyéthylènes	Polypropylènes
Longueur (mm)	30	50	6
Diamètre (mm)	0.5	0.3	0.05
Densité (g/cm ³)	7.85	0.935	0.900
Résistance à la traction (MPa)	1700	350	600
Module d'élasticité (GPa)	150-200	5	5-10
Allongement à la rupture (%)	3-4	3-80	10-20

2.3 Pouzzolane

La pouzzolane utilisée comme ajout dans le béton, est une roche volcanique siliceuse de couleur variant du rouge au noir disponible dans la région de Beni Saf, willaya d'Ain Témouchent, Algérie (Figure 4). Les caractéristiques chimiques sont représentées sur le tableau 4.



Figure 4 : La pouzzolane utilisée.

Tableau 4: Analyse chimique de la pouzzolane

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F
Teneurs (%)	47.48	18.83	10.51	9.92	4.38	0.50	0.20	0.81	3.91

L'analyse chimique de la pouzzolane de Beni-Saf montre qu'elle peut être considérée comme un matériau pouzzolanique d'après les normes en vigueur. La norme française exige que les pouzzolanes doivent être composées essentiellement de la silice SiO₂ réactive avec une teneur $\geq 25\%$ et de l'alumine Al₂O₃. La norme américaine ASTM C618 [18] exige que la somme des teneurs (Al₂O₃+SiO₂+Fe₂O₃) soit supérieure à 70 %.

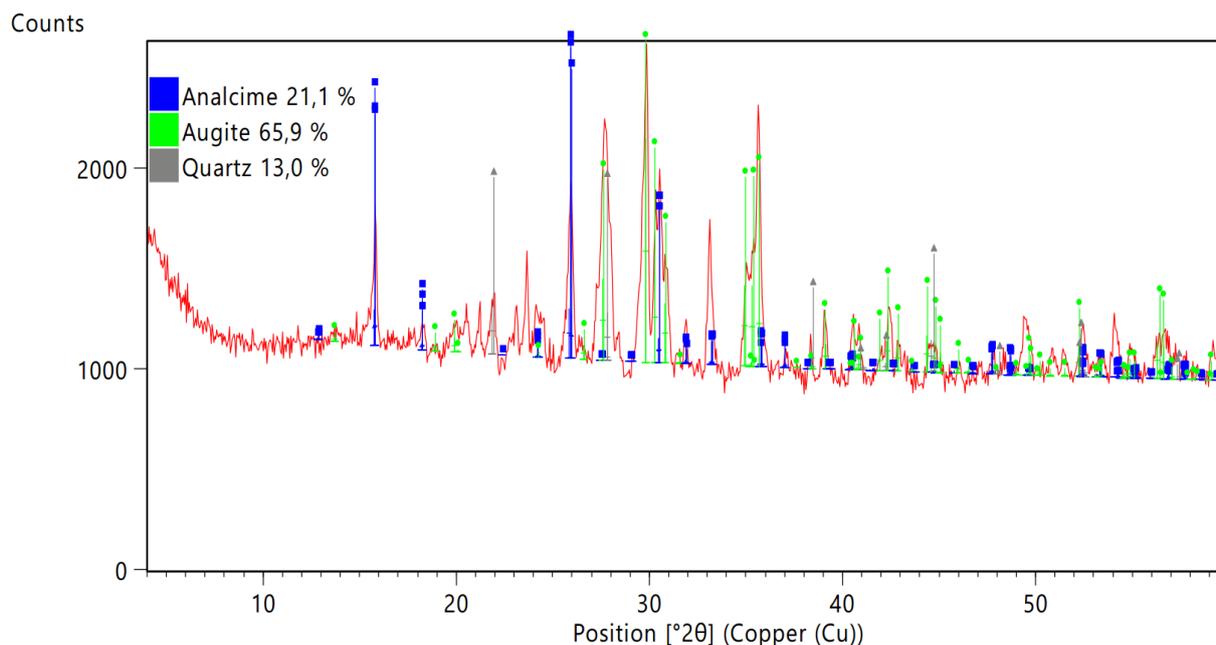


Figure 5 : Diffractogramme de l'échantillon de pouzzolane.
La diffraction des rayons X (XRD)

La Figure 5 représente les phases identifiées dans le diffractogramme en utilisant le logiciel Highscore Plus de Panalytical. Trois phases ont été identifiées dans l'échantillon de pouzzolane : Analcime ($\text{Si}_{32.16}\text{Al}_{15.84}\text{Na}_{16.08}\text{O}_{112.00}$), Augite ($\text{Ca}_{4.00}\text{Mg}_{2.96}\text{Fe}_{1.00}\text{Si}_{8.00}\text{O}_{24.00}$) et Quartz (Si_6O_6). La méthode de Rietveld est maintenant appliquée dans les laboratoires industriels pour l'analyse quantitative des matières premières, des clinkers de ciment Portland, des ciments Portland (OPC) et de tous les types de ciments mélangés.

Pour le clinker, la méthode de Rietveld est la seule option pour déterminer le contenu de la phase. En utilisant la méthode Rietveld de l'échantillon de pouzzolane, le contenu des phases est : Analcime (21,1%), Augite (65,9%) et Quartz (13%).

2.4 Formulations des bétons

Les différentes formulations des bétons étudiés sont données dans le tableau 5 (BT : béton sans fibres; BFE : avec des fibres Polyéthylènes ; BFP : avec des fibres de polypropylène ; BFM : avec des fibres métalliques). Les pourcentages des fibres ont été calculés afin d'avoir une bonne maniabilité. Car d'après Kherbache et al. [19], ainsi que Park et al. [20], en augmentant le volume et la longueur des fibres, il pourra y avoir des problèmes de maniabilité.

Tableau 5 : Compositions de bétons étudiés

Composition	BT	BFM	BFP	BFE
Ciment (kg)	400	400	400	400
Sable (kg)	620	620	620	620
Gravier 3/8 (kg)	1069	1069	1069	1069
Pouzzolane (kg)	/	50	50	50

Eau (litre)	156	156	156	156
Adjuvant (%)	1.5	1.5	2	2
E/C	0.39	0.39	0.39	0.39
E/L	/	0.34	0.34	0.34
Fibre (%)	/	0.51	0.11	0.67

2.5 La cure des éprouvettes

Après 28 jours de cure dans une solution d'eau saturée en chaux, les éprouvettes sont pesées pour déterminer M_1 , puis elles ont été immergées dans les différentes solutions chimiques dont les concentrations sont présentées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Concentration des solutions

Solution	Concentration(%)	Quantité/10 litres d'eau	Observation
HCl	5	1300 ml/10 L	Acide fort
H₂SO₄	5	520 ml/10 L	Acide fort

La conservation dans les solutions chimiques est commencée à partir de 28 jours pour une durée de : 7, 14 et 28 jours d'immersion dans les deux solutions chimiques.

3 Résultats et Interprétations

3.1 Perte de masse

Les mesures de la perte de masse sont réalisés par les pesées des éprouvettes $7 \times 7 \times 7$ cm³ dans le but de suivre l'évolution des échanges hydriques et chimiques entre les éprouvettes et le milieu de conservation, après 7, 14 et 28 jours.

$$\text{La perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100 \quad (1)$$

M_1 : Masse initial.

M_2 : Masse finale (après immersion dans les solutions).

3.1.1 Eprouvettes conservées dans l'acide chlorhydrique Hcl

Le suivi de la perte de masse pour les éprouvettes immergées dans l'acide chlorhydrique Hcl est assez importante, on peut voir sur la Figure 6 que la perte de masse à l'âge de 7 jours est presque identique pour les différents types du béton tandis qu'à l'âge de 14, on peut voir clairement que le béton avec fibres de polypropylène à une perte de masse assez importante par rapport aux autres bétons. Au-delà de 28 jours on remarque un autre comportement pour les différents bétons avec fibres. Des résultats semblables ont trouvés par Kadja et al. [21].

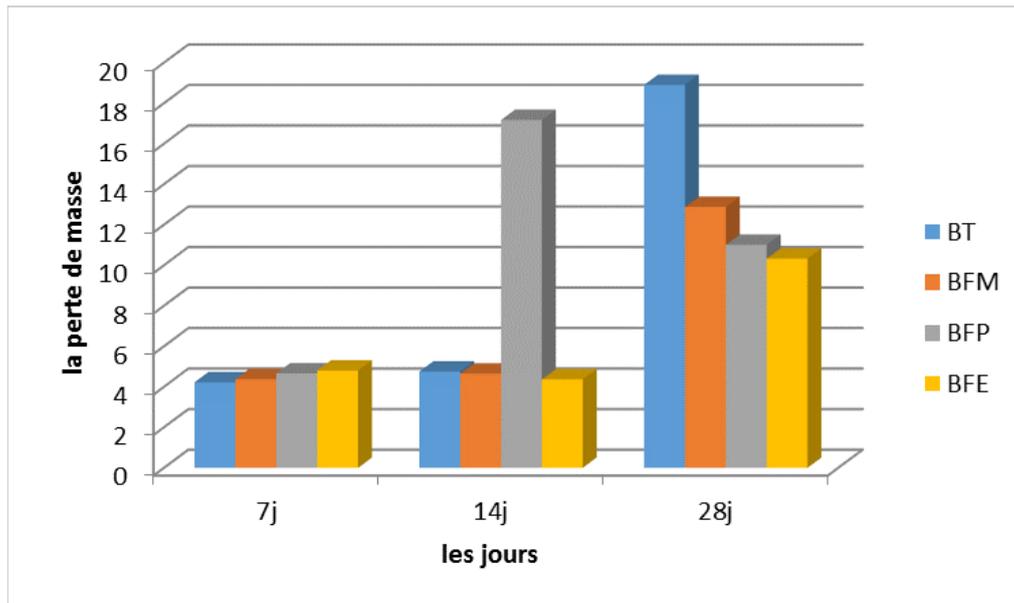


Figure 6 : perte de masse des éprouvettes dans l'acide (Hcl).

3.1.2 Eprouvettes conservées dans l'acide sulfurique H_2SO_4

La perte de masse pour les éprouvettes immergées dans l'acide sulfurique est assez importante. Après examen visuel, on a constaté une déformation des parois extérieures des bétons (voir Figure 7).



Figure 7 : éprouvettes des bétons immergées dans (H_2SO_4).

On a aussi constaté des dépôts blanchâtres sur la surface des éprouvettes et dans la solution de conservation. Ces dépôts sont dus à la formation de l'étringite secondaire, un produit gonflable et très soluble en présence d'eau. L'acide sulfurique réagit avec des composants de la matrice de ciment, principalement avec les hydrates d'aluminat de calcium, pour former des produits de réaction volumineux. Ce qui provoque la formation de gypse secondaire et d'étringite selon les réactions suivantes:



Le gypse est formé par la réaction entre les sulfates et la portlandite (Eq. 2). Le gypse déposé est ensuite lessivé, ce qui explique la couleur blanche de la solution à partir de la deuxième semaine. La dégradation des matériaux cimentaires dans ces conditions environnementales se caractérise par le passage complet en solution du portlandite et par la décalcification progressive des HCS et dans d'autres proportions d'étringite et de monosulfoaluminate (Eq. 3).

Au niveau de la Figure 8, on remarque que les BFP et les BFM avaient plus de perte de masse que d'autres bétons avec des fibres à l'âge de 14 jours. Tandis qu'à l'âge de 28 jours les BFP ont une faible perte de masse par rapport les deux autres bétons avec fibres.

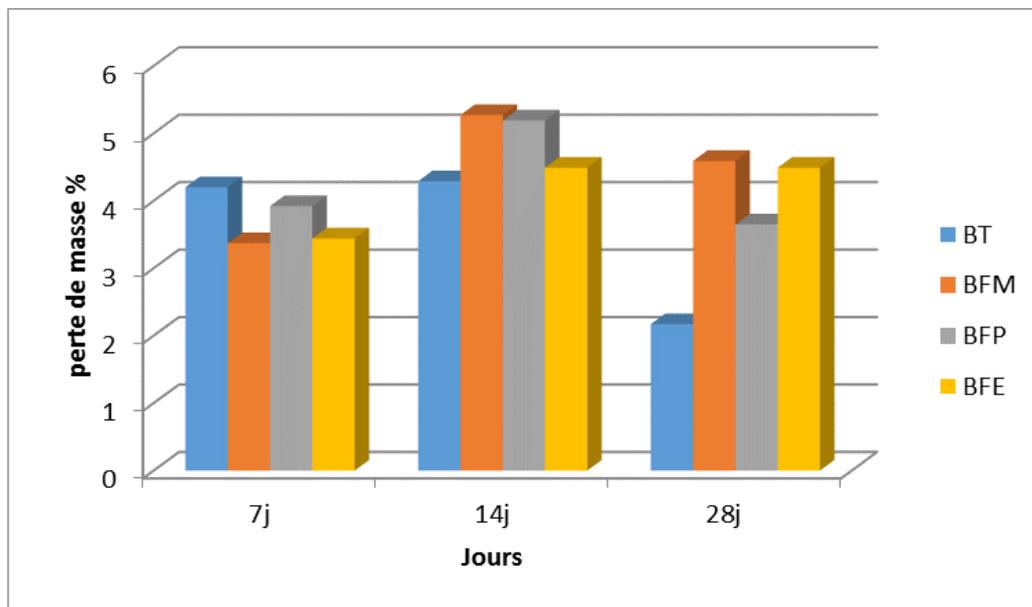


Figure 8 : perte de masse des éprouvettes dans l'acide (H_2SO_4).

3.2 Résistance à la compression :

Les essais de la compression par l'application de compression axial ont été effectués, selon la norme NF EN 206-1 [22], sur des éprouvettes de béton $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ âgée de j jours dans une presse de béton jusqu'à la rupture.

3.2.1 Résistance des éprouvettes immergées dans (Hcl).

On constate sur la Figure 9, qu'il y a une évolution de la résistance en fonction de l'âge jusqu'à de 28 jours. On remarque une diminution de la résistance. Les bétons BFE ont une meilleure résistance par rapport les autres bétons.

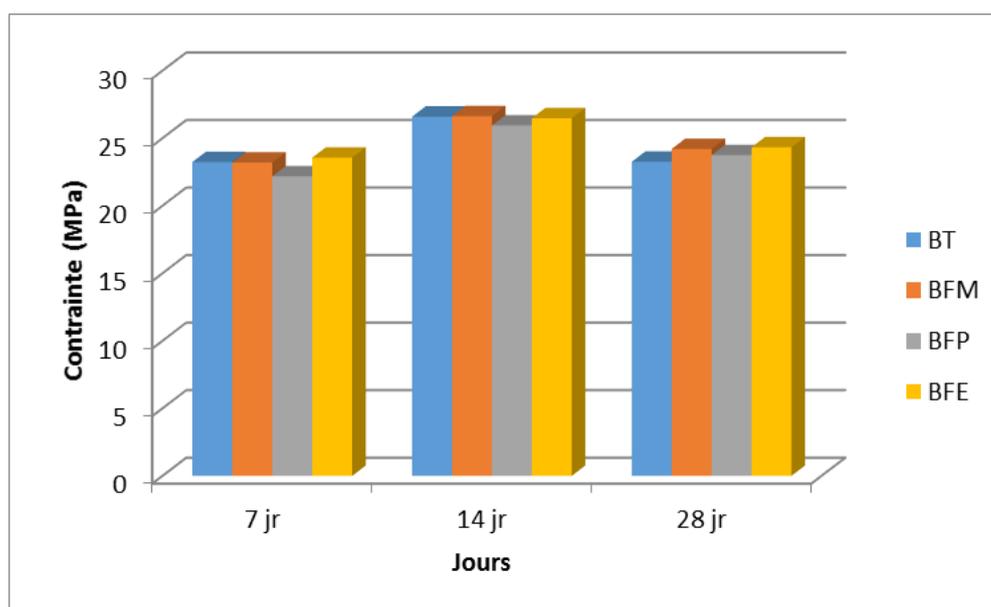


Figure 9 : différentes résistances à la compression.

3.2.2 Résistance des éprouvettes immergées dans (H_2SO_4)

Les éprouvettes BFM immergées dans l'acide sulfurique ont une bonne résistance par rapport aux autres types de bétons à l'âge de 14 jours. Au-delà de 28 jours les bétons ont subis une dégradation importante qui a influencé sur la résistance en compression (Figure 10).

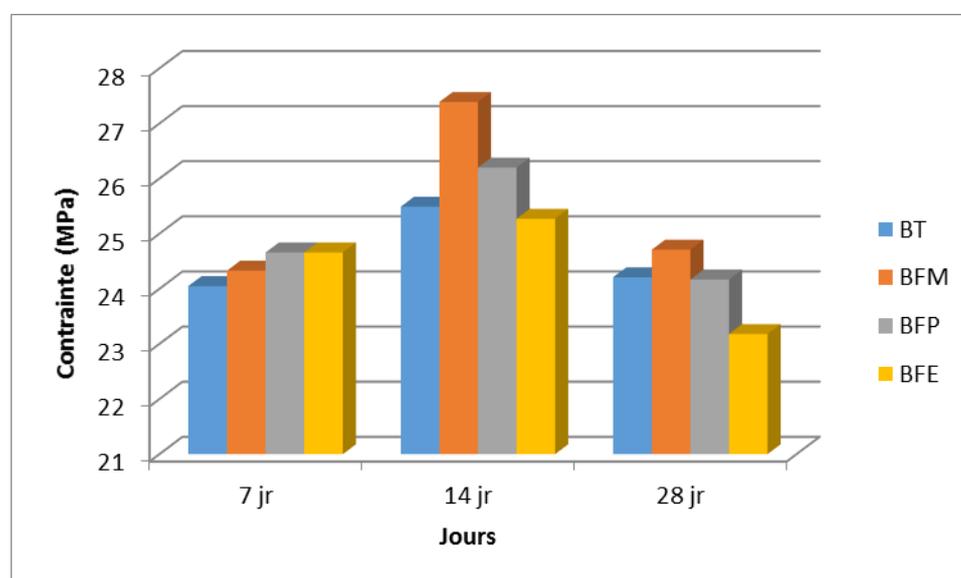


Figure 10 : différentes résistances à la compression.

4 Conclusion

Dans cette étude, une analyse de l'influence des types des fibres et de l'ajout de la pouzzolane sur le comportement de bétons dans les milieux agressifs est réalisée.

Le travail expérimental nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les bétons exposés à l'acide Hcl ont une grande perte de masse par rapport à ceux conservés dans l'acide sulfurique H₂SO₄.
- L'attaque chimique des bétons s'effectue principalement sur la portlandite Ca(OH)₂, contenue dans le ciment l'ajout de la pouzzolane conduit à la consommation de cette portlandite ce qui a contribué à la résistance de l'attaque sulfatique.
- En effet, la réaction pouzzolanique conduit à la consommation de l'hydroxyde de calcium issu de l'hydratation du ciment qui réduit le potentiel de formation du gypse et de l'étringite secondaire.
- En outre, la présence de la pouzzolane naturelle dans le ciment, rend la microstructure plus dense suite à la Formation de gels secondaires C-S-H. et par la suite empêche la pénétration des agents agressifs.

Références

- [1] H. Houari, Contribution à l'étude du comportement béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 1993, 244p.
- [2] A. Belferrag, A. Kriker, E. Khenfer, Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les matériaux de constructions en zones sahariennes, Annales de la Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur (2007), Vol. 1 N° 2, pp.14-20.
- [3] H P. Behbahani, Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams, A project report of the degree of Master of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, April, 2010, 69 pages.
- [4] T.T. Lie, V.K.R. Kodur, Mechanical properties of fibre-reinforced concrete at elevated temperatures, Internal Report No. 687, February 1995, Institute - Bev Creighton Analyse.
- [5] P. Kalifa, G. Chene, C.H. Galle, High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure, Cement and Concrete Research (2001), Vol. 31, pp. 1487–1499
- [6] P.C. Rossi, Les bétons de fibres métalliques, Presse de l'ENPC, Juin 1998, 309 p.
- [7] P.O. Awoyera, J.K. Ijalana, O.E. Babalola, Influence of Steel and Bamboo Fibres on Mechanical Properties of High Strength, Concrete Journal Materials and Environmental Sciences (2015), Vol. 6, No. 12, pp. 3634-3642, ISSN : 2028-2508.
- [8] O. Rahli, H. Belkadi, S. Bedjou, Etude comparative du comportement mécanique des dallages industriels en béton arme et celles en béton de fibres métalliques, Conférence: séminaire international de Génie civil SIGC 2018. ENPO-MA, 27 et 28 Novembre 2018.
- [9] A.H Mohammed Belhadj, A. Mahi, R. Derbal, R. Aouane, Comportement des bétons légers fibrés à base des granulats pouzzolaniques vis-à-vis des milieux acides. 23^{ème} Congrès Français de Mécanique, 28 août - 1er septembre 2017, Lille, France, AFM.
- [10] R.A. Alameri, A.A. Abbass, F.H. Arna'ot, M. Ozakca, Response of steel fiber concrete hollow beams under four points test, UEMK 2017, 2nd International Energy and Engineering Conference Gaziantep University, Turkey Volume 2.
- [11] CIM béton, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, Collection technique, CIM béton, 2013, Paris-la-Défense, France.
- [12] J. Page, M. Boutouil, F. Khadraoui, M. Gomina, Etude des propriétés mécaniques d'un béton renforcé par des fibres de lin, Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015, Douai, France.
- [13] A. Dubose, G. Escadeillas, P.J. Blanc, Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as underlying material, Cement and Concrete Research (2001), Vol. 31 No. 11, pp. 1613-1617.

- [14] A. García-Santo, J.M. Rincón, M. Romero, R. Talero, Characterization of a polypropylene fibered cement composite using ESEM, FESEM and mechanical testing, *Construction and Building Materials* (2005), Vol. 19, No. 5, pp. 396-403.
- [15] O. Fedoui-Akmoussi, L. Molez, W. Brahim, S. Kaci, Comportement mécanique des mortiers fibres pré-fissurés stockés dans un environnement acide, 36^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, Jun 2018, Saint-Etienne, France.
- [16] C. Perlot, J. Verdier, M. Carcassès, Influence of cement type on transport properties and chemical degradation: Application to nuclear waste storage, *Materials and structures* (2006), Vol. 39, No. 5, pp. 511-523.
- [17] NA 442 : Norme Algérienne Ciment Composition, Spécifications Et Critères De Conformité Des Ciments Courants Algérie : IANOR.
- [18] ASTM (2003), Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete (C618), 2003, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International.
- [19] S. Kherbache, N. Bouzidi, M.A. Bouzidi, K. Moussaceb, A.K. Tahakourt, The behavior of the concretes and mortars reinforced by metallic fibers wastes as substitution of cement, *Journal of Materials, Environment and Sciences* (2016), Vol. 7 No. 1, pp. 18-29, ISSN : 2028-2508.
- [20] S.H. Park, G.S. Ryu, K.T. Koh, D.J. Kim, Effect of shrinkage reducing agent on pullout resistance of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete, *Cement and Concrete Composites* (2014), Vol. 49, pp. 59-69.
- [21] M. Kadja, A. Zaatri, Z. Nemouchi, R. Bessaih, S. Benissaad, K. Talbi, Apport des fibres sur les caractéristiques du béton Autoplaçant durci, Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution ICEMAEP2016, October 30-31, 2016, Constantine, Algeria.
- [22] NF EN (2004b), NF EN 206-1: Béton – Partie 1: Spécification, performances, production et conformité (April). Comité Européen de Normalisation (CEN), 2004, AFNOR, Paris France.