

Etude statistique et Caractérisation Mécanique des Bétons Polymères Sollicités en Flexion

N. ZANACHE^a, A. BEZAZI^b, H. BOUCHELAGHEM^{b,c}, M. BOUMAAZA^a,
S. AMZIANE^d, F. SCARPA^e

a. Laboratoire de Génie Civil & Hydraulique LGCH, Université 8 Mai 1945 Guelma, BP 401 Guelma 24000, Algérie.

E-mails : zanachenaziha@yahoo.fr messaoudabeb@yahoo.fr

b. Laboratoire de Mécanique appliquée et des nouveaux matériaux LMANM, Université 8 Mai 1945 Guelma, BP 401 Guelma 24000, Algérie

E-mails : ar_bezazi@yahoo.com bouchelaghem_h@yahoo.fr

c. Département de Génie Mécanique, Université de Constantine 1, Algérie.

d. Département Génie Civil, Polytech Clermont Ferrand Université Blaise Pascal, UMR 6602, Institut Pascal BP 206, 63174 Aubière, France.

E-mail : sofiane.amziane@univ-bpclermont.fr

e. Advanced Composites Centre for innovation and Science (ACCIS), University of Bristol, BSB 1 TR Bristol, UK.

E-mail : f.scarpa@bristol.ac

Résumé :

Le travail proposé est une étude expérimentale du comportement mécanique d'un béton polymère sollicité en flexion 3- points. Le béton élaboré est constitué d'une matrice en résine polyester renforcée par la poudre de marbre et des granulats de sable. Sept types de formulation d'échantillons composites sont préparés et dimensionnés selon la norme ASTM C580-02 où la matrice polymère est prise constante représentant 14% de la masse totale. Vu les dispersions des résultats des analyses statistiques par la variance Anova et par les distributions de Weibull à 2 et à 3-paramètres ont été utilisées. L'analyse des résultats obtenus montre que le taux de la poudre de marbre et des granulats de sable ont un effet significatif sur la résistance du béton polymère et que la distribution de Weibull à 2-paramètres décrit mieux les résultats expérimentaux que celle à 3-paramètres.

Abstract:

The proposed work is an experimental investigation of the mechanical behavior of the polymer concrete under 3-point bending. The concrete performed consists of a polyester resin matrix reinforced by marble powder and aggregates sand. Seven types of formulation of composite samples are prepared and sized according to ASTM C580-02 where the polymer matrix is taken constant representing a 14% of the total masse. Having regarded to dispersion of results a statistical analysis by Anova and the Weibull distributions with 2 and 3-parameters were used. The analysis of the results obtained show that the rate of the marble powder and the aggregates sand have a significant effects on the resistance of polymer concrete and that the Weibull distribution with 2-parameters better describes experimental results than the 3-parameter one.

Mots clefs : Béton polymère/ Résine/granulats / Flexion / Anova / Weibull

1. Introduction

Le béton polymère (BP) est un matériau fabriqué en remplaçant totalement ou partiellement le ciment par un polymère. La recherche et le développement des bétons et mortiers polymères ont connu un grand essor dans différents pays occidentaux depuis les années 1980 [1]. Comme le remplacement du ciment Portland par un polymère entraîne une augmentation sensible du coût du béton, il ne faudrait le faire que si l'on recherche des caractéristiques supérieures, si le coût de la main d'œuvre est moins élevé ou si les besoins en énergie lors de la fabrication et de la mise en œuvre sont moindres. Actuellement, le BP est utilisé très efficacement de par sa résistance élevée et sa légèreté, en éléments préfabriqués dans le bâtiment, pour les tabliers de pont, pour les conteneurs de déchets dangereux, pour bases de machines industrielles, pour la fabrication des carreaux de planchers en marbre synthétique et les panneaux d'escaliers, des plaques et panneaux de parements de diverses structures, d'appuis de fenêtre [2]. Pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques et permettre une bonne durabilité des bétons de résine renforcés ou non tout en satisfaisant les exigences économiques qui se rapportent au coût du produit fini, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'optimisation de la formulation du BP par la diminution de la fraction massique de la résine et/ou par le remplacement ou l'ajout d'une partie du squelette granulaire par d'autres composantes, conférant aux bétons des qualités meilleures en abaissant le prix du matériau du produit fini [3, 4]. Gorninski *et al*, [5] ont abordé le problème de l'optimisation du BP du point de vue économique. La composition pour la résine polyester iso-phthalique et ortho-phthalique en fraction massique de 12 et 13% respectivement est choisie sur la base d'un rapport résistance/coût. Maksimov *et al*, [6] ont étudié la composition d'un béton de résine formé de polyester insaturé, de gravier granitique concassé, de sables de fillers calcaires. Agavrioloiaie *et al*, [7] ont élaboré un BP avec une résine époxyde polyuréthane qui a donné une bonne résistance en flexion, traction et compression ainsi qu'une bonne adhérence avec le béton ordinaire. Muthukumar *et al*, [8] ont montré que les fractions massiques en polymère de furane variaient de 7,5% à 15% et qu'au dessous de 8,5%, le béton présentait des problèmes d'ouvrabilité et qu'au dessus de 12% des phénomènes de ségrégation apparaissaient. Vipulanandran *et al*, [9] se sont intéressés à des BP à matrice polyester et époxyde. En variant la quantité de résine entre 10 et 20%, les valeurs des propriétés mécaniques (résistance et module de young) augmentent en fonction de la quantité de résine introduite jusqu'à atteindre un maximum où elles commencent alors soit à décroître, soit à se stabiliser. La durabilité du BP sous l'effet de la température et du gel-dégel a été aussi abordée par des auteurs [10, 11]. Pendant les dernières années, des études se sont intéressées à l'utilisation de résine provenant du recyclage des bouteilles en plastique PET pour la fabrication du BP [12, 13]. Ces tentatives visent en premier lieu à préserver l'environnement par l'élimination d'une partie des déchets et la réduction de l'exploitation excessive des ressources minérales naturelles et en deuxième lieu à abaisser le coût de production des bétons de résines. Basés sur les mesures de résistance en compression, Tawfik *et al*, [14] proposent une optimisation du squelette granulaire pour un BP fabriqué à partir de résine recyclée à partir de PET et des déchets de marbre et de basalte donnant des résistances en compression les plus élevées pour les fractions massiques suivantes : 30% de la poudre de marbre ($\Phi > 0,1\text{cm}$), 30% de basalte (0,5 à 1 cm) et 40% de marbre (0,1 à 0,5 cm). Le BP obtenu est à durcissement rapide et possède des propriétés physiques acceptables et de bonnes caractéristiques chimiques.

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'influence du taux des différents constituants du béton polymère (granulats de sable et poudre de marbre) sur sa résistance en flexion en se basant sur des

études statistiques à savoir l'analyse de variance Anova et les distributions de Weibull à 2 et à 3 paramètres.

2 Protocole expérimental

2.1 Matériaux de l'étude

Le matériau utilisé dans ce travail est un matériau granulaire à matrice polymère type béton synthétique, Ce matériau est élaboré à partir d'une matrice polymère (résine polyester) de taux massique constant égal à 14% renforcée par un sable commercialisé de masse volumique $1,675 \text{ g/cm}^3$ étuvé à 105° pendant 24 heures et dont une analyse granulométrique a donné des diamètres variant de 0,71 à 3 mm, et de poudre de marbre de masse volumique $1,425 \text{ g/cm}^3$ ayant une granulométrie variant de 0,02 à 1,4 mm. Les sept formulations prises avec des pourcentages variables en masse d'agrégats sont présentées sur le Tableau 1.

Tableau 1: Formulation des bétons résineux étudiés.

| Constituants | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|---------------------|----|----|-----|----|----|----|-----|
| Sable commercialisé | 0 | 16 | 26 | 43 | 60 | 70 | 86 |
| Poudre de marbre | 86 | 70 | 60 | 43 | 26 | 16 | 0 |
| Résine | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |

2.2 Préparation des éprouvettes

Le béton polymère avec différentes formulations est préparé en mélangeant, premièrement les grains de sable commercialisé avec la poudre de marbre puis la résine polyester préalablement mélangé, avec un durcisseur et un accélérateur avec un taux de 1% pour chacun, est introduite progressivement dans le mélange d'agrégats tout en remuant avec une spatule métallique, On obtient à la fin une mixture du béton résineux prête à être moulée dans des moules prismatiques, de dimensions (25 x 25 x 300 mm) selon la norme ASTM C580.02. Une cire servant d'isolant a été utilisée sur les parois des moules afin de faciliter le démoulage qui s'effectue après 24h. Les échantillons sont séchés à température ambiante et ils ne seront testés qu'après 7 jours au moins afin de permettre une polymérisation totale de la résine.

Les essais de flexion 3-points statique sont réalisés sur une machine d'essai universel de type ZWICK ROELL Z005 à une vitesse d'essai de 2 mm/min. Cette machine est équipée d'une cellule de charge de 5 kN et d'un système d'entraînement de la traverse à l'aide d'un moteur électrique. Le guidage du déplacement de la traverse est sans jeu. Cette machine est pilotée par un logiciel Testexpert V10.11 qui permet d'enregistrer les résultats sur un procès-verbal d'essais, le calcul de la contrainte de flexion est effectué par la formule $\sigma = (3PL)/2bh^2$ où P représente l'effort de rupture, L la distance entre appuis, b et h les dimensions de l'éprouvette. Pour chaque formulation un ensemble de sept éprouvettes a été testé.

3 Résultats et discussions

La figure 1 représente la courbe type de l'évolution de la contrainte en fonction du déplacement, cette évolution se déroule en trois phases : la première phase quasi linéaire suivie d'une deuxième phase linéaire avec une pente plus importante. Ces deux premières phases se caractérisent par une

augmentation quasi-linéaire ou linéaire de la contrainte en fonction du déplacement. Quand à la troisième phase très courte, ou la contrainte chute d'une manière brutale caractérisant ainsi la rupture de l'éprouvette.

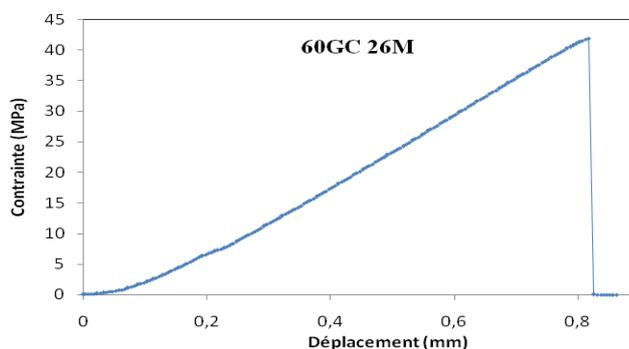


Fig. 1. Courbe type contrainte-déplacement des éprouvettes sollicitées en flexion.

La figure 2 représente l'ensemble des courbes contrainte-déplacement des essais effectués sur les éprouvettes de formulation 60GC/26M. Malgré que les éprouvettes testées soient de la même mixture, on remarque une dispersion entre les résultats, ceci peut être dû à la préparation des éprouvettes (fabrication manuelle) provoquant une distribution non uniforme des agrégats, hétérogénéité du matériau ainsi que la porosité des échantillons, et des dispersions dans les dimensions, pour cela une analyse statistique a été jugée nécessaire.

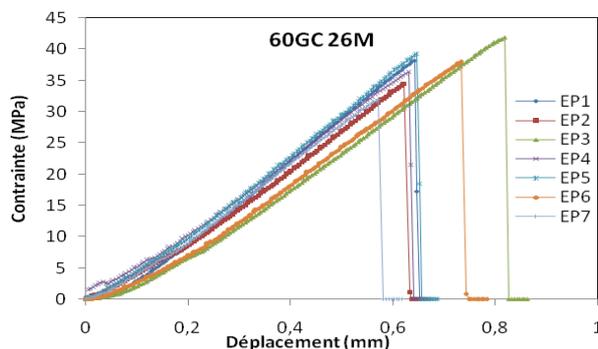


Fig. 2. Courbes contrainte-déplacement des éprouvettes de formulation 60GC 26M.

3.1 Analyse statistique

Dans cette étude la méthode de variance ANOVA et celle de Weibull à deux et à trois paramètres ont été choisies pour l'analyse statistique des résultats expérimentaux obtenus.

Les résultats de l'analyse effectuée sur Minitab montrent clairement que le taux des granulats et celui de la poudre de marbre présentent un effet significatif sur le comportement mécanique notamment la contrainte à la rupture et le déplacement.

L'analyse à sens unique de la variance (ANOVA) [15] présentée dans les figures 3 et 4 des différentes formulations a montré un meilleur comportement de la formulation 60GC/26M vis à vis de la résistance et du déplacement. De plus, une homogénéité de trois sous groupes générés par les comparaisons des moyennes des différentes formulations a été constatée (tableaux 2 et 3).

Etant donné que la valeur P du test F est inférieure à 0,05 pour la contrainte à la rupture et $F = 40,02$ supérieure à $F_{cr} = 3,23$, donc il existe statistiquement une différence significative pour la

caractéristique mécanique moyenne d'une formulation à une autre à un intervalle de confiance de 95 %. (l'hypothèse H0 est rejetée).

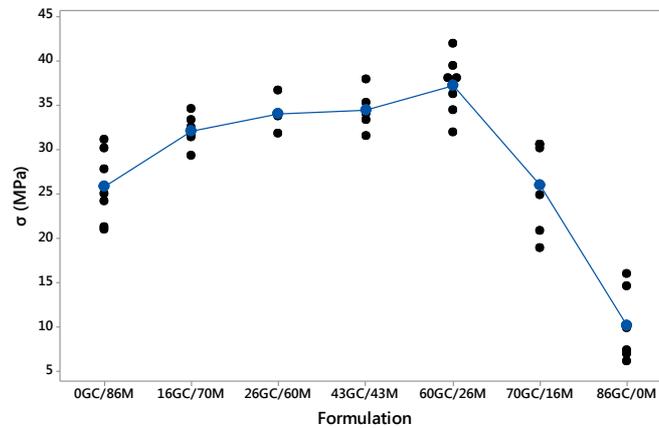


Fig. 3. Courbe des valeurs individuelles de la contrainte à rupture en fonction des formulations.

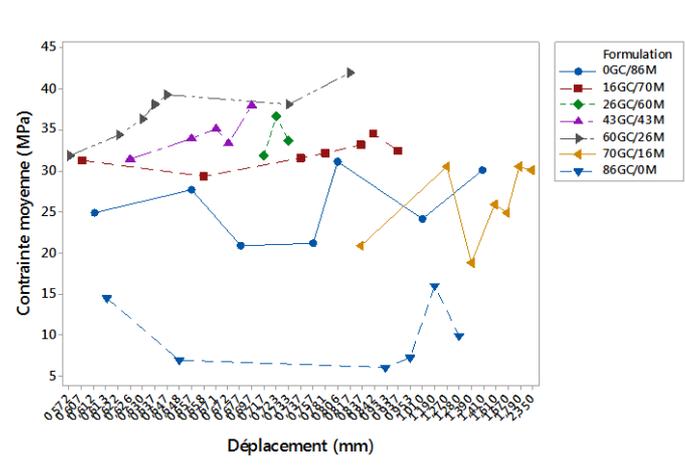


Fig. 4. Courbes d'interaction de la contrainte à rupture en fonction du déplacement des différentes formulations.

Tableau 2: Information sur les groupes utilisant la méthode de Tukey avec un intervalle de confiance de 95%.

| Formulation | N | σ _{moy} (MPa) | Sous groupes | | |
|-------------|---|------------------------|--------------|---|---|
| | | | A | B | C |
| 60GC/26M | 7 | 37,2 | 37,2 | | |
| 43GC/43M | 5 | 34,4 | 34,4 | | |
| 26GC/60M | 3 | 34,1 | 34,1 | | |
| 16GC/70M | 7 | 32,1 | 32,1 | | |
| 70GC/16M | 7 | 26,0 | 26,0 | | |
| 0GC/86M | 7 | 25,8 | 25,8 | | |
| 86GC/0M | 6 | 10,1 | 10,1 | | |

Tableau 3: Analyse de la variance des différentes formulations.

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|-------------|----|--------|--------|-------|-----|
| Formulation | 6 | 3012,7 | 502,12 | 40,02 | 0,0 |
| Erreur | 35 | 439,1 | 12,55 | | |
| Total | 41 | 3451,8 | | | |

DF : degré de liberté ;
 SS: somme des carrées ;
 MS : moyenne des carrées ;
 F : F-test de ANOVA.

Le diagramme des valeurs résiduelles de la figure 5 destiné à repérer la non-normalité a montré une ligne à peu près droite qui signifie qu'elles sont réparties normalement (Fig. 5a). Les valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées permettant de repérer la variance non constante, les termes d'ordre supérieur manquants et les valeurs aberrantes, sont réparties de manière aléatoire autour de zéro (Fig. 5b et d).

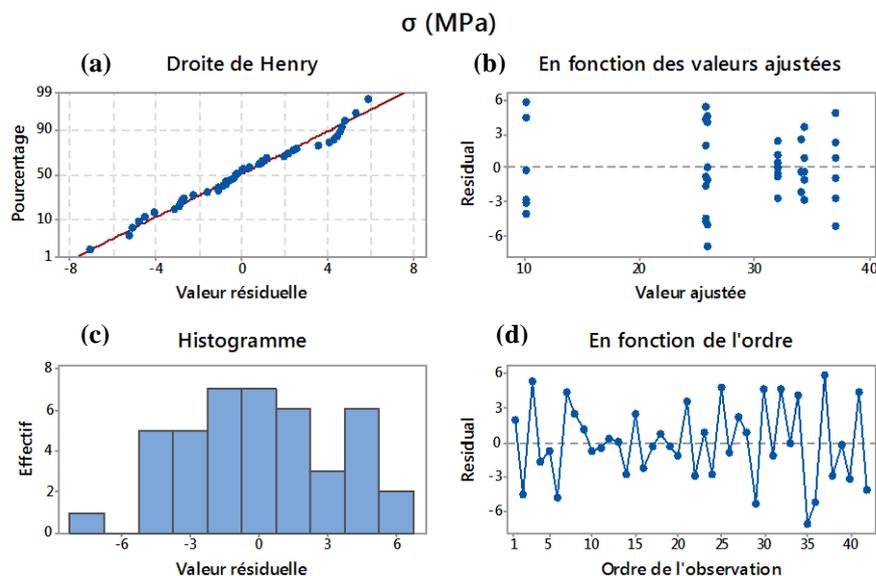


Fig. 5. Diagramme des valeurs résiduelles de la contrainte σ (MPa).

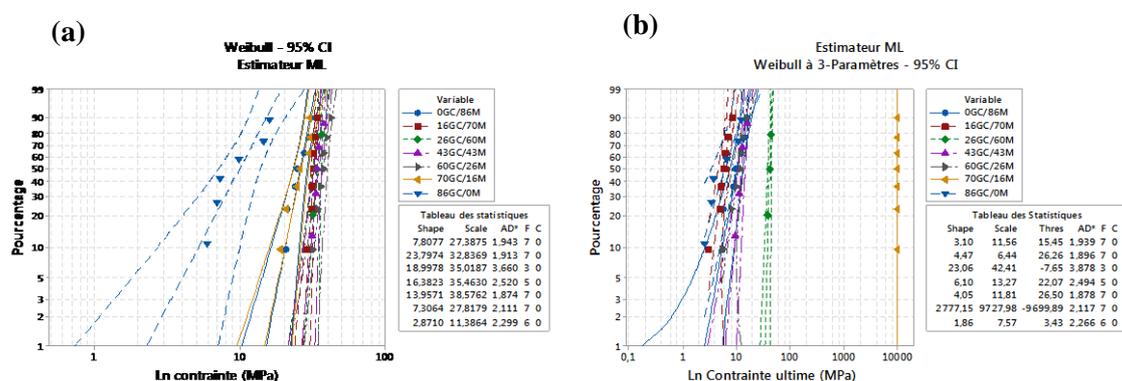
3.3 Analyse statistique par la distribution de Weibull

Le comportement mécanique du béton polymère a été aussi analysé statistiquement en utilisant la distribution de Weibull à 2 et à 3 paramètres. L'analyse des résultats obtenus, récapitulés dans le tableau 4, permet de confirmer que la distribution de Weibull à 2 paramètres donne une bonne estimation des propriétés mécaniques (contrainte σ_0 et déplacement D_0) que celle à 3 paramètres, comparées à celles obtenues expérimentalement. A titre d'exemple, les meilleures propriétés mécaniques sont obtenues pour la formulation 60GC/26M, où la contrainte et le déplacement estimés par Weibull à 2 paramètres sont respectivement 38,6 MPa et 0,701 mm, à 3 paramètres elle donne : 11,8 MPa et 0,188 mm, ces dernières sont très loin des valeurs moyennes obtenues expérimentalement qui sont respectivement 37,2 MPa et 0,665 mm. De même les modules de Weibull pour la distribution à 2-paramètres de la contrainte et du déplacement sont respectivement $m_\sigma = 14$ et $m_D = 8,5$, ces derniers sont supérieurs à ceux obtenus par Weibull à 3-paramètres $m_\sigma = 4,05$ et $m_D = 2,33$. Lorsque le module de Weibull est élevé, la répartition des défauts est relativement homogène, et on observera donc une faible dispersion des contraintes et des déplacements à la rupture dans le même volume.

La figure 6 représente l'interaction de la contrainte avec les différentes formulations. Des singularités sont observées pour trois formulations ; une pour la distribution de Weibull à 2-paramètres, il s'agit de la formulation 86GC/0M qui présente la plus faible valeur du paramètre de Weibull $m_\sigma = 2$ (Fig. 6a), vu qu'elle a donné la plus faible contrainte (11 MPa) alors que celle à trois paramètres (Fig. 6b), les deux formulations sont 26GC/60M et 70GC/16M présentant des valeurs négatives pour le 3^{ème} paramètre de Weibull respectivement $s_\sigma = -7,65$ et $s_\sigma = -9700$.

Tableau 4: valeurs des paramètres des distributions de Weibull à 2 et 3 paramètres en fonction des formulations.

| Formulation | Résultats expérimentaux | | Distribution de Weibull 2- paramètres | | | | Distribution de Weibull 3- paramètres | | | | | |
|----------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------|------------|-------|---------------------------------------|---------------------|------------|-------|------------|--------|
| | σ_{moy} (MPa) | Dep _{moy} (mm) | σ_0 (MPa) | D ₀ (mm) | m_σ | m_D | σ_0 (MPa) | D ₀ (mm) | m_σ | m_D | s_σ | s_D |
| 0GC 86M | 25,7 ±4 | 0,899 ± 0,325 | 27,4 | 0,943 | 7,8 | 3,3 | 11,7 | 0,320 | 3,10 | 1,20 | 15,4 | 0,550 |
| 16GC70M | 32,1 ±2,4 | 0,771 ± 0,114 | 32,8 | 0,817 | 23,8 | 8,37 | 6,4 | 0,292 | 4,47 | 2,70 | 26,3 | 0,513 |
| 26GC60M | 34,4 ±2,4 | 0,724 ± 0,008 | 35 | 0,727 | 19,0 | 117,6 | 42,4 | 0,121 | 23,06 | 19,31 | -7,65 | 0,605 |
| 43GC43M | 34,4 ±2,4 | 0,665 ± 0,026 | 35,5 | 0,675 | 16,4 | 33,7 | 13,3 | 512 | 6,10 | 25758 | 22,10 | -511,4 |
| 60GC26M | 37,2 ±3,3 | 0,665 ± 0,082 | 38,6 | 0,701 | 14,0 | 8,5 | 11,8 | 0,188 | 4,05 | 2,33 | 26,5 | 0,500 |
| 70GC16M | 26 ±4,8 | 1,43 ± 0,346 | 27,8 | 1,722 | 7,3 | 3,9 | 9728 | 1,163 | 2777 | 2,55 | -9700 | 0,527 |
| 86GC 0M | 13,5 ±3,2 | 1,028 ± 0,362 | 11,4 | 1,031 | 2,9 | 4,3 | 7,6 | 1,191 | 1,86 | 5,10 | 3,43 | -0,157 |

**Fig. 6.** Courbes de Probabilité de l'influence des différentes formulations sur la contrainte.

4. Conclusion

L'étude expérimentale sous chargement statique du béton polymère permet de dégager les conclusions suivantes :

- Les essais de flexion 3-points sur les éprouvettes en béton polymère montrent que le comportement contrainte/déplacement est quasi-linéaire ou linéaire jusqu'à la rupture;
- L'analyse de la variance à sens unique ANOVA, montre que la valeur P du test F est inférieure à 0,05, donc il existe une différence statistiquement significative pour chaque caractéristique mécanique et que le facteur taux de poudre marbre et granulats influe sur la résistance de flexion, et laisse apparaître un meilleur comportement pour la formulation 60GC/26M;
- L'utilisation des lois de distribution de Weibull à 2-paramètres et à 3-paramètres indique clairement que celle à 2-paramètres décrit mieux les résultats expérimentaux.

Références

- [1] Y. Ohama, Concrete-polymer composites-the past, present and future, 13 th ICPIIC, Portugal, 2010, pp. 1-14.
- [2] A. Blaga, JJ. Beaudoin, Polymer modified concrete, Canadian building digest, CBD-241. Institute for Research in Construction, 1985.
- [3] H. Abdel Fattah, M. El- Hawary, Flexural behavior of polymer concrete, Construction and building Materials 13 (1999) 253-262.
- [4] M. Haidar, E.Ghorbel, H.Toutanji, Optimization of the formulation of micropolymer concretes, Constr Build Mater 25 (2011)1632-1644.
- [5] J.P. Gorninski, D.C. Dal Olin, C.S. Kazmierczak, Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004) 2091-2095.
- [6] R.D. Maksimov, L.Jirgens, J. Jansons. and E. Plume, Mechanical properties of polyester-polymer concrete, Mechanics of Composite Materials 35 (1999) 99-103.
- [7] L. Agavrioloaie, S. Oprea, M. Barbuta, Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix, Construction and Building Materials 37 (2012) 190-196.
- [8] M. Muthukumar, D. Mohan, Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion, European polymer journal 40 (2004) 2167-2177.
- [9] C. Vipulanandan, E. paul, Characterization of polyester polymer and polymer concrete, Journal of materials in Civil Engineering 5 (1993) 62-82.
- [10] O. Elalaoui, E. Ghorbel V. Mignot, M. Ben Ouezdou, Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250°C, Constr Build Mater 27 (2012) 415-425.
- [11] M. Heidari-Rarani, M.R.M. Aliha, Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings an experimental study, Journal of construction and building materials 4 (2014) 308-315.
- [12] M. Galip Icduygu, L. Aktas, Characterization of Composite Tiles Fabricated From Poly(ethylene terephthalate) and Micromarble Particles Reinforced by Glass Fiber Mats, Journal of Polymer Composites (2012).
- [13] A. Abdel-Azim, L.A. Attia, Making polymer concrete and polymer mortar using synthesized unsaturated polyester resins from poly (ethylen terephthalite) waste, Polymers from Advanced Technologies 6 (1995) 688-692.
- [14] M.E. Tawfik, S.B Eskander, Polymer concrete from marble wastes and recycled poly (ethylen terephthalate), Journal of Elastomers and Plastics 38 (2006) 65-79.
- [15] DC. Montgomery, Design and Analysis of Experiments. NY, John Wiley & Sons, Inc., 2001.