

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Maintenance Industrielle

Présenté par : SAAIDIA Ali

=====

Comportement en flexion statique
des composites (granulat/résine)

=====

Sous la Direction de :

Pr. BEAZI Abderrezak

Co-encadreur : M^{me} . BENZANNACHE. N

Année universitaire 2014/2015

Remerciements

Je remercie dieu qui m'a donné la foi en moi et m'a donné toute la force pour y arriver.

Je tiens à remercier tous les gens qui m'ont aidée afin d'arriver à ce niveau et m'ont encouragé, conseillé, soutenu de près ou de loin.

Je remercie mon encadreur : Pr. BEZAZI Abderrezak

Et mon co-encadreur : Mme. BENZANNACHE. N

Je remercie infiniment tous mes amis qui m'ont aidé au cours de la réalisation de ce travail.

Je remercie mes parents qui m'ont enseigné l'amour de travail pour leurs sacrifices, leurs affections et soutien moral. Qui ont sacrifiés éternellement une grande partie de leurs vies pour réussir la notre.

Et tous les professeurs à qui j'ai assisté mes cours ou ceux que je n'ai pas eu le plaisir d'être face à leur tableaux je les remercie du fond du cœur et que Allah les récompense pour leur noble travail.

Mes meilleurs remerciements sont aussi à notre chef de département et tout le staff administratif.

Merci Allah premièrement et finalement.

SAADIA ALI



Dédicace

Je dédie le fruit de mes années d'études à :

Mon père pour son soutien et ses encouragements

Ma douce mère pour son affection

Ma sœur

Ma tante et son mari et leurs enfants

A ma famille

A la mémoire de mon très cher frère

« Aouamri Sofiane »

**A mes très chers amis, pour leur soutien et leurs
sacrifices**

**A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin
pour la réalisation de ce travail.**

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale

Chapitre I : Etude bibliographique

I. 1. Développement classification des bétons polymère (résineux).....	12
I. 2. Classification des bétons polymère	13
I. 3. Domaines d'applications des bétons polymères.....	13

Article 1

I. 1.1 Résumé.....	19
I. 1.2 Objectif visé par cet article.....	19
I. 1.3 Matériel et méthode.....	19
I. 1.4 Résultats et discussions.....	21
I. 1.5 Synthèse et conclusion.....	23

Article 2

I. 2.1 Résumé.....	24
I. 2.2 Objectif visé par cet article.....	24

I. 2.3 Programme expérimental.....	24
I. 2.3.1 Matériaux.....	24
I. 2.3.1.1 Résine.....	24
I. 2.3.1.2 Cendres volantes.....	25
I. 2.3.1.3 Agrégats.....	25
I. 2.3.2 Méthodes.....	25
I. 2.3.2.1 Composition du BP.....	25
I. 2.4 Résultats et discussion.....	26
I. 2.4.1 Contrainte de compression.....	26
I. 2.4.2 Module d'élasticité.....	27
I. 2.5 Conclusion.....	28
Article 3	
I. 3.1 Résumé.....	29
I. 3.2 L'objectif de l'étude.....	29
I. 3.3 Matériaux et techniques expérimentales.....	29
I. 3.3.1 Matériaux.....	29
I. 3.3.2 Préparation du béton polymère.....	29
I. 3.3.3 Techniques expérimentales.....	30
I. 3.3.3.1 Essais mécaniques.....	30

I. 3.3.3.2 Essais thermo-physique.....	30
I. 3.4 Résultats.....	31
I. 3.4.1 Essais mécaniques.....	31
I. 3.4.2 Essais thermo-physique.....	31
I. 3.5 Conclusion.....	32
Article 4	
I. 4.1 Résumé.....	33
I. 4.2 Objectif visé par cet article.....	33
I. 4.3 Techniques et méthodologie adopté dans cet article.....	34
I. 4.4 Résultats et discussion.....	34
I. 4.4.1 Essais de compression monotones à différentes vitesse de déformation.....	34
I. 4.4.2 Les essais de fatigue à différentes fréquences.....	36
I. 4.5 Conclusion.....	37
Article 5	
I. 5.1 Résumé.....	38
I. 5.2 Objectif visé par cet article.....	38
I. 5.3 Techniques et méthodologie adopté dans cet article.....	39
I. 5.4 Résultats et discussion.....	40

I. 5.5	
Conclusion.....	
42	

Conclusion	
.....	43

Chapitre II : Technique expérimentale

II.	
Introduction.....	
45	
II.2. Techniques	
expérimentales.....	46
II.2.1. Essais de caractérisation	
mécanique.....	46
II.2.1.1. Essai de flexion 3-	
points.....	46
II.2.1.2. Machine	
d'essais.....	47
II.3. Matériaux utilisés dans les	
formulations.....	48
II.3.1. Caractérisation des charges	
minérales.....	48
II.3.1.1. Propriétés	
physiques.....	48
II.3.1.2	
Détermination	
de	
la	
masse	
volumique.....	48
II.3.1.3 Analyse granulométrique du sable de carrière et de la poudre de	
marbre.....	49
II.4. Mode de fabrication du béton résineux à base de résine	
polyester.....	50
II. 5.	
Conclusion.....	
54	

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1.			
Introduction.....			
56			
III.2. Optimisation vis-à-vis les résistances mécaniques du béton résineux (BR).....	56		
III.3. Résultats et discussions.....		57	
III.4. Analyse statistique à l'aide de l'ANOVA.....		64	
III.4.1			
	Théorie		de
l'ANOVA.....		64	
III.4.2. Présentation et discussion de l'analyse.....		66	
III.5.			
Conclusion.....			
71			

Conclusion générale
Référence bibliographique

Introduction générale

Les matériaux granulaires à base polymère sont l'objet d'un intérêt croissant et de recherches du fait de leur large gamme d'applications possibles notamment dans la construction civile. Cette classe de matériaux est constituée d'un liant de polymère, parfois thermoplastique mais généralement thermodurcissable, et d'une charge minérale comme le gravier ou la pierre concassée et du sable. Les résines les plus généralement utilisées sont les polyesters et les époxydes. En comparaison au béton de ciment Portland, le béton polymère possède une plus grande résistance mécanique, résiste mieux aux produits chimiques et aux agents corrosifs, absorbe moins d'eau et présente une plus grande stabilité aux cycles gel-dégel. Les applications initiales du béton polymère, vers la fin des années 50, concernaient la production de revêtement de bâtiment, la confection de mortier pour sols industriels résistant aux agressions physiques ou chimiques, de revêtement antidérapant pour routes, d'enduit pour murs extérieurs (panneaux de granulats apparents, etc.) et de matériau de réparation pour des surfaces endommagées. Le béton polymère armé de fibres de verre, de carbone ou de bore sert à la fabrication de panneaux translucides. Ces matériaux sont hétérogènes à l'échelle des constituants et la description de leurs propriétés mécaniques dépend de l'échelle d'observation (microscopique, mésoscopique ou macroscopique).

De nombreux chercheurs s'intéressent à l'étude des matériaux hétérogènes notamment en génie civil. Cette hétérogénéité conditionne totalement le comportement de la structure. Ainsi, il est intéressant d'estimer les propriétés mécaniques du matériau en fonction des propriétés de leurs constituants et de leur répartition. L'emploi de ces matériaux dans différents secteurs nécessite aussi une connaissance plus approfondie de leurs mécanismes d'endommagement qui conditionnent leur durée de vie au cours du chargement. Cette connaissance nécessite d'effectuer des essais élémentaires en laboratoire et de développer des modèles numériques pour simuler la progression de l'endommagement au cours du chargement.

De nombreux travaux ont été effectués pour étudier le comportement et l'endommagement des matériaux granulaires à base de ciment portland sous sollicitations statiques et cycliques, contrairement aux matériaux granulaires à base polymère pour lesquels les recherches sont plus limitées. L'un des enjeux actuels est de pouvoir connaître les

différents mécanismes d'endommagement et leur évolution dans le matériau au cours du chargement.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique de quelques travaux récents trouvés dans la littérature sur les bétons polymères et leur utilisation dans le domaine de la construction des superstructures de Génie Civil.

Le deuxième chapitre est exposé la méthode d'élaboration du béton résineux. De plus, dans ce chapitre est définit le protocole expérimentale et les conditions expérimentales d'exposition des formulations adoptées.

Le dernier chapitre consacré à l'analyse des résultats des travaux expérimentaux effectués pour la détermination des caractéristiques mécaniques du béton résineux en flexion statique.

Les bétons polymères

I. 1. Développement des bétons polymères :

Le béton polymère (BP) représente une nouvelle génération de matériaux qui en dépit d'une faible consommation en liant polymérique par unité de masse se caractérise par une grande densité, une bonne résistance aux agents chimiques, une bonne adhésion aux granulats, par des résistances mécaniques notamment à la traction plus élevées que les bétons hydrauliques et beaucoup d'autres avantages. En plus, la grande proportion de fillers utilisés dans ce type de béton réduit énormément le retrait (égal à celui des bétons cimentaires) alors que le module d'élasticité est largement haussé. Ceci permet l'utilisation de ces bétons dans la fabrication des éléments porteurs et structuraux et aussi dans l'industrie de la construction.

Les BP sont initialement utilisés comme des matériaux décoratifs et de revêtement et pour la fabrication des éléments structuraux stable chimiquement, En effet c'est vers la fin des années 50 que le BP trouvait sa première application dans la production du revêtement des bâtiments et du marbre synthétique. Ses excellentes propriétés étaient à l'origine du développement de son utilisation dans d'autres domaines d'application au point qu'ils sont utilisés dans l'industrie de la construction, dans la production d'énergie électrique, dans l'énergie atomique, le réaménagement des terrains.

Le BP est devenu le matériau de construction dominant dans les pays développés dans les années 1970, Les mortiers et bétons résineux se sont développés entre la fin des années 1950 et le début des années 1960 et deviennent les matériaux de construction majeurs en Japon et en Europe vers les années 1970 et aux Etats-Unis dans les années 1980. À présent, ils sont des matériaux de construction courants.

Quelques dizaines de types de monomères et d'oligomères sont utilisés autour du monde dans des combinaisons différentes avec des modificateurs pour donner naissance à plus de 30 variétés de béton polymère. Les plus utilisés sont ceux à base de polyester, d'époxyde, vinyle ester et des monomères de méthyle méthacrylate. Les résines phénol sont les moins utilisés.

Le béton polymère a l'avantage de résister à l'action des huiles et des liquides de refroidissement et ne nécessitent donc pas l'application d'une couche supplémentaire de peinture. Malgré le prix initialement élevé, les structures utilisant les bétons résineux peuvent économiser de 3,2 à 4 \$ par m^3 de béton [1].

I.2. Classification des bétons polymère :

Les bétons de résine sont classés généralement en trois catégories selon le processus technologique de fabrication [2]:

- Béton polymère « BP »
- Béton Additionné par des Polymères «BAP »
- Béton Imprégné par des Polymères «BIP »

La recherche des méthodes et moyens pour augmenter la résistance, la densité, la résistance aux agressions chimiques et la durabilité des bétons renforcés ou non a conduit à la formulation de différents groupes de béton avec des additifs ou à base de polymère désignés comme les BP.

L'utilisation des polymères dans les bétons se manifeste par :

- Le remplacement des granulats inorganique par d'autres organiques dans le but d'alléger les bétons et améliorer les caractéristiques liées à l'isolation thermique. Les propriétés des bétons utilisant des agrégats organiques ou inorganiques sont comparables.
- Le remplacement partiel ou complet du liant inorganique par un liant organique: le remplacement partiel de la matrice inorganique implique la présence d'une interaction entre la résine synthétique et le ciment donnant naissance à un nouveau matériau avec des caractéristiques un peu particulières.

I.3. Domaines d'applications des bétons polymères :

Le béton polymère a plusieurs domaines d'application dans le génie civil. Aujourd'hui, le BP est utilisé très efficacement comme un matériau de construction courant pour fabriquer un large éventail de produits [1].

I.3.1 Utilisation des BP dans les bâtiments :

Le BP est utilisé essentiellement dans la production du marbre artificiel (la figure 2) (à matrice polymérique) dont l'attrait de surface et non seulement les propriétés techniques du matériau est d'une importance cruciale. Sur cette base, des exigences un peu particulières sont prescrites pour les granulats, les monomères et les oligomères.

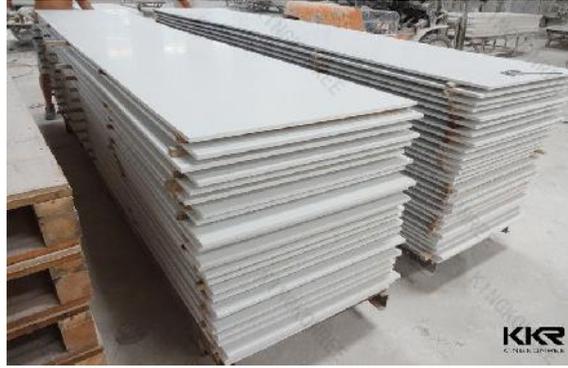


Fig. I.1: Feuilles de marbre en BP. [3]

A présent, l'industrie de façades s'est enrichie avec l'utilisation du BP comme matériau de revêtement influençant ainsi la conception des façades surtout avec les formes de ces dernières de plus en plus complexes de point de vue architecturale et les exigences économiques et techniques plus strictes. Certes le prix de matière première du BP est 8 fois plus cher que celui de béton hydraulique, mais une contre partie estimée 80% du prix initial est récupérable par la réduction des dimensions des éléments produits grâce aux résistances élevées du BP, la réduction des frais pendant les opérations de production (décoffrage rapide), stockage, manutention et transport. En plus de ces dépenses considérablement diminuées, le BR est une excellente alternative des roches naturelles pour la fabrication des éléments tels que les panneaux, appuis de fenêtres, marches d'escalier, table de travail, haut de table, équipements techniques sanitaires, etc. Le BP peut être considéré comme un matériau ami à l'environnement.

1.3.2 Utilisation des BP dans les travaux de drainage et hydrauliques :

L'utilisation du BP pour la fabrication des différents systèmes de drainage et le réseau de canalisation (Figure 2) est très répondeur comme résultat de la faible absorption d'eau et une résistance exceptionnelle au gel-dégel. Par conséquent, les éléments fabriqués en BP peuvent avoir jusqu'à 15 mm d'épaisseur (réduction de 1/3 du poids par rapport au béton cimentaire pour des produits similaires) et maintiennent leurs poids initiaux après 1600 cycle de gel-dégel tandis que celles produites en BHC perdent jusqu'à 25% après 750 cycles seulement comme le montre des essais réalisés in-situ.



Fig. I.2 : Canal de drainage en BP. [4]

I. 3.3 Utilisation des BP dans l'agriculture et l'horticulture :

Dans beaucoup de pays, le BP est employé pour réaliser des réservoirs d'aliments pour les porcheries et les fermes de bétails. Les raisons de cette utilisation sont la résistance mécanique, le faible poids et la résistance contre l'action des ammoniacales et des détergents industriels utilisés pour éliminer les bactéries pathogènes afin d'empêcher la contamination des aliments. Comparés avec les réservoirs céramiques, ceux à base de BP sont moins chers et présentent moins de dégâts pendant le service. En horticulture, le BP est utilisé pour fabriquer des petites formes et des bacs pour les plants. Ces conteneurs sont à déplacer selon les conditions météorologiques et c'est ici que réside l'avantage de profiter de BP plus léger et robuste.

I.3.4 Utilisation des BP pour le revêtement des chaussés et planchers :

Les planchers dans les établissements industriels sont constamment exposés à des actions mécaniques permanentes exercées par les engins de transport, les vibrations, les impacts, l'abrasion, l'action des agents chimiques (acides, alcalins, graisse, huile et sels) affectant ainsi la qualité de surface ce qui peut engendrer l'endommagement des surfaces non protégées mettant ainsi la santé des travailleurs en danger et influant négativement sur l'état des machines .

Dans les régions à grande variation de température, l'eau pénétrante dans le béton gèle et gonfle ce qui engendrent des contraintes menant à la fracture du béton. De même pour les chaussés, le mouvement intensifs des véhicules lourdes essentiellement réduit énormément le freinage à temps et cause l'usure de la surface du béton et par la suite l'augmentation des

accidents routiers. Les investigations basées sur des essais en laboratoires et in-situ pour une période de 10 ans ont démontré l'efficacité de cette technique si la résine est bien choisie.

Un exemple très connu témoignant du succès quant à l'utilisation du BP pour la protection des surfaces des chaussées est la réparation du pont de Brooklyn à New York. Le revêtement peut supporter la totalité de la charge du trafic après 4 heures de son étalement et la circulation sur le pont n'est pas complètement interrompue puisque le travail est fait voie par voie.



Fig. I.3 : Un revêtement protecteur époxydique polymère, polyuréthane ou acrylique. [5]

1.3.5 Utilisation des BP dans l'industrie :

Le BP est fortement recommandé dans la construction des usines chimiques et dans la fabrication des équipements miniers (électrolytiques, réservoirs, puits, etc.). Des étais et des traverses de liaison en BP sont fabriqués et utilisés pour la première en ex-URSS vers 1959. Près de 10 km de chantier minier sont supportés par ces étais creux (pour alléger la structure) dans les mines du bassin de Donetsk.

L'introduction des éléments porteurs en BP renforcés supportant les bains électrolytiques a aidé à dépasser les matériaux réfractaires garnis jugés chers et défectueux, à réduire les frais de construction, à améliorer la protection contre l'électro corrosion, à réduire la main d'œuvre en production par 3, à augmenter la durée de vie en service 5 fois et à réaliser une économie annuelle importante.

Des isolateurs en porcelaine montrent des défaillances à 235 KV alors que ceux des BP résistent jusqu'à 250 KV (le coût estimatif d'un isolateur en BP est moins que la moitié du coût de celui en porcelaine). Des super-isolateurs, des supports et des regards de visite ont été confectionnés aux USA, ex-URSS, et Japon en utilisant le BP. Une application du BP dans le secteur industriel est la fabrication des bases pour des tours, des rectifieuses, des fraiseuses et

des perceuses (Emag-Index, Elb-Shlif, SKFKalle, Burkhat-Weber) grâce à la qualité anti-vibrations meilleure de 6 à 10 fois que celle du fer, à la stabilité à l'eau et lubrifiants, à la technologie facile de sa production et à la faible conductivité thermique par rapport à l'acier.



Fig. I.4 : un bâti d'une machine de tournage en béton polymère. [6]

I.3.6 Utilisation des BP dans le site d'enfouissement des déchets toxiques et radioactifs :

Un important problème se pose à l'industrie nucléaire exponentiellement croissante est le rejet sûr des déchets des produit de fission. L'approche techniquement et économiquement raisonnable adoptée par la commission d'énergie atomique américaine (AEC) est l'immobilisation (ex. la technologie de confinement) des produits fissibles et de fission dans un matériau durable à long terme. Ces déchets radioactifs exigeant un stockage à longue durée se présentent sous forme de sels solubles, solution aqueuse (nitrates), oxydes, verres et équipements de production contaminés. Ils doivent être stockés pendant une période de 1000 ans avant qu'ils puissent être considérés comme biologiquement saints.

Le BP grâce à ces avantages rend l'utilisation d'un tel matériau favorable pour l'usage dans la gestion de déchets dangereux et les applications récentes ont montré des résultats prometteurs. En effet Quelques formulations ont montré une stabilité aux radiations de 10^{10} rads ce qui est équivalent à la totalité de la dose prévue pour 1000 ans d'exposition : le BP peut assurer longévité et résistance désirés.

I. 3.7 Utilisation des BP en géothermie :

La disponibilité des matériaux de construction durables et économiques pour manipuler la saumure et la vapeur chaude, à des températures atteignant 260°C, est un sérieux problème dans le développement de l'énergie géothermique. Les saumures produites en

géothermie sont généralement caractérisés par des teneurs en sel élevées, des faibles PH, de dioxyde de carbone et de l'hydrogène sulfuré dissous et des quantités de sulfate de calcium, de carbonate de calcium et de silice. Ces composés dissous dans l'eau à des températures élevées, rendent la saumure très corrosive à beaucoup de matériaux de construction ce qui affecte la durée de vie des usines géothermiques et la quantité d'énergie produite.

Des bénéfices importants sont enregistrés en remplaçant l'usage des conduites en acier inoxydable, tantale et des alliages Hastelloy par des conduites en BP. Comme conséquence de cette économie quant aux frais des usines, le prix du courant électrique fourni est réduit de 9,7%.

Article 1 : M. Muthukumar, D. Mohan *

Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion

Etude optimisée des composants des bétons polymères à base d'agrégats

[European Polymer Journal 40 (2004) 2167–2177]

I .1.1 Résumé :

M. Muthukumar et D. Mohan [7], ont cherché à optimiser les proportions des constituants d'un béton polymère (BP) avec moins de vides possible. Pour cela une série de différentes formulations en composition du BP a été élaborée et testée, le taux de résine et le temps de durcissement ont été discuté. En outre, la résistance à la compression obtenue a été optimisée et comparée avec les données expérimentales. Le coefficient de corrélation entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites a été jugée élevé prouvant la justesse du modèle considéré.

I .1.2 Objectif visé par cet article :

Dans cet article [7], en utilisant une série de résines furaniques, les bétons de polymères BP de différentes compositions ont été élaborés et testés en compression. En utilisant des techniques statistiques, les résultats expérimentaux ont été optimisés et la conception de mélange optimal a été recommandée. L'effet du taux de liant et du temps de durcissement sur la résistance à la compression du béton polymère a été étudié et rapporté.

I .1.3 Matériel et méthode :

Une série d'éprouvettes en BP à base de furanne et alcool furfurylique, le furfural et le formaldéhyde ont été synthétisés et codifiés comme 5 types de résine A, B, C, D et E comme indiqué dans le tableau 1. En utilisant ces résines furane comme une première variable et optimisé la proportion de mélange d'agrégats ayant une teneur minimale en vide comme deuxième variable et la poudre de silice (poudre de remplissage) comme troisième variable [8], 15 différentes combinaisons ont été conçues dans les tableaux 2 et 3. Sur cette base, des échantillons en BP ont été préparés et testés dans des conditions identiques. Trois types de granulats avec des diamètres 4,72 à 9,52 mm et 2,38 à 4,76 mm et 0,15 à 0,3 mm pour des pourcentages respectifs de 39,6% et 33,5% et 26,9% ont été utilisés.

Le BP de différentes compositions comme indiqué dans le tableau 3 a été préparé en mélangeant préalablement de la résine avec un catalyseur qui sera ensuite ajouté au mélange d'agrégats et de poudre de remplissage, l'ensemble sera agité dans un mélangeur mécanique à vitesse lente muni d'un agitateur à pales. Les échantillons coulés dans des moules normalisés ont été vibrés sur une table vibrante.

Les échantillons démoulés au bout de 24h ont été testés en compression à intervalles de temps de durcissement à savoir un jour, 3 jours et 7 jours. Les résultats obtenus ont été analysés statistiquement selon une loi de régression linéaire.

Tableau 1 : Les types de résines de furanne et leurs propriétés.

S.no	Variable	limite inférieure	limite supérieure
		%	%
1	Résine	7.5	15
2	Agrégat	70	87.5
3	Microcharges	5	15

Tableau 2 : Gamme des constituants du BP.

S.no	Description de résine	FA(mol)	F(mol)	FAL(mol)	Viscosité @ 25°C	Densité @ 25°C
1	A	1	-	-	220	1.208
2	B	1	0.25	-	253	1.213
3	C	1	0.50	-	246	1.215
4	D	1	0.75	-	287	1.219
5	E	1	-	0.5	216	1.205

Tableau 3: Combinaisons des composants du BP.

Combinaison Référence	Résine %	Agrégat%	Microfiller %
1	7.5	87.5	5
1a	7.5	87.5	5
2	7.5	77.5	15
2a	7.5	77.5	15
3	9.375	83.125	7.5
4	11.25	83.75	5
5	11.25	78.75	10
6	11.25	76.25	12.5
7	11.25	73.75	15
8	13.125	79.375	7.5
9	15	80	5
9a	15	80	5
10	15	75	10
11	15	70	15
11a	15	70	15

Suffixe «a» se réfère à répéter combinaisons pour tenir compte de «manque d'ajustement» des statistiques.

I.1.4 Résultats et discussion :

Les résultats montrent qu'il y a un gain de résistance en fonction du temps de durcissement, figures. 1-5.

Le gain de résistance du BP avec le type de résine A est plus lent que celui du type E, par contre les résines type B,C et D présentent un grand gain en résistance qui sera très rapide en 24h pour la résine C et atteindra le maximum en 3 jours, alors que pour la résine D le maximum est atteint après 24h, la résine E présente la même tendance que la résine A mais avec plus grande résistance.

Tous les types de résines excepté la résine de type A donnent de béton résineux avec une bonne résistance pour un pourcentage en résine de 7,5% et 15% de poudre de remplissage, alors que le pourcentage de résine A est de 11,25%.

Les résistances obtenues sont plus élevées que ceux obtenues en utilisant le furfural observent une tendance similaire avec l'époxy et le polyester.

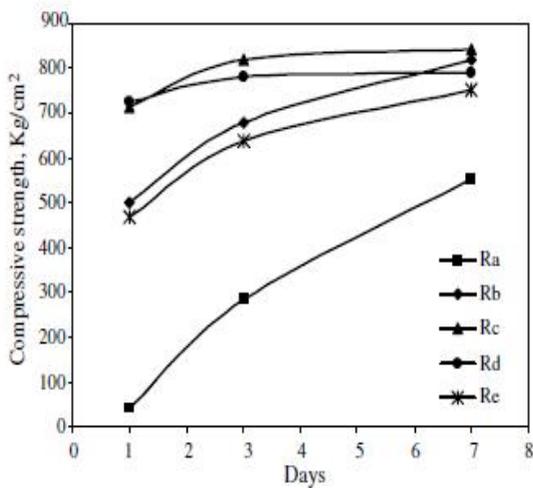


Fig.1: Effet de temps de séchage pour les systèmes contenant 9,375% de liant.

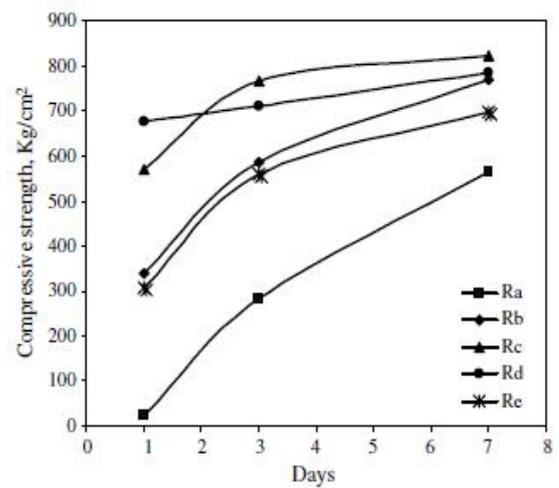


Fig.2: Effet du temps de séchage pour les systèmes contenant 7,5% de liant.

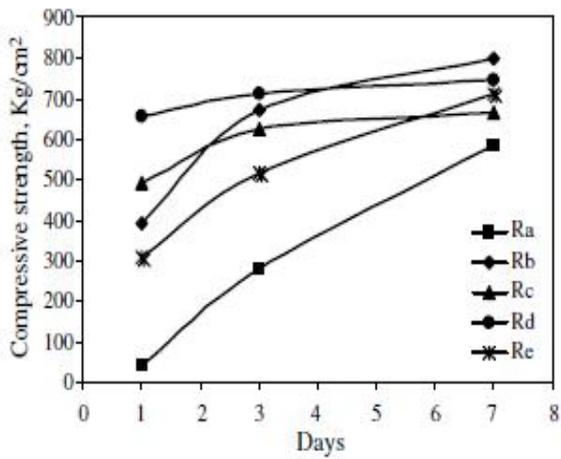


Fig. 3: Effet de temps de séchage pour les systèmes contenant 13,125% de liant.

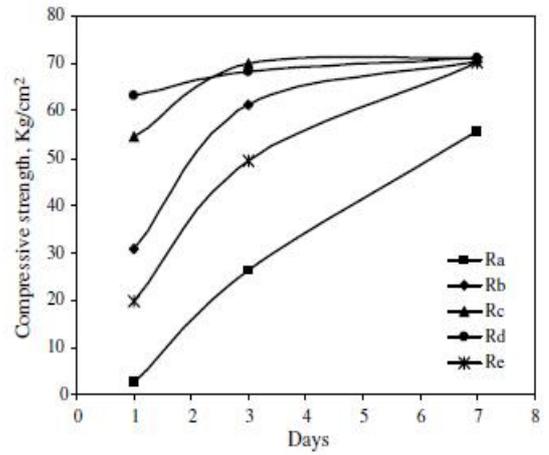


Fig.4: Effet du temps de durcissement les pour les systèmes contenant 11,25% de liant.

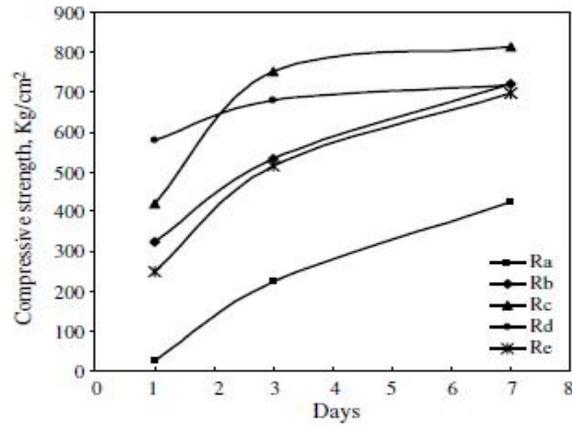


Fig. 5 : Effet de temps de séchage pour les systèmes contenant 15% de liant.

I .1.5 Synthèse et conclusion :

Les bétons polymères préparés avec les séries de résines furaniques et les différentes proportions d'agrégats et la poudre de remplissage présentent un minimum de vide. La résistance à la compression est plus élevée par rapport aux autres résine furanique, par contre elle est relativement comparable à celle d'époxy et venylestere. Le pourcentage d'agrégats et de poudre donnant le minimum de vide contribue à la diminution du pourcentage de résine sans autant altérer ses propriétés mécaniques, ce qui contribue à un gain économique. La faible viscosité du polymère de furanne et son excellente résistance chimique peuvent être exploités dans la conception d'articles préfabriqués avec une bonne résistance en compression et une bonne protection en corrosion dans les industries de transformation chimique manipulant les produits chimiques corrosifs.

Article 2 : Jane Proszek Gorninskia* , Denise C. dal Molinb, Claudio S. Kazmierczaka

Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete

Étude de l'influence des composants du béton polymère sur le module d'élasticité et l'évaluation comparative du béton polymère et du béton de ciment Portland

[Journal of Cement and Concrete Research 34 (2004) 2091–2095]

I. 2.1 Résumé :

Jane Proszek Gorninskia et al [9], ont fait une étude pour déterminer le module d'élasticité du béton polymère (BP) en utilisant deux types de liants: polyester orthophtalique et isophtalique. Les compositions utilisées ont été choisies selon une étude précédente qui a identifié les compositions économiques du BP. Basé sur ces données, les concentrations des polymères utilisés étaient 12% de polyester orthophtalique et 13% de polyester isophtalique du poids total. Des cendres volantes ont été employées comme élément de remplissage avec des taux en poids de 8%, 12%, 16% et 20%. Les résultats indiquent que toutes les compositions évaluées dans cette étude montrent des grandes valeurs du module d'élasticité. L'analyse statistique des données indique que le type de résine et la concentration des cendres volantes, ont un effet significatif sur le module d'élasticité.

I. 2.2 Objectif visé par cet article :

Dans cette étude [9], l'auteur a vérifié l'influence des composants du BP sur le module d'élasticité longitudinale en utilisant quatre compositions des cendres volantes comme remplissage et des concentrations fixes de 12% de polyester orthophtalique et de 13% du polyester isophtalique.

I. 2.3 Programme expérimental:

I. 2.3.1 Matériaux :

I. 2.3.1.1 Résines :

Des résines insaturées de polyester isophtalique et orthophtalique dissous en styrène ont été choisies comme liants. Ces résines présentent de bonnes propriétés mécaniques et un faible coût en comparaison aux résines époxydes, aussi bien que leur large disponibilité commerciale.

I. 2.3.1.2 Cendres volantes :

La compatibilité entre les cendres volantes et le sable améliore également l'ouvrabilité du mélange frais du BP et la résistance mécanique du matériau durci, ayant pour résultat des produits avec une excellente finition extérieure. Une étude récente [10] a prouvé que l'utilisation des cendres volantes améliore également la résistance chimique de compositions du BP en raison de leur faible dimension particulaire et de leur forme arrondie. Ceci réduit la taille moyenne des pores du BP et bloque la pénétration des agents agressifs. La masse spécifique des cendres volantes est 2.16 g/cm³ selon la norme brésilienne NBR6474.

I. 2.3.1.3 Agrégats :

Un sable de rivière avec grains de dimension moyenne et une distribution régulière et une masse spécifique 2.65 g/cm³ selon la norme brésilienne NBR 9776 a été employé.

I. 2.3.2 Méthodes :

Le test de résistance à la compression a été effectué selon la norme ASTM ASTM C 39 / C 39 M-01. Trois éprouvettes cylindriques mesurant 5x10cm ont été coulées pour chaque composition et les résultats représentent la moyenne des valeurs individuelles pour chaque test. Le test du module d'élasticité statique a été effectué en utilisant la norme ASTM C 469-94.

Les tests ont été effectués dans une presse Shimadzu UH-2000 KNA avec une échelle de 400 kN et un taux de chargement de 40 kN / min. Les résultats (déformation et charge) ont été enregistrés chaque seconde jusqu'à la rupture ainsi que le module d'élasticité.

Toutes les données ont subi une analyse statistique utilisant le logiciel statistique de SPSS avec la méthode de Tukey HSD pour l'analyse de la variance (ANOVA),

I. 2.3.2.1 Composition du BP:

Les compositions optimisées du BP utilisées dans la présente étude sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1: Compositions de BP utilisés dans cette étude.

Composants de la matrice de polymère	Composition	% Masse
(a) Polyester		
Résine 1	isophtalique insaturé polyester 33411 (Reichhold)	12 ^a
Résine 2	orthophtalique insaturé polyester 10228 (Reichhold)	13 ^a
Catalyseur	Le naphthénate de cobalt à 3%	1.0 ^b
Initiateur	Cétone d'éthyle de méthyle peroxyde (CEMP)	1.0 ^b
(b) Granulats		
Sable	Le sable de rivière, la taille moyenne des particules	(70.4– 81.0) ^c pour 12% de résine (69.6– 80.0) ^c pour 13% de résine
Remplissage	Les cendres volantes	(8%, 12%, 16% et 20%) ^d (7.0– 17.6) ^c Pour 12% de résine (7.0– 17.4) ^c pour 13% de résine

a Les pourcentages en poids de cendres + sable. b Les pourcentages en poids de liant.

c Gamme (g) pour chaque 100 g du BP.

d Les pourcentages en poids de sable.

I. 2.4 Résultats et discussion:

Les résultats des essais obtenus pour les différentes formulations sont représentés et discutés dans cette partie. La figure 1 montre l'effet du type de résine et la concentration des cendres volantes sur la résistance de compression axiale.

I. 2.4.1 Contrainte de compression :

Les résultats sur la figure 1 montrent des valeurs de résistance en compression élevées. Ceci est en accord avec les résultats trouvés des travaux antérieurs. Bien entendu, ces valeurs dépendent de la composition de chaque formulation spécifique du BP. Abdel-azim et Atta [11] produit des échantillons de béton présentant des valeurs de résistance allant de 92 à 112 MPa en utilisant des résines de polyester de poids moléculaire élevé et des concentrations de 15% de polymère du poids de l'agrégat. Oshima et Koyanagi [12] ont trouvé des valeurs supérieures à 120 MPa en utilisant des concentrations de polyester jusqu'à 20% de résine, et de granulats fins et grossiers et de carbonate de calcium comme charge.

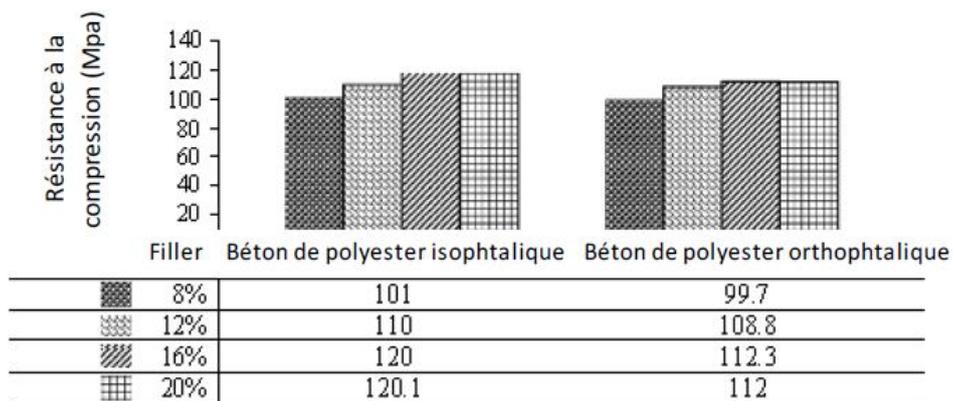


Fig. 1. Effet du type de résine et de cendres volante sur la force de compression axiale.

Les résultats montrent que la contrainte de compression croît avec l'augmentation de la concentration des cendres volantes, alors que la résine polyester isophtalique donne une meilleure résistance que celle orthophtalique.

En comparaison avec le béton Portland la résistance du BP est plus élevée.

I. 2.4.2 Module d'élasticité:

L'analyse statistique montre l'existence d'une influence significative de la concentration des cendres volantes et du type de résine ainsi que les interactions entre les deux sur le module d'élasticité (GPa). Des échantillons du BP préparés avec quatre concentrations différentes de cendres volantes et de deux types de liants et les polyesters (isophtaliques et orthophtaliques) testés ont donné les valeurs de E présentées sur le tableau 2. Les résultats montrent de grandes valeurs de E comparable à ceux trouvés pour le béton ordinaire.

Tableau 2 : Module d'élasticité du BP avec le polyester isophtalique ou orthophtalique et avec 8, 12, 16 et 20% de cendres volantes.

Essais Echantillons	Module d'élasticité (GPa)				
	Résine cendre (%)	Différentes valeurs			Moyenne
I-8		23.94	25.00	25.05	24.66
I-12		26.42	28.69	26.72	27.28
I-16		31.70	29.73	29.69	30.37
I-20		28.20	28.59	28.40	28.40
O-8		22.70	22.31	26.13	23.71
O-12		25.30	23.59	23.80	24.23
O-16		27.16	28.35	26.62	27.38
O-20		28.77	28.70	29.38	28.95

I. 2.5 Conclusion :

De cette étude on peut souligner les points suivants :

- La résistance à la compression axiale augmente avec l'augmentation de la concentration des cendres volantes. Cependant, toutes les compositions ont donné lieu à une haute résistance du BP.
- De grandes valeurs du module d'élasticité sont obtenues atteignant un maximum de 29 GPa. Ces valeurs sont proches de celles observées dans le béton de ciment Portland.
- En général Il y a une augmentation du module d'élasticité lorsque la concentration de cendres volantes augmente. Le BP à base de résine polyester Isophtalique atteint des valeurs de 25 à 28 GPa tandis que celui à base de polyester Orthophtalique, il atteint des valeurs de l'ordre de 24 à 29 GPa.
- Les analyses statistiques montrent l'existence d'une interaction significative entre les facteurs étudiés, à savoir, le type de résine et la concentration de cendres volantes.

Article 03 : Leon Agavriloaie, Stefan Oprea, Marinela Barbuta, Florentina Luca

Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix

Caractérisation de béton polymère à matrice époxy polyuréthane acrylique

[Journal of Construction and Building Materials 37 (2012) 190–196]

I. 3.1 Résumé :

Leon Agavriloaie et al [13], ont étudié un nouveau type de béton polymère (BP) obtenu en utilisant la résine époxy polyuréthane acrylique et des agrégats. Les propriétés mécaniques, telles que: résistance à la compression, à la flexion, module d'élasticité, contrainte de retrait et contrainte d'adhérence entre le béton de ciment et le béton de polymère ont été déterminés expérimentalement. Les propriétés thermo-physiques, tels que: la densité apparente à l'état naturel et sec, l'humidité relative et absolue de masse, la conductivité thermique, la dilatation thermique linéaire, la force de choc thermique, résistance chimique, la résistance au gel-dégel et la résistance d'adsorption d'eau ont été étudiés pour établir les propriétés de durabilité du béton polymère en époxy polyuréthane acrylique. Les résultats expérimentaux ont montré que le BP a une haute performance, béton léger avec des propriétés qui le recommandent comme un matériau de remplacement possible aux matériaux de construction classiques.

I. 3.2 L'objectif de l'étude :

L'objectif de cet article [13], est d'établir la performance d'un nouveau BP en utilisant une résine en époxy-polyuréthane acrylique, afin de prévoir son application en tant que matériau de construction.

I. 3.3 Matériaux et techniques expérimentales :

I. 3.3.1 Matériaux :

Les matériaux utilisés pour préparer le BP sont 30% en masse de la résine époxy polyuréthane acrylique préalablement mélangée avec un durcisseur et 70% en masse d'agrégats en granite de carrière avec deux types de dimension : 0-1 mm et 1-3 mm.

I. 3.3.2 Préparation du béton polymère :

Les échantillons sont préparés en deux étapes: d'abord, les deux types d'agrégats ont été mélangés, ensuite le mélange a été placé dans des moules remplis de résine. Une table de

vibration réalise le compactage des enrobés. Différents types d'échantillons ont été utilisés puis testés au bout de 21 jours selon les normes.

I. 3.3.3 Techniques expérimentales :

Deux types de tests ont été élaborés, mécanique et thermo-physique.

I 3.3.3.1 Essais mécaniques : Ces essais ont été effectués afin de déterminer la résistance à la compression et à la flexion [14] ainsi que le module d'élasticité longitudinale du BP époxy et polyester, La contrainte d'adhérence entre le béton portland et le B (Figure 1 a – d) et la contrainte d'adhérence entre le BP (époxy et polyester) et la barre d'acier.

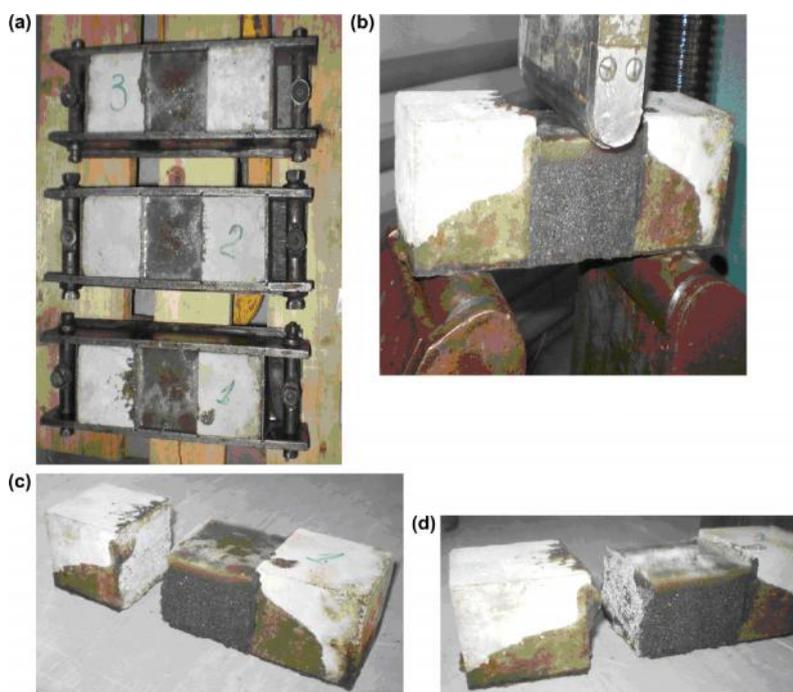


Fig. 1. Test Adhérence: (a) Les échantillons pour les tests d'adhérence; (b) Essai en flexion; (c) vue de gauche; et (d) Vue de droite.

I. 3.3.3.2 Essais thermo-physiques :

Ces essais ont été élaborés pour déterminer la densité apparente à l'état naturel et sec, l'humidité relative et absolue de masse, la conductivité thermique, la dilatation thermique linéaire, la force de choc thermique et au gel-dégel, l'adsorption de l'eau.

I. 3.4 Résultats :

I. 3.4.1 Essais mécaniques :

Le tableau 1 présente les valeurs expérimentales du BP (époxy polyuréthane [BPEP]) comparable avec celle obtenu du polyester [BPP].

Tableau 1 : Les propriétés mécaniques du BPEP et BPP.

Mix	la résistance à la compression $f_{c,cub}$ (N/mm ²)	la résistance à la flexion f_{cf} , (N/mm ²)	le module d'élasticité à la compression E_{bmed} (N/mm ²)	La contrainte d'adhérence entre le béton portland et le béton résineux (N/mm ²)	la contrainte d'adhérence entre le BP (époxy et polyester) et la barre d'acier. (N/mm ²)
BPEP	52.5	11.52	2434	2.89	4.7
BPP	67.1	10.54	3500	3.52	5.6

I.3.4.2 Essais thermo-physiques :

Le BP époxyque présente une bonne isolation thermique par rapport au béton à résine polyester ce qui concerne la résistance en compression, le béton à époxy présente une bonne endurance par rapport à celui du polyester après 50 cycles de gel-dégel, le tableau 2 présente les valeurs de comparaison.

Tableau 2 : Propriétés thermiques des BPEP et BPP.

Propriétés	UM	BPEP	BPP
Densité - état naturel, nat	Kg/m ³	1857	1936
Densité - état sec, sec	Kg/m ³	1834	1954
L'humidité de masse - relative, U rel	%	1.21	
L'humidité de masse - absolue, U abs	%	1.23	0.07
Conductivité thermique à 0°C, λ_0	W/Mk	0.425	0.49
Linéaire de dilatation thermique, α_m	°C ⁻¹	56.03x10 ⁻⁶	
La force de choc thermique, A_{bmed}	%	0.0108	
Adsorption d'eau, W_i	%	0.627	0.49
Perte de résistance à la compression après 50 cycles de gel-dégel	%	11.58	25

I. 3.5 Conclusion :

Le but de cette recherche s'est focalisé sur un nouveau matériau à base de béton résineux en époxy polyuréthane ayant la possibilité d'être utilisé comme matériau de construction.

Ce béton résineux a été caractérisé selon des essais mécaniques et thermo-physiques. Des résistances en compression, en flexion et le module d'élasticité ainsi que la contrainte d'adhérence pour le BP époxy et celui de polyester ont été comparées. Ils ont trouvé que le BP époxy avait une grande qualité avec des propriétés mécaniques comparables avec celle du BP polyester.

Les essais thermo-physiques laisse apparaitre pour l'époxy un composite de poids léger et une grande performance thermique et de durabilité vis-à-vis aux conditions thermique aux agressions chimique et aux cycles gel-dégel.

Ce type de BP (époxy) ayant des propriétés mécaniques et de durabilité élevées, peut être utilisé dans différents domaines de la construction, tels que: bâtiments industriels où la protection thermo-chimique est requis, ou comme matériau isolant ou d'imperméabilisation, pour la réalisation de planchers soumis à des chocs ou agents chimiques, pour la consolidation structurelle et pour la réalisation de structures élevées.

Article 4 : F.J.C. Del Vecchio, J.M.L. Reis, H.S. da Costa Mattos

Elasto-viscoplastic behaviour of polyester polymer mortars under monotonic and cyclic compression

Comportement élasto-viscoplastique du mortier polymère de polyester en compression monotonique et cyclique

[Journal of Polymer Testing 35 (2014) 62–72]

I. 4.1 Résumé :

F.J.C Del Vecchio et al [15], ont fait une étude sur le comportement plastique et la sensibilité de la vitesse de déformation des éprouvettes cylindriques en mortier polymère (MP) pour des essais de compression monotones et cycliques. Les résultats expérimentaux indiquent un comportement élasto-viscoplastique: la capacité de charge de l'échantillon augmente de façon significative avec la vitesse de déformation, tandis que les propriétés élastiques restent pratiquement constantes. Sous chargement et déchargement cyclique le matériau peut présenter une courbe d'hystérésis (un retard de phase), qui conduit à une accumulation progressive de la déformation. Dans ce cas, malgré la forte dispersion des résultats expérimentaux, le nombre de cycles jusqu'à l'endommagement tend à être plus petit pour les faibles fréquences de chargement. Un modèle capable de décrire un tel comportement élasto-viscoplastique non linéaire est également présenté.

I. 4.2 Objectif visé par cet article :

Le but de l'article [15], est proposer un modèle mathématique simplifié à une dimension, applicable aux problèmes de l'ingénierie afin de décrire le comportement mécanique complexe non linéaire (déformation, plastique, viscosité, écrouissage plastique) observé dans les essais de compression monotoniques et cycliques. En outre, la détermination expérimentale de paramètres qui apparaissent dans le modèle doit être aussi simple que possible. Les équations constitutives peuvent être obtenues à partir des arguments thermodynamiques et suivent une procédure utilisée avec succès pour modéliser des essais de traction en présence d'autres phénomènes non linéaires. Le modèle de comportement contribue également à expliquer la forte dispersion des résultats expérimentaux dans des essais de fatigue.

L'idée principale est d'utiliser ce modèle pour obtenir le maximum d'informations sur les propriétés mécaniques du MP polyester à partir d'un nombre réduit de tests en laboratoire.

I. 4.3 Techniques et méthodologie adoptées dans cet article :

Les différentes formulations du BP ont été préparées en mélangeant du sable de fonderie avec de la résine thermodurcissable comme liant. La résine polyester insaturée utilisée est POLYLITE® 10316 de REICHHOLD®, pré-accélééré avec 1,5% (en poids) de catalyseur.

Le sable de fonderie utilisé est du sable en quartz de granulométrie relativement uniforme, avec un diamètre moyen de 245 μm . La densité et le module de finesse du sable étaient respectivement 2,65 g / cm^3 et 2,5. La teneur en résine était de 12% en poids et 88% de granulats. Des études antérieures expérimentales [16] ont été utilisées pour optimiser les formulations du mortier employé dans le présent travail.

Le mélange est effectué mécaniquement pour obtenir un matériau plus homogène. Avec ces formulations de mélange, des échantillons de mortier polymère ont été coulés dans des moules cylindrique (50 \times 100 mm) selon RILEM TC113 / PC-2. Tous les échantillons sont durcis pendant 7 jours à température ambiante, puis précuits pendant 3 heures à 60° C avant d'être testés.

Tous les tests ont été effectués à la température ambiante avec une machine d'essai universelle modèle Shimadzu AG-X, d'une capacité de 10 KN. Dans tous les essais, une éprouvette cylindrique de longueur $L = 100$ mm a été soumise à une force de compression $F(t)$ provoquant un raccourcissement L .

I. 4.4 Résultats et discussion :

I. 4.4.1 Essais de compression monotone à différentes vitesses de déformation :

Le tableau 1 présente les résultats des essais de compression monotone pour toutes les vitesses de déformation. On peut observer que les propriétés ont été affectées par la vitesse de déformation, quand cette vitesse augmente le module d'élasticité E , la contrainte proportionnelle σ_p , et la contrainte maximale σ_{max} augmentent.

Tableau 1: Les résultats des tests de compression de toutes les vitesses de déformation testés.

Echantillon	E(GPa)	σ_p (MPa)	σ_{max} (MPa)
= $1.25 \times 10^{-3} \text{S}^{-1}$			
1	3.23	14.31	26.77
2	3.90	15.58	27.66
3	3.56	14.96	26.08
Moyenne	3.57	14.85	26.77
= $1.25 \times 10^{-2} \text{S}^{-1}$			
1	3.89	21.47	30.16
2	3.91	22.82	30.66
3	3.62	22.56	29.82
Moyenne	3.81	22.22	30.20
= $1.25 \times 10^{-1} \text{S}^{-1}$			
1	3.70	24.08	33.31
2	3.72	28.08	34.45
3	4.22	27.08	35.19
Moyenne	3.88	26.36	34.13

La figure 1 montre les courbes moyennes du BP pour chaque taux de déformation. On peut constater d'après la figure 1 que les mortiers de résine polyester sont extrêmement dépendantes du taux de déformation. Il est important d'observer que, pour des taux inférieurs à $\dot{\epsilon} = 1.25 \times 10^{-3} \text{S}^{-1}$, la variation de la courbe $\sigma = f(\epsilon)$ est négligeable. Ainsi, la courbe obtenue lors d'un essai de compression à l'aide de ce taux sera appelée la courbe limite. Le comportement initial est linéaire ou proportionnelle ($\sigma = E \epsilon$). Le module d'élasticité est presque insensible à la variation de la vitesse de déformation, et il est raisonnable de considérer que le comportement contrainte-déformation dans la phase proportionnelle est purement élastique ou réversibles; le comportement viscoélastique ou de dépendance de la vitesse de déformation peut être négligé dans la phase proportionnelle. Contrairement au module d'élasticité, les contraintes proportionnelle σ_p et maximale σ_{max} ont une importante dépendance du taux de déformation, σ_p est la contrainte à la limite élastique. Cependant, la détection de cette limite pose un problème expérimental car il dépend de la précision des mesures de contrainte.

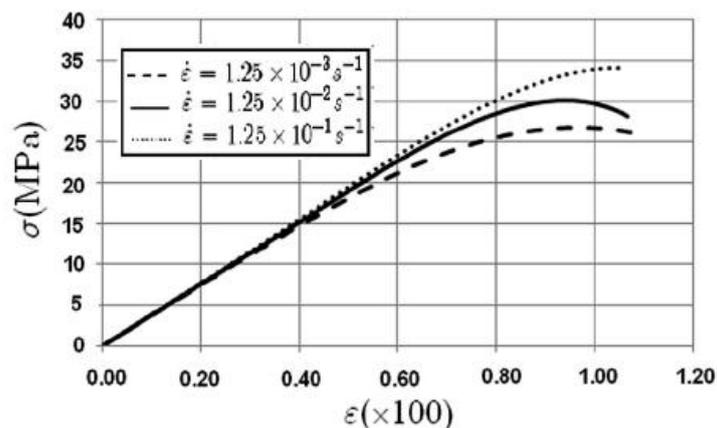


Fig.1 : Courbes contrainte-déformation moyenne pour tous les niveaux de taux de souche testée.

I. 4.4.2 Les essais de fatigue à différentes fréquences :

Les durées de vie (en nombre de cycles), déterminées à partir des essais de fatigue sont présentés dans le tableau 2. La figure 2 montre des courbes expérimentales obtenues pour deux fréquences (62.5×10^{-3} Hz et 6.25×10^{-3} Hz).

En fatigue cycliques, le taux de déformation est négligeable quand $< \sigma_p$. Par contre le phénomène de fatigue dépend de la fréquence quand $> \sigma_p$. Ainsi la durée de vie devient faible quand la fréquence est importante.

Tableau 2 : Durée de vie expérimentale.

Fréquence	essai	Durée (cycles)	Durée moy(cycles)
62.5×10^{-3}	1	9	57
	2	80	
	3	100	
	4	85	
	5	6	
	6	48	
	7	69	
6.25×10^{-3}	1	275	438
	2	101	
	3	797	
	4	144	
	5	423	
	6	378	
	7	945	

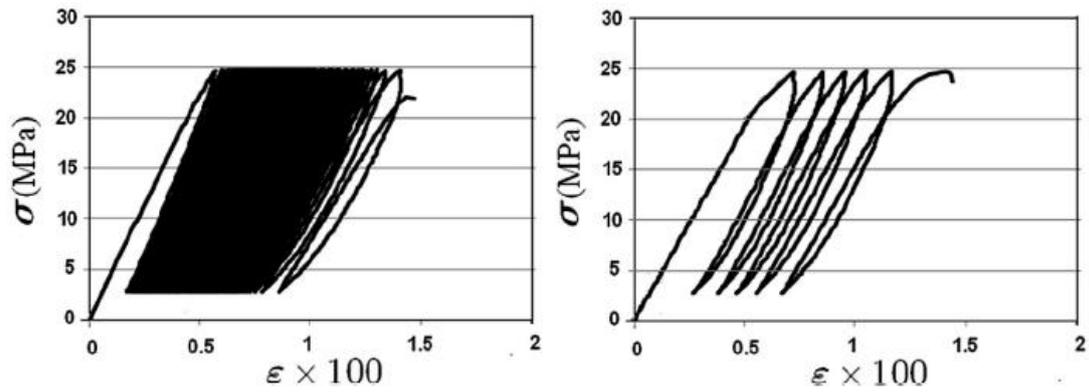


Fig. 2 : Type des courbes expérimentales à deux fréquences différentes.

I. 4.5 Conclusion :

Le comportement plastique en fonction de la sensibilité de la vitesse de déformation des éprouvettes cylindriques en mortier de résine a été étudié en compression mono tonique et fatigue cyclique.

Les résultats expérimentaux en comportement élasto-viscoplastique indiquent que la vitesse de déformation a un effet négligeable sur le module d'élasticité E , par contre il dépend considérablement de σ_p et σ_{max} .

En fatigue cyclique, dans le domaine plastique quand le taux de déformation n'est pas négligeable, la durée de vie dépend fortement du mode de chargement, et de sa fréquence. Il est difficile de prévoir la durée de vie d'un composite car il est impossible d'avoir un contrôle sur ses propriétés. La meilleur des choses est d'éviter l'utilisation d'un composite dépassant sa contrainte à la limite élastique.

Article 5 : M. Heidari-Rarani a, M.R.M. Aliha b,c, M.M. Shokrieh d, M.R. Ayatollahi c

Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings – An experimental study

Durabilité mécanique d'un béton polymère optimisé sous diverses sollicitations cycliques thermiques - Une étude expérimentale.

Journal of Construction and Building Materials 64 (2014) 308–315

I. 5.1 Résumé :

M. Heidari-Rarani et al [17], ont étudié la durabilité mécanique d'un béton polymère (BP) à base d'époxy optimisé, porte sur deux propriétés qui sont la ténacité et la contrainte de traction, sont expérimentalement étudié sous trois différents cycles de gel / dégel. L'essai Brésilien d'un disque diamétralement comprimé non fissuré (DB) et l'essai de flexion 3 points sur une poutre entaillée sont utilisés pour mesurer respectivement la contrainte de traction et la ténacité. Les cycles thermiques : 25 °C à -30 °C (cycle A), 25°C à 70 °C (cycle B) et -30 °C à 70 °C (cycle C) appliqués pendant 7 jours à des éprouvettes; sont choisis en fonction du climat de l'Iran dans les différentes saisons. Les résultats expérimentaux montrent l'influence notable de cycles thermiques, en particulier le cycle B, à la fois sur la ténacité et la résistance à la traction. Les cycles thermiques du chaud au froid telle que cycle A et cycle thermique de gel telle que cycle B indique respectivement une croissance et une réduction pour σ_t et k_{IC} en comparaison aux conditions ambiante. En outre il apparait que la ténacité et la contrainte de traction du béton polymère diminuent avec l'augmentation de la température moyenne des cycles thermiques.

I. 5.2 Objectif visé par cet article :

Dans cette étude [17], la ténacité et la résistance de traction du BP sont étudiés expérimentalement dans trois différents cycles thermiques de gel / dégel (selon les conditions climatiques de l'Iran à différentes saisons). L'utilisation de plusieurs disques diamétralement comprimé non fissuré dans l'essai brésilien (DB) et l'essai de flexion trois points sur des poutres entaillées d'un BP optimisé, pour des cycles thermiques ont permis de trouver à la fois la contrainte de traction et la ténacité. Il est montré que l'amplitude et le type de cycles thermiques ont une influence notable sur le comportement à la rupture d'un matériau testé.

I. 5.3 Techniques et méthodologie adopté dans cet article :

Shokrieh et al [18], ont récemment étudié le pourcentage optimum des composants du béton polymère pour obtenir la résistance maximale en flexion et en compression, ainsi que la résistance inter faciale au cisaillement entre le béton polymère et la surface intérieure d'un anneau en acier. En utilisant la méthode Taguchi et l'exécution d'une série d'essais expérimentaux, ils ont trouvé les pourcentages en poids suivants pour une composition optimisée de béton polymère: 48,3% en poids d'agrégat minéral grossier (avec 4-6 mm en taille), 32,2% en poids d'une charge de sable de fonderie (avec 0,5 à 1,5 mm de diamètre), 19% en poids de résine époxy, et 0,5% en poids de fibres de verre E coupés de longueur 6 mm. Dans cette étude, la même composition a été utilisé pour étudier les effets des cycles de gel / dégel sur la résistance à la traction et de la ténacité à la rupture du béton polymère optimisé. La résine époxy à base de bisphénol F avec un durcisseur de polyamine a été utilisée pour fabriquer des matériaux en BP. Les fibres de verre coupées, des charges de sable et de résine époxy avec les fractions pondérales mentionnées ci-dessus ont été mélangés ensemble dans un récipient pour obtenir un mélange uniforme.

Pour préparer les éprouvettes, le mélange du BP a été coulé dans un moule métallique cubique de dimensions : $L = 180$ mm, $W = 75,4 \pm 1,06$ mm, $B = 36 \pm 1,59$ mm pour l'essai de flexion et aussi dans un moule en acier en forme d'anneau de diamètre $D = 75$ mm et de hauteur $B = 21$ mm pour l'essai brésilien. Avant la coulée, les surfaces intérieures des moules ont été revêtues d'un film afin de faciliter le démoulage. Les échantillons préparés de PC ont été durcis à la température ambiante pendant 7 jours et post-durcis pendant 2 heures à 80° C. Aussi, pour la préparation d'une fissure de bord dans la poutre prismatique, un diamant très mince d'épaisseur 0,35 mm de haute vitesse rotatif a été utilisée pour introduire une entaille très étroite d'une longueur $a = 20$ mm avec un rapport (a / W) d'environ 0,27.

Les échantillons préparés ont été exposés à trois cycles thermiques pendant une durée de 7 jours :

- Cycle-A: 25° C à -30° C pour 7 jours, la moitié de chaque cycle prend 12 h.
- Cycle-B: 25° C à 70° C pour 7 jours, la moitié de chaque cycle prend 6 h.
- Cycle-C: -30° C à 70° C pour 7 jours, la moitié de chaque cycle prend 12 h.

12 échantillons ont été testés sur une machine de compression /traction selon l'essai brésilien. 36 échantillons ont été testés sur un banc de flexion à trois points avec une portée de poutre $S = 140 \text{ mm}$. Les essais ont été effectués à la température ambiante avec une vitesse de déplacement constante de $0,5 \text{ mm / min}$. La figure 1 montre la configuration des essais. Des essais de ténacité et de résistance à la traction, les spécimens ont été chargés de façon monotone jusqu'à la rupture finale.



Fig. 1 : Les essais de flexion et de Disc brésilien.

I. 5.4 Résultats et discussion :

Les courbes charge-déplacement de flexion en cycle A présentés dans la figure 2 montrent une allure presque linéaire pour tous les échantillons avec un comportement peu fragile. La figure 3 montre les courbes force-déplacement pour l'essai brésilien en cycle B.

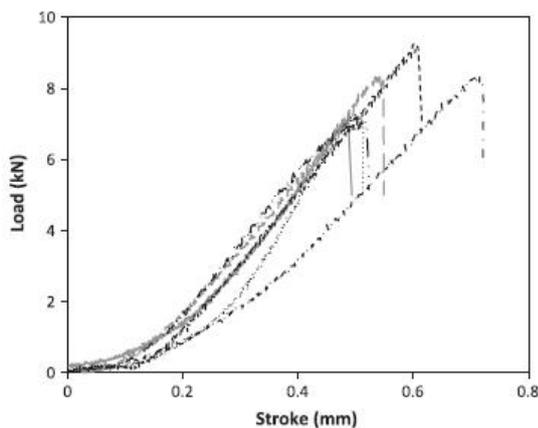


Fig. 2. Les courbes charge-déplacement de flexion en cycle A.

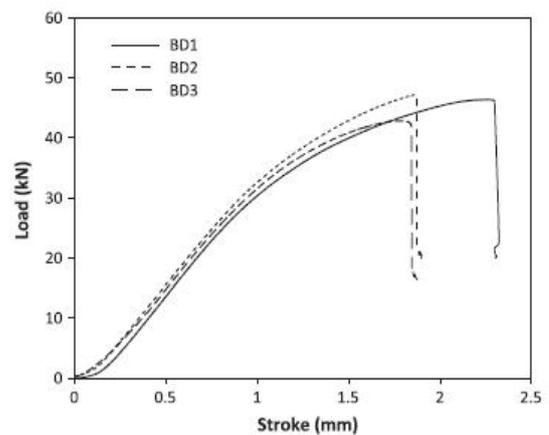


Fig.3 : courbes force-déplacement pour l'essai brésilien en cycle B.

Les Figures 4 et 5 présentent les diagrammes de comparaisons des différents cycles thermiques avec celui des conditions ambiantes : respectivement pour le critère d'intensité k_{IC} en flexion 3 points, la contrainte de traction de l'essai brésilien.

Les résultats montrent que le critère k_{IC} est le même pour les cycles A et C avec une croissance de 11%, alors que pour le cycle B on remarque une diminution de k_{IC} de 16,7% par rapport à celle obtenue en conditions ambiantes. Ce phénomène est observée en cycle de dégel ce qui affecte les propriétés du polymère par rapport aux cycles gel-dégel. On remarque que la valeur de k_{IC} max est obtenue pour le cycle A et la valeur min pour le cycle B avec une différence de 33%.

La contrainte de traction maximale est obtenue en cycle A alors que la minimale est obtenue en cycle B avec une différence de 24%, le passage du chaud au froid telle que le cycle A et C influe d'une façon significative sur la contrainte de traction.

En outre il est observée d'après les résultats expérimentaux que les valeurs de k_{IC} et σ_t peuvent être attribuées à la température moyenne pour chaque cycle $T_m = (T_{max} + T_{min})/2$ ou T_{max} et T_{min} représentent les valeurs maximales et minimales de la température pour les différents cycles thermiques qui sont respectivement pour les cycles A, B et C : -25°C , 47.7°C et 20°C .

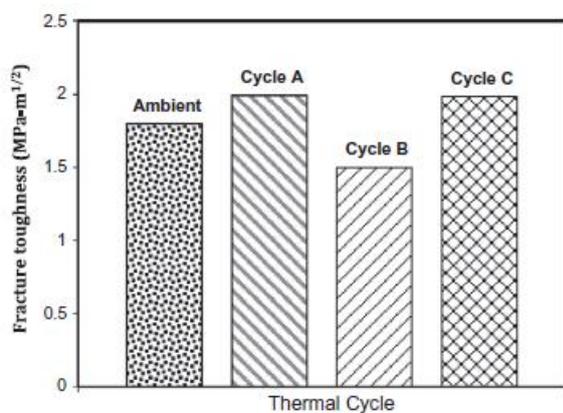


Fig. 4 : Comparaison de la ténacité du BP sous trois cycles thermiques et des conditions ambiantes.

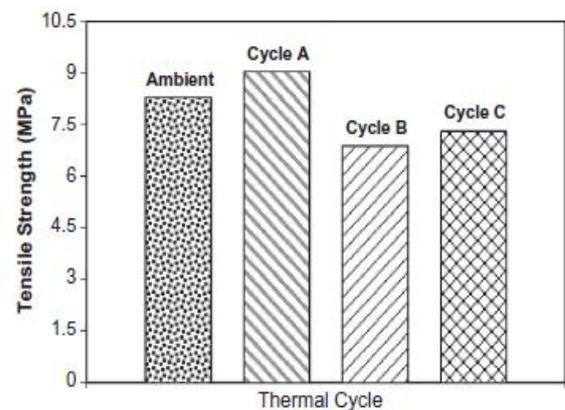


Fig. 5 : Résistance à la traction du matériau du BP testée dans des conditions ambiantes et trois cycles thermiques A, B et C.

- Les Figures. 6 et 7 représentent les courbes de variation de k_{IC} et σ_t en fonction de la température moyenne. On remarque d'après ces figures que k_{IC} et σ_t diminuent avec l'augmentation de la température moyenne.

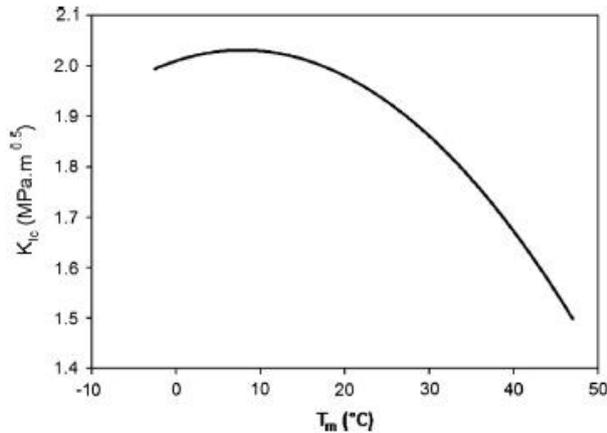


Fig. 6 : courbe de variation de k_{IC} .

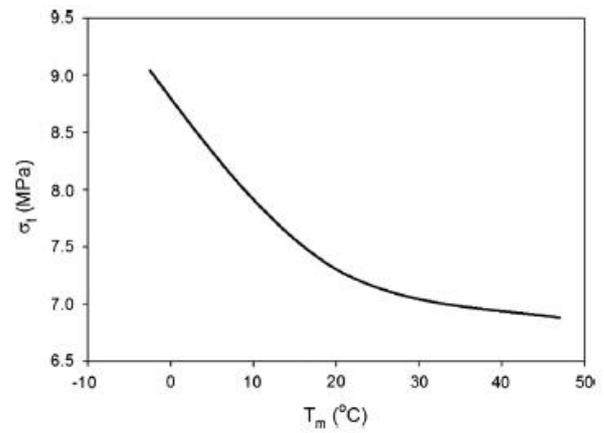


Fig. 7 : courbe de variation de σ_t .

I. 5.5 Conclusion :

La durabilité mécanique d'un BP est d'un grand intérêt pour deux raisons:

(1) Le polymère utilisé comme liant dans le BP a une grande sensibilité aux changements de température; (2) il a montré un comportement quasi-fragile sous différentes sollicitations mécaniques.

Par conséquent, l'effet de différents cycles de gel / dégel sur la résistance à la traction (σ_t) et mode I ténacité (K_{IC}) d'un matériau de BP optimisé a été étudiée expérimentalement. La gamme inférieure et supérieure de chaque cycle thermique est sélectionnée conformément aux intempéries et conditions climatiques de l'Iran dans différentes saisons à différents endroits du pays. Les points suivants sont conclus à partir des résultats expérimentaux:

- Pour l'ensemble des cycles thermiques, la défaillance de la fragilité en traction a été observée pour les cycles gel / dégel et n'a pas changé les modes de rupture du BP.
- Une influence notable des cycles thermiques sur k_{IC} et σ_t est observée sur les bétons polymère testés par exemple le cycle de dégel B et le cycle chaud au froid A donne la même réduction et augmentation pour toutes les propriétés.
- Les cycles A et B fournissent respectivement les valeurs supérieures et inférieures pour (k_{IC}) et (σ_t), tandis que le cycle C a un effet intermédiaire entre les cycles A et B.

I. Conclusion

Dans ce chapitre, les matériaux granulaires et leurs applications dans le génie civil sont présentés. Ces matériaux sont constitués d'un liant polymère et des charges minérales comme le gravier ou la pierre concassée et du sable. Ils présentent donc une microstructure hétérogène, par la présence de plusieurs constituants, les pores et les microfissures. L'analyse expérimentale a permis de mieux cerner l'influence de quelques paramètres sur le comportement mécanique de ces matériaux soumis aux différentes sollicitations. Les résines les plus généralement utilisées sont les polyesters et les époxydes.

En outre, dans cette recherche, on a considéré quelques références bibliographiques présentées dans la littérature en se focalisant sur : Le résumé, la description des techniques utilisées et en fin les principaux résultats ont été éclair.

Chapitre II

Techniques expérimentales

Chapitre II

Techniques expérimentales, caractérisation des matériaux et mode de préparation des bétons

II.1. Introduction

Ce second chapitre débute par la présentation détaillée des méthodes et techniques expérimentales de caractérisation classiquement utilisées en science des matériaux, sur lesquelles s'appuie une grande partie de cette étude, ainsi que des moyens d'analyses plus spécifiques et complémentaires pour déterminer les propriétés physiques et mécaniques des différents matériaux utilisés: liant, granulats et béton résineux (BR). On décrira également les techniques d'élaboration utilisées pour la réalisation de ces BR ainsi que les conditions expérimentales d'exposition des formulations adoptées.

II.2. Techniques expérimentales

II.2.1. Essais de caractérisation mécanique

II.2.1.1. Essai de flexion 3-points :

Des essais de flexion 3-points sont menés sur des éprouvettes prismatiques en BR. Les éprouvettes sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge concentrée (poinçon se déplaçant à vitesse constante) à mi-travée (Figure II.1). Les éprouvettes sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs pour des portées variantes pour une portée et des dimensions des échantillons conformément à la norme considérée comme indiquée dans le Tableau II.1.

Tableau II.1 : Dimensions et vitesses d'essai.

Type d'essai	Type de l'échantillon	Dimension (mm)	Vitesse de chargement (mm/min)	Portée (mm)	Norme
Flexion	Béton résineux	25x25x300	3	270	ASTM C580.02



Fig. II.1: Schéma du dispositif de flexion 3-points.

Les essais sont réalisés à température ambiante et les charges en fonction des déplacements au cours du temps sont enregistrées au cours de l'essai.

La contrainte de flexion est égale à :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{II.1})$$

où F est la charge totale appliquée en flexion en Newton, L est la portée en mm et b et h sont la largeur et la hauteur de l'éprouvettes exprimées en mm.

II.2.1.2. Machine d'essais :

Les différents essais de flexion statique sont réalisés sur une machine d'essai universel de type **ZWICK ROELLE Z005 (Figure II.2)**. 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. La machine est pilotée par un logiciel Test expert V10.11 qui permet d'enregistrer les résultats sur un procès-verbal d'essais.



Fig. II.2 : Machine d'essai.

II.3. Matériaux utilisés dans les formulations

Le but de cette partie est de présenter les caractéristiques des matériaux utilisés.

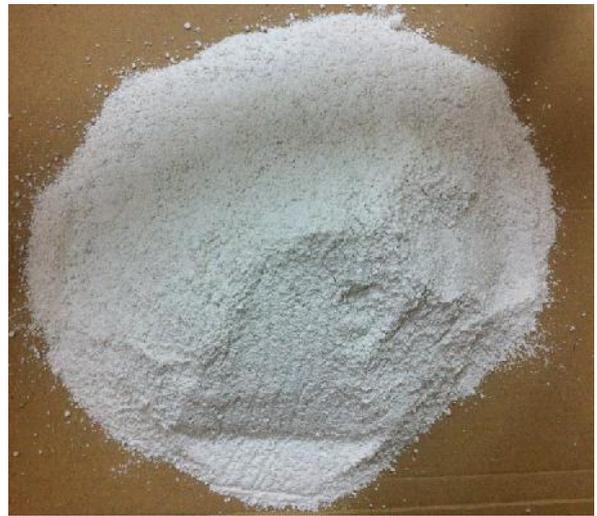
II.3.1. Caractérisation des charges minérales

II.3.1.1. Propriétés physiques :

Les bétons étudiés ont été tous élaborés avec un squelette (renfort) granulaire à base de grains de sable de carrière (obtenue après tamisage d'un sable naturel provenant des carrières de Tébessa utilisé dans le mortier de ciment comme enduit pour murs) et de poudre de marbre (obtenue suite au broyage des chutes de marbres récupérées).



Sable de carrière



Poudre de marbre

Fig. II.3 : Charges minérales utilisées dans la confection du béton.

II.3.1.2 Détermination de la masse volumique :

- Peser une éprouvette vide graduée d'un volume $V=1$ L, (M_1) ;
- Remplir cette éprouvette avec du sable arasé ;
- Peser une deuxième fois (M_2) ;
- Calculer la masse volumique $= \frac{M}{V}$.

$$M = M_2 - M_1$$

La masse volumique déterminée du sable de carrière $\rho_{sc}=1,675$ g/cm³ et celle de la poudre de marbre $\rho_{pm}=1,425$ g/cm³.

II.3.1.3 Analyse granulométrique du sable de carrière et de la poudre de marbre :

L'analyse granulométrique a été effectuée sur un ensemble de tamis normalisés en faisant passer un kilogramme de chaque matériau à travers ces tamis, puis on pèse les refus correspondants et à la fin on calcule le pourcentage de tamisat qui permettra de tracer les courbes granulométriques.

Les tableaux et la Figure II.4 représentent les analyses granulométriques réalisées sur le sable et la poudre de marbre utilisés dans les formulations.

Tableau II.2 : Analyse granulométrique du sable de carrière.

Tamis	Refus	Cumul	Refus (%)	Tamisat (%)
3	20	20	2	98
2,8	155	175	17,5	82,5
2	740	915	91,5	8,5
1,4	80	995	99,5	0,5
1	5	1000	100	0

Tableau II.3 : Analyse granulométrique de la poudre de marbre.

Tamis (mm)	Refus	Cumuls	Refus(%)	Tamisat(%)
1,4	10	10	1	99
1	40	50	5	95
0,71	90	140	14	86
0,5	175	315	31,5	68,5
0,355	145	460	46	54
0,25	270	730	73	27
0,18	70	800	80	20
0,125	60	860	86	14
0,045	30	890	89	11
0,02	5	895	89,5	10,5

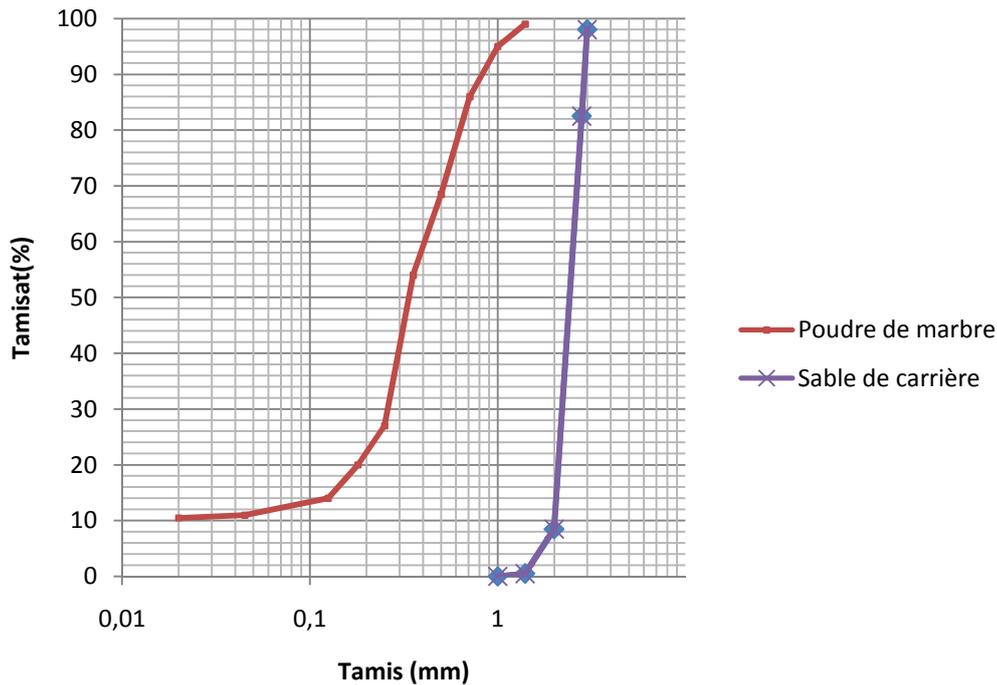


Fig. II.4 : Analyses granulométriques.

A partir de ces courbes on calcule le module de finesse qui est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés (exprimée en pourcent) des fraction granulaires obtenues sur les tamis de modules : 23 - 26 - 29 - 32 - 35 - 38 - 41 - 44 - 47 - 50 (respectivement des tamis de la série 0,16 mm - 0,315 mm - 0,63 mm - 1,25 mm - 2,5 mm - 5 mm - 10 mm - 20 mm - 40 mm et 80 mm).

Le sable et la poudre de marbre utilisés possèdent respectivement des modules de finesse de 2,93 et 1,98 et des coefficients d'uniformité C_u respectifs de 1,3 et 10 ce qui donne pour le sable une courbe serrée et pour la poudre de marbre une courbe étalée.

II.4. Mode de fabrication du béton résineux à base de résine polyester

Avant de procéder à la fabrication proprement dite du béton de résine (BR), des étapes préliminaires sont nécessaires pour l'obtention d'un produit identique à lui-même et pour minimiser l'effet des éléments liés à l'état et la qualité des matériaux entrant dans la composition du BR à fabriquer et aussi à la méthode de fabrication. Les constituants doivent être donc stockés dans des conditions favorables. En effet, les granulats doivent être séchés à

105°C pour plus de 24 heures et la résine doit être stockée dans une salle à température ambiante.

Une autre étape importante est le nettoyage des moules et l'application d'une couche séparatrice entre le BR et les moules afin d'assurer un démoulage facile et sans risque d'exercer des contraintes parasites autres que les contraintes appliquées aux échantillons pendant les essais mécaniques. Il s'agit d'une cire (figure II.5) en phase solvant (cire de démoulage fourni par Abel industrie) à appliquer en couches sur un moule propre (figure II.6) ; ce traitement est à appliquer quelques minutes à l'avance de la phase du remplissage.



Fig. II.5 : cire de démoulage.

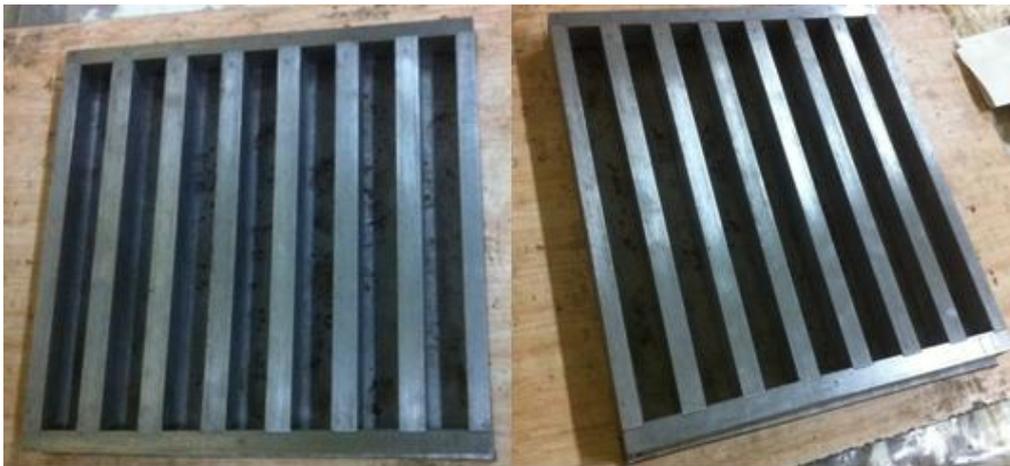


Fig. II.6 : les moules prismatiques.

Le processus de fabrication du BR se déroule comme suit :

- Peser les différents matériaux (résine, sable, poudre de marbre) avec une balance type ACS-30 (figure II.7).



Fig. II .7 : la balance.

- Mélanger pendant trois minutes la résine avec le durcisseur puis introduire un accélérateur et continuer à mélanger, en respectant les proportions massiques de 2% pour chacun.
- Bien mélanger le sable de carrière avec la poudre de marbre puis introduire sur trois fois la résine préparée sans arrêter de malaxer manuellement avec une spatule métallique. Chaque introduction est suivie d'un malaxage pendant trois minutes afin d'obtenir un matériau plus homogène (figure II.8), ainsi, on obtient un BR à l'état frais et la phase de remplissage peut commencer.
- Le mélange est effectué manuellement pour les différentes formulations (tableau II.4), les échantillons, de dimension (25x25x300 mm), de béton résineux sont coulés manuellement dans des moules prismatiques.



Fig. II.8 : Constituants du BR et processus de malaxage.

Tableau II.4 : Proportion des formulations en béton résineux.

Constituants (%)	I	II	III	IV	V	VI	VII
Sable	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

- Les moules à moitiés remplis sont mis sur une table vibrante afin de réaliser un bon compactage des enrobés puis terminer le remplissage.
- Les échantillons sont démoulés après 24 h et (figure II.9) et conservés à température ambiante pendant 7 jours jusqu'à l'échéance des essais mécaniques.



Fig. II.9 : Échantillons prismatiques en BR.

II. 5. Conclusion

Le chapitre II décrit et explique les techniques expérimentales utilisées pour la préparation des échantillons, en plus d'une présentation du matériel et matériaux utilisés.

Les échantillons sont constitués d'un mélange de sable et de la poudre de marbre avec le liant (résine polyester), et après le démoulage, ces éprouvettes sont conservées à une température ambiante (au moins 7jours) jusqu'à l'échéance des essais mécaniques.

CHAPITRE III

Résultats et discussions

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais expérimentaux effectués pour la détermination des caractéristiques mécaniques de du béton résineux, préparées au laboratoire à l'université 8 Mai 1945 Guelma, testés en flexion et il s'agit donc :

- D'essai de flexion 3-points en statique, dont le but de déterminer leurs propriétés mécaniques.
- Les échantillons du béton résineux testés dans les mêmes conditions sont regroupées en sept formulations en total de 25 éprouvettes ont été utilisé dans ce travail et leurs courbe contrainte/déplacement sont présentés
- Pour une bonne analyse statistique des résultats expérimentaux, la méthode de variance ANOVA a été choisie dans cette étude.

III.2. Optimisation vis-à-vis les résistances mécaniques du béton résineux (BR)

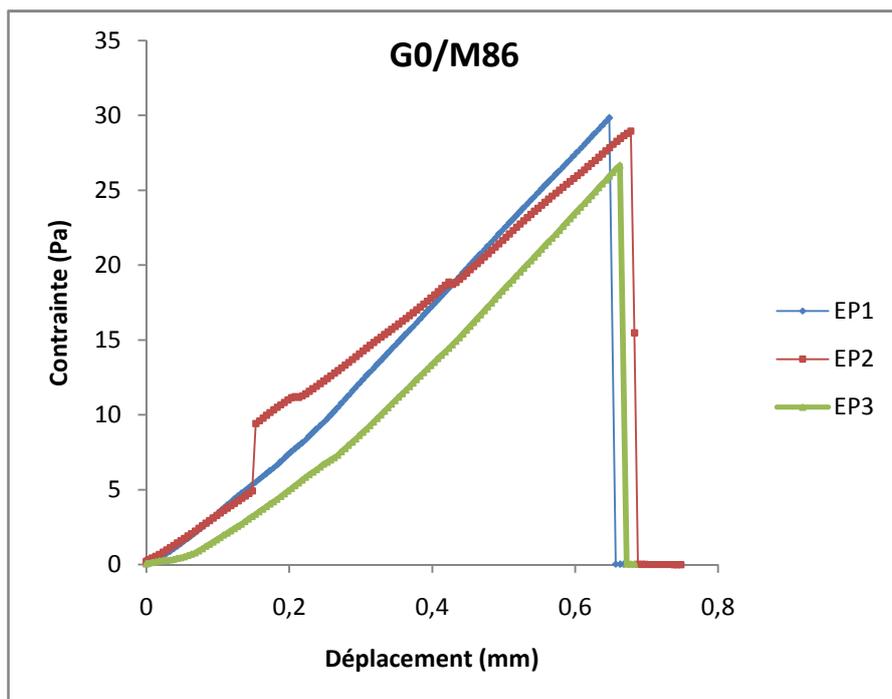
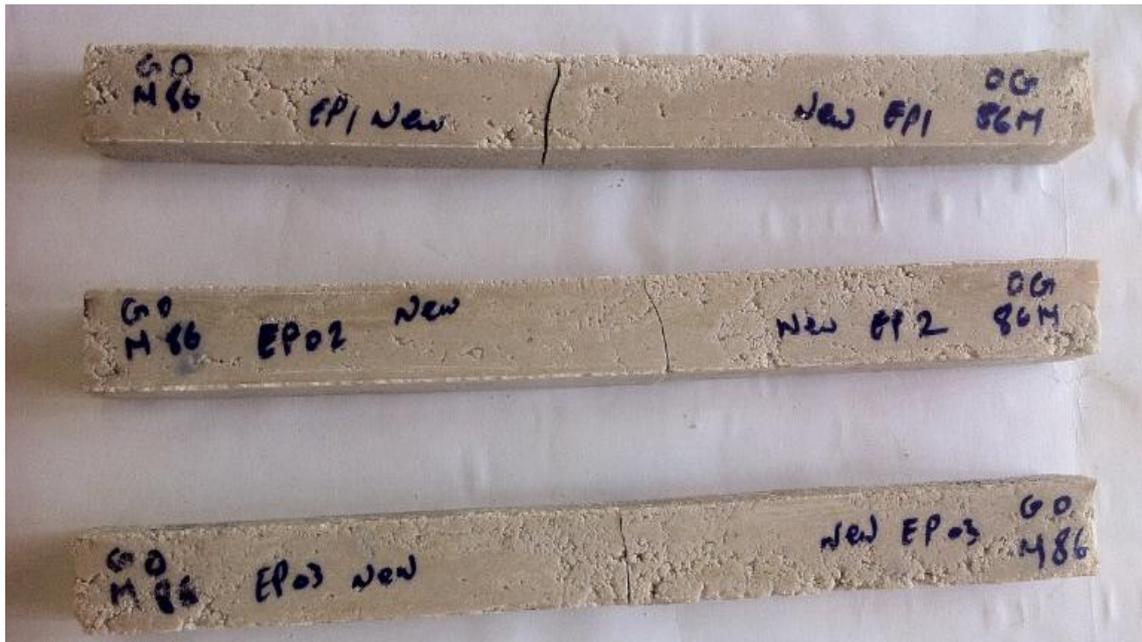
Les caractéristiques mécaniques des différentes formulations du BR ont été évaluées afin d'obtenir la formulation donnant le maximum de performances mécaniques.

Les essais mécaniques de flexion 3-points ont été réalisées sur des éprouvettes prismatiques 25x25x300 mm selon la procédure décrite (§II.3) avec une vitesse de chargement de 3 mm/min. Les essais ont été faits à température ambiante sur des éprouvettes âgées de 7 jours.

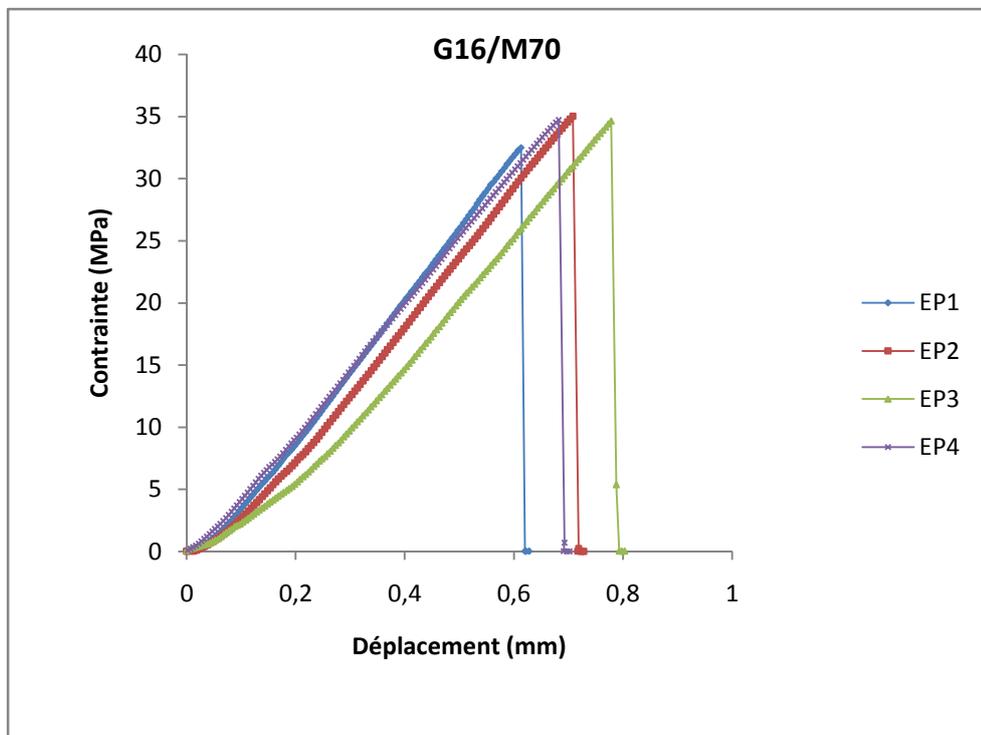
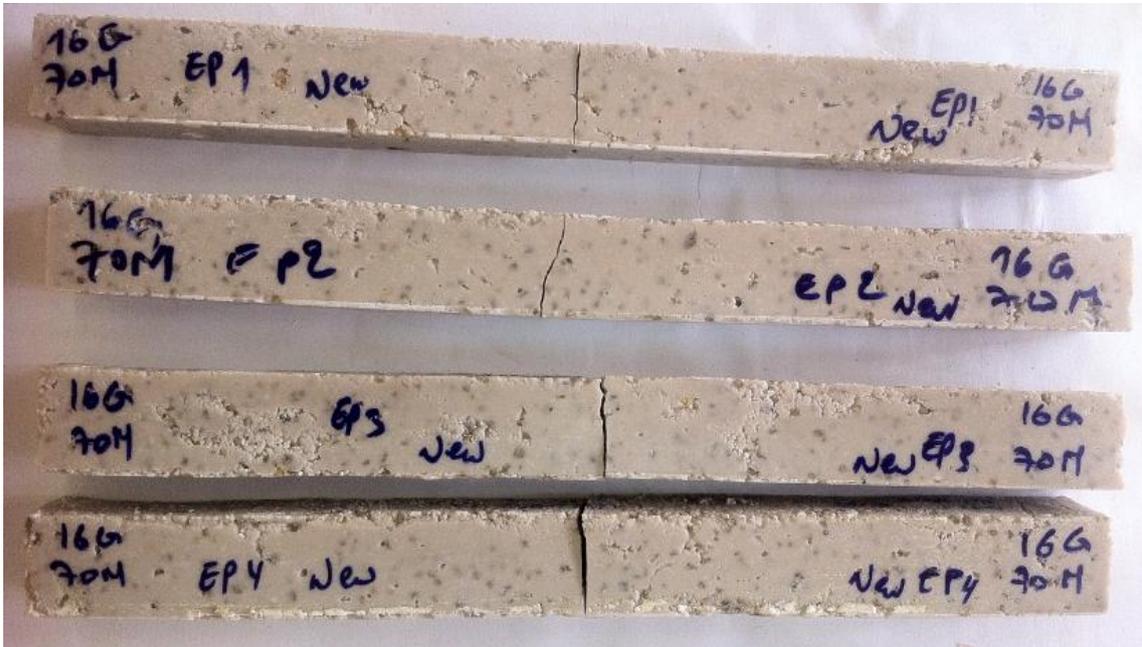
III.3. Résultats et discussions

Les figures (1a – g) représentent les courbes types de l'évolution de la contrainte en fonction du déplacement, cette évolution se déroule en trois phases.

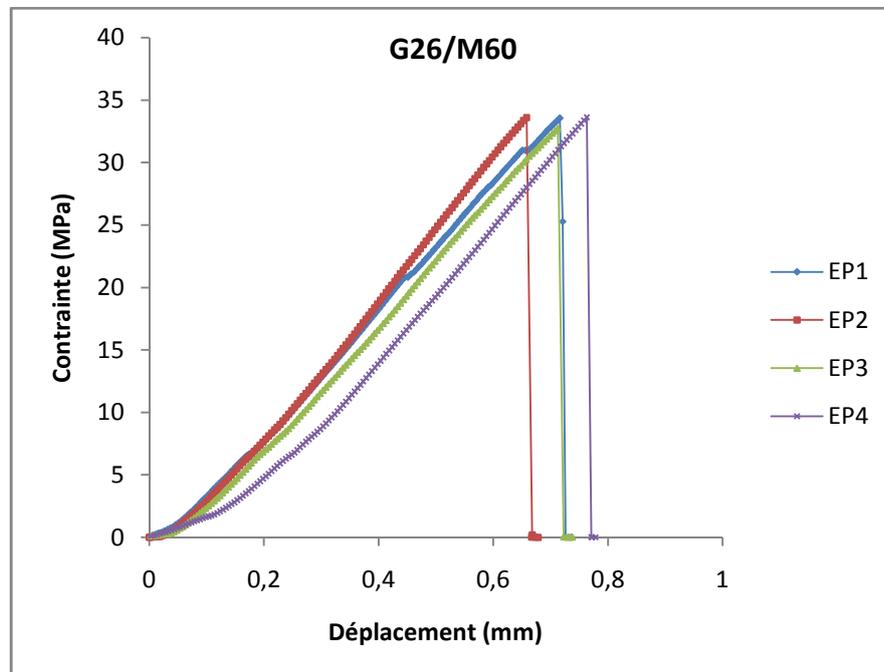
a) G0/M86



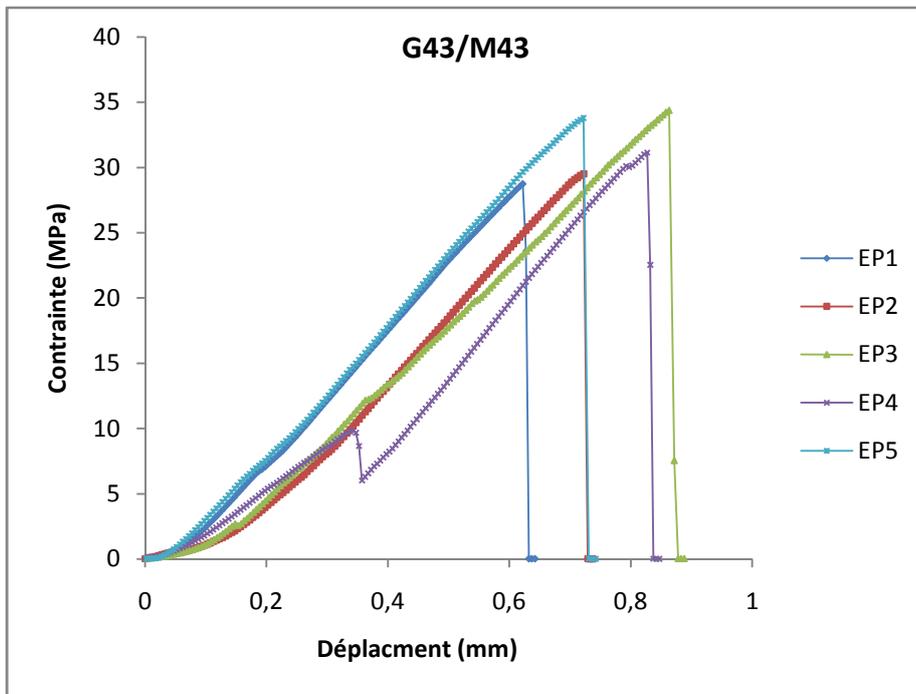
b) G16/M70



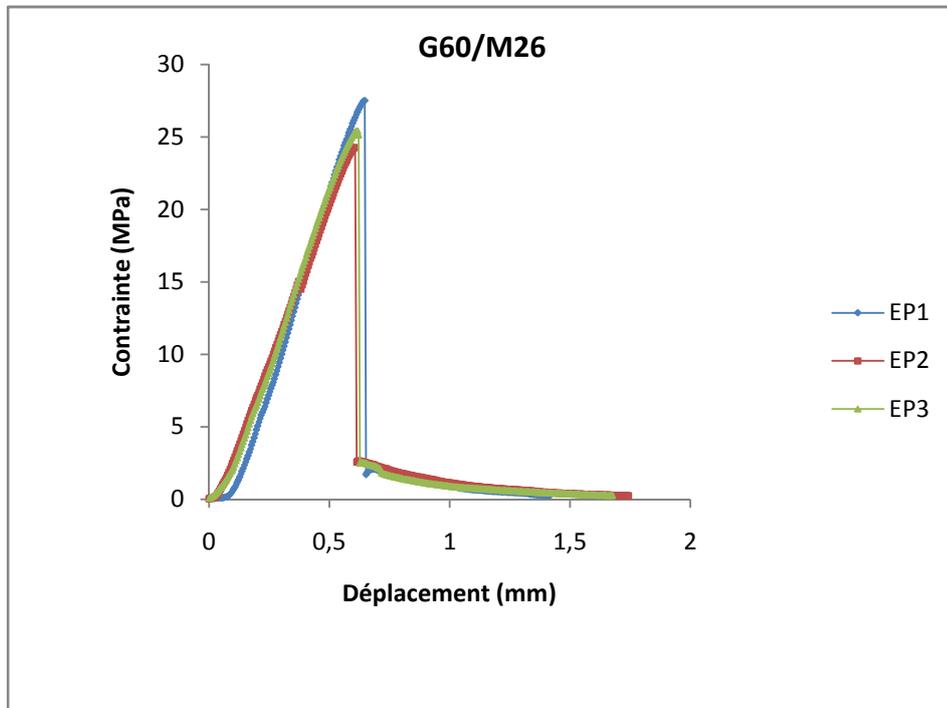
c) G26/M60



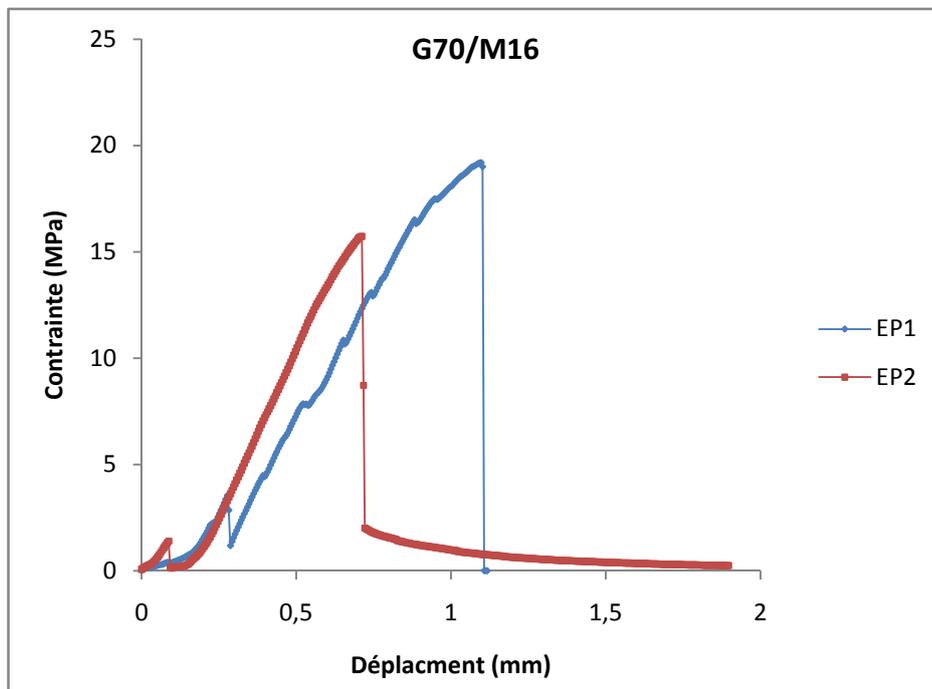
d) G43/M43



e) 60G/26M



f) G70/M16



g) G86/M0

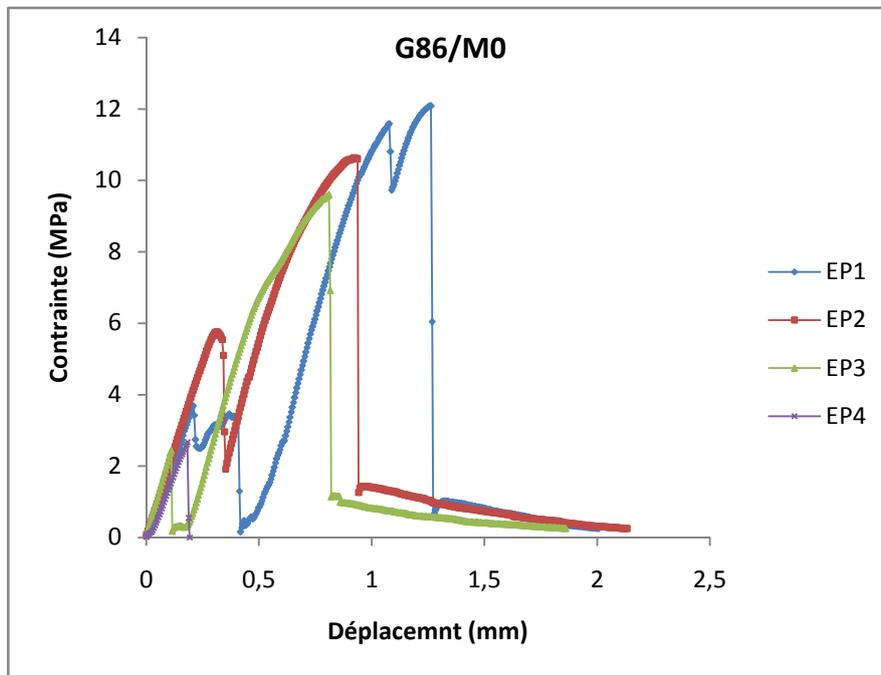


Fig. III.1: comportement contrainte / déplacement des poutres en flexion statique pour différentes formulations (a –g).

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 de la contrainte en fonction du déplacement. Alors que la troisième phase très courte se caractérise par des perturbations conduisant à la rupture des éprouvettes.

Les résultats des essais ont été regroupés sur le tableau III. 1

Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques (contrainte, déplacement) des différentes formulations du BR obtenues expérimentalement par des essais de flexion.

Formulations	Contrainte moyenne (MPa)	Déplacement à la rupture (mm)
G0/M86	28,48 ± 1,6	0,66 ± 0,015
G16/M70	34,2 ± 1,15	0,7 ± 0,07
G26/M60	33,4 ± 0,45	0,71 ± 0,04
G43/M43	31,5 ± 2,53	0,75 ± 0,095
G60/M26	25,73 ± 1,62	0,62 ± 0,022
G70/M16	17,45 ± 2,5	0,9 ± 0,3
G86/M0	10,77 ± 1,26	1,0014 ± 0,234

D'après les résultats obtenus on remarque une grande dispersion non seulement au niveau d'une même formulation mais aussi au niveau des différentes formulations donc afin de déterminer la meilleure formulation vis-à-vis des caractéristiques mécaniques, une analyse statistique s'impose.

III.4. Analyse statistique à l'aide de l'ANOVA

Dans cette étude la méthode de variance ANOVA a été choisie pour l'analyse statistique des résultats expérimentaux obtenus.

III.4.1 Théorie de l'ANOVA

Les analyses de variance ou analyses factorielles sont des techniques permettant de savoir si une ou plusieurs variables dépendantes (appelées aussi variables endogènes ou variables à expliquer) (valeurs numériques et continues [c-à-d des effectifs, des rapports

comme des longueurs ou des poids, etc..] = disposées dans différentes lignes d'un tableau) sont en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes (ou variables exogènes ou variables explicatives) (disposées dans différentes colonnes d'un tableau).

- On analyse la variance totale, intragroupe et intergroupe (voir plus bas) pour comparer des moyennes et tester l'hypothèse $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$.

- L'ANOVA est une méthode très utilisée pour analyser les résultats d'expériences contrôlées, réalisées en laboratoire ou sur le terrain. Selon la nature des facteurs, les intentions sont généralement différentes.

- Facteur aléatoire: on tente souvent de montrer que les données supportent H_0 . S'il n'y a pas d'évidence que les groupes diffèrent par leur moyenne, on pourra les réunir pour les analyses subséquentes,

- si le test de comparaison des moyennes avait assez de puissance pour rejeter H_0 lorsque H_1 est vraie (n suffisamment élevé);

- si les groupes ne diffèrent pas non plus par leur variance.

- Facteur contrôlé: on cherche la plupart du temps à rejeter H_0 afin de supporter l'hypothèse (H_1) qu'une partie de la variabilité des données est explicable par le critère de classification [19].

Calcul pratique:

1- On calcule:

a) La variance totale par rapport à la moyenne globale des n mesures;

b) La variance intra-groupes (celle qui n'est pas liée aux conditions expérimentales).

2- Par différence **[a-b]** on obtient la variance inter-groupes (qui est liée aux différences de conditions expérimentales).

$$a = [a-b] + b$$

$$\begin{aligned} \text{Variance totale} &= \text{Variance inter-groupe} + \text{Variance intra-groupe} \\ [\text{SCE à la moyenne générale}] &= [\text{SCE factorielle}] + [\text{SCE résiduelle}] \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{\rho} \sum_{k=1}^{n_i} x_{ik} - \bar{x}^2 = \sum_{i=1}^{\rho} n_i \bar{x}_i - \bar{x}^2 + \sum_{i=1}^{\rho} \sum_{k=1}^{n_i} x_{ik} - \bar{x}^2$$

SCE= Somme des carrés des écarts

3- On calcule le rapport : $F = \text{variance inter-groupes} / \text{variance intra-groupes ou résidu}$.

La valeur de ce rapport appelé F [attention : ce F n'a rien à voir avec le F du test de vérification de l'homogénéité des variances] est comparée à celle d'une table de F de Fisher Snedecor, table à double entrée avec pour numérateur le [nombre d'échantillons (k) moins un] soit (k-1) et pour dénominateur le [nombre total de mesures - k] soit (kn-k). [20]

III.4.2. Présentation et discussion de l'analyse

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) présentée dans les figures III.2 et III.3 des différentes formulations a montré un meilleur comportement de la formulation 16G/70M vis à vis de la résistance et du déplacement. De plus, une homogénéité de quatre sous groupes générés par les comparaisons des moyennes des différentes formulations a été constatée (tableaux III.2 et III.3).

Etant donné que la valeur P du test F est inférieure à 0,05 pour la contrainte à la rupture et $F = 60,22$ 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 H_0 est rejetée).

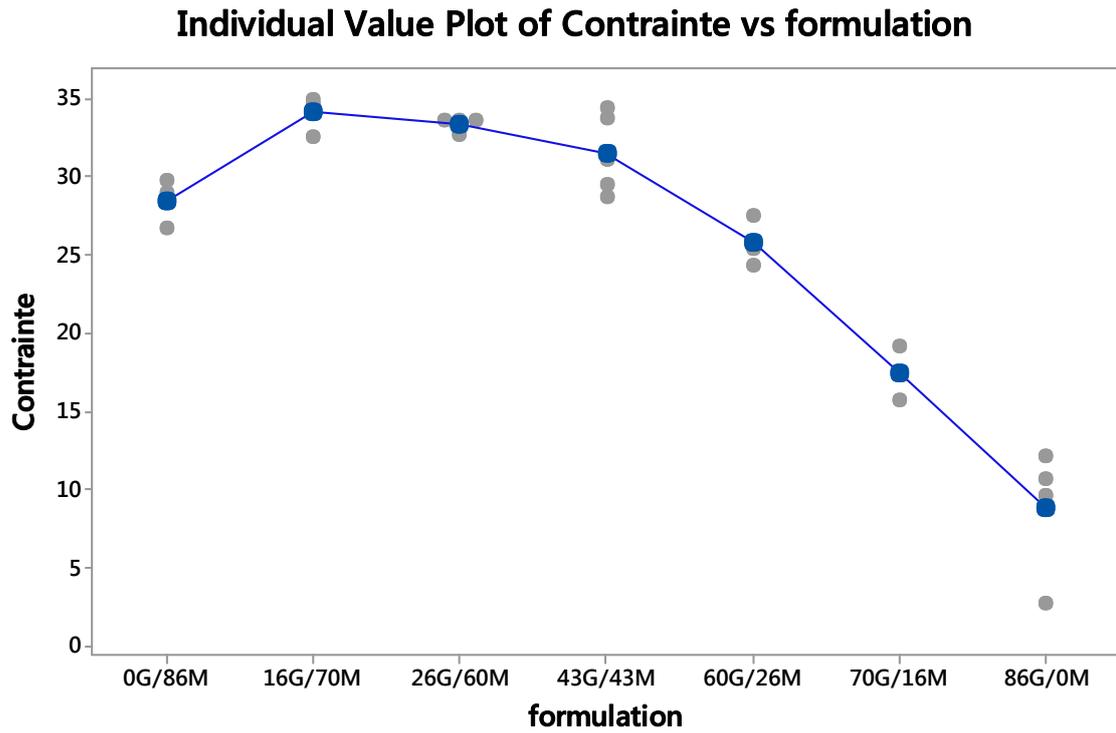


Fig. III.2 : Courbe des valeurs individuelles de la contrainte en fonction des formulations.

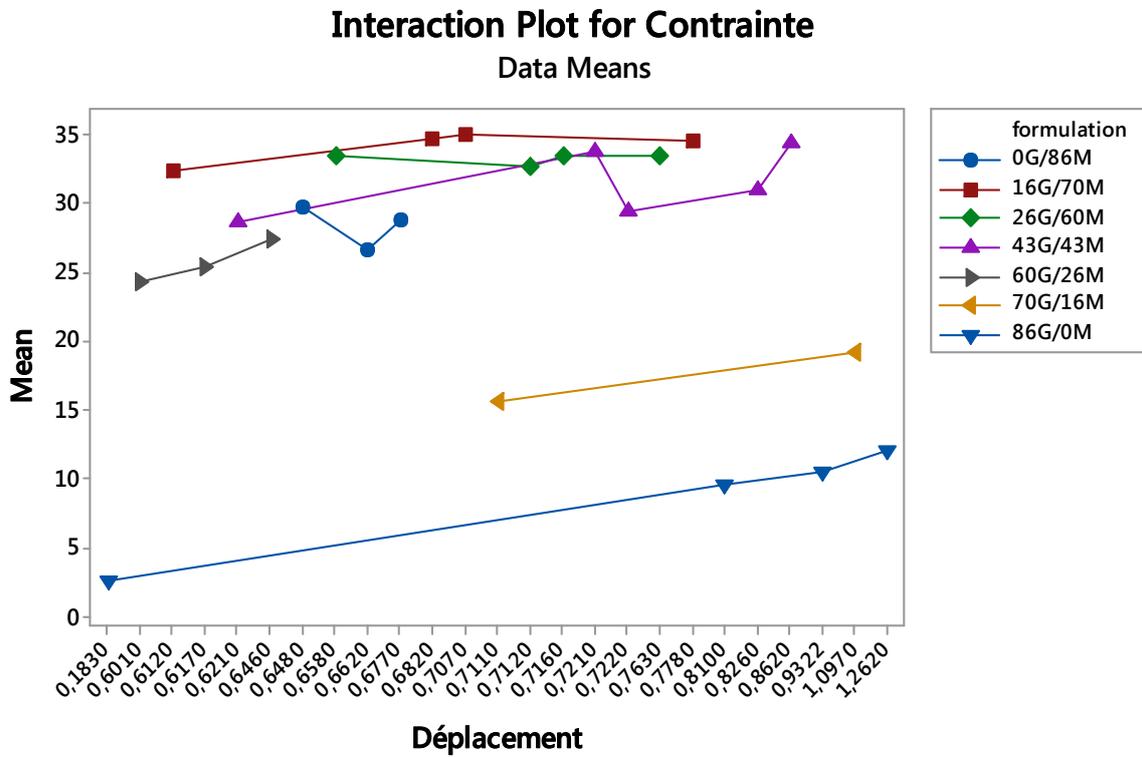


Fig. III.3 : Courbes d'interaction de la contrainte en fonction du déplacement des différentes formulations.

La figure III.4 présente le test de Tukey à comparaisons multiples afin de connaître la différence entre les moyennes des contraintes des différentes formulations.

Le test de Tukey propose plusieurs ensembles d'intervalles à comparaisons multiples. Certains ensembles présentent des intervalles qui s'étendent entre -30 et -1 MPa à savoir les formulations (70G/16M – 86G/0M, 86G/0M – 0G/86M, 60G/26M – 16G/70M, 70G/16M – 16G/70M, 86G/0M – 16G/70M, 60G/26M – 26G/60M, 70G/16M – 26G/60M, 86G/0M – 26G/60M, 60G/26M – 43G/43M, 70G/16M – 43G/43M, 86G/0M – 43G/43M, 70G/16M – 60G/26M, 86G/0M – 60G/26M, 86G/0M – 70G/16M). Etant donné que l'intervalle n'inclut pas zéro, la différence de contrainte entre ces différentes formulations est statistiquement importante. Par contre le reste des ensembles présentent des intervalles qui s'étendent entre -8 et + 12 MPa. Ce qui inclut le zéro, donc la différence de contrainte entre ces formulations n'est pas statistiquement importante. (16G/70M - 0G/86M, 26G/60M - 0G/86M, 43G/43M - 0G/86M, 60G/26M - 0G/86M, 26G/60M - 16G/70M, 43G/43M - 16G/70M, 43G/43M - 26G/60M).

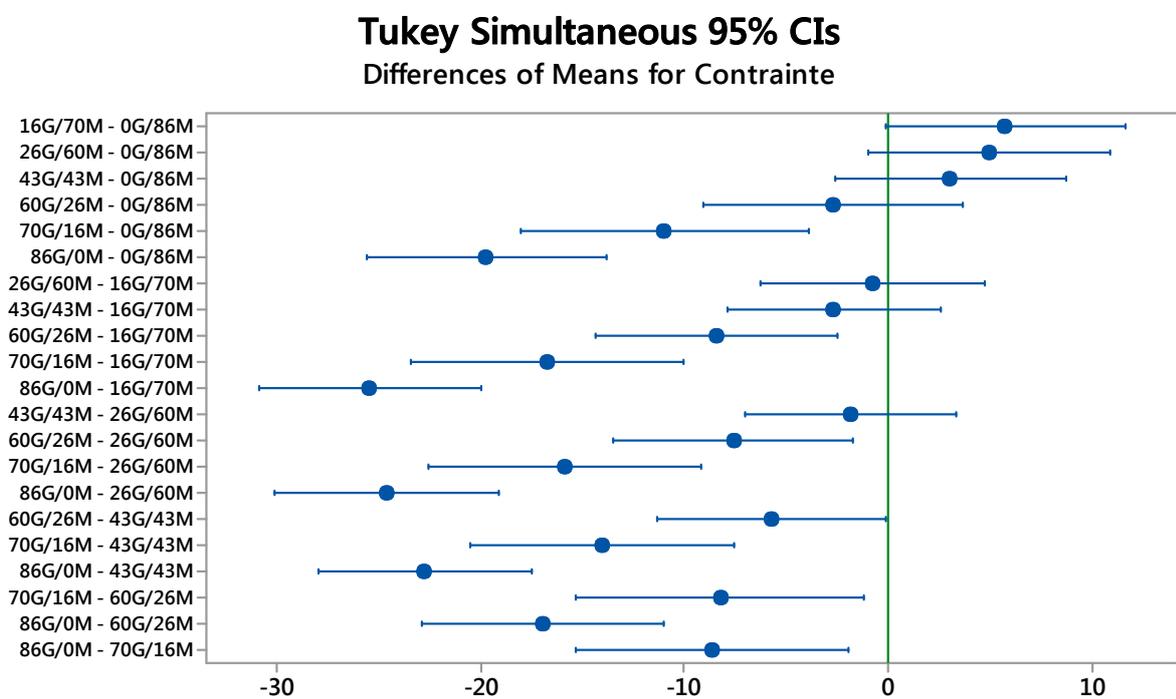


Fig. III.4 : Comparaison des moyennes par le test du Tukey.

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

Formulation	N	La moyenne	Sous groupes
16G /70M	4	34,2	A
26G /60M	4	33,37	A
43G/43M	5	31,5	A
0G/86M	3	28,48	A B
60M/26G	3	25,73	B
70G/16M	2	17,45	C
86G/0M	4	8,74	D

Source	DF	SS	MS	F	P
Formulation	6	1989,68	331,613	60,22	0,0
Erreur	18	9,12	5,506		
Total	24	2088,79			

Tableau III.3: Analyse de la variance des différentes formulations.

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 III.5 destiné à repérer la non-normalité a montré une ligne à peu près droite qui signifie qu'elles sont réparties normalement (Fig. III.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. III.5b et d).

Residual Plots for Contrainte

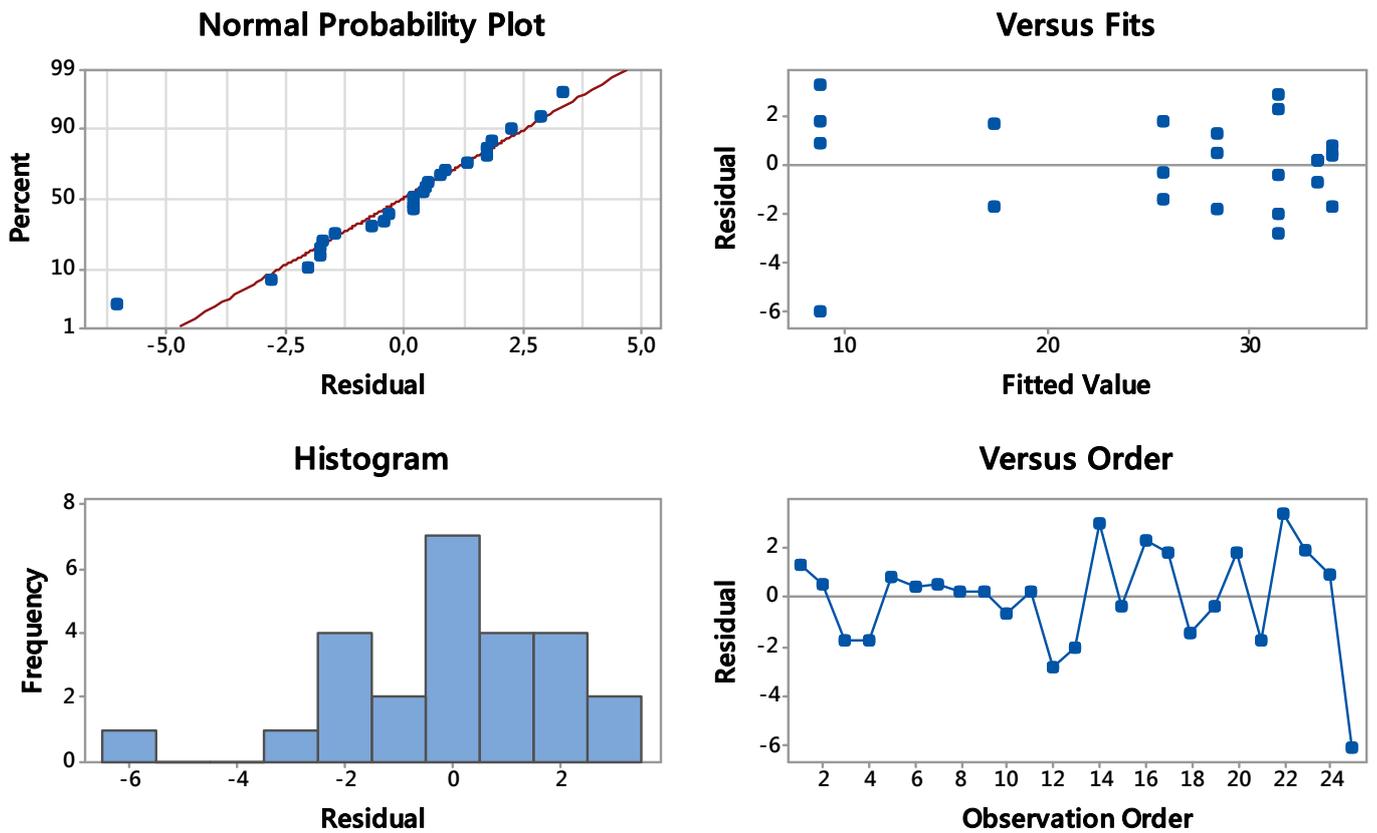


Fig. III.5 : Diagramme des valeurs résiduelles de la contrainte (MPa).

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre les caractéristiques mécaniques du BR ont été déterminées par des essais de flexion 3-points :

Pour les différentes formulations les résultats obtenus présentaient beaucoup de dispersions pour cela une étude statistique en ANOVA a été menée.

Les résultats montrent que le taux de granulats et celui de la poudre de marbre présentent un effet significatif sur le comportement mécanique et que la formulation 16G/70M présente un meilleur comportement vis-à-vis de la contrainte à la rupture et du déplacement.

Conclusion générale

Ce travail s'intéresse à l'analyse du comportement mécanique en statique du béton polymère constitué d'une matrice polymère (résine polyester), de grains de sable et de poudre de marbre. La méthodologie utilisée pour analyser l'évolution de l'endommagement du matériau au cours des essais consiste à élaborer des échantillons modèles permettant de discriminer les différents modes d'endommagement et à appliquer cette analyse au béton polymère au cours des essais statiques.

- Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire de Master permet de dégager les conclusions suivantes :
 - Les matériaux granulaires sont constitués d'un liant polymère et des charges minérales comme le gravier ou la pierre concassée et du sable, D'après l'étude bibliographique les résines les plus généralement utilisées sont les polyesters et les époxydes. Ces matériaux ont plusieurs applications tel que dans l'industrie, la géothermie et dans l'agriculture et l'horticulture.
 - Le chapitre II décrit et explique les techniques expérimentales utilisées pour la préparation des échantillons.
 - Dans le chapitre III les caractéristiques mécaniques du BR ont été déterminées par des essais de flexion 3 points et la méthode de variance ANOVA a été choisie Pour une bonne analyse statistique des résultats expérimentaux. Les résultats montrent que la formulation 16G/70M présente un meilleur comportement vis-à-vis de la contrainte à la rupture et au déplacement.

- Les résultats des essais mécaniques montre qu'il y beaucoup d'avantages d'utilisation les bétons résineux tels que leur grande résistance et un procédé de durcissement plus court et leurs excellentes propriétés mécaniques et pour leur faible masse volumique par rapport à celle des bétons ordinaires.

Liste des figures

Figures	Titre de figure	Page
Figure I.1	Feuilles de marbre en BP	14
Figure I.2	Canal de drainage en BP	15
Figure I.3	Un revêtement protecteur époxydique polymère, polyuréthane ou acrylique	16
Figure I.4	un bâti d'une machine de tournage en béton polymère	17
Figure II.1	Schéma du dispositif de flexion 3-points	46
Figure II.2	Machine d'essai	47
Figure II.3	Charges minérales utilisées dans la confection du béton	48
Figure II.4	Analyses granulométriques	50
Figure II.5	Cire de démoulage	51
Figure II.6	Les moules prismatiques	51
Figure II.7	La balance	52
Figure II.8	Constituants du BR et processus de malaxage	53
Figure II.9	Échantillons prismatiques en BR	53
Figure III.1	comportement contrainte / déplacement des poutres en flexion statique pour différentes formulations	63
Figure III.2	Courbe des valeurs individuelles de la contrainte en fonction des formulations	67
Figure III.3	Courbes d'interaction de la contrainte en fonction du déplacement des différentes formulations	67
Figure III.4	Comparaison des moyennes par le test du Tukey	68
Figure III.5	Diagramme des valeurs résiduelles de la contrainte (MPa)	70

Liste des tableaux

Tableaux	Titre des tableaux	page
Tableau II.1	Dimensions et vitesses d'essai.	46
Tableau II.2	Analyse granulométrie du sable de carrière.	49
Tableau II.3	Analyse granulométrie de la poudre de marbre.	49
Tableau II.4	Proportion des formulations en béton résineux.	53
Tableau III.1	Caractéristiques mécaniques (contrainte, déplacement) des différentes formulations du BR obtenu expérimentalement par des essais de flexion.	64
Tableau III.2	Information sur les groupes utilisant la méthode de Tukey avec un intervalle de confiance de 95%.	69
Tableau III.3	Analyse de la variance des différentes formulations.	69

Résumé :

Les bétons polymères sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles et dans le génie-civil, pour leurs excellentes propriétés mécaniques et pour leur faible masse volumique par rapport à celle des bétons ordinaires. Le travail proposé est une étude expérimentale du comportement mécanique du béton polymère sollicité en flexion 3-points en statique. Les éprouvettes prismatiques seront dimensionnées selon la norme ASTM C580-02 et confectionnées avec un béton polymère constitué d'une matrice en résine avec un taux constant en masse de 14% et d'un squelette (renfort) granulaire à base de grains de sable de carrière et de poudre de marbre avec différentes compositions.

:

البوليمر في العديد من التطبيقات الصناعية في الهندسة المدنية، لخصائصها الميكانيكية لأنها
كان عليه من الخرسانة العادية . العمل المقترح هو دراسة
تجريبية سلوك الميكانيكي الخرسانة البوليمرية 3 .
يتم قياس العينات المنشورة حسب المعيار ASTM C580-02 . العينات
14 و حبيبات

Référence Bibliographique

- [1] Oussama ELALAOUI. Optimisation de la formulation et de la tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde. Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2012, 194 p.
- [2] Murhaf HAIDAR. Optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde. Thèse de Doctorat, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil-L2MGC-EA4114, Université de Cergy-pantoise , 2011, 198 p.
- [3] <http://french.everychina.com/f-z51da9c6/p-90561579/showimage1.html>
- [4] <http://french.alibaba.com/product-gs/polymer-drainage-channel-drain-trench-gutter-resin-concrete-drainage-trench-565678170.html>
- [5] <http://www.algisol.com/revetement-sol.php>
- [6] <http://www.machine-outil.com/actualites/t229/a2524-l-usinage-vertical-d-arbres-avec-4-axes-sur-centre-de-tournage-vtc-d-emag.html>
- [7] M. Muthukumar, D. Mohan. Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion. European Polymer Journal 40 (2004) 2167–2177.
- [8] Muthukumar M, Mohan D, Rajendran M. Optimization of mix proportions of mineral aggregates using Box Behnken design of experiments. Cem Concr Compos 2003;25:751 8.
- [9] Jane Proszek Gorninska^{*}, Denise C. dal Molin^b, Claudio S. Kazmierczaka. Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete. Journal of Cement and Concrete Research 34 (2004) 2091–2095.
- [10] J.P. Gorninski, D.C. Dal Molin, C.S. Kazmierczak, C. Pauletti, PolyPolymer concrete based on polyester resin and fly ash as filler, Tenth International Congress on Polymers in Concrete, Honolulu, 2001, pp. 300– 311.
- [11] H. Abdel-Fattah, M. El-Hawary, Flexural behavior of polymer concrete, Constr. Build. Mater. 13 (1999) 253– 262.

- [12] M. Oshima, W. Koyanagi, Thermal properties and temperature dependency of mechanical properties of resin concretes for structural use, in: L. Sierra (Ed.), Proceedings of the 10th International Congress on Polymers in Concrete and ICPIIC/ICRI International Concrete Repair Workshop, ICAR, Honolulu, 2001, pp. 910–926.
- [13] Leon Agavriloaie, Stefan Oprea, Marinela Barbuta, Florentina Luca. Characterisation of polymerconcrete with epoxy polyurethane acryl matrix. *Journal of Construction and Building Materials* 37 (2012) 190–196.
- [14] Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens. SR EN 12390-5:2002.
- [15] F.J.C. Del Vecchio, J.M.L. Reis, H.S. da Costa Mattos. Elaston-viscoplastic behaviour of polyester polymer mortars under monotonic and cyclic compression *Journal of Polymer Testing* 35 (2014) 62–72.
- [16] J.M.L. Reis, Effect of textile waste on the mechanical properties of polymer concrete, *Mater. Res.* 12 (2009) 63–67.
- [17] M. Heidari-Rarani a, M.R.M. Aliha b,c, M.M. Shokrieh d, M.R. Ayatollahi c. Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings – An experimental study. *Journal of Construction and Building Materials* 64 (2014) 308–315.
- [18] Shokrieh MM, Heidari-Rarani M, Shakouri M, Kashizadeh E. Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete. *Constr Build Mater* 2011;25 :3540–9.
- [19] http://biol09.biol.umontreal.ca/bio2041e/Sujet_09-Anova.pdf
- [20] <http://www.cons-dev.org/elearning/stat/parametrique/5-3/5-3.html>