

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DU 08 MAI 1945 GUELMA

SPÉCIALITÉ : Génie Civil

Par :

Naziha BENZANNACHE

Caractérisation mécanique des bétons polymères à base de résine renforcés par des granulats

JURY

Président :	M. NOUAOURIA Med Salah	(Pr. Université de Guelma)
Encadreur :	M. BEZAZI Abderrezak	(Pr. Université de Guelma)
Rapporteurs :	M. AMZIANE Sofiane	(Pr. Université Clermont Ferrand France)
	M. REDJEL Bachir	(Pr. Université d'Annaba)
	M. HARKATI El Hadi	(MCA Université de Tébessa)

Année : 2017

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- *Aux mémoires de mon père et ma fille*
- *ma mère,*
- *mon mari et mes enfants,*
- *mes frères et sœurs, principalement ma sœur **NADRA** à qui je souhaite un prompt rétablissement,*
- *mon beau père, mes beaux frères, mes belles sœurs, et ma belle fille ;*
- *mes neveux et nièces ;*
- *mes amies*

Qu'ils trouvent tous, dans ce travail mes sincères remerciements et ma gratitude pour leurs encouragements qu'ils n'ont cessé de me donner durant toute cette période.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, le professeur **BEZAZI Abderrezak**, pour son accueil au sein de son Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM), sa disponibilité, son entier investissement et ses conseils qui ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens aussi à remercier le professeur **NOUAOURIA M^{ed} Salah** de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Mes sincères remerciements se dirigent aussi vers le professeur **AMZIANE Sofiane** d'avoir accepté d'examiner ce travail et aussi pour sa contribution dans la correction de l'article.

Aussi je tiens à remercier vivement Professeur **SCARPA Fabrizio** pour ses précieux conseils dans la correction de l'article.

Mes vifs remerciements vont aussi vers le professeur **REJEL Bachir** ainsi que le maître de conférences **HARKATI El Hadi**, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être mes examinateurs.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à mon amie de toujours **M. BOUMAAZA** pour tout son soutien qu'elle ne cesse de me donner, ton amitié me va droit au cœur. Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire LMANM, notamment **H. BOUCHELAGHEM, S. AMROUN, A. SAIDIA**, pour l'aide procuré.

Enfin, mes sincères remerciements et ma gratitude s'adresse aussi à toute ma famille notamment mon mari **Ahmed**, mes enfants, **Housseem, Lina** et **Salah Eddine** et mes sœurs pour m'avoir aidé, encouragé et supporté durant toute cette période.

Résumé

Les bétons polymères (BPs) sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles et dans le génie civil, pour leurs bonnes propriétés mécaniques et pour leur faible masse volumique par rapport à celle des bétons ordinaires. Les BPs sont des composites constitués principalement d'une matrice et de renforts. La matrice est en général une résine qui joue le rôle d'un liant, les renforts les plus connus et fréquemment utilisés sont les granulats et les rajouts qui peuvent être d'origine industrielle tel que les déchets de marbre sous forme de poudre ce qui contribue d'une part à la protection de l'environnement et d'autre part à la sauvegarde et la valorisation des ressources naturelles. Dans ce contexte, le travail proposé s'intéresse à l'étude expérimentale de l'incorporation du déchet de marbre mis sous forme de poudre (M) et la substitution d'un sable commercialisé (GC) par un déchet de sable de carrière (G) dans un béton polymère. Pour cela quatorze formulations pour deux catégories de BP sont élaborées à partir d'une matrice en résine polyester avec un taux massique constant égal à 14% renforcée par GC ou G avec M. La caractérisation mécanique et l'endommagement, de ces micros bétons polymères, sont étudiés sous chargement statique et/ou fatigue cyclique, en flexion 3-points. Les résultats trouvés montrent que l'incorporation du déchet de la poudre de marbre a donné un BP plus performant en résistance, économique et écologique. Au vu des dispersions observées dans les résultats, une étude statistique est menée en utilisant le logiciel MINITAB en appliquant d'une part l'analyse de variance ANOVA et d'autre part la distribution de Weibull à 2 et à 3 paramètres. L'analyse statistique confirme l'effet significatif de l'ajout de la poudre de marbre sur les caractéristiques mécaniques du BP. L'étude du comportement en fatigue cyclique en flexion 3-points a été menée sur la meilleure formulation trouvée. L'évolution de la dégradation de la rigidité (F/F_0) et l'énergie dissipée (E_d) en fonction du nombre de cycles et du niveau de chargement ont été mises en évidence. La courbe de Wöhler a été aussi déterminée.

Mots clés : Béton polymère, résine polyester, poudre de marbre, flexion 3-points, fatigue cyclique.

Abstract

Polymeric concretes (PCs) are used in many industrial applications and in civil engineering, for their good mechanical properties and for their low density compared to ordinary concretes. PCs are composites constituted by a matrix and reinforcements. The matrix is generally a resin that acts as a glue, known and frequently used reinforcements are aggregates and additions can be from industry such as marble waste in form of powder contributing to on the one hand to the protection of the environment and on the other hand to the preservation and enhancement of natural resources. In this context, the proposed work focuses on the experimental study of the incorporation of powder marble waste (M) and the substitution of commercialized sand (GC) with quarry sand (G) in a polymer concrete. For this, fourteen formulations for two categories of PCs are produced with a polyester resin matrix having a constant mass ratio equal to 14% reinforced by GC or G with M. The mechanical characterization and the damage of these micron concrete polymers are studied under static loading and/or cyclic fatigue, in 3-point bending. The results found show that the incorporation of the marble powder wastes gave a better PC resistance, economic and ecological. In view of the dispersions observed in the results, a statistical study is conducted using the MINITAB software, firstly applying the analysis of variance ANOVA and secondly the Weibull distribution with 2 and 3 parameters. Statistical analysis confirms the significant effect of the addition of marble powder on the mechanical characteristics of the BP. The study of cyclic fatigue behavior, under 3-point bending, is conducted on the best formulation found. The evolution of the stiffness degradation (F/F_0) and the dissipated energy (E_d) as a function of the number of cycles and the loading level r have been highlighted. The Wöhler curve has also been determined.

Key words: Polymer concrete, polyester resin, marble powder, 3-point bending, cyclic fatigue.

ملخص

يتم استخدام الخرسانة البوليمرية في العديد من التطبيقات الصناعية والهندسة المدنية، لخصائصها الميكانيكية الممتازة والكثافة المنخفضة مقارنة بالخرسانة العادية. الخرسانة البوليمرية هي مركبات تتكون أساساً من مصفوفة و التعزيز. المصفوفة هي عموماً الراتج الذي يلعب دور اللصق، والتعزيزات المعروفة والمستخدمة في كثير من الأحيان هي المجاميع والإضافات التي يمكن أن تكون من أصل صناعي مثل نفايات مسحوق الرخام من أعمال الرخام الذي يسهم من جهة، إلى حماية البيئة، ومن ناحية أخرى إلى الحفاظ على الموارد الطبيعية وتعزيزها. وفي هذا السياق، يركز العمل المقترح على الدراسة التجريبية لدمج نفايات الرخام المسحوق (M) واستبدال الرمل التجاري (GC) برمالم المحجر (G) في الخرسانة البوليمرية. يتم إنتاج أربعة عشر تركيبة لفتتين من BP من مصفوفة راتج البوليستر معززة من قبل GC أو G مع M. يتم دراسة التوصيف الميكانيكي والأضرار لهذه البولي مرات الخرسانية تحت تحميل ثابت و/أو التعب الدوري، في الانحناء 3 نقاط. وأظهرت النتائج أن دمج نفايات مسحوق الرخام أعطى BP أفضل مقاومة واقتصادي وبيئي. وبالنظر إلى التشتت الملاحظ في النتائج، أجريت دراسة إحصائية باستخدام برنامج MINITAB، أولاً تطبيق تحليل التباين أنوفا وثانياً توزيع وبيبل في 2 و 3 المعلمات. يؤكد التحليل الإحصائي التأثير الهام لإضافة مسحوق رخامي على الخصائص الميكانيكية BP. قد أظهرت دراسة سلوك التعب الدوري في الانحناء من 3 نقاط على أفضل صياغة وجدت في ثابت أن تدهور الصلابة كدالة لعدد من الدورات لمستوى تحميل معين يتميز ثلاث مراحل مختلفة. تطور صلابة (F/F_0) كدالة لمستويات التحميل وعدد من الدورات مماثلة لتلك التي من تبدد الطاقة (E_d).

الكلمات المفتاحية: الخرسانة البوليمرية، راتج البوليستر، مسحوق الرخام، الانحناء ثلاثي النقاط، التعب الدوري

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Table des matières.....	7
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	14
Introduction générale.....	15

Chapitre I : Etude bibliographique

1.1. Généralités sur les bétons polymères.....	19
1.2. Historique des BP.....	19
1.2.1. Classification des bétons résineux.....	20
1.3. Polymères et polymérisation.....	24
1.3.1. Polymères.....	24
1.3.2. Polymérisation.....	27
1.4. Constituants du béton polymère et domaines d'applications.....	27
1.4.1. Constituants des bétons polymère.....	27
1.4.2. Domaines d'applications des bétons résineux.....	29
1.5. Synthèse des travaux réalisés sur les bétons polymères.....	34
1.5.1. Comportement en statique.....	34
1.5.2. Comportement en fatigue.....	46
1.6. Conclusion.....	50

Chapitre II : Mode de préparation des échantillons et techniques expérimentales.

2.1. Mode de Préparation du béton polymère et matériaux utilisés.....	52
2.1.1. Caractérisation des matériaux utilisés.....	52
2.1.1.1. <i>Liants polymériques.....</i>	<i>52</i>
2.1.1.2. <i>Charges minérales.....</i>	<i>53</i>
2.1.2. Préparation du béton polymère.....	57
2.2. Techniques expérimentales.....	62
2.2.1 Propriétés physiques.....	62
2.2.1.1. <i>Mesure de la masse volumique.....</i>	<i>62</i>
2.2.1.2. <i>Mesure de la porosité accessible à l'eau.....</i>	<i>64</i>
2.2.1.3. <i>Diffractomètre à rayons X (DRX).....</i>	<i>64</i>
2.2.2 Essais de caractérisation mécanique.....	65
2.2.2.1. <i>Essais statique de flexion 3- points.....</i>	<i>65</i>

Chapitre III : Résultats et discussions des essais en statique.

3.1. Formulations des BP.....	70
3.2. Résultats expérimentaux et analyse des essais physico mécaniques.....	71
3.2.1. Essais physiques.....	71
3.2.1.1. <i>Masse volumique.....</i>	<i>71</i>
3.2.2.2. <i>Porosité accessible à l'eau.....</i>	<i>72</i>
3.2.3.3. <i>Diffractomètre à Rayons X.....</i>	<i>73</i>
3.2.2. Essais mécaniques.....	76
3.2.2.1. <i>Essais de flexion trois points.....</i>	<i>77</i>
3.2.3. Faciès de rupture et d'endommagement.....	85
3.3. Etude statistique par analyse de variance ANOVA.....	85
3.3.1. Concepts de base de l'analyse de variance ANOVA.....	85

3.3.1.1. Aspects mathématiques.....	87
3.3.2. Résultats de l'analyse de variance.....	88
3.4. Analyse statistique par la distribution de Weibull.....	92
3.4.1. Résultats et discussions.....	92
3.5. Valorisation de l'incorporation de la poudre de marbre M et la substitution du sable GC par le sable de carrière G sur la résistance des poutres en flexion.....	99
3.6. Conclusion.....	102

Chapitre IV : Analyse et discussion des essais en fatigue cyclique

4.1. Mécanisme de la fatigue.....	104
4.2. Etude expérimentale de l'essai de fatigue.....	104
4.2.1. Matériaux et conditions d'essais.....	105
4.3 Résultats et discussions.....	106
4.3.1. Perte de charge F/F_0	106
4.3.2. Analyse des boucles d'hystérésis.....	108
4.3.3. Énergie dissipée.....	115
4.3.4 Courbe de Wöhler (S-N).....	117
4.4. Conclusion.....	119
Conclusion générale.....	120
Références Bibliographiques.....	122
Productions scientifiques.....	128

Liste des figures

Figure 1.1 : Classification des bétons résineux.	21
Figure 1.2 : Différentes formes de polymères.	25
Figure 1.3 : Feuilles de marbre en BP.	30
Figure 1.4 : Canal de drainage en BP.	31
Figure 1.5 : Bâti d'une machine de tournage en béton polymère.	32
Figure 1.6 a : Revêtement de plancher industriel.....	32
Figure 1.6 b : Revêtement protecteur époxydique polymère, polyuréthane ou acrylique.	33
Figure 1.7 : Contrainte de compression en fonction du taux et du type de résine.	36
Figure 1.8 : Effet du type de résine et de cendres volantes sur la résistance de compression axiale.	36
Figure 1.9 : Courbe du module de Young en fonction du taux de polymère et de la vitesse de chargement.	37
Figure 1.10 : Courbes contrainte de flexion en fonction de la température du mortier polymère polyester et époxy.	38
Figure 1.11 : Résistance résiduelle à la flexion des mortiers polymères époxy et polyester après exposition à 50 et 100 cycles positifs de fatigue thermique (20 ° C / 100 ° C).	38
Figure 1.12 : Variation de la résistance de traction et de la ténacité du béton polymère en fonction des cycles thermiques.	39
Figure 1.13 : Effet du taux de polymère sur les résistances en flexion et compression du béton polymère époxyde.	40
Figure 1.14 : Influence de la température sur les résistances résiduelles du béton polymère (PM) et du béton de ciment ordinaire (BCO).	40
Figure 1.15 : L'effet de la variation de la poudre de marbre (> 0,1 cm): basalte (0,5-1,0 cm) sur la résistance à la compression du BP.	43

Figure 1.16 : Contrainte de compression en fonction des dimensions des particules de marbre.....	44
Figure 1.17 : Courbes charge-déplacement de comparaison de toutes les fibres naturelles: a) de flexion, b) de l'énergie de rupture.	45
Figure 1.18 : Effets de la variation des taux a) de la résine pour 6.4% de cendre volante, b) des cendres volantes pour 12.4% de résine sur la résistance en compression du BP.	45
Figure 1.19 : Courbes types Charge - déplacement du mortier polymère d'huile de ricin renforcé de la fibre de piassava.	46
Figure 1.20 : Courbe de Wöhler.	47
Figure 1.21 : Evolution du niveau de chargement en fonction du nombre de cycle (N_5). ...	48
Figure 1.22 : Propriétés dynamiques moyennes des trois différents bétons.	49
Figure 1.23 : Le modèle de la poutre séparée avec cinq parties uniformément espacées pour analyser le changement des propriétés dynamiques des dommages locaux.	49
Figure 1.24 : Propriétés de rigidité distribuées dans le sens de la longueur: (a) raideur dynamique et (b) facteur de perte.	50
Figure 2.1 : Les différentes charges minérales.	54
Figure 2.2 : Masse volumique des granulats.	54
Figure 2.3 : Courbes granulométriques.	56
Figure 2.4 : a) Cire de démoulage, b) Moules prismatique, c) Moule en acier démontable.	59
Figure 2.5 : a) Balances de mesure, b) Constituants du BP et processus de malaxage.	60
Figure 2.6 :Echantillons démoulés du mortier polymère avec différentes formulations.	61
Figure 2.7 :. Balance pour pesée hydrostatique	62
Figure 2.8 Diffractomètre à rayon X.	63
Figure 2.9 :.Machine d'essai universel de type <i>ZWICK ROELLE Z005</i>	66
Figure 2.10 : Principe de l'essai de flexion 3-points.	67
Figure 2.11 : Différents paramètres pour l'étude en fatigue cyclique du BP.	68
Figure 3.1 : Masse volumique des BPs en fonction du taux de marbre.	72
Figure 3.2 : Porosité en fonction des différentes formulations.	72

Figure 3.3 : Contrainte en fonction de la Porosité.	73
Figure 3.4 : Diffraction des rayons X du sable G.	74
Figure 3.5 : Diffraction des rayons X du sable GC.	75
Figure 3.6 : Diffraction des rayons X de la poudre de marbre M.	76
Figure 3.7 : Contrainte-déplacement des formulations G0 M86 et GC0 M86... ..	77
Figure 3.8 : Contrainte-déplacement des formulations G16 M70 et GC16 M70.	78
Figure 3.9 : Contrainte-déplacement des formulations G26 M60 et GC26 M60.	79
Figure 3.10 : Contrainte-déplacement des formulations G43 M43 et GC43 M43.	79
Figure 3.11 : Courbes contrainte-déplacement des formulations G60 M26 et GC60 M26... ..	80
Figure 3.12 : Contrainte-déplacement des formulations G70 M16 et GC70 M16... ..	81
Figure 3.13 : Contrainte-déplacement des formulations G86 M0 et GC86 M0.....	82
Figure 3.14 : Contrainte de flexion en fonction du taux de marbre... ..	84
Figure 3.15 : Module de Young en fonction du taux de marbre,	84
Figure 3.16 : Faciès de rupture des éprouvettes en fonction du taux de marbre. a)86%, 70% et 60%,et 43%, b) 26%, 16% et 0%.	86
Figure 3.17 : Courbe des valeurs individuelles de la contrainte en fonction des formulations (a) avec sable GC et poudre de marbre M, (b) avec sable G et poudre de marbre M	89
Figure 3.18 : Comparaison des moyennes par la méthode de Tukey.	91
Figure 3.19 : Courbe résiduelle caractérisée par la droite de Henry : (a) pour le sable GC et (b) pour le sable G.	91
Figure 3.20 : Distribution de Weibull pour les contraintes à la rupture des échantillons du BP respectivement avec GC et G : (a) et (b) à 2 paramètres, (c) et (d) à 3 paramètres.	94
Figure 3.21 : Distribution de Weibull pour les déplacements à la rupture des échantillons du BP avec GC: (a) à 2 paramètres, (b) à 3 paramètres.	96
Figure 3.22 : Distribution de Weibull pour les modules d'élasticité des échantillons du BP avec GC ou G: (a) et (b) à 2 paramètres, (c) et (d) à 3 paramètres.	100
Figure 3.23 : Comparaison des prix des différents constituants du BP et des meilleures formulations.	101
Figure 4.1 : Procédure d'essai.	106

Figure 4.2: Evolution de la perte de charge F/F_0 en fonction du nombre de cycles N pour différents niveaux de chargement r	107
Figure 4.3: Evolution de la perte de charge F/F_0 en fonction du nombre de cycles N pour le niveau de chargement $r = 0.75$	109
Figure 4.4: Boucles d'hystérésis pour les différents niveaux de chargement.	112
Figure 4.5: Forme des boucles d'hystérésis ($N = 1$ cycle) du BR pour les différents niveaux de chargement r	112
Figure 4.6: Courbes charge-déplacement pour des nombres de cycles N spécifiques.	115
Figure 4.7 : Boucle d'hystérésis pour déterminer l'énergie dissipée en (mJ).	116
Figure 4.8 : Energie dissipée en (mJ) pour $r = 0,55$ en fonction du nombre de cycle N	117
Figure 4.9 : Energie dissipée en fonction du nombre de cycle N	118
Figure 4.10 : Courbe de Wöhler.	120

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Propriétés types des bétons de résine et du béton de ciment Portland.	24
Tableau 1.2 : Principales différences entre les matrices TP et TD.	26
Tableau 1.3 : Propriétés types de quelques résines thermodurcissables.	28
Tableau 2.1 : Caractéristique de la résine polyester.	53
Tableau 2.2 : Analyse granulométrique du sable de carrière (G).	55
Tableau 2.3 : Analyse granulométrique du sable de carrière (GC).	55
Tableau 2.4 : Analyse granulométrique de la poudre de marbre (M).	56
Tableau 2.5 : Formulation du béton polymère élaboré avec le sable commercialisé (GC) et le déchet de sable de carrière (G) et le déchet de poudre de marbre (M).	58
Tableau 2.6 : Dimensions et vitesse de chargement pour les essais de flexion.	64
Tableau 3.1 : Formulation du béton polymère élaboré avec le sable commercialisé GC et le déchet de sable de carrière G et le déchet de poudre de marbre M.	70
Tableau 3.2 : Masse volumique des différentes formulations.	71
Tableau 3.3 : Valeurs moyennes des contraintes de flexion pour les différentes formulations et les déplacements respectifs.	83
Tableau 3.4 : Analyse de variance ANOVA.	87
Tableau 3.5 : Analyse de la variance pour les différentes formulations avec GC and G.	88
Tableau 3.6 : Information sur les groupes utilisant la méthode de Tukey avec un intervalle de confiance de 95% pour GC et G.	90
Tableau 3.7 : Résultats des probabilités de Weibull pour les contraintes à la rupture des 2 et 3 paramètres en fonction des formulations avec GC et G.	95
Tableau 3.8 : Résultats des probabilités de Weibull à 2 et 3 paramètres pour les déplacements à la rupture en fonction des formulations du BP avec GC et G.	97
Tableau 3.9 : Résultats des probabilités de Weibull à 2 et 3 paramètres pour les modules d'élasticité en fonction des formulations du BP avec GC et G.	98

Introduction générale

Le béton ordinaire à base de ciment Portland est un matériau, d'utilisation en construction, largement répandue. Son faible coût et sa résistance de compression élevée ont largement contribué pour son acceptation universelle. Toutefois, il présente quelques inconvénients dont la plupart sont imputables au liant qui est à base de ciment Portland. Ces inconvénients sont une faible résistance en flexion et en traction, une porosité élevée, une détérioration au gel, dégel ainsi que sa destruction par des produits corrosifs.

La demande d'un matériau plus résistant et plus durable pour la construction, a conduit depuis déjà quelques décennies au développement d'un matériau composite, relativement récent, appelé le béton polymère (BP), micro béton polymère ou encore béton résineux. Dans ce matériau la matrice inorganique de ciment hydraté conventionnelle est remplacée par une matrice polymère. Par sa résistance élevée et sa légèreté, le BP trouve déjà plusieurs applications comme : éléments préfabriqués dans le bâtiment, tabliers de ponts, conteneurs de déchets dangereux, canalisations des eaux usées, bâti de machines, carreaux de planchers en marbre synthétique et panneaux d'escaliers.

Le remplacement du ciment portland par un polymère entraîne par comparaison au béton à matrice cimentaire une augmentation sensible du coût du béton du fait du coût plus élevé du polymère ainsi que celui de la main d'œuvre généralement plus qualifiée. Il importe, donc, de choisir le béton le plus approprié et le plus économique pour une utilisation donnée.

D'énormes quantités de résidus sont annuellement produites par l'industrie dans divers pays tels que les déchets de marbre, et de granite ce qui provoque de graves menaces pour l'environnement, la pollution des sols et de l'eau, et lorsque les sols sont secs, ces déchets se transforment en une fine couche de poussière qui devient un danger pour la santé publique des individus. A ce moment, la plupart des déchets sont mis en décharge et des solutions alternatives sont à l'étude dans de nombreux pays dans le but de recycler les déchets dans un matériau durable.

Le principal atout des BPs par rapport aux bétons ordinaires est leur grande capacité à intégrer les produits de déchets recyclés, à cause de la nature hermétique de la matrice (résine). Le recyclage et l'encapsulation des déchets constituent aujourd'hui un marché émergent dans la fabrication des BPs. Les déchets industriels comme, les cendres volantes, les sables de fonderie et les granulés de liège et de caoutchouc de pneus ont été utilisés avec succès en substitution des composants de charge et d'agrégats minéraux dans les BPs. Alors que pour la poudre de marbre, plusieurs travaux ont abordé son recyclage dans le béton de

ciment portland, ainsi que pour les chaussées asphaltées, par contre pour le BPs peu de recherches se sont intéressées à ce problème.

Dans ce contexte, ce travail de thèse a pour objectif la valorisation de résidus minéraux comme ajout dans les bétons polymères, tels que les déchets de marbre issue des marbreries mis sous forme de poudre, ainsi que le déchet de sable de carrière récupéré, comme renfort dans une matrice de résine polyester, en substitution totale ou partielle d'un sable commercialisé importé de l'étranger. Ainsi, outre les avantages environnementaux (recyclage de déchets) évidents, viables et réalisables ces solutions conduiraient également à des avantages économiques.

Dans le cadre de cette thèse, quatorze formulations pour deux types de BP sont élaborées à partir d'une matrice en résine polyester avec un taux massique constant égal à 14% renforcé par différents taux de granulats et de poudre de marbre. Le premier type est composé d'un sable commercialisé (GC) et d'une poudre de marbre (M), quand au second, il est constitué d'un déchet de sable de carrière (G) et aussi avec la même poudre de marbre dont les taux en pourcentage sont respectivement : 0/86, 16/70, 26/60, 43/43, 60/26, 70/16 et 86/0. Ces formulations ont été élaborées dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques avec l'incorporation de la poudre de marbre en substitution totale ou partielle d'un sable. Cette recherche est structurée selon quatre chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique retraçant les travaux de recherches antérieures sur les mortiers et les bétons polymères. Deux parties sont considérées, la première est consacrée à la présentation des différentes classes de béton et de mortiers de résine, de leurs domaines d'application. Quand à la deuxième partie, elle regroupe les résultats des différents travaux concernant, l'optimisation des différentes formulations, le comportement mécanique et la durabilité des BPs au sein desquels sont incorporés des déchets industriels.

Les méthodes et techniques de caractérisation expérimentales sont présentées dans le deuxième chapitre, afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques des différents matériaux utilisés (résine polyester, sable de carrière (G), sable commercialisé (GC), poudre de marbre), ainsi que les différentes formulations des micros béton polymères élaborées. La démarche de fabrication de ces BP est aussi décrite et discutée.

Dans le troisième chapitre, deux parties sont considérées, dans la première, les résultats obtenus des différents tests effectués et essais mécaniques statiques en flexion 3-points sont présentés et discutés. Au vu des dispersions remarquables dans les résultats, la deuxième partie est consacrée à l'étude statistique qui s'avère nécessaire en utilisant le logiciel MINITAB version 17 en utilisant d'une part la variance ANOVA afin de mettre en évidence l'influence des facteurs explicatifs (variable indépendante c'est-à-dire les taux de

granulats et poudre de marbre) et voir s'ils ont un impact significatif sur les variables dépendantes (contrainte et déplacements à la rupture). D'autre part les distributions de Weibull à 2 et à 3 paramètres permettant ainsi d'estimer les caractéristiques mécaniques (contrainte et déformation à la rupture et module de Young) des bétons polymères testés. Les résultats sont aussi comparés avec d'autres travaux reportés dans la littérature.

L'analyse du comportement en fatigue cyclique en flexion 3-points du BP effectuée pour la formulation donnant les meilleures caractéristiques mécaniques en statique est présentée dans le quatrième chapitre. Les essais de fatigue sont conduits en contrôlant le signal déplacement qui est de type sinusoïdal avec une fréquence de 2 Hz. La perte de rigidité, les boucles d'hystérésis et les énergies dissipées sont calculées à partir des données expérimentales en contrôle déplacement en fonction du nombre de cycles et pour les différents niveaux de chargements utilisés.

Enfin, la thèse s'achèvera par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats et une présentation des perspectives à envisager lors d'études futures.

Chapitre I

Recherche bibliographique

Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les différentes classes du béton et mortier de résine, les constituants éventuels dont le type de polymère utilisé en tant que liant ainsi que les différentes applications possibles dans le domaine du génie-civil. De nombreux chercheurs et industriels se sont intéressés au béton polymère pour trois raisons principales : la première est la possibilité d'incorporation de déchets dans ce type de matériau ce qui contribue à la protection de l'environnement par recyclage de déchets industriels et la deuxième c'est bien la revalorisation de déchets minéraux provenant des carrières comme par exemple ceux du granit et marbre. Une synthèse bibliographique sera effectuée sur les travaux réalisés sur l'optimisation des constituants de ce type de béton polymère, par l'étude de la durabilité ainsi que du comportement mécanique du matériau en statique et fatigue cyclique.

1.1. Généralités sur les bétons polymères

Le béton polymère est constitué de charges minérales (granulat, sable, ...) et d'un liant polymère. On l'appelle aussi béton résineux synthétique ou béton résineux plastique. La légèreté de ce matériau facilite énormément sa mise en chantier et la présence de résine réduit l'absorption d'eau et garantit ainsi sa complète étanchéité. Ces matériaux résistent bien à l'abrasion et possèdent une grande stabilité aux cycles gel-dégel. En outre, comme ils ont une plus grande résistance mécanique comparativement aux bétons conventionnels fabriqués à base de ciment portland, ils permettent d'économiser jusqu'à 50% de matériau. Ainsi, pour certaines applications spécifiques, ils concurrencent les bétons conventionnels. La résistance aux agents chimiques et les caractéristiques mécaniques dépendent essentiellement de la quantité et nature du polymère utilisé ainsi que la nature, la taille et les proportions des charges. Lorsque la charge est du sable, le composite obtenu est appelé béton ou mortier de résine. Parmi les autres matériaux de charge, on trouve : la pierre concassée, le gravier, le calcaire, la craie, poudre de marbre, cendre volante ... etc.

1.2. Historique des BP

L'utilisation de composés polymères dans la construction est une pratique ancienne. Dans l'histoire des débuts de l'humanité, il est prouvé que les gens avaient l'expérience de combiner des polymères organiques avec des matières inorganiques pour produire un matériau de construction durable, de haute résistance. Toutefois, l'application historique la plus connue de mortiers polymère dans la construction est peut-être la *Grande Muraille de Chine*, deux mille ans avant notre ère, le mortier préparé avec la pâte de riz gluante et la chaux a été utilisé pour consolider les murs de briques de ce grand monument, l'un des sept merveilles du monde [WAN-81], [RIB 06].

Apparemment, la première indication de l'utilisation de polymères naturels dans le béton de ciment était en 1909, aux États-Unis, quand un brevet a été accordé à la *LH Backland*. Treize ans plus tard, en France, un autre brevet sur la modification du polymère naturel pour mortier de ciment était accordé à *ME Varegyas* [CHA- 94].

En Grande-Bretagne, le béton polymère a progressé en 1923 avec le brevet de *L. Cresson* pour le matériau de revêtement des chaussées en caoutchouc modifié. Le brevet porte sur les matériaux de revêtement avec des latex de caoutchouc naturel où le ciment a été utilisé comme matériau de remplissage. En 1924, avec le développement de *L. Lefebure* latex de caoutchouc naturel ciment, le premier brevet avec le concept actuel de la modification des polymères a été publié, et plus tard, en 1925, un autre brevet concernant l'innovation sur ce produit a été délivré à *Kirkpatrick*. Tout au long des années 1920 et les années 1930, les bétons polymères modifiés utilisant le latex de caoutchouc naturel ont été largement développés [ACI 03].

Les mortiers et bétons polymère se sont développés entre la fin des années 1950 et le début des années 1960 et deviennent les matériaux de construction privilégiés, dans certaines applications, au Japon et en Europe vers les années 1970 et aux États-Unis dans les années 1980. A présent, ils sont des matériaux de construction assez courants [OHA-10].

1.2.1 Classification des bétons polymères

Le concept général des composites du béton polymère, du point de vue technique, implique un processus par lequel les produits chimiques (monomères, oligomères, pré polymères et polymères) introduit dans un mélange de béton sont soumis à une polymérisation et une polycondensation par des systèmes thermo-catalytiques ou autres. Les composites types béton-polymère sont des matériaux fabriqués par le remplacement et le renforcement d'une partie ou de la totalité du liant du ciment hydraté du mortier ou du béton conventionnel avec des polymères. Les composites de béton polymère sont généralement classés en trois types (Figure 1.1) suivant les principes des processus technologiques [OHA-10].

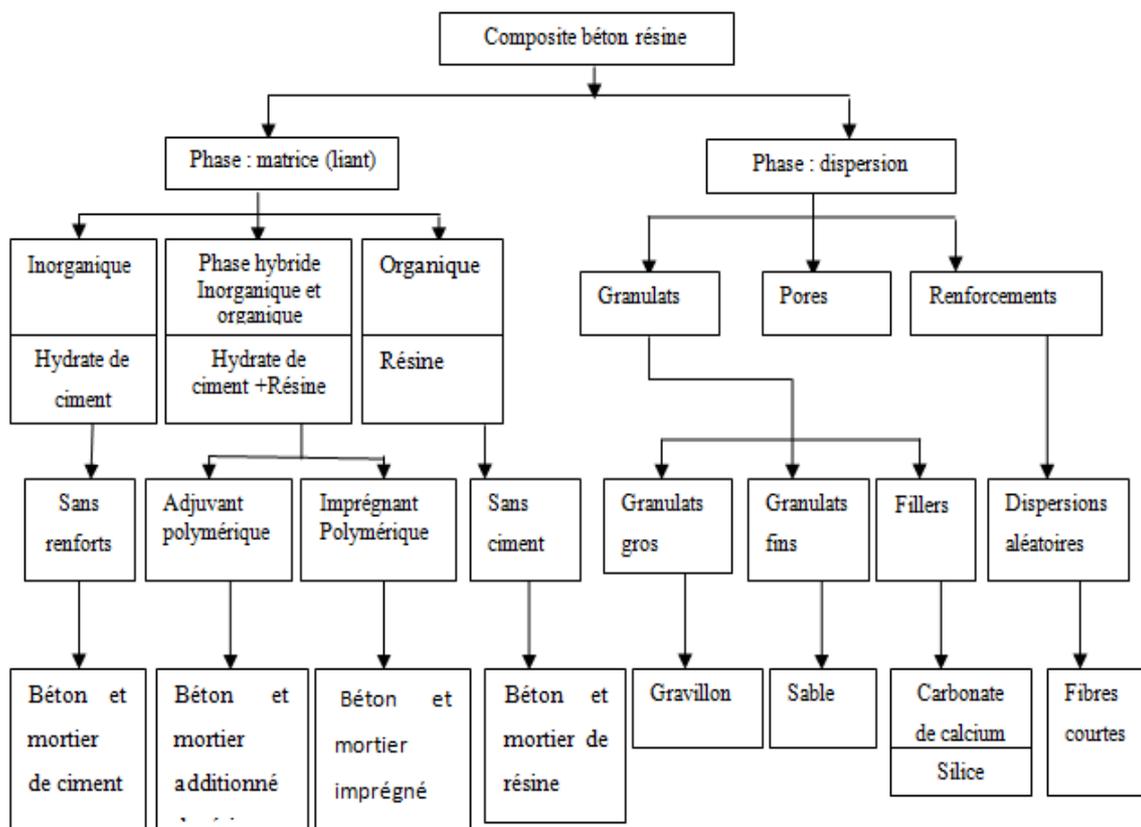


Figure 1.1 : Classification des bétons polymères [OHAM 10].

1.2.1.1 Le béton imprégné de résine

On obtient ce béton en imprégnant du béton de ciment Portland préfabriqué et durci avec un monomère à faible viscosité (sous forme liquide ou gazeuse) qui se transforme en polymère solide sous l'action d'agents physiques (rayons ultraviolets ou chaleur) ou chimiques (catalyseurs). Le procédé consiste : à faire sécher du béton ordinaire, à chasser l'air des pores ouverts (par application du vide ou introduction du monomère sous pression) et de saturer ceux accessibles par diffusion de monomères à faible viscosité ou d'un mélange prépolymère-monomère et enfin à faire polymériser dans la masse de béton le monomère ou le mélange prépolymère-monomère par la méthode la plus économique et la plus pratique, généralement par radiation, chaleur ou amorce chimique. La caractéristique principale de ce matériau est la suivante : une grande partie des vides accessibles est remplie de polymère qui forme un réseau complet renforçant le béton. L'imprégnation peut être superficielle ou variable en profondeur selon la résistance ou la durabilité souhaitée. Le principal inconvénient du béton imprégné est son coût, les monomères utilisés pour l'imprégnation étant chers et le procédé de fabrication plus compliqué que pour le béton ordinaire [BLA-86].

L'imprégnation du béton assure une augmentation remarquable de la résistance en traction, en compression et au choc, une durabilité accrue avec une plus grande imperméabilité à l'eau et aux solutions aqueuses renfermant des sels comme les sulfates et les chlorures. La résistance en compression peut être portée de 35 à 140 MPa, l'absorption d'eau réduite considérablement et la résistance aux cycles gel-dégel améliorée de façon sensible.

1.2.1.2 Le béton additionné de résine

Le béton additionné de résine est un béton modifié dans lequel une partie du ciment (10 à 15 % en masse) est remplacée par un polymère organique synthétique. On le fabrique en incorporant au mélange à béton de ciment un monomère, un mélange prépolymère-monomère ou un polymère dispersé (latex). Pour faire polymériser le monomère ou le prépolymère-monomère, on lui rajoute un catalyseur. Le procédé de fabrication employé ressemble beaucoup à celui utilisé pour le béton ordinaire. Le béton additionné de résine peut donc être coulé sur place, tandis que le béton imprégné de polymère est réalisé à partir d'éléments préfabriqués.

Les caractéristiques du béton additionné de résine vont de piètres à excellentes selon le type de polymère utilisé. La piètre qualité de certains produits a été attribuée à l'incompatibilité entre la plupart des monomères et polymères organiques et certains ingrédients du béton. On arrive à de meilleurs résultats avec des polymères comme le polyester insaturé utilisant le styrène comme agent de réticulation, ou avec des époxydes. Pour obtenir une nette amélioration par rapport au béton ordinaire, il faut employer ces polymères en assez grande quantité; or le résultat ne justifie pas toujours les coûts additionnels.

La modification du béton au moyen d'un latex de polymère (dispersion colloïdale de particules de polymère dans l'eau) donne des caractéristiques largement améliorées pour un coût raisonnable. Il existe actuellement une grande variété de latex qui peuvent être utilisés pour fabriquer des produits en béton ou des mortiers. Parmi les plus courants, mentionnons le poly(méthacrylate de méthyle), ou latex acrylique, le poly(acétate de vinyle), les copolymères de chlorure de vinyle, le poly(chlorure de vinylidène), le copolymère styrène-butadiène, le caoutchouc nitrile et le caoutchouc naturel. Chaque polymère confère au béton des caractéristiques mécaniques particulières [BLA-86]. Le latex acrylique assure une excellente liaison, résistante à l'eau, avec les constituants du béton, tandis que les latex de polymères à base de styrène donnent une forte résistance en compression.

De façon générale, le béton modifié au latex de polymère adhère très bien à l'acier d'armature et au béton ancien; il possède une bonne ductilité, est relativement imperméable à l'eau et aux solutions aqueuses renfermant des sels, et il résiste bien à l'action des cycles gel-dégel. Sa résistance en flexion et sa ténacité sont généralement plus élevées que dans le cas du

béton non modifié. Le module d'élasticité n'est pas nécessairement plus élevé que celui du béton ordinaire; tout dépend du type de latex de polymère utilisé [BLA-86]. Le béton modifié au latex sert surtout pour le surfacage des dalles de plancher, car il ne produit pratiquement pas de poussière et son coût est abordable. En raison des bonnes qualités précitées et de son faible retrait, il se prête particulièrement bien à la réalisation de chapes minces (25 mm) pour planchers, de recouvrements de tabliers de ponts en béton et de revêtements anticorrosifs, ainsi qu'aux travaux de réparation d'ouvrages en béton.

1.2.1.3. Le béton de résine

Le béton de résine qui est un matériau composite dont le liant est constitué entièrement d'un polymère organique synthétique commence à prendre place dans le marché des matériaux de construction de grande diffusion. Désigné sous l'appellation de béton de résine synthétique, de béton de résine plastique ou de béton de polymère, il est ainsi constitué d'une charge minérale (granulat) et d'un liant de polymère, parfois thermoplastique mais généralement thermodurcissable [BLA-85]. Lorsque la charge est constituée de sable, le composite obtenu est appelé mortier de résine. Parmi les autres charges minérales figurent la pierre concassée, le gravier, le calcaire, la craie, le condensât de silice (poudre de silice, poussière de silice), le granit, le quartz, l'argile, le verre expansé et les fines métalliques, les cendres volantes, déchet de marbre ...etc. De façon générale, le béton de résine est obtenu en mélangeant à la dite charge, un monomère ou un pré polymère, un durcisseur (agent de réticulation) et un catalyseur. Différents produits peuvent aussi être ajoutés à la résine pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et physiques, faciliter sa mise en œuvre ou simplement pour en diminuer le coût. Ainsi, il est d'usage de parler de charge quand la quantité ajoutée est de quelques dizaines de % et d'additifs lorsque cette quantité ne dépasse pas quelques %.

Comparativement au béton de ciment Portland (Tableau 1.1), les bétons de résine possèdent une plus grande résistance mécanique, adhèrent bien aux autres matériaux, résistent mieux aux produits chimiques et aux agents corrosifs, absorbent moins d'eau et présentent une plus grande stabilité aux cycles gel dégel [BLA-85]. Aussi comme ils ont une plus grande résistance mécanique que le béton de ciment Portland, ils peuvent faire économiser jusqu'à 50% de matériaux concurrençant ainsi le béton conventionnel pour certaines applications spéciales. Cependant, ils présentent un fort retrait pendant et après la prise (jusqu'à dix fois plus que le béton de ciment Portland), ce qui constitue un handicap pour certaines utilisations. Ce type de béton est employé, coulé sur place ou en éléments préfabriqués, dans les travaux de construction, notamment d'édifices publics ou commerciaux, ainsi que pour la fabrication de carreaux de plancher, de tuyaux d'égout, d'escaliers et de panneaux de cloisonnement.

Tableau 1.1 : Propriétés types des bétons de résine et du béton de ciment Portland [BLA-85].

Matériaux	Masse volumique (Kg/dm ³)	Absorption d'eau (%)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Résistance en flexion (MPa)	Résistance en d'élasticité (MPa)	Module (GPa)
Poly (méthacrylate de méthyle)	2-2,4	0,05-0,6	70-210	9-11	30-35		35-40
Béton Polyester	2-2,4	0,3-1	50-150	8-25	15-45		20-40
Béton Epoxyde	2-2,4	0,02-1	50-150	8-25	15-50		20-40
Furane	1,6-1,7	0,2	48-64	7-8	-		-
Béton de ciment	1,9-2,5	5-8	13-35	1,5-3,5	2-8		20-30

En général, le remplacement du ciment Portland par un polymère engendre une augmentation sensible du coût du béton [BLA-85]. C'est pour cette raison que sa fabrication est conditionnée par la recherche de caractéristiques supérieures répondant à des besoins précis et nécessitant un coût de main-d'œuvre et des besoins en énergie moins élevés lors de sa fabrication et de sa mise en œuvre.

1.3. Polymères et polymérisation

1.3.1 Polymères :

Un polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, constituée de l'enchaînement répété d'un même motif, le monomère (du grec *monos* : un seul ou une seule, et *meros* : partie), reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes.

En général, les polymères formés à partir de chaînes linéaires non réticulées et flexibles sont souples (à certaines températures) tandis que les polymères très réticulés, formant un réseau tridimensionnel sont plus rigides (Figure 1.2). Les premiers donnent lieu à des polymères thermoplastiques, les seconds à des polymères thermodurcissables.

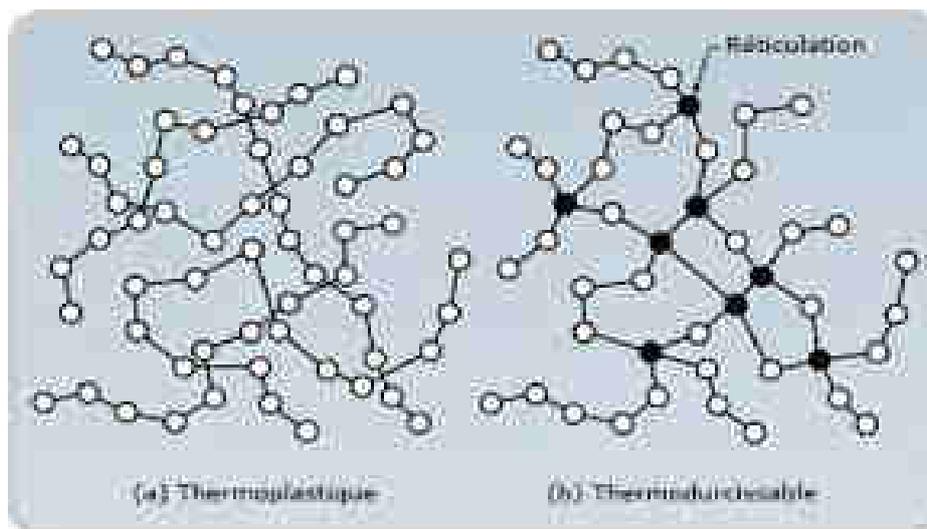


Figure 1.2 : Différentes formes de polymères [NET 11].

1.3.1.1 Thermoplastique (TP)

Se ramollit lorsqu'on la chauffe au dessus d'une certaine température, mais qui redevient solide en dessous. Cette matière conserve de façon réversible sa thermoplasticité initiale. Exemple : Les Polyéthylènes, les polypropylènes, les plastiques à base de poly (chlorure de vinyle) les polystyrènes, les acryliques, les nylons et les cellulosiques. La propriété des polymères thermoplastiques qui permet le ramollissement et durcissement répété plus ou moins indéfiniment est un avantage considérable puisqu'il est à la base du moulage ou autres transformations finales de ces matériaux. Cependant, le fait que les propriétés des matières thermoplastiques dépendent de la température les rend plus ou moins vulnérables. Ceci rend donc le matériau thermoplastique potentiellement recyclable. Ils sont de plus en plus utilisés dans diverses applications, notamment dans le bâtiment et la construction. Les thermoplastiques remplissent diverses fonctions comme éléments légers structuraux et décoratifs ou comme parties auxiliaires d'autres matériaux et éléments [BLA 1-75].

1.3.1.2 Thermodurcissable (TD)

Pour une matière thermodurcissable la modification chimique est induite par l'application de chaleur, et parfois de la pression, afin de prendre un polymère initialement liquide ou pâteux de le rendre en une matière solide. Ainsi les constituants individuels (monomères) se lient sous l'effet de l'énergie pour être plus rigide, ceci est souvent atteint en induisant des liaisons croisées (cross-linking). Un des meilleurs exemples est la vulcanisation du caoutchouc par l'addition de soufre et l'application de chaleur.

En ce qui concerne les propriétés de ces matériaux thermodurcissables, retenons que contrairement aux thermoplastiques les thermodurcissables ne peuvent être mis en œuvre

Chapitre I : Recherche bibliographique

qu'une fois seulement. Ainsi après cette polymérisation, la matière devient infusible, insoluble et une fois durcie, son arrangement moléculaire ne peut plus être modifié. C'est pour cette même raison que les thermodurcissables sont généralement très résistants à la chaleur, et ils présentent aussi une bonne résistance mécanique, diélectrique et aux produits chimiques et au fluage [BLA -75]. Etant donné que les thermodurcissables ont une résistance mécanique supérieure à celle des thermoplastiques et qu'ils offrent une meilleure tenue au fluage à la température ambiante, ils sont généralement destinés pour la fabrication d'éléments pour des applications structurales. Parmi les principaux thermodurcissables, on cite les époxydes, les polyesters insaturés les phénoliques, les aminoplastes (urée-et mélamine-formaldéhyde) et les alkydes.

Les principales différences entre les thermoplastiques et les thermodurcissables sont résumées dans le tableau (1.2) [NGU-08].

Tableau 1.2 : Principales différences entre les matrices TP et TD [NGU-08].

	Thermoplastique (TP)	Thermodurcissable (TD)
Etat de base	Solide	Liquide visqueux ou pâteux
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité renfort	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Chutes et déchets	Recyclables	Perdus ou recyclés en charges
Condition de travail	Propre	Emanation pour« méthode humide»

Les polyesters insaturés, les systèmes époxy et les résines acryliques sont les polymères les plus souvent utilisés dans les bétons polymères. Il existe aussi des bétons résineux à base de furane obtenue à partir de l'alcool furfurique. Les méthodes de transformation ou de moulage sont les mêmes que pour les thermoplastiques. On retrouve entre autre souvent dans les thermodurcissables le moulage par compression.

1.3.2 Polymérisation

La Polymérisation se définit par la réaction chimique permettant la synthèse des polymères à partir de monomères. Une simple analogie serait la fabrication d'une chaîne à partir de simples maillons. Les différents procédés de polymérisation dépendent en général de la nature des monomères que l'on fait réagir. Deux procédés sont très couramment retrouvés dans le monde des polymères. Il s'agit de la polymérisation par condensation ou par étape et par addition. La polymérisation par étape est un mécanisme de polymérisation qui procède par des étapes indépendantes. Les monomères avec deux ou plusieurs groupements fonctionnels réagissent pour former en premier lieu des dimères, ensuite des trimères et oligomères plus longs, et ensuite des polymères à chaîne longue. Ce mécanisme est à distinguer de la polymérisation en chaîne, qui procède plutôt par l'addition successive et rapide de molécules sur centre actif.

1.4 Constituants du béton polymère et domaines d'application

1.4.1 Constituants des bétons polymères

Les bétons et mortiers résineux sont constitués d'un liant organique, parfois thermoplastique mais généralement thermodurcissable, et d'une ou plusieurs charges minérales comme le sable, le gravier. Lorsque la charge est constituée de sable, le produit obtenu est appelé mortier résineux. Des fines telles que les fillers calcaires, la poudre de marbre, la fumée de silice et des cendres volantes peuvent être incorporées aux mélanges.

1.4.1.1 Le liant (la résine)

Les liants sont généralement des résines thermodurcissables qui durcissent à la température ambiante, tels que aromatique comporte un atome d'oxygène. L'alcool furfurique est un monomère qui polymérise dans un milieu acide organique pour conduire à un polymère réticulé de type thermodurcissable. Les polymères de furane sont d'une grande résistance mécanique et durable [Muth-04]. Des polyesters insaturés issus du recyclage du poly(éthylène téréphtalate) et réticulés avec du styrène sont aussi employés en tant que liant pour la fabrication de béton résineux [REB-95]. Parmi les thermoplastiques incorporés dans la formulation des mortiers résineux, on retrouve essentiellement les polyméthacrylates de méthyle obtenus par polymérisation des monomères de méthyle méthacrylate (MMA) avec comme amorceur triméthylol propane triméthacrylate (TMPTMA). Ces mortiers résineux sont plus coûteux que ceux obtenus en utilisant les polyesters insaturés et les époxydes comme liant mais leur utilisation est recommandée pour la réalisation d'ouvrages exposés à des environnements très hostiles et nécessitant une prise rapide (réparation de tablier de pont...) [BLA- 86]. Certains mortiers de résine sont à base de déchets de polystyrène expansé dissous

dans du styrène puis réticulés avec triacrylate de triméthylol propane (TMPTMA). Le tableau 1.3 présente quelques propriétés types des résines thermodurcissables [ELAL 12]

Tableau 1.3 : Propriétés types de quelques résines thermodurcissables [ELAL 12].

Résine	Masse volumique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité en traction (GPa)	Coeff de dilatation thermique (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
Polyester	1,28	45 – 90	2,5 - 4	100 - 110
Epoxydique	1,3	90 - 110	3 – 7	45 - 65
Phénolique	1,35 – 1,75	45 – 59	5,5 – 8,3	30 - 45

1.4.1.2 Les granulats (renfort)

Ils forment le squelette du béton et ils jouent un rôle très important dans la composition et la fabrication des bétons en général et le béton de résine en particulier. Ils influent les propriétés mécaniques et physiques du produit fini. En effet, la sélection adéquate des granulats peut influencer la consistance, la résistance, la durabilité du matériau. La variation de la quantité des agrégats introduits et la granulométrie peut aussi considérablement changer les propriétés finales des matériaux élaborés [ELA-12].

Les granulats pour les bétons de résine, comme pour les bétons classiques, sont généralement obtenus à partir de deux sources. Soit c'est des dépôts de sable et de graviers naturels produits par désagrégation naturelle et érosion due à l'eau courante. Ces agrégats sont principalement de la silice qui est une roche de carrière préalablement concassée et tamisée. Ces carrières comprennent le calcaire, le granit, le quartz, le marbre, le grès, ... etc. Comme matériaux de remplissage (agrégats très fins), la craie, le carbonate de calcium, l'argile, les cendres volantes, fumées de silice, des charges métalliques, et même le ciment portland, ont été utilisés avec succès dans la production du béton résineux.

En principe, n'importe quel granulats utilisables pour la fabrication des bétons ordinaires peut être utilisé pour la confection du béton de résine à condition qu'il soit propre et sec.

Les granulats influencent les modules élastiques, la durabilité, le prix du produit en béton résineux et les propriétés mécaniques principalement la résistance à travers la granulométrie et l'adhésion avec le liant [ACI-09].

1.4.1.3 Matériaux de renforcement et renforts de fibres

Dans certaines applications du BP, des fibres hachées finement sont parfois présentées comme renforts tel que les fibres de : verre, carbone, polyaramide et les fibres métalliques. Certaines propriétés mécaniques telles que la résistance, à la flexion, à la compression et la

Chapitre I : Recherche bibliographique

ténacité sont améliorées par l'incorporation de renforts de fibres [REIS 03]. Les fibres naturelles, comme le sisal, bambou, bois, chanvre et de noix de coco, qui ont été utilisées pour «renforcer» les bétons et mortiers de ciment classique, peuvent également être considérées comme des matériaux de renfort dans le BP [REIS 06], [REI 12]. Dans les applications structurales des matériaux en BP, des barres d'acier doux et à haute adhérence (pour béton précontraint), et FRP (plastique renforcé de fibres) avec des fibres de carbone ou de verre, ont également été utilisées pour renforcer les éléments en BR [TAV 02].

1.4.2 Domaines d'application des bétons résineux

Il existe trois principaux domaines d'application bien connus où les bétons de résine se sont révélés concurrentiels sur les matériaux conventionnels : revêtement des sols et chaussées ; la préfabrication ; la réparation et la réhabilitation des structures en béton. Récemment, un grand intérêt est donné pour la fabrication des bétons de résine écologiques en utilisant des produits recyclés [RIB 06]. Les applications les plus courantes et bien connues du béton résineux sont données ci-dessous :

1.4.2.1 La préfabrication

La préfabrication est l'une des applications la plus dynamique des polymères dans le béton, en raison de son rapide durcissement, sa haute résistance et sa capacité de produire des formes complexes. On peut citer :

a) Marbre artificiel

Le marbre artificiel (ou marbre reconstitué) utilisé pour la fabrication des comptoirs, toilettes et autres revêtements sanitaires, panneaux de cloisonnement, escaliers et plans de travail pour cuisines [BLA 85]. Ces produits sont moins chers que ceux réalisés avec le marbre naturel, ont l'avantage supplémentaire de résister à la corrosion et aux produits chimiques (Fig. 1.3).



Figure 1.3 : Feuilles de marbre en BP.

b) Panneaux de façade et tuiles

Les panneaux de façade, les rebords de fenêtres et les tuiles sont une autre application bien connue des matériaux du BP. Leur faible absorption d'eau, l'excellente durabilité, la résistance aux chocs et à l'abrasion, les rendent très appropriés pour ce type d'application. En outre, en raison de leur grande capacité de la texture et de la couleur, les apparences extérieures de pierre, granit, schiste ou de bois sont facilement obtenues dans ces produits [WAH 05], alliant exigences esthétiques à un matériau résistant, léger et durable, avec l'avantage d'économiser les ressources naturelles.

c) Systèmes de drainage et de canalisation

Le BP trouve aussi son application dans les systèmes de drainage, qui comprennent les gouttières, les canalisations d'égout, regards, chambres d'appareillage et des canaux de drainage, sont généralement trouvés à l'extérieur et à l'intérieur, dans les infrastructures de transport (voies d'accès, les routes et les aéroports), les installations sportives (par exemple, les stades de football, les autoroutes, les piscines et les des pistes de course), les installations industrielles et chimiques, les garages de stationnement, stations-service et les quais.



Figure 1.4 : Canal de drainage en BP.

Les avantages des systèmes de drainage produits en BP par rapport à ceux réalisés avec le béton classique, PVC ou en acier sont nombreux, parmi lesquels, on peut citer la bonne résistance, en compression axiale, aux solutions agressives et attaque au gel, une grande imperméabilité, un drainage rapide due à un facteur de rugosité extrêmement faible, manipulation facile, poids réduit, faible coûts de maintenance.

d) Les réservoirs des contaminants et déchets dangereux

Vu la nature hermétique et la facilité de nettoyage des surfaces en béton résineux qui entrave l'apparition et la prolifération de champignons et autres micro-organismes, le BP se révèle être le choix idéal pour la fabrication de réservoirs d'acides, des contaminants et des déchets dangereux. Le BP a également été appliqué pour les réservoirs de conditionnement et d'entrepôt dans l'industrie de la transformation alimentaire.

e) Substitution du métal et la porcelaine par le BP

Le remplacement du métal est un autre secteur de l'application croissante du BP. La grande résistance par rapport au poids, la faible conductivité thermique, l'amortissement élevé et la malléabilité font du BP un concurrent sérieux pour de nombreuses applications actuelles utilisant des métaux, telles que les bases d'outils de machines, comme les tours, les fraiseuses, les perceuses où le BP a été trouvé très compétitif avec la fonte et l'acier (Fig. 1.5).



Figure 1.5 : Bâti d'une machine de tournage en béton polymère [EMA-07]

1.4.2.2 Revêtement des planchers et chaussées

Les BP ont été largement utilisés pour les tabliers de pont, revêtement des chaussées et des planchers où une forte corrosion et / ou résistance à l'abrasion est nécessaire, tels que, les garages de stationnement, les usines chimiques, l'industrie de la transformation alimentaire et d'autres industries où les conditions de l'usure corrosive sont rencontrées (Fig. 1.6a). Les revêtements du BP peuvent fournir une surface durable et résistante à l'usure pour le béton de ciment portland avec une faible perméabilité à l'eau et aux ions chlorures, et donc contribuent également à prévenir la détérioration et l'effritement du béton en raison des cycles gel-dégel et à la corrosion de l'acier d'armature (Fig. 1.6b).

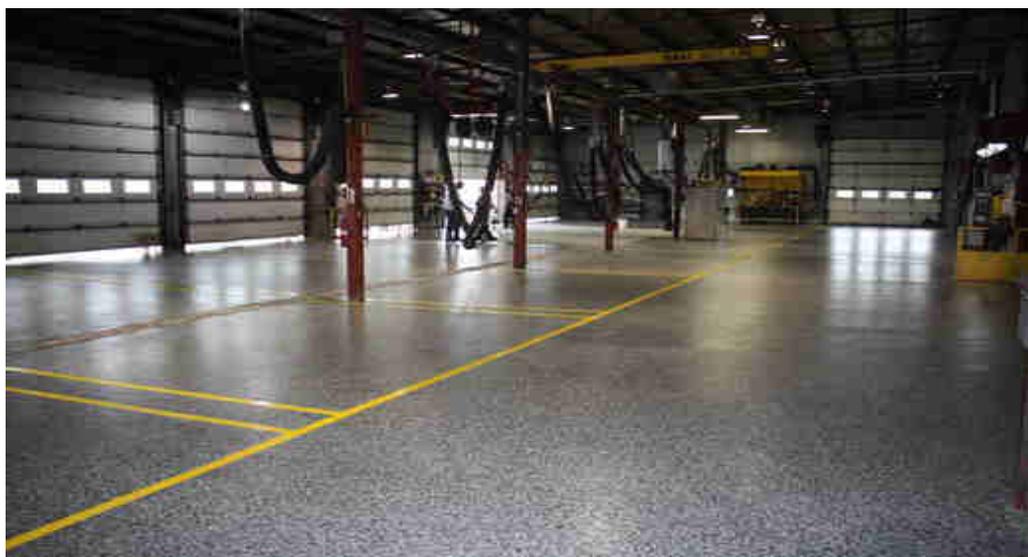


Figure 1.6a : Revêtement de plancher industriel



Figure 1.6b : Revêtement protecteur époxydique polymère, polyuréthane ou acrylique.

1.4.2.3 Réparation et réhabilitation des structures en béton

Actuellement, le BP est aussi utilisé pour la réhabilitation et la réparation des structures en béton. Le durcissement rapide, l'excellente adhérence au béton et aux armatures en acier, et la bonne résistance et durabilité en font un matériau de réhabilitation très attractif [CZA- 99]. La réparation peut se faire soit en surface, ou en profondeur partielle ou totale. Le fait que les BP ont une reprise rapide ce qui les rend d'un grand intérêt dans les réparations d'installations existantes où le temps d'arrêt de fonctionnement doit être maintenu minimum, comme les tabliers de ponts, les routes, les autoroutes et les pistes d'aéroport [FOW-99].

1.4.2.4 Recyclage des déchets

Les bétons de résine sont très attractifs d'un point de vue écologique en raison de leur capacité d'utiliser les produits de déchets recyclés. Cette caractéristique de composites polymères a été développée principalement par deux approches différentes. Tout d'abord, par l'utilisation de résines de polyesters insaturés à partir de poly recyclé poly (éthylène-téréphtalate), généralement connue sous le PET, et d'autre part, par l'incorporation de sous-produits industriels et des déchets tels que des charges ou des agrégats.

Comme le coût élevé des polymères est généralement considéré comme le principal facteur limitant le développement des BP, des polyesters insaturés obtenus sur la base de PET recyclé pourraient être une source potentiellement à coût réduit de résines pour fabriquer des produits en BP [Taw-06]. Les déchets de PET sont obtenus généralement à partir des

bouteilles de boisson en plastique; Ainsi, un grand flux de déchets de PET est disponible pour les applications de recyclage. Un avantage principal de recyclage de PET dans le BP est que les déchets de PET n'ont pas besoin d'être purifiés, y compris l'enlèvement de couleurs.

La prise de conscience croissante de l'impact environnemental d'une part par l'élimination des déchets industriels et d'autre part par l'épuisement des ressources naturelles, a également conduit à l'incorporation d'un grand nombre de variété de déchets industriels comme agrégats dans la fabrication des BP, tels que la poudre et granulats de marbre, le liège, les cendres volantes, les scories, le caoutchouc des pneus, les granulés de plastique provenant de déchets broyés [Dia-13], [Nóv-04], [Rib-13], [Con-13], [Bar-10].

I.5 Synthèse des travaux réalisés sur les bétons polymères

I.5.1 Comportement statique

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 et améliorer les propriétés mécaniques des matériaux en fonction des propriétés de leurs constituants et de leur répartition en optimisant leurs formulations par la diminution du taux de polymère ou bien par le remplacement d'une partie du squelette granulaire par des déchets industriels ou des fibres naturelles. Les approches utilisées sont pour la plus part expérimentales. D'autres méthodes basées sur les disciplines de statistiques enregistrent aussi leurs présences dans les travaux d'optimisation.

1.5.1.1 Optimisation de la formulation des mortiers et bétons polymères

Abdel-Fattah et El-Hawary [FAT-99] ont étudié le comportement du béton polymère à base de résine polyester insaturée et d'époxyde avec des fractions variant de 9 à 15%, en compression et en flexion quatre points. Les résultats montrent que les meilleures résistances mécaniques beaucoup plus élevées que celles du béton en ciment Portland, sont obtenues pour un taux de résine de 12%. (Fig. 1.7)

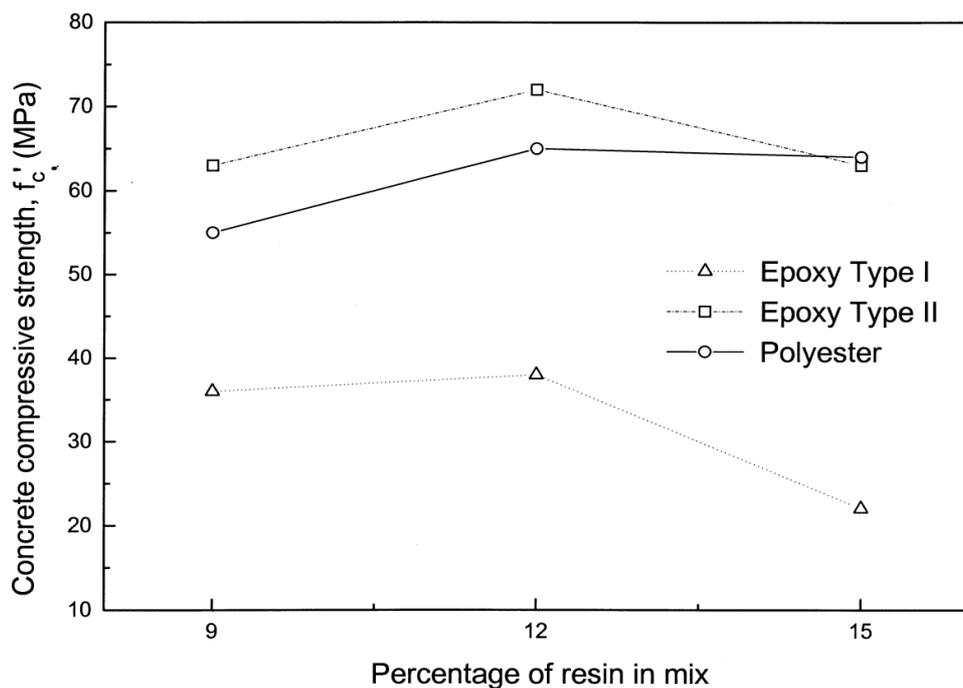


Figure 1.7 : Contrainte de compression en fonction du taux et du type de résine [FAT-99]

Gorninski et *al.* [GOR-04] ont utilisé des résines polyester insaturées isophtaliques et orthophtalique réticulées avec du styrène pour formuler des mortiers résineux avec des fractions massiques respectivement pour les deux types de résine de 12 et 13%. Pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques, ils ont introduit des cendres volantes comme élément de remplissage avec des taux en poids de 8%, 12%, 16% et 20%. L'analyse des résultats montre que le type de résine et le taux des cendres volantes ont un effet significatif sur la rigidité et la résistance mécanique du mortier résineux et qu'au-delà de 16% de cendre volante cet effet n'est plus vérifié.

Les résultats sur la figure 1.8 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. La résistance en compression croît avec l'augmentation de la concentration des cendres volantes, alors que la résine polyester isophtalique donne une meilleure résistance que celle orthophtalique.

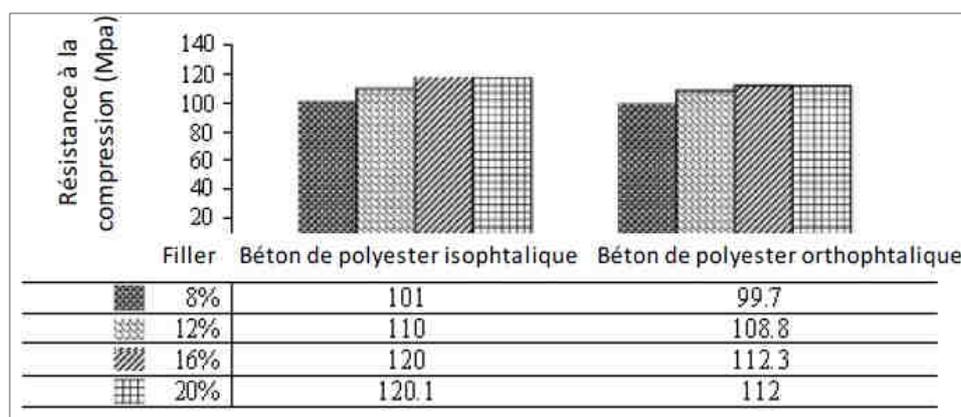


Figure 1.8 : Effet du type de résine et de cendres volantes sur la résistance de compression axiale [GOR-04].

Il y a aussi une augmentation du module d'élasticité lorsque la concentration de cendres volantes augmente. Le BP à base de résine polyester Isophthalique atteint des valeurs de 25 à 28 GPa tandis que celui à base de polyester Orthophtalique atteint des valeurs variant de 24 à 29 GPa.

Muthukumar et Mohan [MUT-04] ont cherché à optimiser les proportions des constituants d'un béton polymère (BP) à base de furanne et alcool furfurylique avec la plus faible porosité possible par le biais de méthodes statistiques. Les variables ou entrées sont les constituants du BP, soit la résine furane X_1 (5 types) dont le taux varie de 7.5% à 15%, le gravier X_2 optimisé par une méthode d'empilement d'un mélange ternaire et les micro-fillers de silice X_3 . Les auteurs montrent qu'une fraction massique de 9.75% conduit à la meilleure ouvrabilité du BP et qu'en dessous de 8,5% cette ouvrabilité n'est plus assurée alors qu'au dessus de 12% des phénomènes de ségrégation apparaissent.

Haidar et *al.*[HAI-11] ont étudié l'optimisation des formulations des micro-bétons polymères à base de résine époxy renforcée par un mélange de sables grossiers et fins afin de produire un matériau de construction possédant d'excellentes propriétés physiques et mécaniques, tels que le contenu d'un minimum de vide, un module de Young élevé et d'excellentes propriétés de résistance. Toutes les propriétés mécaniques du MBR se stabilisent après 3 jours de durcissement à température ambiante. Le micro-béton polymère conçu avec une teneur en polymère de 9% présente les caractéristiques physiques et mécaniques les plus élevées donc la meilleure durabilité (Fig. 9).

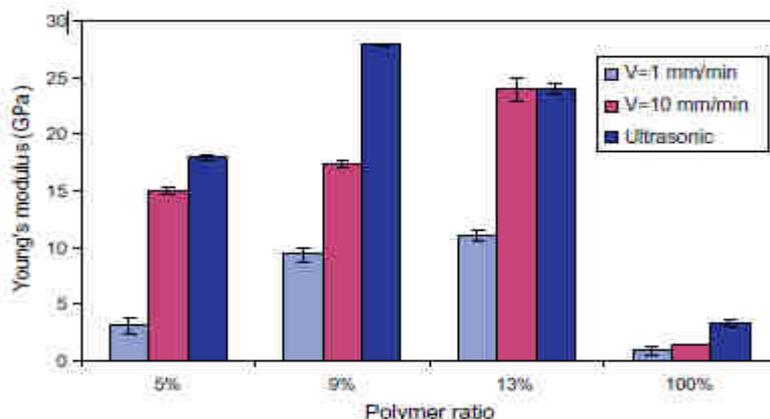


Figure 1.9 : Courbe du module de Young en fonction du taux de polymère et de la vitesse de chargement [HAI-11].

Agavriloaie et *al.* [AGA-12], 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 ; un béton léger avec des propriétés qui le recommandent comme un matériau de remplacement possible aux matériaux de construction classiques.

Ribeiro et *al.* [RIB-04] se sont intéressés à l'influence de la température des cycles de fatigue thermique sur le comportement en flexion de deux types de mortier polymère, l'un à base de résine polyester et l'autre à base d'époxy. Ils ont trouvé que la résistance en flexion des deux mortiers diminue considérablement avec l'augmentation de la température (Fig.1.10).

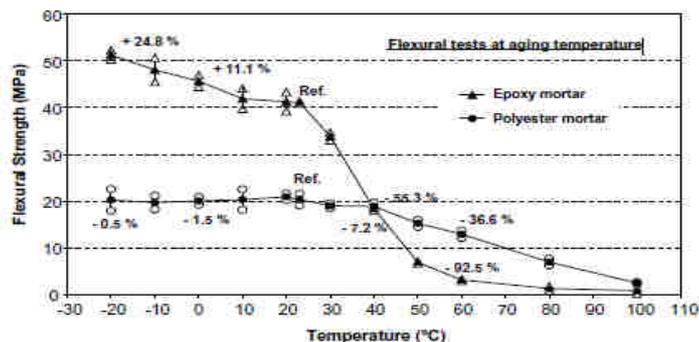


Figure 1.10 : Courbes contrainte de flexion en fonction de la température du mortier polymère polyester et époxy [RIB-04].

L'exposition à des températures constantes ou variables (cycles thermiques de fatigue) (Fig. 1.11) n'a pas d'influence significative sur les propriétés de flexion des deux formulations de mortiers polymères, aussi longtemps que les spécimens sont ramenés aux conditions environnementales initiales. Cependant, la récupération de la capacité des mortiers de polymère époxydique est progressivement réduite par l'exposition répétée à des températures élevées. Cent cycles de gel-dégel entre -10 et $+10^{\circ}$ C produisent très peu de dégâts sur les deux mortiers d'époxy et de polyester, probablement en raison d'un degré réduit d'absorption d'eau. Il sera nécessaire d'avoir un plus grand nombre de cycles pour évaluer la résistance de ces matériaux au gel.

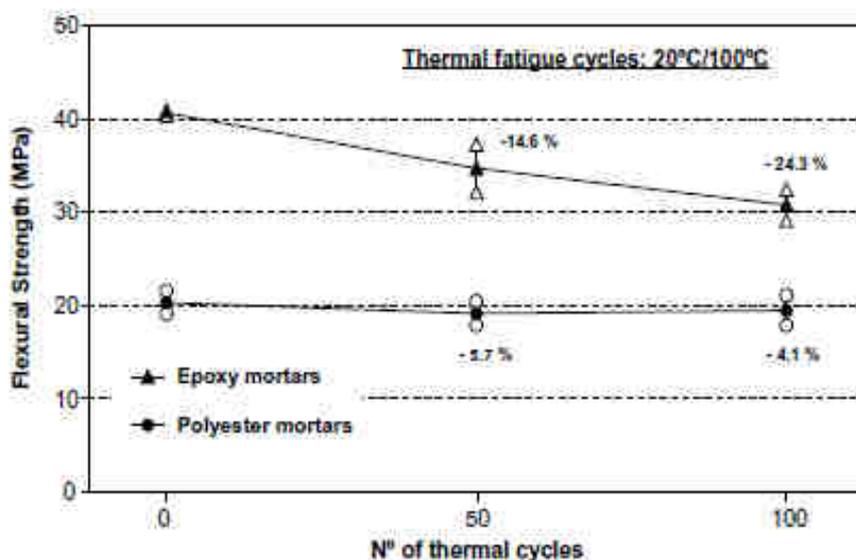


Figure 1.11 : Résistance résiduelle à la flexion des mortiers polymères époxy et polyester après exposition à 50 et 100 cycles positifs de fatigue thermique (20° C / 100° C) [RIB-04].

Heidari-Rarani et *al.* [HEI-14] ont étudié la durabilité mécanique du béton polymère à base d'époxy par rapport à la résistance en traction et la ténacité et cela sous trois types de cycle gel-dégel. Les cycles thermiques variant de 25°C à -30°C (cycle A), 25°C à 70°C (cycle B) et -30°C à 70°C (cycle C) sont appliqués pendant sept jours. Les résultats expérimentaux montrent une influence notable des cycles thermiques, en particulier le cycle B, à la fois sur la ténacité et la résistance à la traction (Fig.1.12). Les cycles thermiques, A du chaud au froid et B de décongélation donnent la plus grande augmentation et réduction, respectivement à la fois sur la résistance en traction et la ténacité par rapport aux conditions ambiantes.

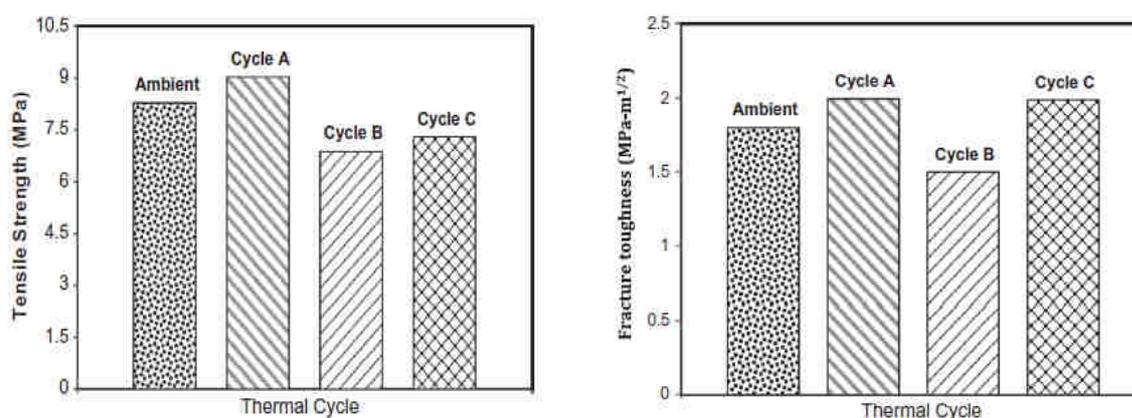


Figure 1.12 : Variation de la résistance de traction et de la ténacité du béton polymère en fonction des cycles thermiques [HEI-14].

Reis [REI-09] a étudié les propriétés de rupture du béton polymère époxyde exposé à différents agents de dégradation. Des échantillons ont été exposés à sept solutions avec des pH variant de 1,2 à 12,8. Les résultats à la rupture ont été analysés par ténacité à la rupture ainsi que l'énergie de rupture. En outre, le module d'élasticité, E, a été calculé. L'auteur a observé de fortes dégradations des propriétés de fracture, ainsi que du module d'élasticité des échantillons exposés aux agents corrosifs. Cependant, même dans ces conditions, les valeurs de résistance résiduelle étaient beaucoup plus élevées que celles trouvées dans les mortiers préparés avec le ciment Portland.

Ellalaoui et *al.* [ELA-12] ont effectué une recherche portant sur un béton polymère à base de résine époxy durcie avec des polyamines modifiées, avec des teneurs en polymère variant de 6% à 16%. Les résultats obtenus pour les résistances mécaniques à la flexion et à la compression montrent que la teneur optimale en polymère qui garantit l'obtention d'un béton polymère avec des performances mécaniques élevées et de moindre coût est d'environ 13% (Fig. 1.13).

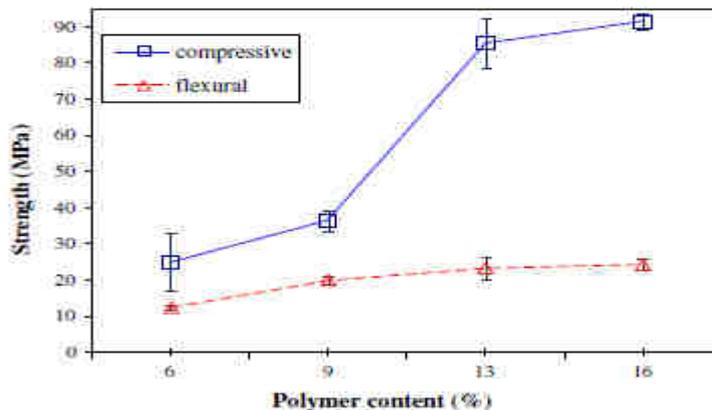


Figure 1.13 : Effet du taux de polymère sur les résistances en flexion et compression du béton polymère époxy [ELA-12]

Le béton polymère optimal est ensuite exposé à une température inférieure à 250° C pendant 3 h, et les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un béton de ciment ordinaire. Lorsqu'il est exposé à des températures supérieures à 150° C, le béton polymère époxy présente une perte significative de la résistance due principalement à la dégradation thermo-oxydante du polymère époxy et au décollement entre les agrégats et la matrice. Ces dégradations sont accompagnées d'un dégagement de gaz. Le béton à base de ciment a des propriétés mécaniques inférieures par rapport à celles du béton polymère. Les résultats montrent aussi (Fig. 1.14) que lorsqu'ils sont exposés à des températures inférieures à 250° C, le béton polymère époxy reste encore plus efficace que le béton à base de ciment.

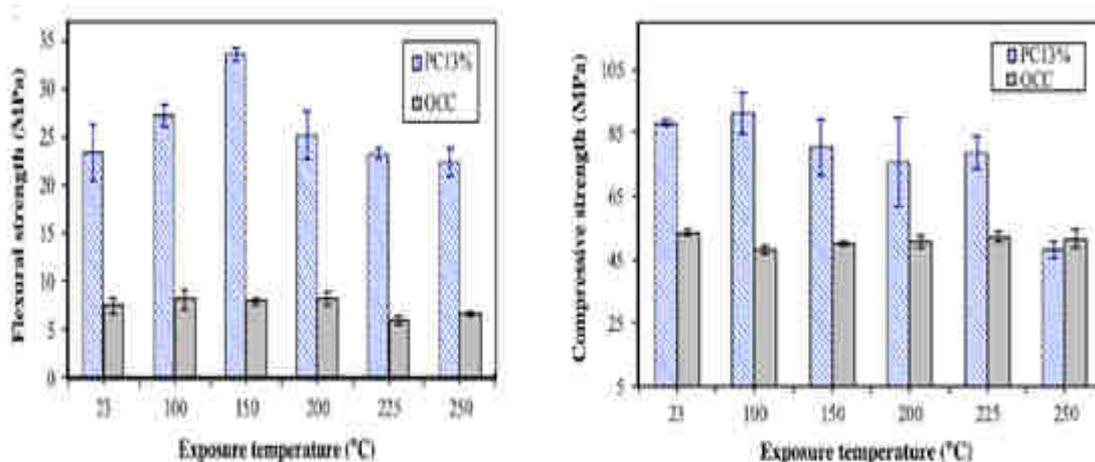


Figure 1.14 : Influence de la température sur les résistances résiduelles du béton polymère (BP) et du béton de ciment ordinaire (BCO) [ELA-12].

1.5.1.2 Utilisation des déchets industriels dans la fabrication du béton polymère

Les déchets industriels, comme les cendres volantes, les scories, les rasages de bois, de la poudre de liège et granulés de liège et de caoutchouc de pneu, les sables de fonderie, puces en plastique de polyéthylène utilisé et de films de chlorure de polyvinyle, ainsi que des granulés en matière plastique provenant de déchets de câbles électriques broyés, ont été utilisés avec succès en substitution des composants de charge et d'agrégats minéraux dans les BP [VAR, BIG, RIB].

Le recyclage des déchets industriels en tant que composants de remplissage et / ou d'agrégats dans les bétons et mortiers polymères rend ces matériaux très intéressants d'un point de vue écologique et de résistance.

Varughese et Chaturvedi [VAR-95] ont utilisé les cendres volantes dans la fabrication du béton polymère en remplaçant partiellement ou totalement un sable ordinaire de rivière. Ce matériau a donné un bon comportement mécanique et une bonne résistance à l'absorption d'eau jusqu'à un taux de 75% en poids de cendres volantes, au-delà de cette valeur ces propriétés diminuent, alors que l'augmentation du taux de résine polyester contribue à l'augmentation de ces propriétés.

Bignozzi et al. [BIG-00] ont étudié un mortier polymère renforcé par quatre charges recyclées (caoutchoucs en poudre, caoutchoucs de pneus, des fibres de pneus micronisées et les déchets de câbles électriques broyés). Ils ont trouvé que les contraintes en compression et en flexion sont plus faibles que celles d'un mortier polymère ordinaire mais restent toujours plus élevées que les propriétés mécaniques d'un mortier de ciment portland. Cependant, l'addition de charges organiques recyclées augmente la porosité des échantillons en particulier aux interphases entre la matrice de résine et les grains de remplissage.

Ribeiro et al. [RIB-13] ont établi une étude portant sur l'effet de l'incorporation dans des mortiers de polymère polyester de déchets des fibres de verre recyclé de plastiques renforcés (GFRP), obtenues au moyen de broyage avec des taux variant entre 4% et 12% en poids. L'effet de l'addition d'un agent de couplage de silane à la résine a également été évalué. Les résultats expérimentaux ont été prometteurs vers la recyclabilité de déchets des matériaux GFRP comme remplacement partiel des agrégats et renforcement des mortiers polymères, avec des améliorations significatives sur les propriétés mécaniques des mortiers résultants par rapport à celles des formulations ne contenant pas de déchets. Par conséquent, en plus des avantages environnementaux évidents, une solution viable et réalisable pour ces déchets conduira également à des avantages économiques importants.

D'autres auteurs, [NUN-12], [DIA-13], [CAS-13] ont aussi étudié l'incorporation des déchets de fibres de verre et des cendres volantes provenant des déchets industriels dans le béton polymère.

1.5.1.3 Utilisation des déchets de poudre de marbre dans la fabrication du béton polymère

D'énormes quantités de boue et autres résidus sont annuellement produites par l'industrie dans divers pays tels que les déchets de marbre, et de granite ce qui provoque de graves menaces pour l'environnement, la pollution des sols et de l'eau, et lorsque les sols sont secs, ces déchets se transforment en une fine couche de poussière qui devient un danger pour la population. A ce moment, la plupart des déchets sont mis en décharge et des solutions alternatives sont à l'étude dans de nombreux pays dans le but de recycler les déchets dans un matériau durable tel que le béton polymère. Saboya et al. [SAB-07] rapporté par Gencel et al. [GEN-12] signalent que la quantité de déchets de coupe et de sciage dans le processus des pierres décoratives brésilien atteint facilement 20 à 25% du volume total de la matière première. Hebhoub et al. [HEB-11] ont rapporté qu'un volume élevé de production de marbre génère une quantité considérable de déchets; une partie importante de ce minerai se perd dans l'extraction, le traitement et les étapes de polissage avec un impact évident sur l'environnement.

Plusieurs travaux ont abordé le recyclage du déchet de la poudre de marbre dans le béton de ciment portland, ainsi que pour les chaussées asphaltées,[SAB, GEN, HEB, ADI].

Gencel *et al* [GEN-12] ont étudié la faisabilité de l'incorporation du déchet de poudre de marbre dans la fabrication des blocs de pavés et son influence sur ses caractéristiques physiques et mécaniques. Ils ont constaté que la demande en eau de la mixture augmente et la densité diminue avec l'accroissement du taux de marbre En d'autres termes, le rapport w/c augmente en raison de la grande surface spécifique des agrégats de marbre. Bien que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en marbre dans le béton, les blocs donnent des valeurs de résistance satisfaisantes après 28 jours. La résistance à l'abrasion des blocs est fortement influencée par leur contenu global en marbre. Les taux les plus élevés d'abrasion ont été obtenus pour les blocs de contrôle qui ne contiennent pas de marbre. La durabilité gel – dégel des pavés contenant des granulats de marbre est supérieure à ceux des blocs de contrôle. La présence d'agrégats de marbre provoque une très faible diminution de la résistance à la traction par fendage des blocs. Enfin, ils concluent que l'incorporation des déchets de marbre fournit des blocs de pavé en béton de qualité suffisante.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Par contre pour le BP peu de recherches se sont intéressées à l'incorporation de la poudre de marbre dans le béton résineux. On peut citer celle de Tawfik *et* Eskander [TAW--06] qui proposent une optimisation du squelette granulaire pour un BP fabriqué à partir de résine recyclée à partir de polyéthylène téréphtalate (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 ($\Phi > 0.1$ cm) : 30% de basalte (0.5-1.0 cm) et 40% de marbre (0.1-0.5 cm). Le BP obtenu est à durcissement rapide et possède des propriétés physiques acceptables et de bonnes caractéristiques chimiques.

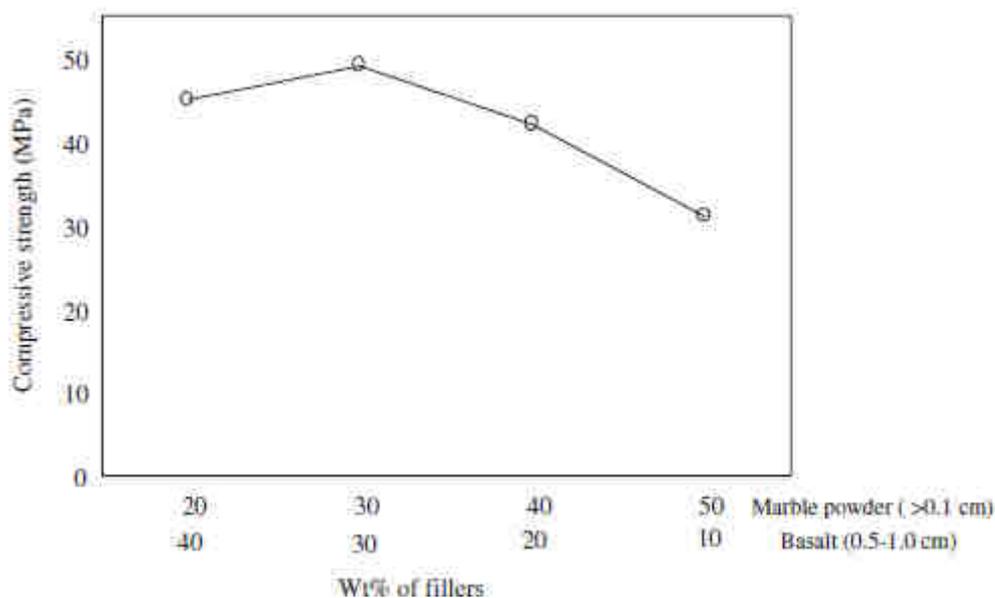


Figure 1.15 : L'effet de la variation de la granulométrie de la poudre de marbre ($> 0,1$ cm): basalte (0,5-1,0 cm) sur la résistance à la compression du BP.

Martínez-Barrera et Brostow [MAR-10] ont étudié les effets du rayonnement gamma et la taille des particules de marbre sur les propriétés de compression et le module d'élasticité dynamique des BP. Ils ont trouvé que les propriétés de compression et les valeurs de module d'élasticité dynamique dépendent de la combinaison des tailles de particules de marbre et de la dose du rayonnement gamma appliqué. L'augmentation du nombre de particules dispersées par unité de volume fournit plus de résistance à la propagation des fissures. Les particules de marbre de taille moyenne offrent un meilleur module de compression (Fig. 1.15).

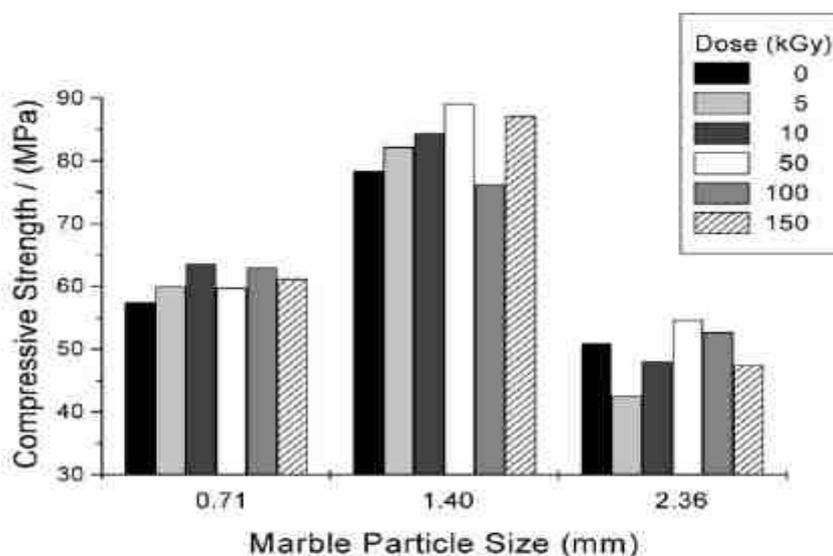


Figure 1.16 : Contrainte de compression en fonction des dimensions des particules de marbre [MAR-10].

1.5.1.4 Utilisation des fibres naturelles dans la fabrication du BP

Dans le but d'améliorer les propriétés à la rupture d'une part et d'autre part d'obtenir des matériaux légers contenant des produits biodégradables. Certains chercheurs ont eu recours au renforcement des BP par des fibres naturelles telles que le bois, le sisal, la canne à sucre de bagasse, fibre de banane, la fibre de noix de coco etc..., comme substitution aux fibres synthétiques. En effet, Reis estime que des fibres provenant des déchets en bois améliorent la résistance à la flexion, la ténacité et l'énergie de rupture fracture du BP. La variation de la ténacité est semblable à celle du BP époxydique renforcé par les fibres synthétiques de verre qui présente néanmoins un rendement meilleur.

Dans l'étude menée par Reis [REI-06], où il a incorporé des fibres hachées, de noix de coco, de bagasse canne à sucre et de la banane à la matrice du BP afin d'améliorer son comportement mécanique. Il a trouvé que les fibres de noix de coco, de bagasse canne à sucre améliorent les propriétés de rupture du béton polymère à la fois sa résistance et son énergie de rupture, alors que la fibre de banane n'a augmenté que l'énergie de rupture (Fig. 1.17). Le renforcement du béton polymère époxy en fibres de noix de coco a présenté une légère augmentation des propriétés en flexion par rapport à celles des BP non renforcés et renforcés avec des fibres synthétiques comme le verre et le carbone établies dans deux études antérieures. La résistance à la flexion du béton polymère diminue lorsqu'il est renforcé avec la bagasse et les fibres de tige de banane, ce qui rend le composite polymère faible. Cependant la fibre de noix de coco se révèle être un excellent renforcement pour le béton polymère augmentant ainsi sa résistance à la rupture en flexion. Alors que la fibre de tige de banane n'est pas un bon choix pour le renforcement du béton polymère.

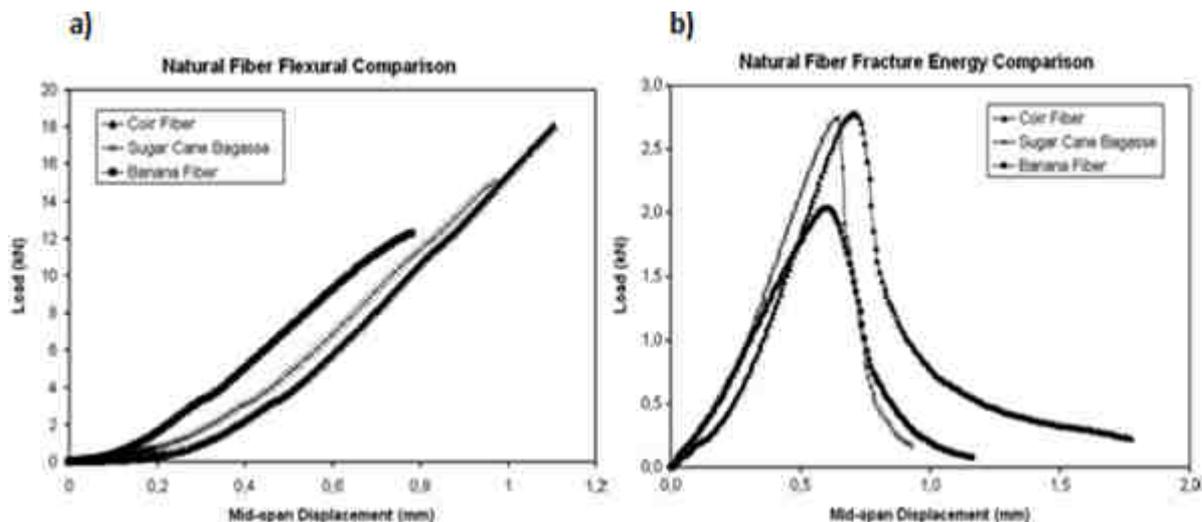


Figure 1.17 : Courbes charge-déplacement de comparaison de toutes les fibres naturelles: **a)** de flexion, **b)** de l'énergie de rupture [REI-06].

Dans une étude Barbuta et Harja [BAR-08] ont étudié l'incorporation des cendres volantes et des fibres de cellulose dans la fabrication du BP à base d'époxy. Les caractéristiques mécaniques telles que la résistance, à la compression, à la flexion et celle à la traction ont été étudiées, en gardant le pourcentage de fibres de cellulose constant égal à 3% de la masse de la résine, alors que les dosages de la résine époxy et de la charge de cendre volante ont été variées respectivement de 12,4 à 15,6% et de 6,4 à 12,8%. Ils ont trouvé que l'augmentation du taux de résine et des cendres volantes contribue à l'amélioration de la résistance en compression voir (figure 1.18) et de la résistance en traction alors que celle de la flexion elle diminue avec l'augmentation du taux de résine. Ils ont trouvé aussi que les fibres de cellulose n'ont pas donné d'amélioration des caractéristiques mécaniques du béton polymère.

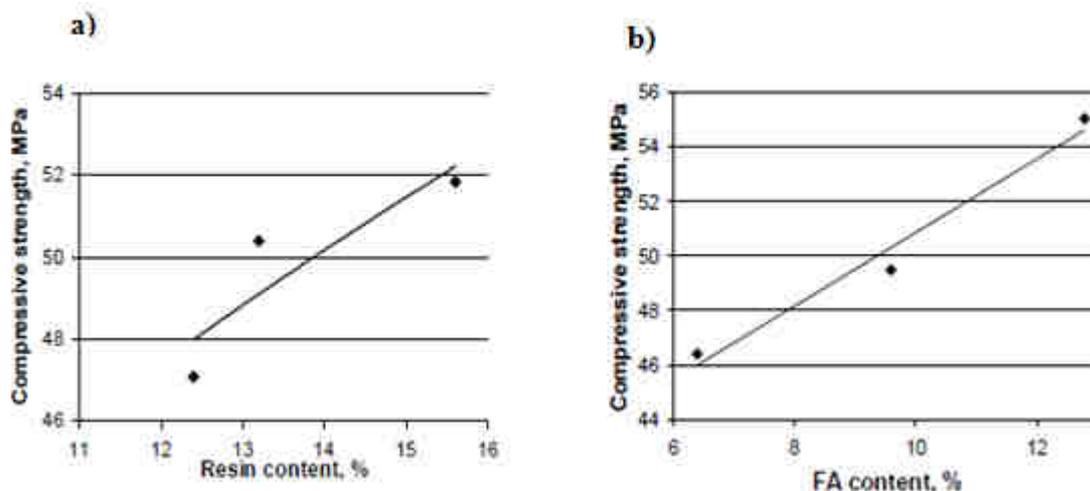


Figure 1.18 : Effets de la variation des taux : **a)** de la résine pour 6.4% de cendre volante, **b)** des cendres volantes pour 12.4% de résine sur la résistance en compression du BP [BAR-08].

Dans une autre étude Reis et Motta [REI-14] ont élaboré un mortier polymère biocomposite à base d'huile de ricin comme substitut de résines polymères synthétiques, époxy ou polyester renforcé de fibres de piassava issues de déchets de l'industrie de balai. Les propriétés mécaniques de rupture en flexion et en compression de ce matériau renforcé avec 1 et 2% en masse de fibres de piassava sont étudiées. Les résultats ont montré que les mortiers de polymère d'huile de ricin renforcé avec des fibres de piassava donnent des propriétés similaires à celles du mortier polymère à base d'époxy avec notamment une diminution de la résistance à la flexion. L'analyse de la résistance à la propagation des fissures montre que les fibres de piassava affichent un rôle important, améliorant de manière significative la ténacité et la rigidité, en particulier la teneur de 1% (Fig.1.19). Cependant, la fibre de piassava contribue à une rupture fragile. Lorsque la rupture se produit, la fissure dans le mortier polymère renforcé de fibre de piassava se propage plus rapidement que celle dans les mortiers non renforcés.

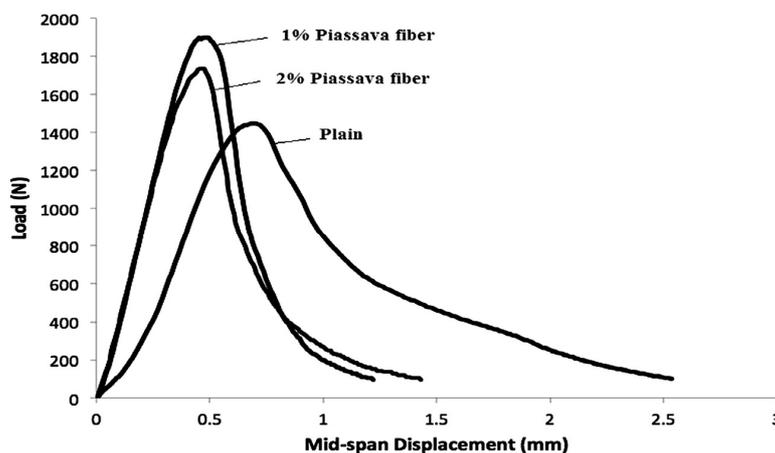


Figure 1.19 : Courbes types charge - déplacement du mortier polymère d'huile de ricin renforcé de la fibre de piassava [REI-14].

L'utilisation de fibres naturelles à partir de ressources renouvelables et le remplacement des résines polymères synthétiques par une résine naturelle produit un matériau biocomposite qui apporte des avantages économiques et écologiques.

1.5.2 Comportement en fatigue

1.5.2.1 Phénomène de fatigue

On entend par phénomène de fatigue, la dégradation progressive d'une structure soumise à des sollicitations fluctuantes ou répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures qui progressent avec le nombre de cycles appliqué. Ce processus à caractère irréversible altère les propriétés mécaniques macroscopiques du matériau et peut

conduire à la rupture pour un niveau de chargement inférieur à sa résistance statique si le nombre de cycles appliqué est suffisant [AST-85].

Dans un premier temps, les recherches ont essentiellement porté sur la fatigue des pistes d'aéroport ou sur des chaussées réalisées en béton. Enfin un grand nombre de matériaux composites ont fait l'objet de nombreuses études. La représentation classique des résultats d'essais de fatigue est la courbe de fatigue ou la courbe de Wöhler (Fig. 1.20). Cette courbe fait correspondre une durée de vie à un niveau de sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation imposée. La courbe de fatigue est présentée dans une échelle logarithmique ou semi logarithmique. L'axe du nombre de cycles ou de durée de vie est en logarithme puisqu'il couvre une plage importante pouvant aller de quelques milliers à plusieurs millions de cycles.

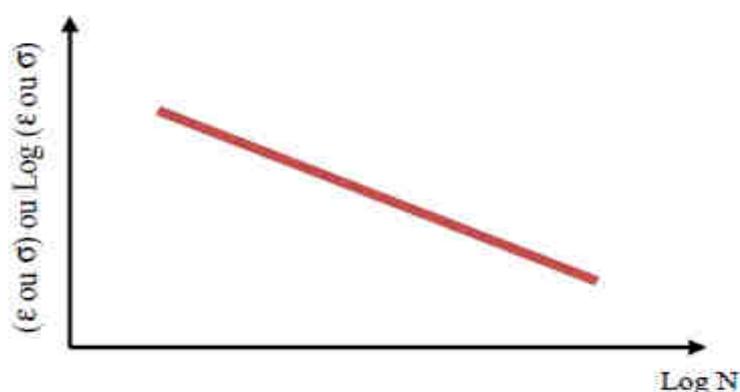


Figure 1.20 : Courbe de Wöhler

De nombreux travaux ont été effectués afin d'étudier le comportement et l'endommagement des matériaux granulaires à base polymère sous sollicitations statiques et contrairement sous sollicitations cycliques les recherches restent 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 statique et cyclique.

Berbaoui *et al* [BER 10] ont effectué une analyse par émission acoustique (EA) dans le but d'identifier les différents mécanismes d'endommagement dans le béton polymère constitué d'une matrice polymère (résine époxyde), de granulats et de sable, et suivre leur évolution au cours de la fatigue en flexion 3-points. L'approche a été faite d'un point de vue expérimental et numérique. L'analyse de l'activité EA en fonction du nombre de cycles a permis de suivre l'évolution des différents mécanismes d'endommagement au cours de la fatigue et d'identifier ceux les plus critiques entraînant la rupture du matériau. De plus, une analyse micrographique sur les éprouvettes après la rupture a été effectuée à l'aide d'un microscope optique et un microscope à balayage électronique. Ces clichés ont permis de valider l'existence des différents mécanismes d'endommagements identifiés par EA sur ce type de matériau. Le comportement en fatigue cyclique a été analysé dans le cas de la flexion

trois points en contrôlant le signal force avec un rapport de chargement nul et pour plusieurs niveaux de chargement.

Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles se déroule en trois phases: une diminution rapide de la rigidité dès les premiers cycles dans la première phase, la diminution devient ensuite très lente dans la deuxième phase, correspondant à la quasi-totalité de la durée de vie des éprouvettes et enfin dans la troisième phase, très courte, où la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture totale des échantillons. Les essais d'endurance ont permis de tracer la courbe de Wöhler en utilisant le critère de durée de vie N_R correspondant à la rupture totale de l'éprouvette (Fig. 1.21).

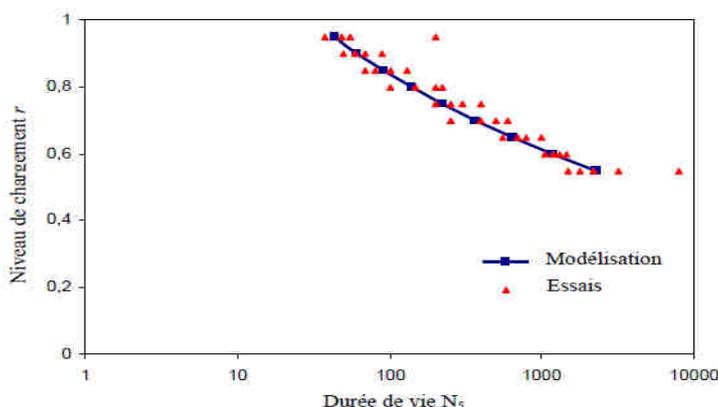


Figure 1.21 : Evolution du niveau de chargement en fonction du nombre de cycle (N_5) [BER10].

Sangkeun et *al.* [SAN-16] ont développé une méthode expérimentale afin de mesurer la réduction de la rigidité du béton polymère (un mélange de résine époxy, agrégats et fibre de carbone). A partir d'essais d'impact, les propriétés dynamiques dépendantes de la fréquence moyenne ont été comparées pour des poutres réalisées en utilisant différentes fractions pondérales de fibres de carbone. Ils ont trouvé que les modules élastiques du béton de ciment et du CFRPC étaient approximativement les mêmes, alors que le facteur de perte de rigidité du CFRPC était trois fois plus grand que celui du béton de ciment (Fig. 1.22). L'important amortissement induit par le polymère et les fibres de carbone est avantageux pour réduire la vibration de résonance des bâtiments contre les chocs externes tels que les tremblements de terre ou les trains qui passent.

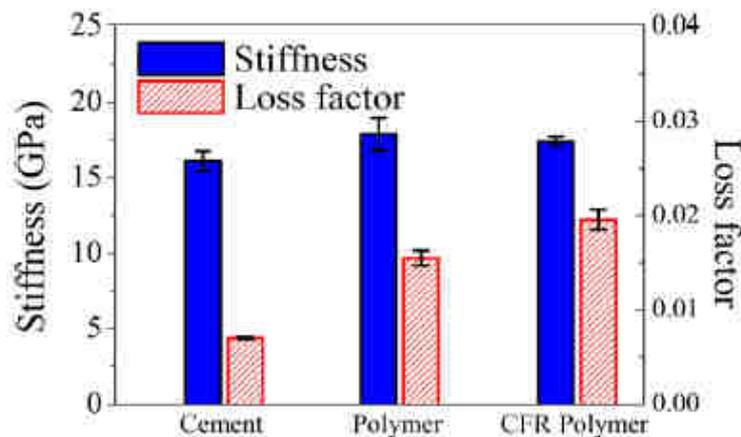


Figure 1.22 : Propriétés dynamiques moyennes des trois différents bétons [SAN-16].

Des tests de fatigue en flexion 3 points ont aussi été effectués pour comparer les changements des caractéristiques de vibration en raison des dommages locaux. La méthode de la poutre divisée et uniformément espacées a été utilisée afin d'identifier la distribution de rigidité le long des éprouvettes de béton (Fig. 1.23).

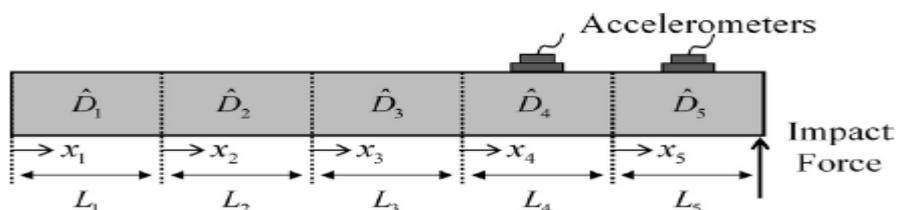


Figure 1.23 : Le modèle de la poutre séparée avec cinq parties uniformément espacées pour analyser le changement des propriétés dynamiques des dommages locaux [SAN-16].

L'amplitude de la réponse vibratoire a changé en particulier dans la plage de hautes fréquences de 3 à 5 kHz après les tests de fatigue. La rigidité dynamique a été étudiée pour comparer la durabilité des charges en fatigue du béton polymère (BP) et du béton polymère renforcé de fibre de carbone (CFRPC). Les résultats suggèrent que la réduction locale de la rigidité dynamique était plus prononcée pour le BP comparée au CFRPC. Cela génère une concentration de contrainte aux dommages locaux qui induit finalement une rupture liée à la fatigue. Les variables observées fournissent des informations sur l'éprouvette concernant la génération et la propagation des dommages lors des essais de fatigue (Fig. 1.24).

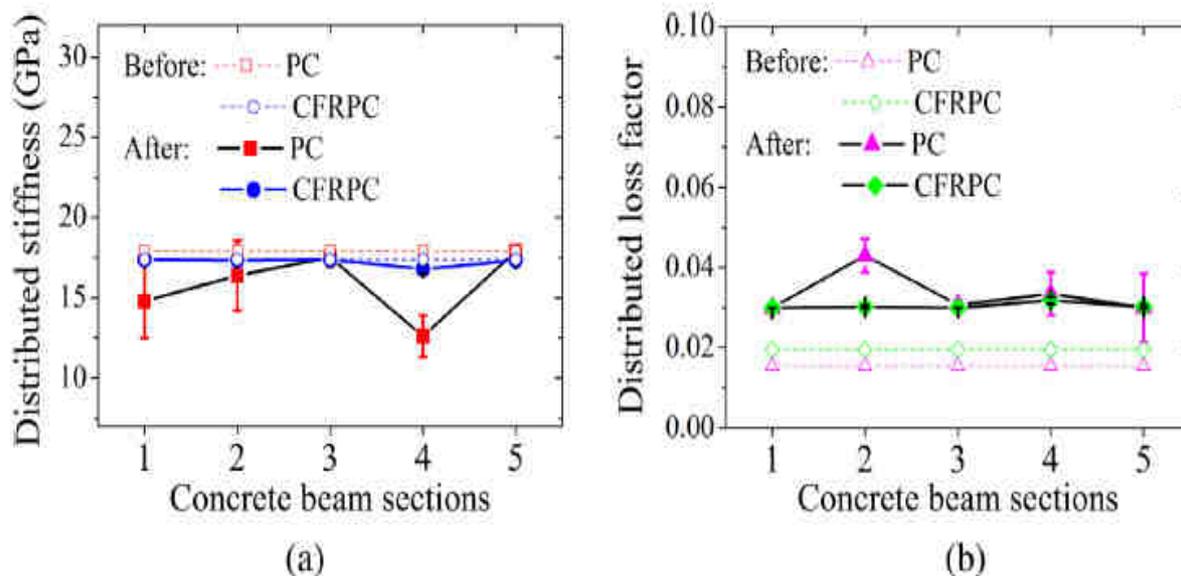


Figure 1.24 : Propriétés de rigidité distribuées dans le sens de la longueur: (a) raideur dynamique et (b) facteur de perte [SAN-16].

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les bétons et mortiers polymères et leurs applications dans le génie civil sont présentés. Plusieurs travaux étaient consacrés à l'optimisation de la formulation du BP donnant une meilleure résistance mécanique et aussi vis-à-vis de la durabilité en se basant sur la fraction du polymère ainsi que sur le squelette granulaire. D'autres recherches se sont intéressées à l'incorporation des déchets industriels dans le béton résineux, mais en ce qui concerne le déchet de poudre de marbre qui reste un matériau très répandu résultant du sciage et de la coupe dans l'industrie du marbre, peu de travaux était consacrés à l'introduction de ce déchet dans le BP.

L'utilisation de la poudre de marbre est très nécessaire, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger les ressources naturelles, d'où le premier objectif de cette thèse à savoir la valorisation du déchet de poudre de marbre dans le BP. Le deuxième objectif de cette thèse étant la compréhension du comportement mécanique de ce type de matériau soumis à des essais de flexion en statique et en fatigue cyclique.

Chapitre II

Mode de préparation des échantillons et techniques expérimentales

Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter en première étape le mode de confection des échantillons des BP, puis en deuxième étape, on décrira les méthodes et techniques expérimentales, utilisées pour la détermination des propriétés physiques et mécaniques des échantillons. Cette caractérisation, physico et mécanique du liant, des granulats et du béton polymère (BP) a été effectuée par plusieurs machines et appareils, à savoir : une balance hydrostatique, le diffractomètre à rayons X (DRX) et la machine universelle (Zwick Rokwell) utilisée pour la caractérisation mécanique en statique et en fatigue cyclique.

2.1 Mode de Préparation du béton polymère et matériaux utilisés

Le but de cette partie est de présenter les caractéristiques des différents matériaux utilisés ainsi que le mode d'élaboration des différentes formulations.

2.1.1. Caractérisation des matériaux utilisés

2.1.1.1. Liants polymériques

Une résine polyester insaturée a été utilisée en tant que liant des matières particulières des différentes formulations. Une préparation est nécessaire pour utiliser la résine polyester dans la fabrication d'un matériau composite. Les polyesters insaturés sont des résines thermodurcissables liquides qui avec l'adjonction d'un catalyseur (peroxyde organique) provoquera une réaction chimique et permet de former les résines polyesters à l'état solide.

Il est important de noter que cette réaction chimique est irréversible. La proportion du catalyseur varie selon les durées de polymérisation souhaitées, environ 1% à 2% en volume. Pour maintenir les résines à l'état liquide, on utilise du styrène, composé aromatique à odeur forte caractéristique, comme solvant. Les résines polyester sont conservées à l'abri de la lumière et au frais.

Les caractéristiques mécaniques, en traction et en flexion de la résine seule, déterminées expérimentalement au laboratoire en utilisant respectivement les normes ASTM D5083 et D790 -03 sont illustrées dans le tableau 2.1. Les caractéristiques obtenues sont similaires à celles de la résine polyester 716.09 durcie non renforcée, fabriquée par Technobell London [29] et utilisée dans la fabrication des pipes en béton polymère par la société MAGHREB pipe industrie de M'sila Algérie.

Tableau 2.1 : Caractéristiques de la résine polyester

Résine	Type de sollicitation					
	Traction			Flexion		
	Contrainte MPa	Déformation %	Module de Young GPa	Contrainte MPa	Déformation %	Module de Young GPa
Présente étude	29,36 ± 2,87	2,25 ± 0,24	12,128 ± 2,04	81,74 ± 11,08	2,56 ± 0,52	3,33 ± 0,25
Technobell	50 à 70	4 – 5	3200 – 3600	70 – 90	---	---
London [29]	ISO R 527	ISO R 527	ISO R 527	ISO 178		

2.1.1.2. Charges minérales

➤ Propriétés physiques

Deux types de bétons ont été élaborés avec un squelette (renfort) granulaire à base de grains de sable de carrière et de poudre de marbre ainsi qu'un sable commercialisé (voir Figure 2.1) Ces charges minérales sont :

- Déchet de sable de carrière G : de masse volumique absolue $1,675 \text{ g/cm}^3$ (Fig. 2.2), obtenue après tamisage d'un sable naturel provenant des carrières de Tébessa utilisé dans le mortier de ciment comme enduit pour murs et récupéré comme déchet.
- Sable commercialisé GC : de masse volumique absolue $1,524 \text{ g/cm}^3$ commercialisé en sacs 20 Kg utilisé dans les peintures de façade comme crépissage.
- Déchet de poudre de marbre M : de masse volumique $1,425 \text{ g/cm}^3$. obtenue par broyage des chutes de marbres récupérées.



Figure 2.1 : Les différentes charges minérales

La figure 2.2 représente les masses volumiques des différents granulats utilisés dans la confection du BP.

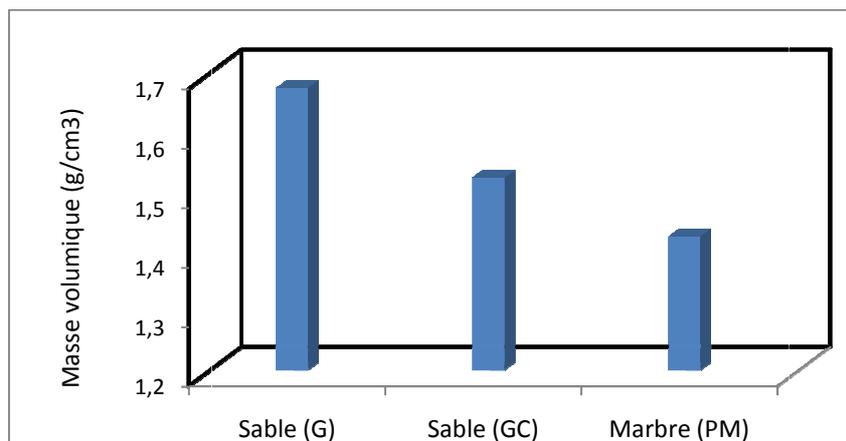


Figure 2.2 : Masse volumique des granulats.

➤ *Analyse granulométrique*

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 tamisât qui permettra de tracer les courbes granulométriques.

Les tableaux ci- dessous et la Figure 2.3 représentent les analyses granulométriques réalisées sur le sable (G) et le sable (GC) et la poudre de marbre (M) utilisés dans les formulations.

Tableau 2.2 : Analyse granulométrique du sable de carrière (G).

Tamis	Refus	Cumul	Refus (%)	Tamisât (%)
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 2.3 : Analyse granulométrique du sable commercialisé (GC).

Tamis	Refus	Cumul	Refus (%)	Tamisât (%)
3	20	20	2	98
2,8	305	307	30.7	69.3
2	470	777	77.7	22.3
1,4	210	987	98.7	2.3
1	10	997	99.7	0.3
0.71	3	1000	100	0

Tableau 2.4 : Analyse granulométrique de la poudre de marbre (M).

Tamis (mm)	Refus	Cumuls	Refus(%)	Tamisât(%)
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

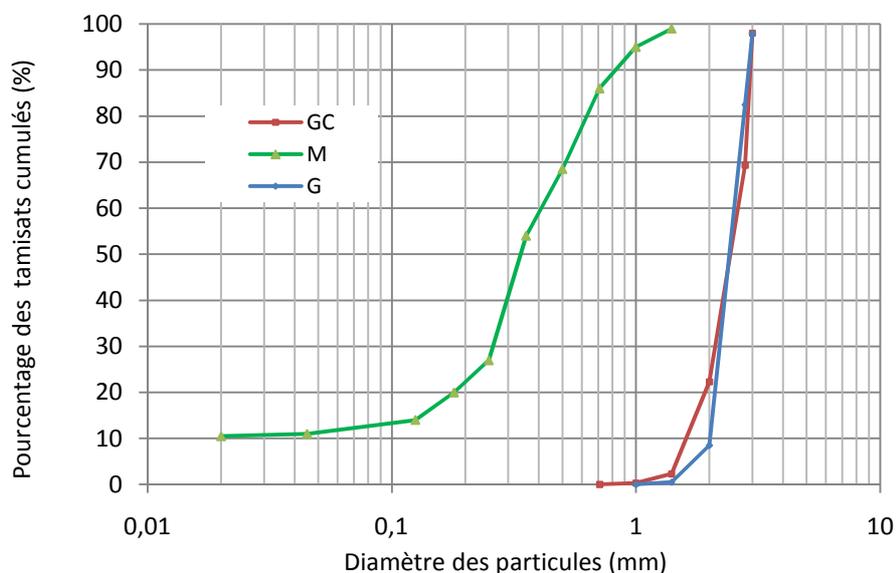


Figure 2.3 : Courbes granulométriques.

A partir de ces courbes, on remarque que la granulométrie du sable (G) varie de 1 à 3 mm et celle du sable (GC) de 0,7 à 3 mm alors que celle de la poudre de marbre (M) de 0.02 à 1.4 mm.

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).

Les sables (G) et (GC) ainsi que la poudre de marbre possèdent respectivement des modules de finesse de 3,1 ; 4,1 et 2,5 et des coefficients d'uniformité Cu respectifs de 1,3 et 10 ce qui donne pour le sable une courbe serrée et pour la poudre de marbre une courbe étalée.

2.1.2. Préparation du béton polymère

Plusieurs formulations ont été élaborées avec un taux constant de résine égal à 14%, ce choix est basé sur les travaux de Elalaoui et al [ELA-12], qui a rapporté que le teneur optimale de 13% de résine garantit l'obtention d'un béton polymère avec les performances mécaniques en flexion les plus élevées et à moindre coût. De plus, Gorninski et al [2] ont utilisé 12% de polyester orthophtalique et 13% de polyester isophtalique. Pour les granulats différents taux ont été envisagés (tableau 2.5).

Avant de procéder à la fabrication proprement dite du béton polymère (BP), 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 BP 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 afin d'assurer une teneur en humidité inférieure à 0,1% 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 BP 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 2.4a) en phase solvant (cire de démoulage fourni par Abel industrie) à appliquer en couches sur un moule propre (figure 2.4b) ; ce traitement est à appliquer quelques minutes à l'avance de la phase de remplissage. Pour la confection des éprouvettes, deux moules démontables en acier comportant chacun sept compartiments (Fig. 2.4c) ont été fabriqués et rectifiés selon la norme ASTM C580.02 aux ateliers du département de Génie mécanique de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma.

Tableau 2.5 : Formulation du béton polymère élaboré avec le sable commercialisé (GC) et le déchet de sable de carrière (G) et le déchet de poudre de marbre (M).

Formulations		Résine	Sable	Poudre de marbre
Sable (GC)	Sable (G)	(%)	(%)	(%)
GC0 M86	G0 M86	14	0	86
GC16 M70	G16 M70	14	16	70
GC26 M60	G26 M60	14	26	60
GC43 M43	G43 M43	14	43	43
GC60 M26	G60 M26	14	60	26
GC70 M16	G70 M16	14	70	16
GC86 M0	G86 M0	14	86	0





Figure 2.4 : a) Cire de démoulage, b) Moules prismatique, c) Moule en acier démontable.

Le mélange de chaque formulation du BP est obtenu suivant les étapes suivantes :

- ✓ Calculer et peser les proportions massiques des agrégats et la résine respectivement avec deux balances ayant les précisions de 5g et 0,01g (Fig. 2. 5a) ;
- ✓ 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 ;
- ✓ Les polyesters insaturés sont des résines thermodurcissables liquides qui avec l'adjonction d'un catalyseur (peroxyde organique) avec la possibilité d'intégration de différentes charges minérales pour diminuer le coût et la masse volumique, provoquera une réaction chimique et permet de former les résines polyesters à l'état solide. Il est important de noter que cette réaction chimique est irréversible. La proportion du catalyseur varie selon les durées de polymérisation souhaitées, environ 1% à 2% en masse. Mélanger pendant trois minutes la résine avec le durcisseur et l'accélérateur ;
- ✓ Bien mélanger le sable avec la poudre de marbre à sec 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 ainsi, on obtient un BP à l'état frais (Fig. 2.5b), et la phase de remplissage peut commencer ;
- ✓ Le remplissage, pour les différentes formulations (Tableau 2.4), est effectué manuellement en deux étapes, c.à.d. remplissage de moule à environ sa moitié, ce

Chapitre II : Mode de préparation des échantillons et techniques expérimentales

dernier est mis sur une table vibrante afin de réaliser un bon compactage des enrobés du BP, ensuite procéder au remplissage total du moule avec compactage ;

- ✓ Les échantillons du béton résineux de dimension (25x25x300 mm), sont démoulés après 24 h (Fig. 2.6) et conservés à température ambiante au moins 7 jours avant qu'ils ne soient testés en flexion 3-points.



Figure 2.5: a) Balance de précision 5g, balance de précision 0,01g, b) Constituants du BP et processus de malaxage.



Figure 2.6: Echantillons démoulés du BP avec différentes formulations.

2.2. Techniques expérimentales

2.2.1. Propriétés physiques

2.2.1.1. Mesure de la masse volumique

Les masses volumiques apparentes et absolues des constituants des BP ont été déterminées expérimentalement.

- *La masse volumique apparente* est la masse du granulat occupant l'unité de volume, tous vides inclus. Elle est donnée par la formule : $\rho_a = \frac{M_s}{V_t}$ où V_t est le volume total de la matière solide en tenant compte des pores et M_s est sa masse après son passage à l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

- *La masse volumique absolue* est donnée par la formule : $\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$ où V_s est le volume de la matière solide en excluant les pores. Pour mesurer ρ_s des BP on utilise la méthode de la pesée hydrostatique qui nécessite une balance de précision $\pm 0.1g$ et équipée d'un crochet pour une pesée hydrostatique (voir Figure 2.7). Elle repose sur la mesure de l'échantillon dans l'eau et dans l'air.



Figure 2.7 : Balance pour pesée hydrostatique.

Les différentes étapes sont les suivantes :

- Peser l'échantillon en BP dans l'air après son passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, soit M_s
- Peser l'échantillon dans l'eau, soit M'_s .

Le volume de l'échantillon sec est

$$V_s = \frac{M_s - M'_s}{\gamma_w} \quad (2.1)$$

2.2.1.2. Mesure de la porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau des différents échantillons a été mesurée aussi par la technique de la pesé hydrostatique pour cela il faut peser l'échantillon :

- saturé, dans l'air soit M_{air} ;
- sec soit M_{sec} .
- dans l'eau soit M_{eau} .

La porosité sera calculée par la formule suivante :

$$n (\%) = 100 * \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (2.2)$$

2.2.1.3. Diffractomètre à rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique utilisée qui s'applique sur des matériaux présentant une structure cristalline. On obtient un spectre qui trace l'évolution de l'intensité diffractée en fonction de la longueur d'onde pour une différence de potentiel donnée.

L'échantillon sous la forme d'une poudre (réduit par broyage) étalé sur une plaquette solide est bombardé par un faisceau de rayon X monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 1.542 \text{ \AA}$ (Fig. 2.8). Les essais ont été effectués à l'université de Grenoble en France.



Figure 2.8 : Diffractomètre à rayon X

2.2.2. Essais de caractérisation mécanique

2.2.2.1. Essais de flexion 3- points statique

Les essais mécaniques de flexion statique des BP sont réalisés sur une machine d'essai universel de type **ZWICK ROELLE Z005** (Figure 2.9). Ce type de machine est équipé 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 *Testexpert V10.11* qui permet d'enregistrer les résultats sur un fichier texte sous forme d'un procès-verbal d'essais qu'on pourra exploiter par la suite sur un ordinateur personnel ou portable en utilisant un utilitaire (Microsoft Excel, Origine, Matlab, ...) qui permet de lire le fichier récupéré.

Des essais de flexion statique 3-points sont menés sur des éprouvettes prismatiques de BP. Elles sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge concentrée à mi-travée avec une vitesse de chargement de 2 mm/mn. L'éprouvette est posée sur deux rouleaux à une portée L et de dimensions et vitesse de chargement selon la norme indiquée sur le tableau 2.6 et la figure 2.10. Les essais sont réalisés à température ambiante (23°C et 50% HR) et la charge maximale est enregistrée au cours de l'essai ainsi que les valeurs de la force et du déplacement de la traverse mobile.

Tableau 2.6 : Dimensions et vitesse de chargement pour les essais de flexion.

Essai	Dimensions	Vitesse de chargement	Portée	Norme
Essai de flexion	25x25x300 mm	2 mm/mn	270 mm	ASTM C580-02

Les propriétés mécaniques (la contrainte à la rupture et le module de Young en flexion) sont déterminées par les formules suivantes selon aussi la norme ASTM C580-02.

$$\sigma_f = \frac{3 F l}{2 b h^2} \quad (2.3)$$

Dans ce cas, le module d'élasticité doit être calculé au point où la déflexion est de 50% de la déviation maximale. Il est calculé comme suit:

$$E_f = \frac{L^3 M}{4b h^3} \quad (2.4)$$

F: la force (N),

Chapitre II : *Mode de préparation des échantillons et techniques expérimentales*

l : la longueur entre appuis (mm) ;

b et h sont respectivement la largeur et la hauteur de l'éprouvette (mm) ;

σ_f : la contrainte à la rupture (MPa) ;

E_f : le module de Young (GPa) ;

M : La pente tracée depuis l'origine par le point sur la courbe charge-déplacement où ce dernier est égal à 50% du déplacement à la rupture (N/mm).



Figure 2.9 : Machine d'essai universel de type *ZWICK ROELLE Z005*.

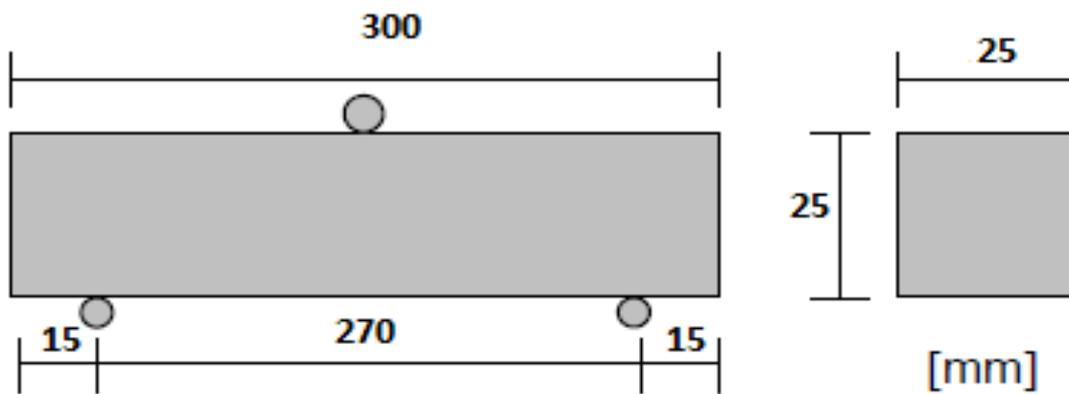


Figure 2.10 : Principe de l'essai de flexion 3-points.

2.2.2.2. Essai de fatigue de flexion

Les essais de fatigue cyclique (Figure 2.11) sur les BP sont menés en contrôle déplacement avec une forme d'onde sinusoïdale d'une fréquence de 2 Hz. Au cours de ces essais, le déplacement moyen (d_{moy}) est maintenu constant est égal à 50% du déplacement à la rupture en statique (d_{rup}).

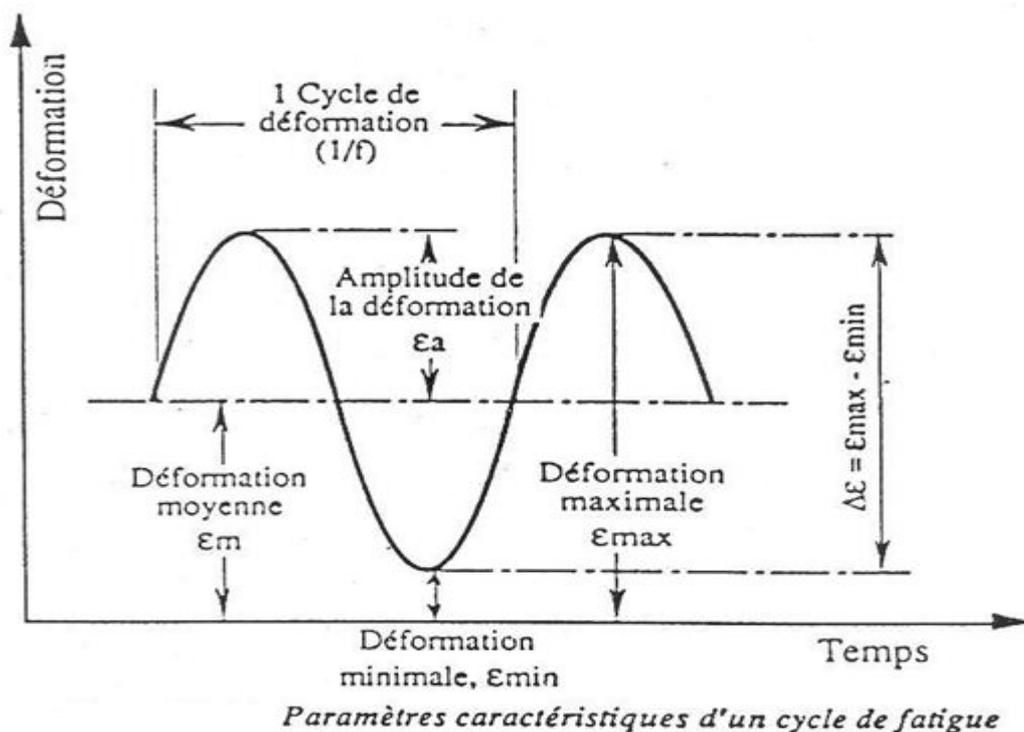


Figure 2.11 : Différents paramètres pour l'étude en fatigue cyclique du BP [BEZ-04].

Plusieurs niveaux de chargement r_d ($r_d = d_{\max}/d_{\text{rup}}$) représentant le rapport du déplacement maximum au déplacement à la rupture statique sont considérés, variant de 0,95 à 0,55. Les paramètres d'essai sont calculés d'après les formules suivantes [BEZ-03a] [BEZ-03b] [BEZ-03c] :

$$d_{\max} = r_d * d_{\text{rup}} \quad (2.5)$$

$$d_{\text{moy}} = 50\% * d_{\text{rup}} \quad (2.6)$$

$$A = d_{\max} - d_{\text{moy}} \quad (2.7)$$

$$d_{\min} = d_{\max} - A \quad (2.8)$$

Où :

r_d et A sont respectivement le niveau de chargement et l'amplitude ;

d_{rup} , d_{\max} , d_{moy} , d_{\min} sont respectivement les déplacements à la rupture, maximal, moyen et minimal.

Chapitre III

Résultats et discussions des essais de statique

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons d'une part, à l'influence de l'incorporation de la poudre de marbre issue des déchets de marbrerie dans le béton résineux avec différents taux, sur les propriétés physico-mécaniques. D'autre part, on s'intéresse à l'effet de la substitution du sable commercialisé (provenant de l'étranger) par un déchet de sable de carrière (local).

L'utilisation du déchet de marbre est très nécessaire, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger les ressources naturelles. Actuellement, la poudre de marbre obtenue par broyage des chutes est l'une des additions minérales les plus utilisées dans la production du béton ordinaire dans le monde entier notamment en Turquie qui possède 40% des réserves mondiales [GEN 12]. Plusieurs travaux traitant l'effet de l'incorporation de la poudre de marbre sur les bétons ordinaires ont été publiés comme on l'a vu dans la partie bibliographique, alors que pour le béton polymère peu de recherches ont été effectuées.

3.1. Formulations des BPs

Afin d'étudier cette influence, quatorze différentes formulations du BP ont été confectionnées avec une même résine polyester de taux constant égal à 14%. Elles se différencient essentiellement par 2 types de composition du squelette granulaire, l'un composé par du sable commercialisé GC et le déchet de poudre de marbre M alors que l'autre, avec du déchet de sable de carrière G utilisé comme substitution au GC et poudre de marbre M.

Les dosages massiques des charges minérales de chaque formulation sont donnés sur le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Formulations du béton polymère élaborées avec le sable commercialisé GC ou le déchet de sable de carrière G et de poudre de marbre M.

Formulations		Résine (%)	Sable(%)	Poudre de marbre (%)
Sable GC	Sable G			
GC0 M86	G0 M86	14	0	86
GC16 M70	G16 M70	14	16	70
GC26 M60	G26 M60	14	26	60
GC43 M43	G43 M43	14	43	43
GC60 M26	G60 M26	14	60	26
GC70 M16	G70 M16	14	70	16
GC86 M0	G86 M0	14	86	0

3.2 Résultats expérimentaux et analyse des essais physico-mécaniques

Dans le but d'étudier l'influence de l'incorporation du déchet de la poudre de marbre et la substitution du sable de carrière dans le BP sur son comportement mécanique, une démarche comparative entre un BP de référence contenant uniquement du sable GC ou sable G et un BP contenant en plus du sable, de la poudre de marbre avec différents taux.

3.2.1 Essais physiques

3.2.1.1 Masse volumique

La masse volumique absolue ρ_s des BP, a été calculée selon la procédure décrite dans le paragraphe (2.2.1.1) du chapitre 2. Les résultats du tableau (3.2) montrent que La masse volumique la plus faible est obtenue pour les échantillons ne contenant pas de marbre, et avec l'incorporation de ce dernier, la masse volumique augmente de façon progressive jusqu'à atteindre les valeurs maximales de 2267 Kg/m³ et de 2432 Kg/m³ soit des taux de 9 % et 14% respectivement pour les échantillons élaborés avec G et GC. Cela peut être du au fait que la poudre de marbre qui est un filler, intervient par sa finesse et s'insère dans les petits vides entre les grains fins de sable, il en résulte une meilleure compacité; ce qui justifie l'augmentation de la masse volumique. On remarque aussi que les masses volumiques des BP élaborés avec le sable GC sont supérieures à celles des BPs conçus avec G (Fig. 3.1).

Tableau 3.2 : Masse volumique moyenne des différentes formulations.

Taux de marbre (%)		0	16	26	43	60	70	86
Masse volumique absolue (Kg/m ³)	G*	2062	2174	2242	2257	2266	2267	2192
	GC*	2082	2390	2432	2417	2241	2236	2192

* Taux G et GC = 86% – taux de marbre

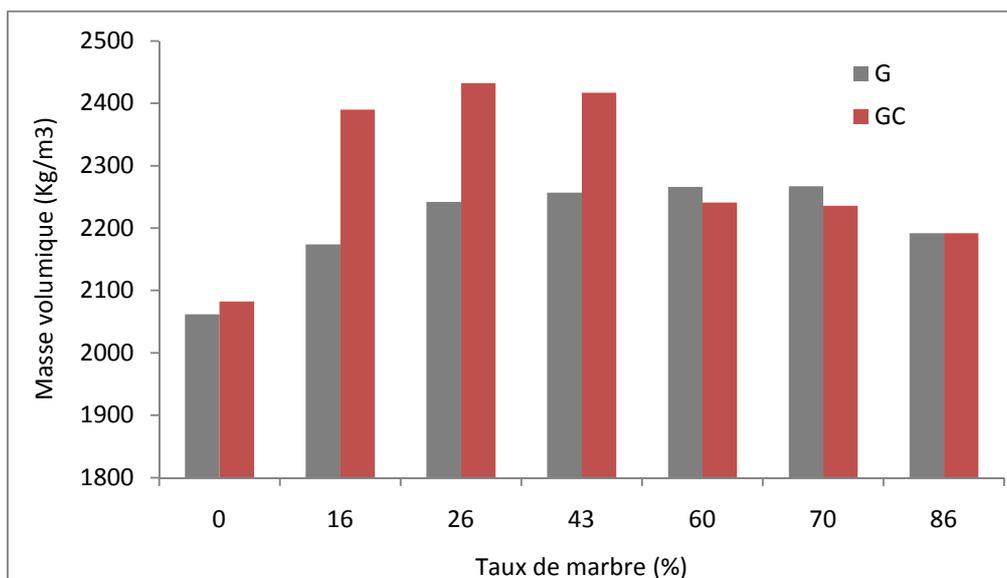


Figure 3.1 : Masse volumique moyenne des BP en fonction du taux de marbre.

3.2.1.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité des 14 formulations des BP a été mesurée par la méthode de la pesé hydrostatique exposée au paragraphe (2.3.1.1) du chapitre 2. La porosité a atteint un maximum de 12,10 % et 9,39 % respectivement pour les échantillons élaborés avec les sables G et GC ne contenant pas de poudre de marbre (0%) comme le montre la figure 3.2. Ensuite, elle se trouve diminuée à 4,5% et 4,7% pour des taux de marbre de 16%, après ça elle devient presque constante pour les formulations contenant 26%, 43%, 60% et 70% de marbre soit respectivement des porosités variant de 0,9 à 1,10% pour le sable G et 1,09 à 1.45% pour GC. En revanche, une légère augmentation de la porosité a été constatée de l'ordre de 2,61% pour les échantillons fabriqués ayant comme renfort seulement du marbre.

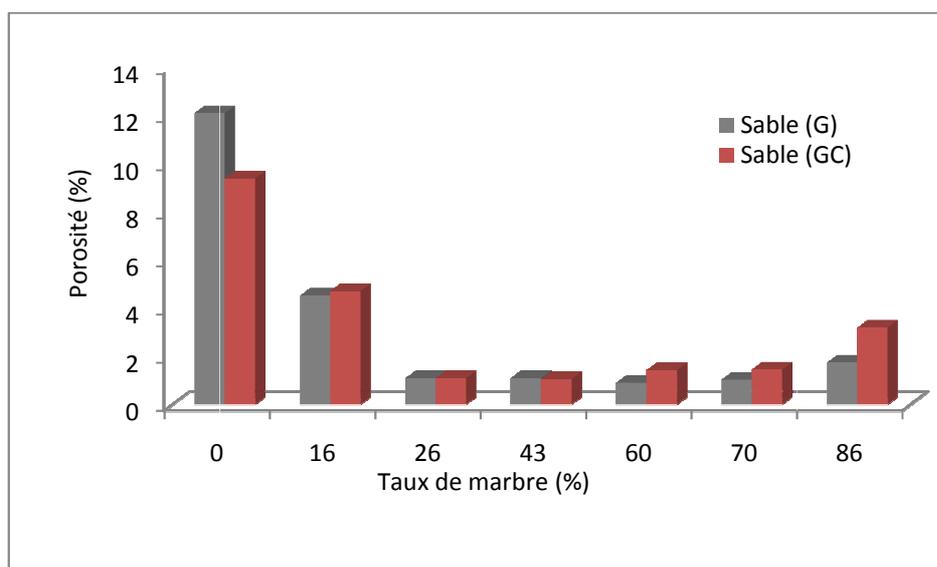


Figure 3.2 : Porosité en fonction des différentes formulations.

La contrainte en flexion en fonction de la porosité pour les BP présentée dans la figure 3.3 montre que la contrainte diminue avec l'augmentation de la porosité. Il est à noter aussi que les contraintes obtenues des BP constitués par le sable GC sont supérieures à ceux préparés avec G.

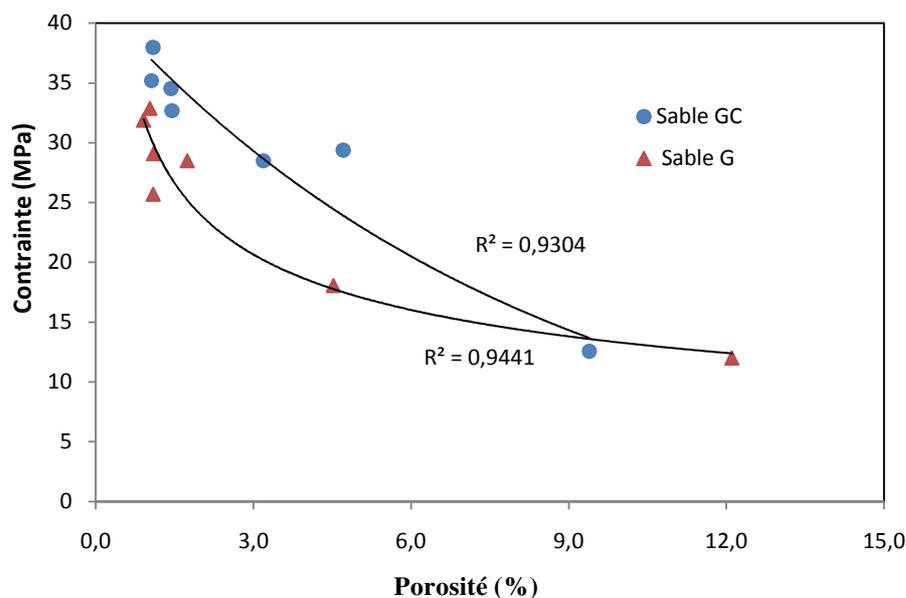


Figure 3.3 : Contrainte en fonction de la Porosité.

3.2.1.3 Diffractomètre à Rayons X

Les figures 3.4, 3.5 et 3.6 représentent les courbes de l'intensité des rayons X diffractés en fonction des angles de diffraction, correspondent respectivement aux diffractogrammes ou spectre obtenus par diffraction des rayons X d'une poudre de granulats de sables G et GC et poudre de marbre M. L'identification des principales phases minérales est réalisée à l'aide d'un logiciel par rapport à la position des pics de diffraction et donc la détermination cristallographique de l'échantillon.

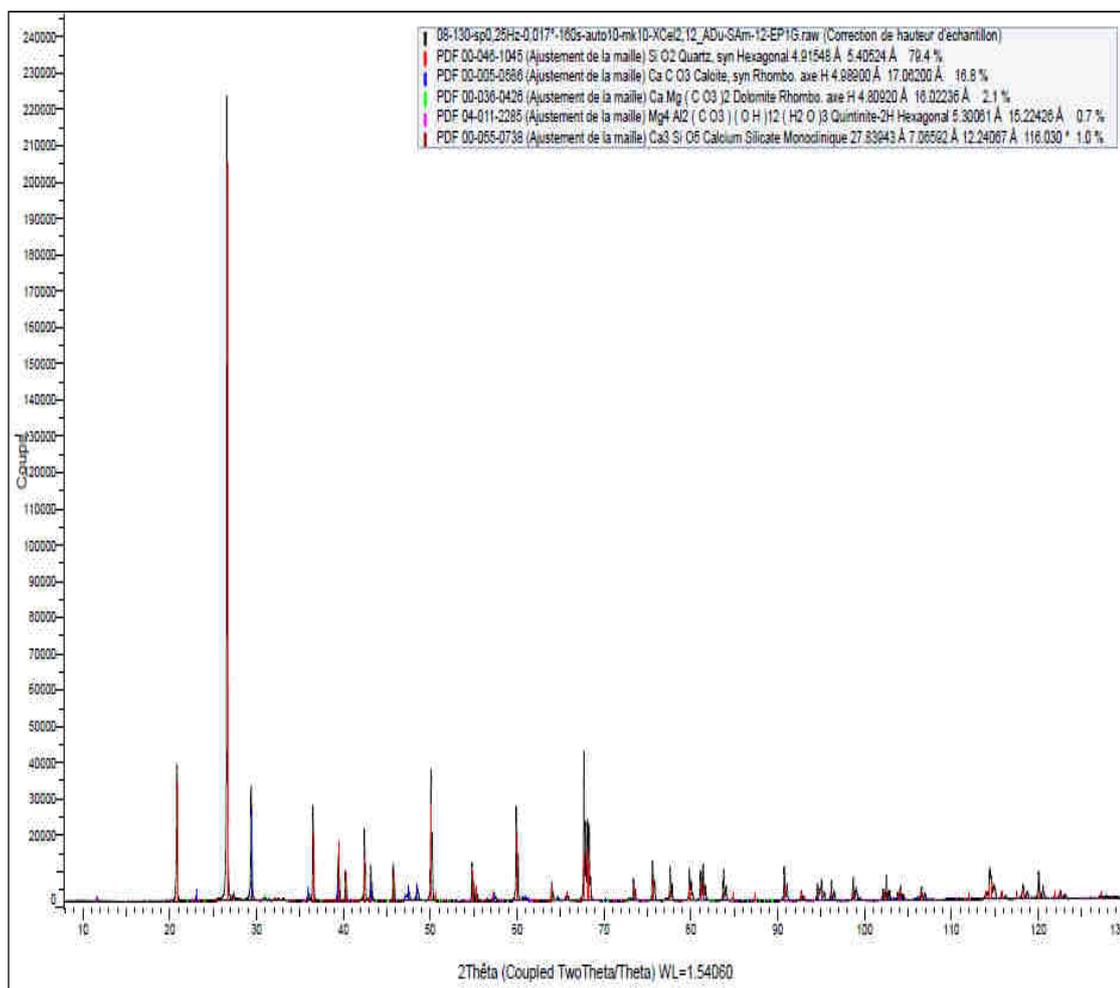


Figure 3.4 : Diffraction des rayons X du sable G.

Les spectres (Fig. 3.4) montrent pour le sable G la présence en majeure partie des pics relatifs au quartz (SiO_2) soit un taux de 79,4% et en mineur des pics caractérisant le carbonate de calcium (CaCO_3) soit 16,8% et des traces ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

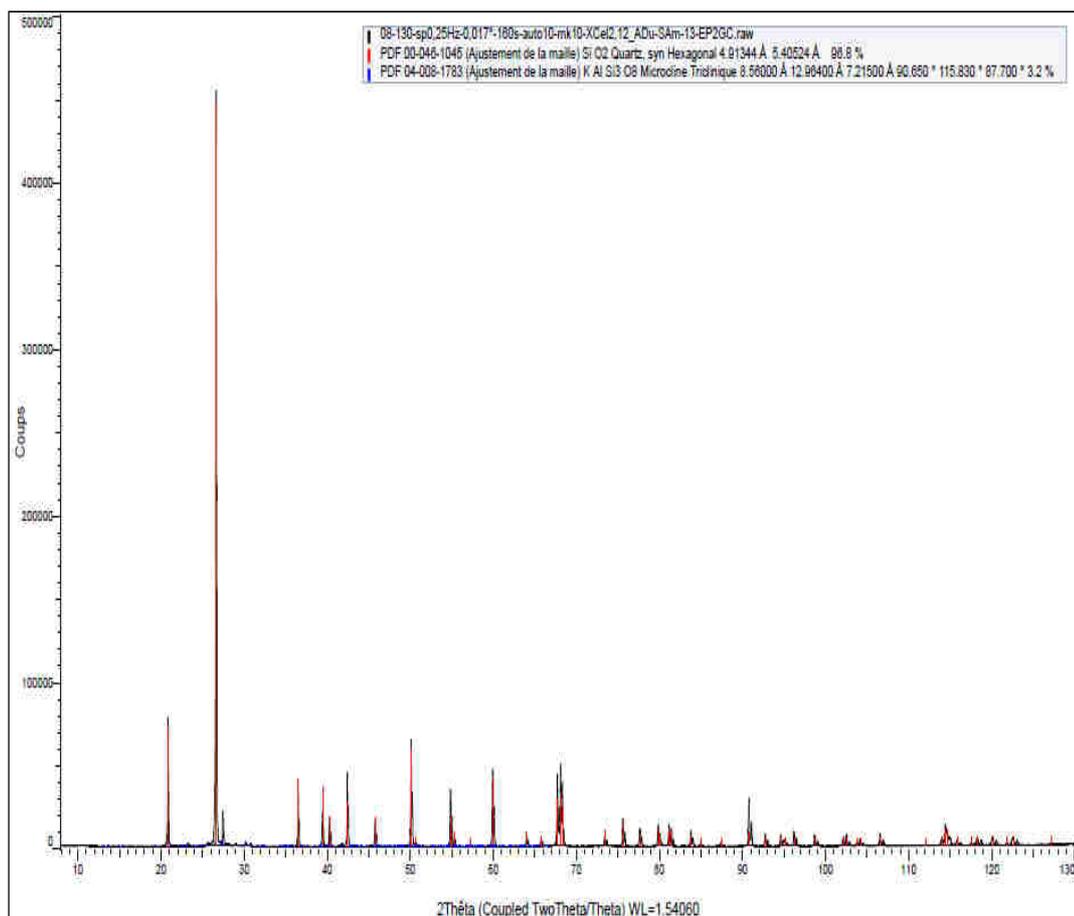


Figure 3.5 : Diffraction des rayons X du sable GC.

Pour le sable GC (Fig. 3.5), on identifie en majeure présence du quartz soit un taux de 96,8% et en mineur celle du microcline (KAlSi_3O_8) soit 3,2% et l'absence de pics caractérisant le carbonate de calcium (CaCO_3).

Pour la poudre de marbre (Fig. 3.6), on identifie pour la totalité la présence de pics caractérisant le calcite (CaCO_3) soit 100%.

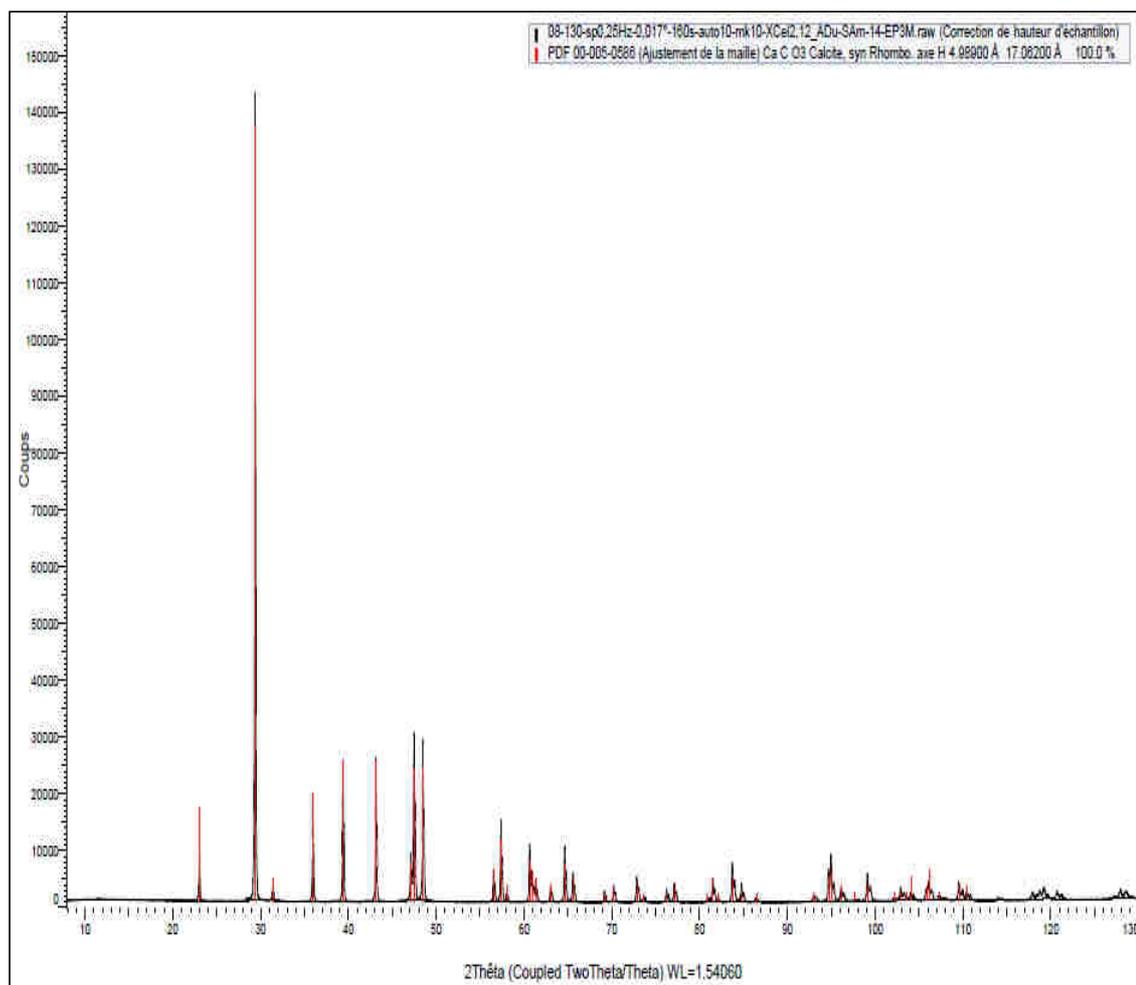


Figure 3.6 : Diffraction des rayons X de la poudre de marbre.

3.2.2 Essais mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des différentes formulations ont été évaluées afin d'obtenir la formulation alliant au maximum de performance mécanique/coût et ainsi valoriser l'incorporation de la poudre de marbre et la substitution du sable commercialisé GC par un déchet de sable G de carrière local récupéré.

3.2.2.1 Essais de flexion trois points

Les essais mécaniques de flexion 3-points ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques 25x25x300 mm selon la procédure décrite au paragraphe (2.1.1.1) avec une vitesse de chargement de 2 mm/mn. Les essais ont été effectués à température ambiante sur des éprouvettes âgées d'au moins 7 jours.

Les figures 3.7 à 3.13 représentent les courbes types de l'évolution de la contrainte en fonction du déplacement pour les différentes formulations élaborées respectivement, avec le

sable G et GC. On constate que le comportement du BP change en fonction des taux de granulats et la poudre de marbre.

Pour les formulations contenant un taux de marbre important, à partir de la moitié, de la masse granulaire totale, soit les taux suivants : 86%, 70%, 60% et 43% correspondant respectivement aux figures 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10, l'évolution des courbes contrainte déplacement se déroule en trois phases d'une façon pratiquement similaire. Elle commence par une première phase de démarrage de l'essai ou la courbe est quasi-linéaire suivie d'une deuxième phase avec une pente plus importante caractérisée par une augmentation linéaire de la contrainte en fonction du déplacement. La troisième phase, très courte, se caractérise par une chute brutale de la contrainte conduisant ainsi à une rupture de l'échantillon ce qui lui donne un comportement à caractère fragile.

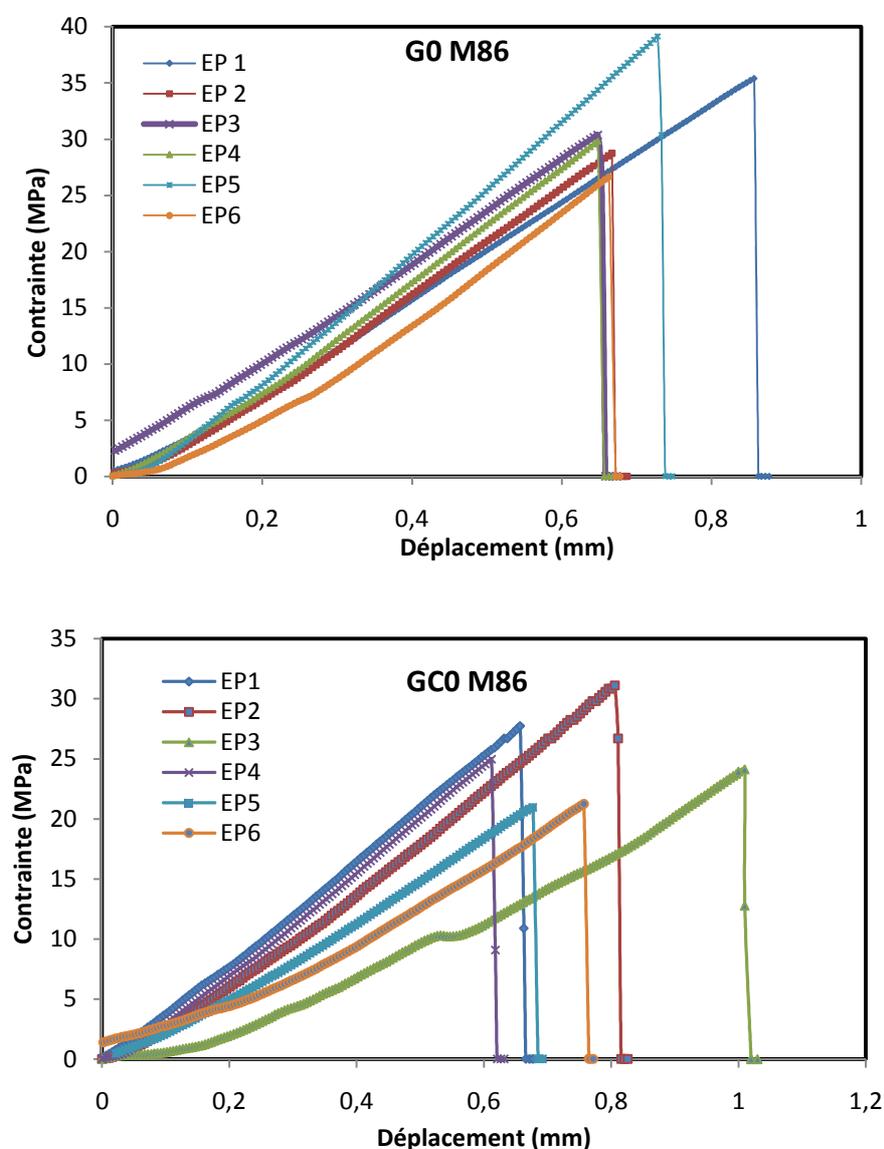


Figure 3.7 : Contrainte-déplacement des formulations G0 M86 et GC0 M86.

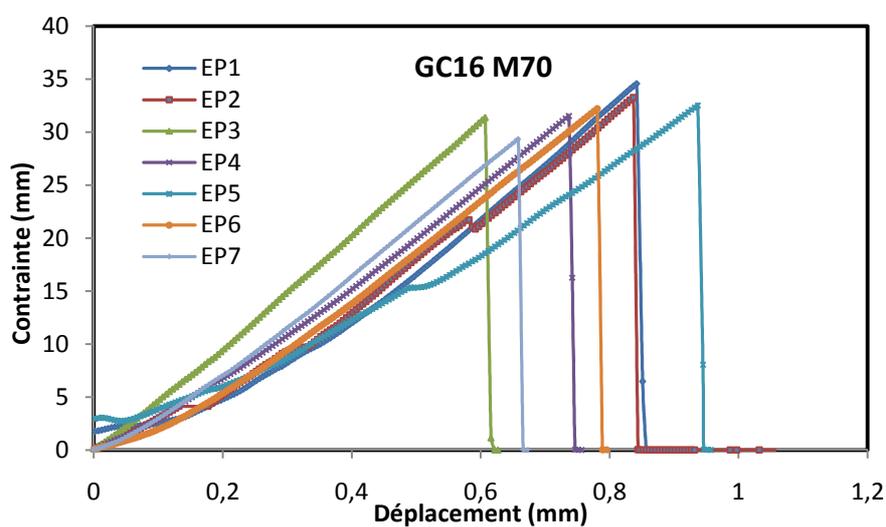
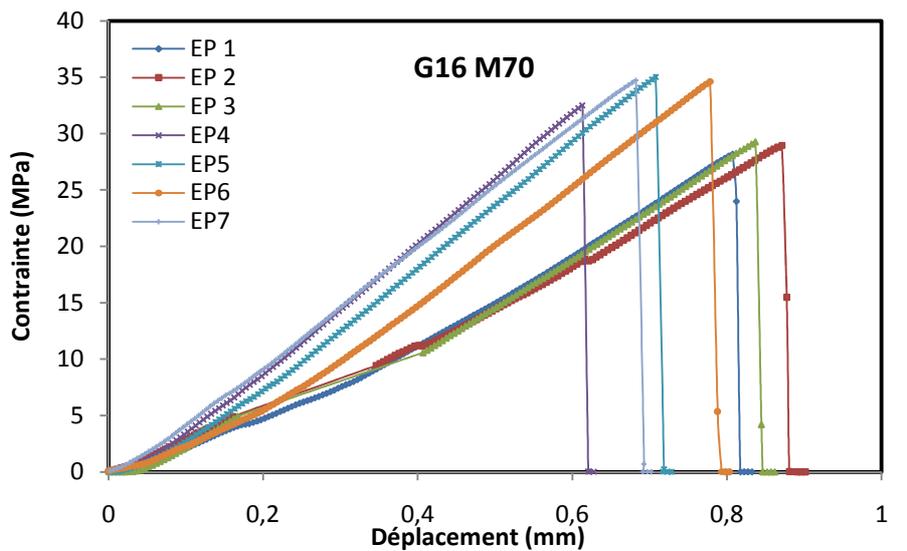
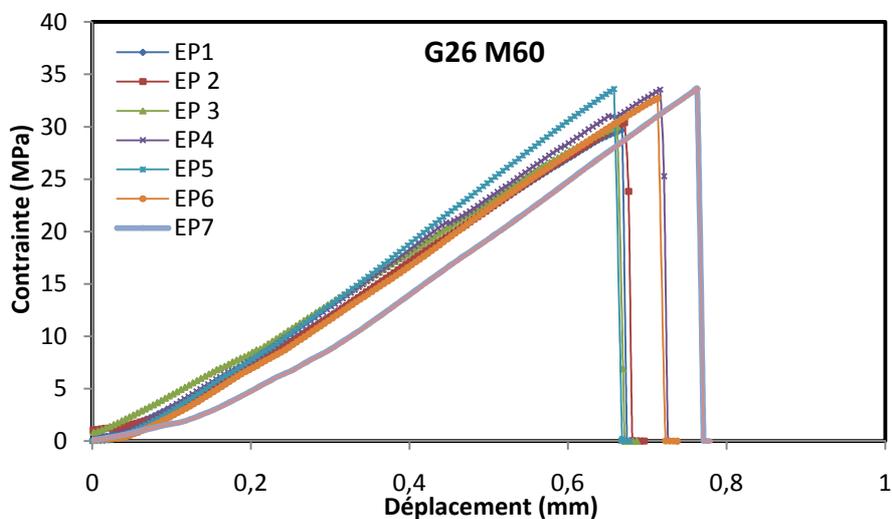


Figure 3.8 : Contraite-déplacement des formulations G16 M70 et GC16 M70.



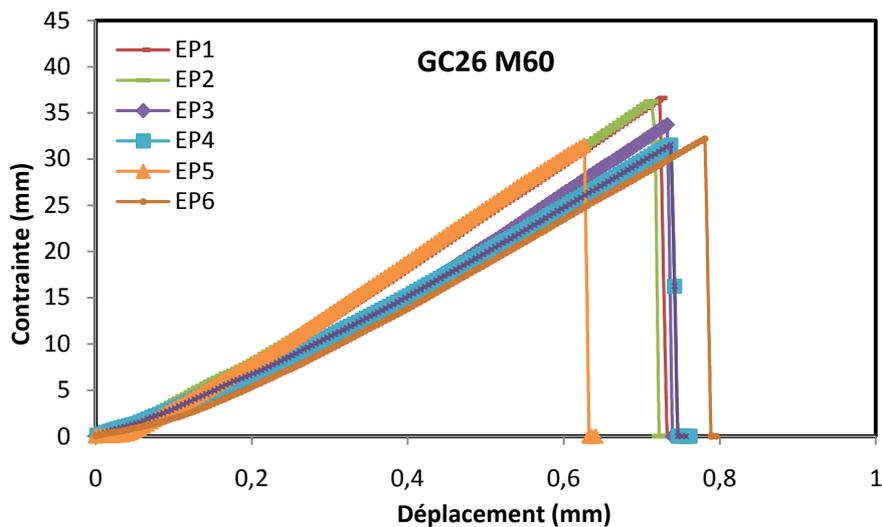


Figure 3.9 : Contrainte-déplacement des formulations G26 M60 et GC26 M60.

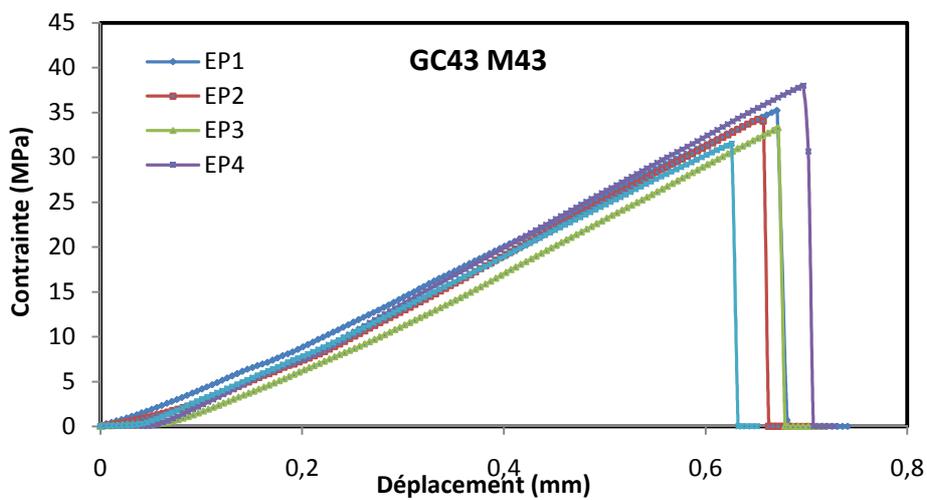
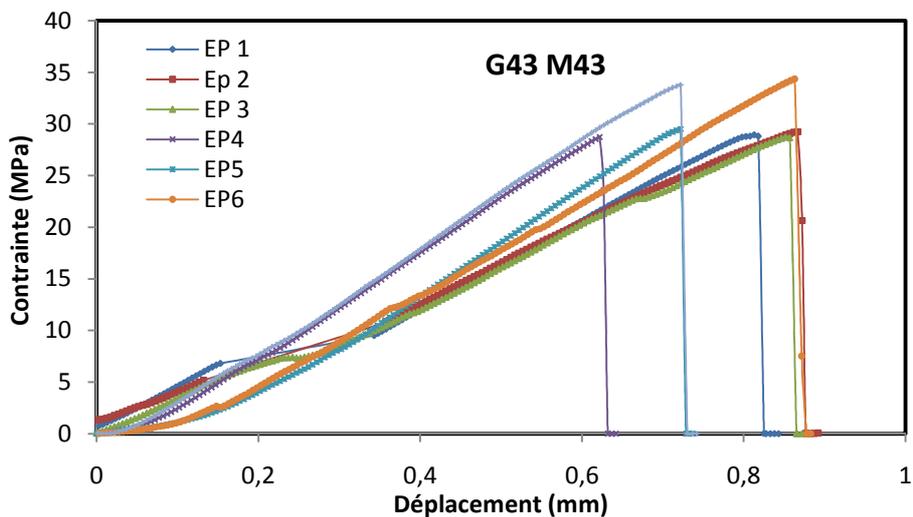


Figure 3.10 : Contrainte-déplacement des formulations G43 M43 et GC43 M43.

Les courbes de la figure 3.11 représentent le comportement contrainte/déplacement des différentes formulations des BPs (G60 M26 et GC60 M26) constitués par les sables G et GC et contenant 26% de poudre de marbre. L'analyse de cette figure montre que le comportement du BP GC60 M26 se déroulant en trois phases est similaire à ceux déjà présentés dans les figures 3.7 à 3.10. Tandis que, pour le BP G60 M26, l'évolution de la contrainte en fonction du déplacement est la même que pour la première sauf que cette fois ci la rupture est moins fragile.

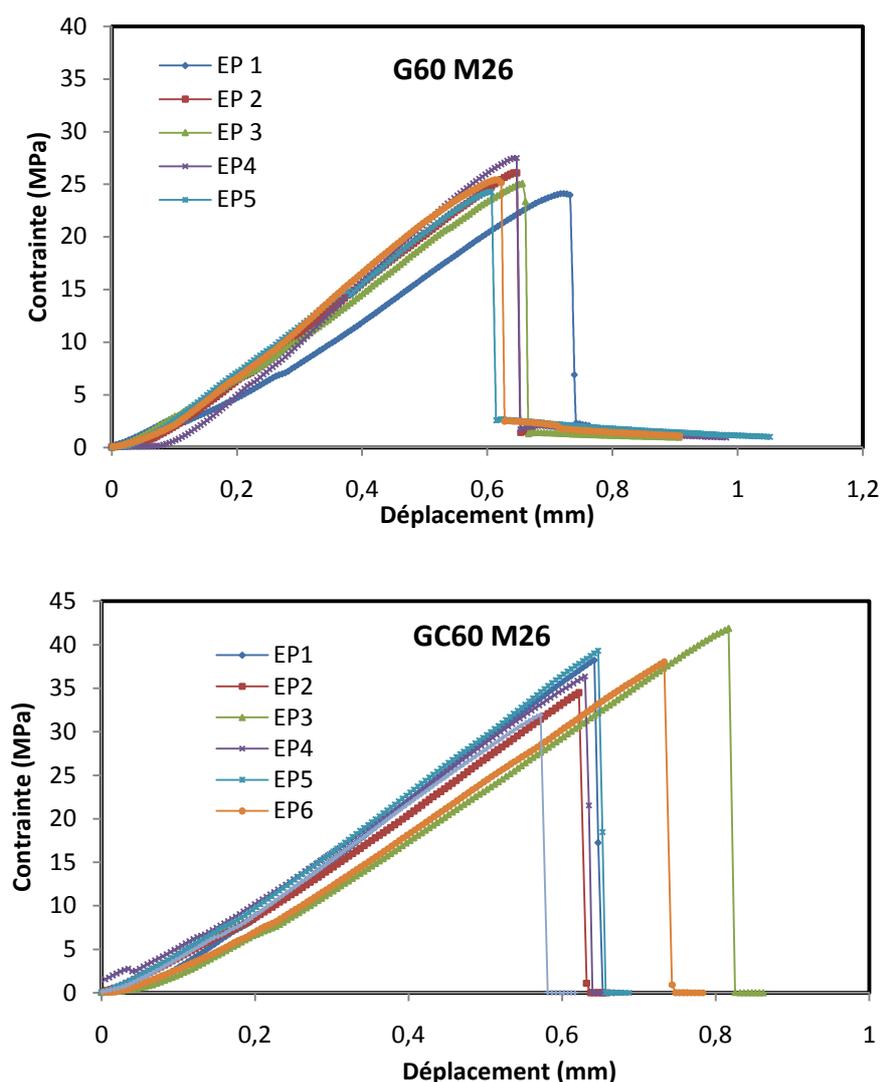


Figure 3.11 : Contrainte-déplacement des formulations G60 M26 et GC60 M26.

Enfin, pour la dernière série (Fig. 3.12 et 3.13) représentant les formulations G70 M16, GC70 M16, G86 M0 et GC86 M0 dont le taux de marbre est faible soit 16% ou 0%, l'évolution contrainte/déplacement est différentes des séries précédentes (présentés dans les figures 3.7 à 3.11). En effet, pour les formulations élaborées avec G, les perturbations sont

moins importantes avec un comportement non linéaire jusqu'à une rupture moins brutale, c'est-à-dire que la chute de contrainte provoquant la rupture n'atteint pas la valeur zéro (Fig. 3.12a et 3.13a). Par contre, pour les formulations contenant uniquement le sable GC (Fig. 3.12b et 3.13b), le comportement est linéaire jusqu'à la rupture accompagné de perturbations plus prononcées que celles enregistrées pour les échantillons contenant G. Il faut noter aussi que les perturbations enregistrées pour les BPs conçus avec les sables G ou GC et sans poudre de marbre (0% de marbre) sont plus prononcées que celle avec 16% de marbre.

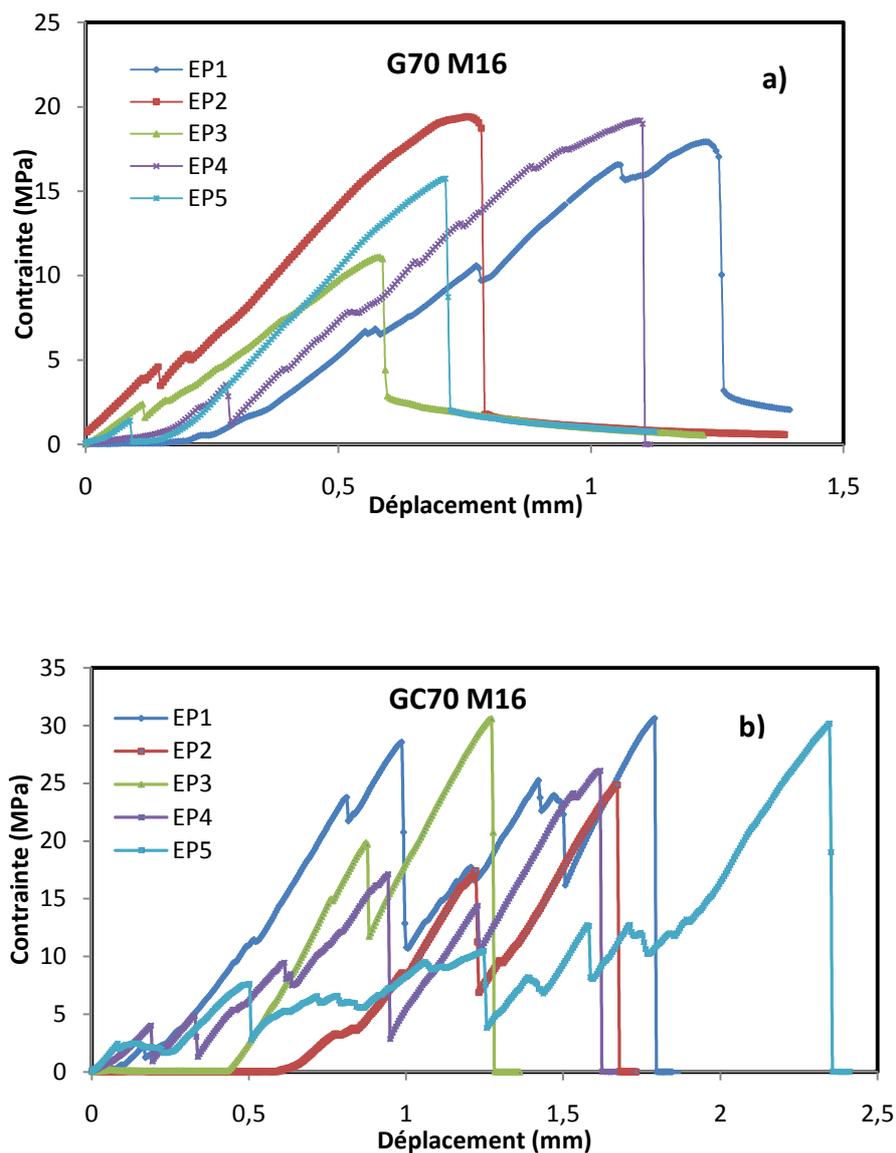


Figure 3.12 : Contrainte-déplacement des formulations : a) G70 M16 et b) GC70 M16.

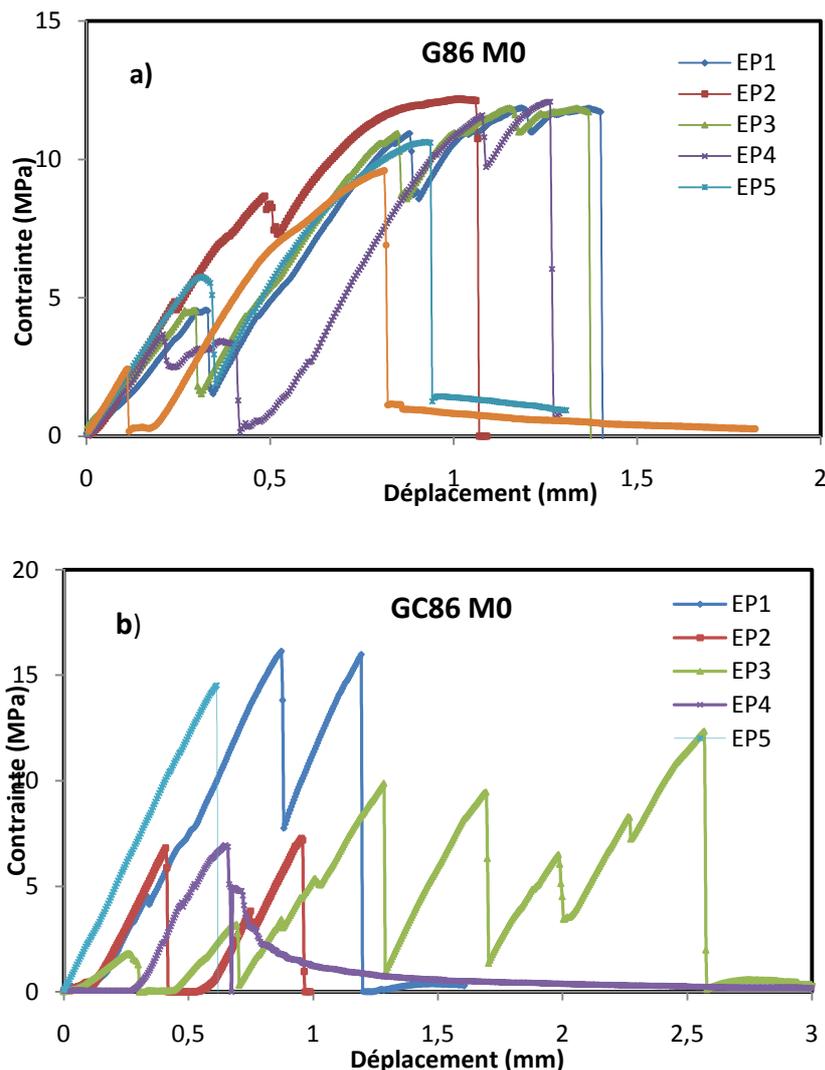


Figure 3.13 : Contrainte-déplacement des formulations : a) G86 M0 et b) GC86 M0.

Les résultats des caractéristiques mécaniques obtenus pour les quatorze formulations des BPs élaborées avec les sables GC et G, testées en flexion 3-points, sont donnés dans le tableau 3.3. Les valeurs moyennes indiquées représentent les contraintes ultimes, les déplacements à la rupture et les modules de Young ainsi que leurs écarts-types correspondants. Ils ont été comparés à ceux de Shokrieh *et al.* [SHO-15], qui ont utilisé un mélange de 25% de résine et 75% de sable de silice ayant un diamètre maximal de grains de 5 mm. Les éprouvettes, de dimensions des 400x75x75 mm³, ont été testées en flexion 3-points avec un entre axe de 250 mm. La contrainte maximale obtenue par Shokrieh *et al.* [SHO-15] est de l'ordre de 19,69 MPa. Alors que, les meilleurs formulations du présent travail ont donné des contraintes de l'ordre de 37,98 MPa et de 32,89 MPa respectivement pour les éprouvettes fabriquées avec les sables GC et G suite à l'incorporation de 26% et 70% de poudre de marbre.

Le béton ainsi conçu est plus performant du fait que l'on peut obtenir des augmentations allant jusqu'à 93% malgré une portée de 270 mm pour une section 25x25 mm² au lieu de 250 mm et une section 75x75 mm². De plus, les BPs du présent travail sont plus économiques car ils utilisent 56% moins de résine par rapport à celui de Shokrieh *et al.* du fait que la quantité de résine est de 14% au lieu de 25%. A partir de ces comparaisons, on peut dire que la présence de la poudre de marbre a contribué non seulement à l'amélioration de la résistance du BP mais aussi à avoir un matériau économique et écologique.

Tableau 3.3. Valeurs moyennes des contraintes de flexion pour les différentes formulations des BPs et leurs déplacements respectifs.

Formulation	Contrainte (MPa)	Déplacement (mm)	Module de Young (GPa)
GC0/M86	28,49 ± 1,94	0,717 ± 0,083	21,10±1,97
G0/M86	28,49 ± 1,94	0,717 ± 0,083	21,10 ± 1,97
GC16/M70	32,68 ± 1,32	0,756 ± 0,096	19,55±2,80
G16/M70	32,89 ± 2,29	0,710 ± 0,081	20,86 ± 2,80
GC26/M60	34,54 ± 2,06	0,726 ± 0,010	19,96±1,80
G26/M60	31,89 ± 1,69	0,677 ± 0,023	20,92 ± 0,78
GC43/M43	35,19 ± 1,75	0,674 ± 0,014	23,00 ± 1,40
G43/M43	29,06 ± 0,34	0,766 ± 0,100	16,52 ± 1,93
GC 60/M26	37,98 ± 1,06	0,663 ± 0,043	25,9±1,8 0
G60/M26	25,71 ± 1,24	0,667 ± 0,032	12,58 ± 1,08
GC70/M16	29,38 ± 2,20	1,755 ± 0,391	5,23 ±2,60
G70/M16	18,07 ± 1,68	0,946 ± 0,224	3,91 ± 3,70
GC 86/M0	12, 57 ± 3,34	1,332 ± 0,859	7,6 ± 5,0
G86/M0	12,00 ± 0,16	1,278 ± 0,149	3,08 ± 2,90
Shokrieh <i>et al.</i> [SHO-15]	19,69	2,96	

Les figures (3.14) et (3.15) représentent les contraintes de flexion ainsi que le module de Young en fonction du taux de marbre, On remarque que l'apport du marbre contribue à l'augmentation de la contrainte du BP ainsi que sa rigidité (module de Young).

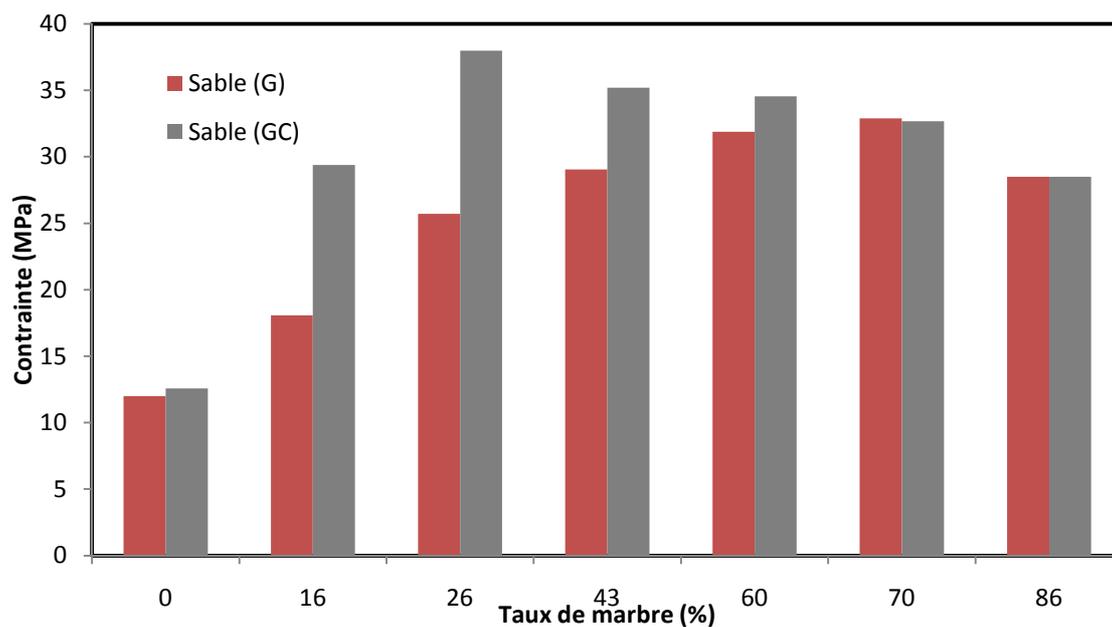


Figure 3.14 : Contrainte de flexion en fonction du taux de marbre.

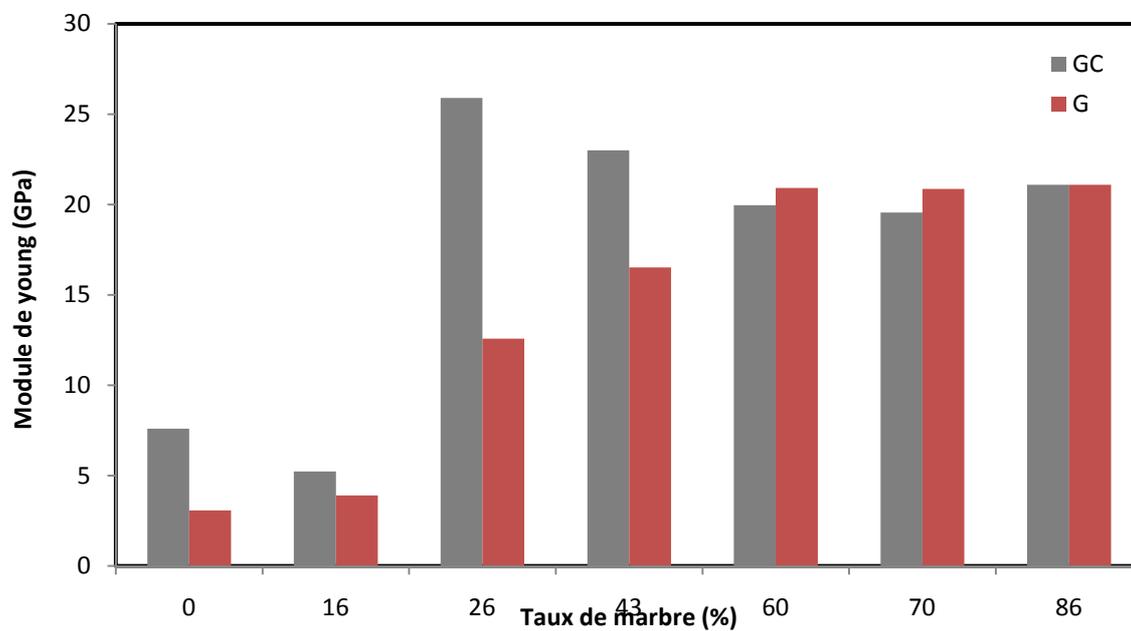


Figure 3.15 : Module de Young en fonction du taux de marbre.

3.2.3. Faciès de rupture et d'endommagement

L'analyse des faciès de rupture des éprouvettes révèle deux modes d'endommagement pour l'ensemble des formulations des BPs comme le montre la figure 3.16.

Une rupture brutale a été observée pour le premier mode, obtenue pour les éprouvettes ayant un taux de marbre supérieur ou égale à 43%, (Figure 3.16a). Le deuxième mode est caractérisé par une rupture moins fragile suite à des craquements dus non seulement aux microfissures mais aussi à l'arrachement des grains de sable pour les poutres dont le taux de marbre est inférieur à 43% (Figure 3.16b).

3.3. Etude statistique par analyse de variance ANOVA

Les résultats obtenus présentent des dispersions remarquables donc, une analyse statistique s'est avérée nécessaire en utilisant d'une part, la variance ANOVA afin de mettre en évidence l'effet significatif de l'incorporation du déchet de poudre de marbre et d'autre part la distribution de Weibull à 2 et à 3 paramètres qui permettra d'estimer les caractéristiques mécaniques (contrainte et déformation à la rupture et module de Young) des bétons polymères testés.

3.3.1. Concepts de base de l'analyse de variance ANOVA

ANOVA permet d'analyser la variation globale d'un ensemble de données ou d'un échantillon, en évaluant la contribution de chaque variable ou facteur à la dispersion globale. Cette analyse statistique se révèle être un outil puissant, et elle a été largement utilisée comme méthode efficace pour le traitement de données dans de nombreux domaines d'investigation, y compris dans l'évaluation des composants des bétons polymères [GOR-04].

Le concept de l'analyse elle-même est assez simple, cependant, dans les groupes qui sont plus semblables que différents, l'analyse de variance ANOVA fournit un outil logique pour évaluer l'importance de la différence entre ces groupes. Par conséquent, l'analyse de la variance devient un outil important pour montrer les différences statistiques entre les moyennes de deux ou plusieurs populations ou échantillons différents. Les différences ne sont pas si claires que si une analyse ANOVA est utilisée pour comparer les moyennes et les erreurs pour des niveaux de signification.

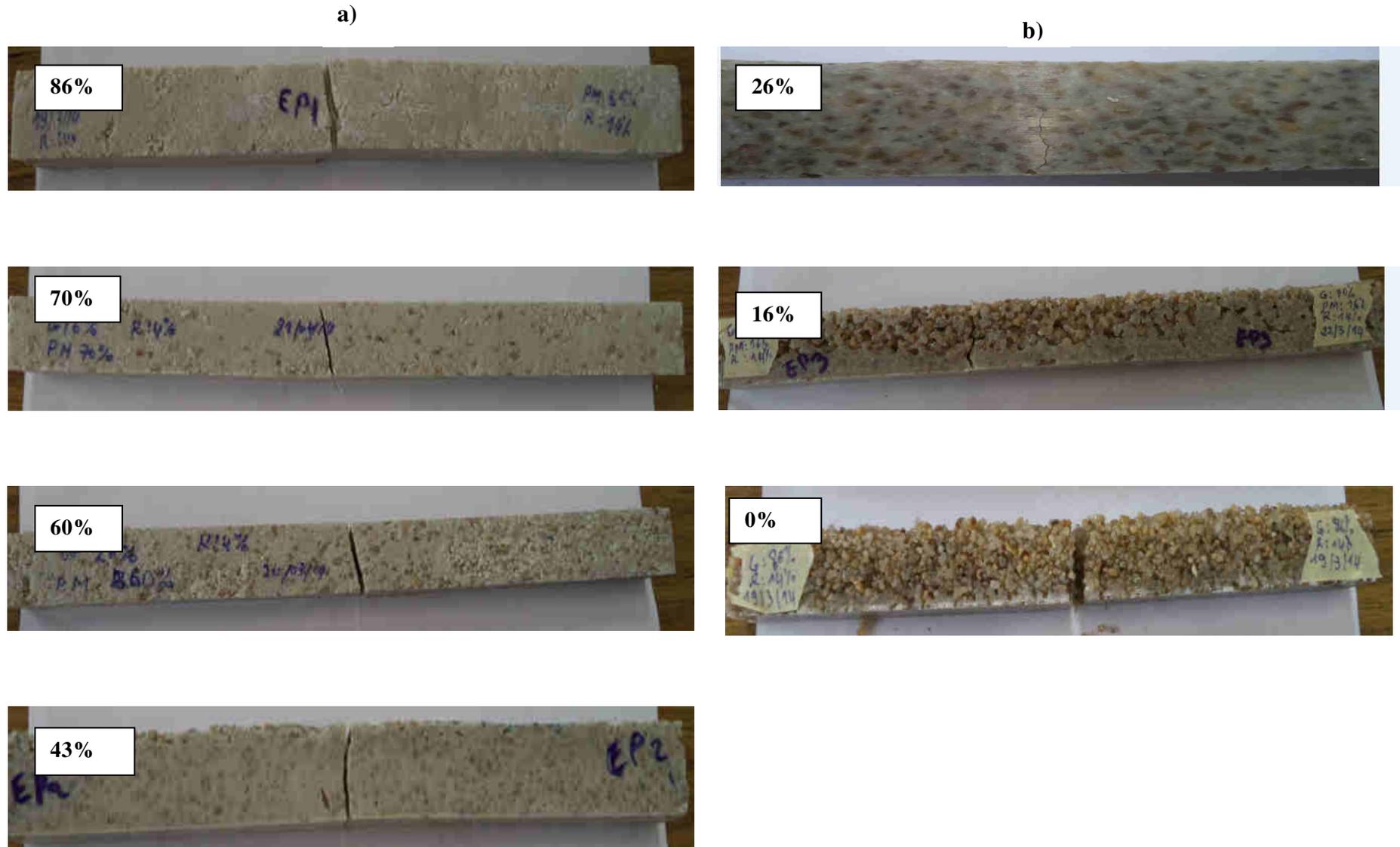


Figure 3.16: Faciès de rupture des éprouvettes en fonction du taux de marbre. a) 86%, 70% et 60% et 43%, b) 26%, 16% et 0%.

3.3.1.1. Aspects mathématiques

Le tableau 3.4 est un tableau type de la variance ANOVA regroupant les différents éléments de cette analyse.

Tableau 3.4. Analyse de variance ANOVA.

Source de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F
Entre les groupes	t-1	SCe	s_e^2	
A l'intérieur des groupes	N-t	SCi	s_i^2	s_e^2/s_i^2
Total	N-1	SCt		

➤ **Calcul de la variance entre les groupes (SCe)**

$$SC_e = \sum_{i=1}^t n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (3.1)$$

$$s_e^2 = \frac{SC_e}{t-1} \quad (3.2)$$

➤ **Calcul de la variance à l'intérieur des groupes (SCi)**

$$SC_i = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (3.3)$$

$$s_i^2 = \frac{SC_i}{N-1} \quad (3.4)$$

➤ **3 Calcul de la variance totale (SCt)**

$$SC_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y})^2 \quad (3.5)$$

$$SC_t = SC_e + SC_i \quad (3.6)$$

➤ **Test de Fisher**

Le test de Fisher nous permet de vérifier si les données proviennent de la même population et donc affirmer ou infirmer que le traitement a un effet. Pour cela, nous calculons le rapport :

$$F = s_e^2/s_i^2 \quad (3.7)$$

Si F est supérieur ou égal à la valeur de la table de Fisher pour $t-1$ et $N-t$ degrés de liberté, nous pouvons en déduire que le traitement t n'est pas du au hasard et que celui-ci a une véritable interaction sur la population étudiée.

3.3.2. Résultats de l'analyse de variance

L'étude statistique par ANOVA, effectuée pour un niveau de signification de 5%, ou pour un niveau de confiance de 95%, est menée avec le logiciel MINITAB 17 dans le but de vérifier la variabilité des résultats vis-à-vis du taux d'incorporation de la poudre de marbre.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 3.5 respectivement pour les échantillons élaborés avec les sables GC et G et cela en termes, de degrés de liberté (DF), de la somme des carrés (SC) des valeurs moyennes des carrés (s^2), du rapport du test de Fisher (F-value) et p-value. Les valeurs calculées obtenues permettent l'évaluation de l'importance relative de chaque facteur de l'essai.

Tableau 3.5. Analyse de la variance pour les différentes formulations fabriquées avec GC et G.

Source	DF	P-value	Formulations avec GC			Formulations avec G		
			SC	s^2	F-value	SC	s^2	F-value
Formulation	6	0,00	1699,2	283,2	56,59	1418,3	236,4	93,61
Erreur	21		105,1	5,00		53,03	2,52	
Total	27		1804,3			1471,4		

La statistique du test F (F-value) est calculée comme étant le rapport entre la moyenne des carrés du groupe (ou facteur d'interaction) et la moyenne des carrés des erreurs aléatoires [MON-01].

La valeur F-critique (F_{crit}) peut être trouvée sur la table de F de Snedecor en fonction du niveau de signification (α) et des degrés de liberté du numérateur et du dénominateur. Si F est supérieure à F_{crit} , l'hypothèse nulle est rejetée ce qui indique que l'effet ou l'interaction est significatif en terme statistique. Si F est inférieure à F_{crit} , l'hypothèse nulle est acceptée, ce qui signifie que les groupes ne sont pas significativement différents, F_{crit} étant déterminée à un niveau de signification de 5%. Ce niveau de signification est couramment utilisé dans la pratique [MON-01].

Etant donné que la valeur P du test F est inférieure à 0,05 et pour la contrainte à la rupture, les valeurs de F trouvées égales respectivement à 56,59 et 93,61 pour GC et G, sont largement supérieures à $F_{crit} = 3,23$ 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 %, donc l'hypothèse nulle H_0 est rejetée.

L'analyse à sens unique de la variance (ANOVA) présentée dans les figures 3.17a et 3.17b des différentes formulations élaborées, avec le sable GC et G et la poudre de marbre M a montré que les meilleurs comportements, vis à vis de la contrainte et du déplacement à la rupture, sont obtenus pour les formulations GC26 M60 et G16 M70.

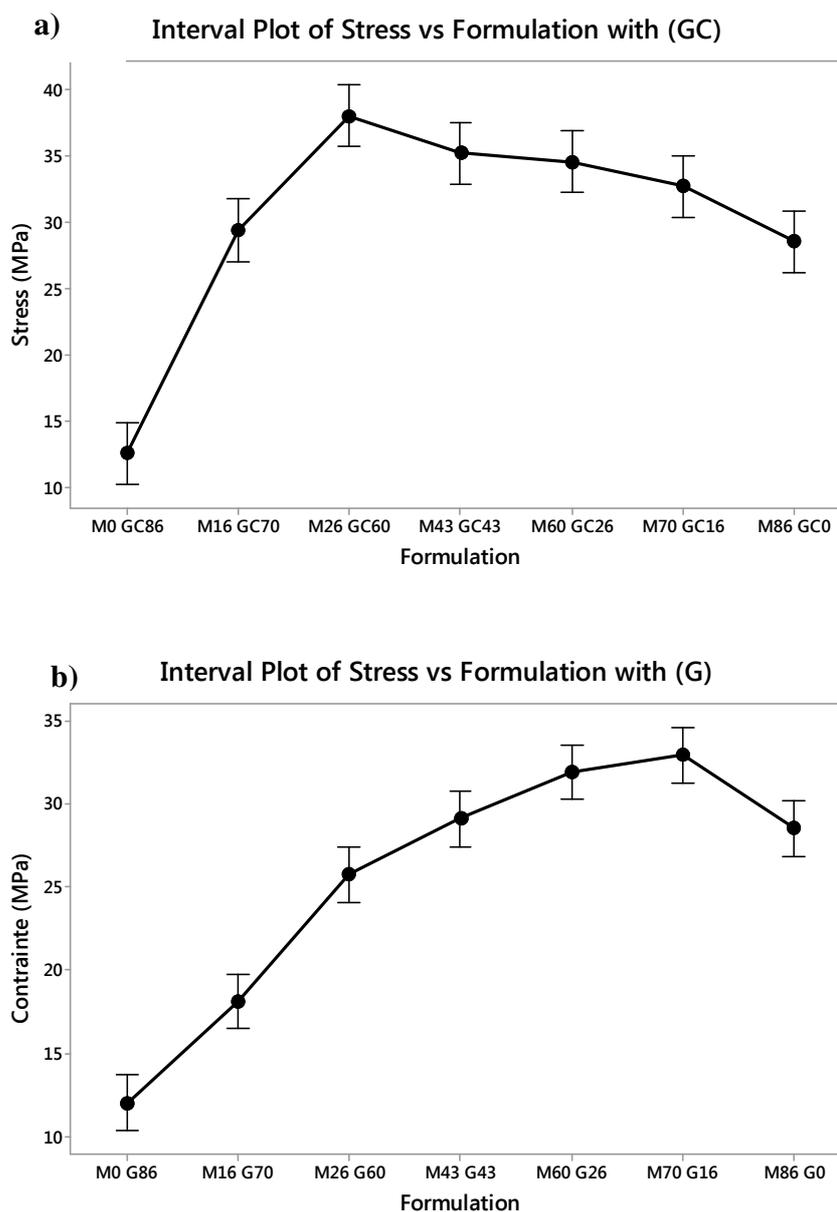


Figure 3.17 : Courbe des valeurs individuelles de la contrainte en fonction des formulations :
 a) avec sable GC et poudre de marbre M, b) avec sable G et poudre de marbre M.

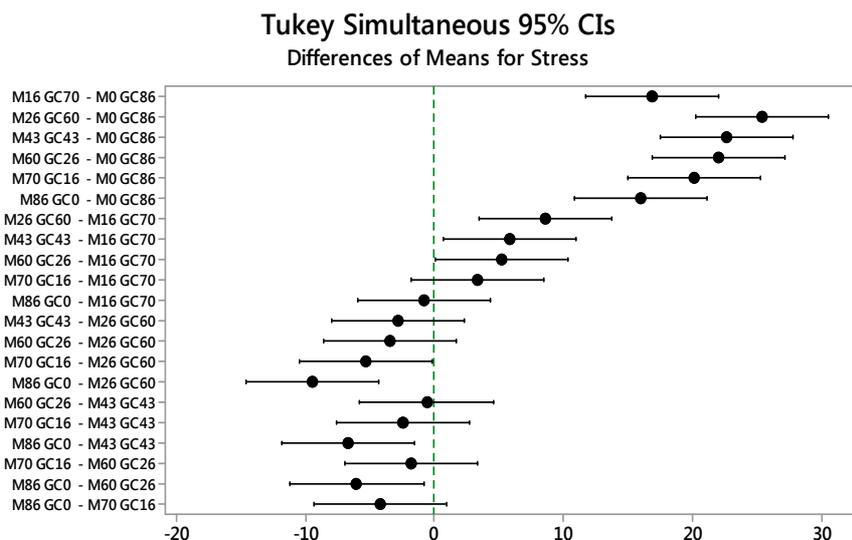
De plus, une homogénéité de quatre et cinq sous groupes respectifs générées par les comparaisons des moyennes des différentes formulations par la méthode de Tukey (Fig 3.18) a été constatée (Tableaux 3. 6)

Tableau 3.6 : Information sur les groupes utilisant la méthode de Tukey avec un intervalle de confiance de 95% pour GC et G.

Formulation	N ^{bre}	σ_{moy} (MPa)	Sous-groupes					
			A	B	C	D	E	
GC60 M26	4	37,98	37,98					
GC43 M43	4	35,19	35,19					
GC26 M60	4	34,54	34,54	35,19				
GC16 M70	4	32,68		34,54				
GC70 M16	4	29,38		32,68	32,68			
GC0 M86	4	28,49			29,38			
GC86 M0	4	12,57			28,49			
							12,57	
G16 M70	4	32,89	32,89					
G26 M60	4	31,89	31,89					
G43 M43	4	29,06		31,89				
G0 M86	4	28,49		29,06				
G60 M26	4	25,71		28,49	29,06			
G70 M16	4	18,07			28,49			
G86 M0	4	12,00			25,71			
							18,07	
								12,00

Il est intéressant de souligner que l'approche paramétrique appliquée ici pour tester l'hypothèse nulle est valide parce que les hypothèses de variance concernant la normalité et l'homogénéité des variances de données brutes ont été remplies, comme démontré sur la figure 3.18.

Le diagramme des valeurs résiduelles destiné à repérer la non-normalité a montré une ligne de Henry à peu près droite qui signifie qu'elles sont réparties normalement (Fig. 3.19 a et b).



If an interval does not contain zero, the corresponding means are significantly different.

Figure 3.18 : Comparaison des moyennes par la méthode de Tukey.

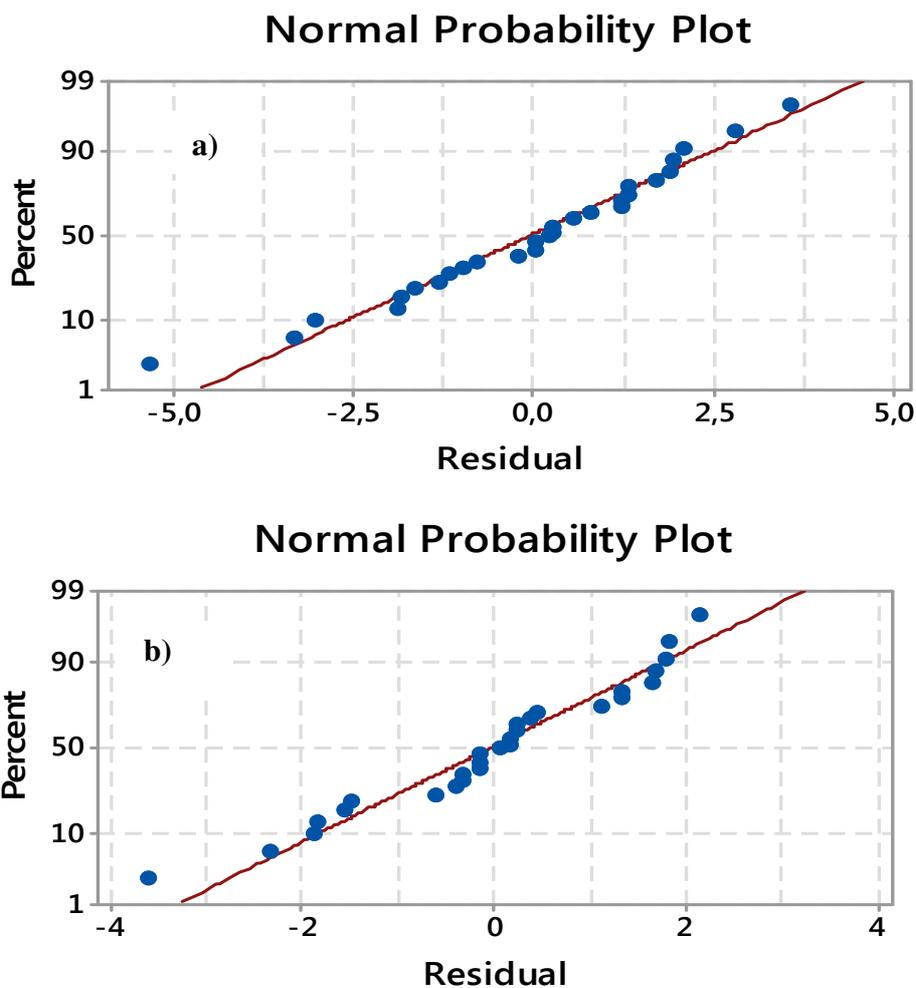


Figure 3.19 : Courbe résiduelle caractérisée par la droite de Henry : (a) pour le sable GC et (b) pour le sable G.

3.4. Analyse statistique par la distribution de Weibull

Parmi les différents modèles permettant de décrire la variation statistique de la contrainte à la rupture d'un matériau, la distribution de Weibull est couramment utilisée [AND-05]. Le paramètre de forme m est appelé couramment module de Weibull, il permet d'avoir une idée sur la dispersion de la taille des défauts dans le matériau. Plus m est faible, et plus cette dispersion est importante (proche de 10, pour une céramique industrielle avec une répartition homogène de défauts de même taille [AND-05]). Enfin, la constante σ représente la contrainte de rupture moyenne de l'échantillon.

➤ *La distribution de Weibull à deux paramètres* : elle peut être décrite par la formule :

$$F(\sigma, m, \sigma_0) = 1 - e^{-(\sigma/\sigma_0)^m} \quad (3.8)$$

- σ est la contrainte appliquée ;
- $m > 0$ est le paramètre de forme ;
- $\sigma_0 > 0$ le paramètre d'échelle de la distribution.

➤ *La distribution de Weibull à trois paramètres* : elle peut être décrite par la formule :

$$F(\sigma, m, \sigma_0, s) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma-s}{\sigma_0}\right)^m} \quad (3.9)$$

- σ est la contrainte appliquée ;
- $m > 0$ est le paramètre de forme ;
- $\sigma_0 > 0$ le paramètre d'échelle de la distribution ;
- s est le paramètre de position de la distribution.

3.4.1. Résultats et discussions

Les propriétés mécaniques sont analysées par le logiciel *Minitab 17* par l'utilisation des lois de Weibull à 2 et à 3 paramètres afin de déterminer la distribution la plus adéquate se

rapprochant le plus possible des résultats expérimentaux. Les résultats de l'analyse de la distribution de Weibull pour les contraintes et les déplacements à la rupture et le module de Young des quatorze formulations des BPs sont représentés dans les figures 3.20 à 3.22 et les tableaux de 3.7 à 3.9.

La figure 3.20 permet de comparer les deux types de probabilités (à deux est à trois paramètres) pour les contraintes à la rupture des formulations élaborées avec GC et G. A titre d'exemple, les meilleures valeurs de la contrainte σ_0 sont respectivement obtenues pour les formulations GC60 M26 et G16 M70. Pour ces formulations, les contraintes estimées par Weibull à 2-paramètres sont respectivement égales à 38,6 MPa et 33,89 MPa et celles à 3 paramètres, elles sont de l'ordre de 11,8 MPa et 15007,6 MPa, ces deux dernières sont très loin des valeurs moyennes obtenues expérimentalement qui sont égales à 37,98 MPa et 32,89 MPa (Fig. 3.19 a, 3.19 b, 3.19 c 3.19 d et Tableau 3.7). De même les modules de Weibull pour la distribution à 2 paramètres pour les formulations GC60 M26 et G16 M70 sont respectivement $m_\sigma = 14$ et $m_\sigma = 19,49$ et pour ceux à 3 paramètres, ils sont égaux à $m_\sigma = 4,05$ et $m_\sigma = 8998,4$.

L'analyse de ces résultats montre que la distribution de Weibull à 2 paramètres permet de bien estimer la contrainte à la rupture des différentes formulations des BPs.

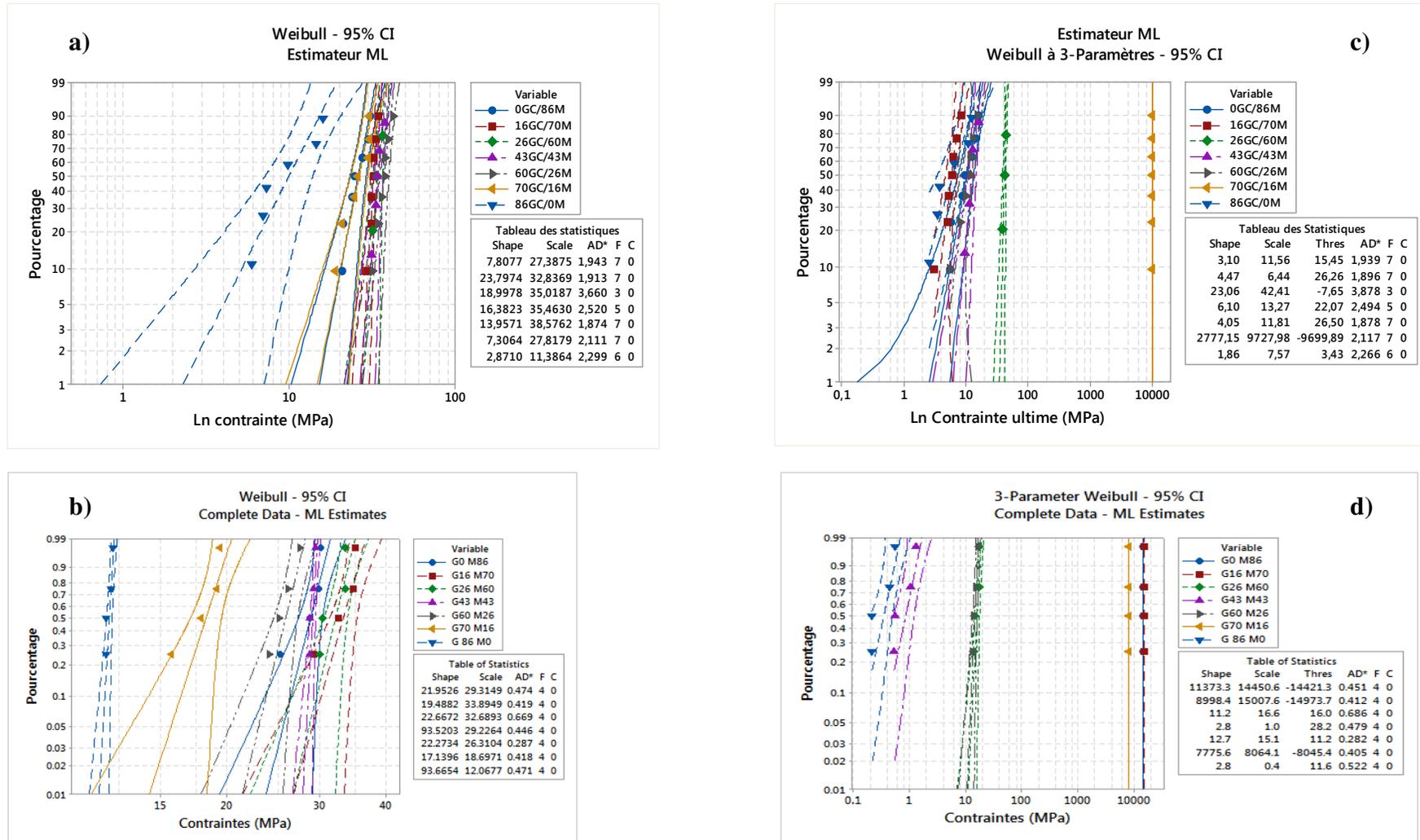


Figure 3 20 : Distribution de Weibull pour les contraintes à la rupture des échantillons du BP respectivement avec GC et G : (a) et (b) à 2 paramètres, (c) et (d) à 3 paramètres.

Tableau 3.7. Résultats des probabilités de Weibull pour les contraintes à la rupture des BPs à 2 et 3 paramètres des différentes formulations élaborées avec GC et G.

	Expérimentales	Weibull 2P		Weibull 3P		
	σ_{moy} (MPa)	σ_0 (MPa)	m_σ	σ_0 (MPa)	m_σ	s_σ
GC0 M86	28,49 ± 1,94	27,4	7,8	11,7	3,10	15,4
GC16 M70	32,68 ± 1,32	32,8	23,8	6,4	4,47	26,3
GC26 M60	34,54 ± 2,06	35	19,0	42,4	23,06	-7,65
GC43 M43	35,19 ± 1,75	35,5	16,4	13,3	6,10	22,10
GC60 M26	37,98 ± 1,06	38,6	14,0	11,8	4,05	26,5
GC70 M16	29,38 ± 2,20	27,8	7,3	9728	2777	-9700
GC86 M0	12, 57 ± 3,34	11,4	2,9	7,6	1,86	3,43
G0 M86	28,49 ± 1,94	29,31	21,95	14450,6	11373,3	-14421,3
G16 M70	32,89 ± 2,29	33,89	19,49	15007,6	8998,4	-14973,7
G26 M60	31,89 ± 1,69	32,69	22,67	16,6	11,2	16,0
G43 M43	29,06 ± 0,34	29,22	93,52	1,0	2,8	28,2
G60 M26	25,71 ± 1,24	26,31	22,27	15,1	12,7	11,2
G70 M16	18,07± 1,68	18,69	17,14	8064,1	7775,6	-8045,4
G86 M0	12,00 ± 0,16	12,07	93,6	0,4	2,8	11,6

La figure 3.21 et le tableau 3.8 représentent l'analyse du déplacement à la rupture par les distributions de Weibull, on peut constater que les déplacements D_0 obtenus pour les meilleures formulations GC60 M26 et G16 M70 sont respectivement égales à 0,701 mm et 0,747 mm pour Weibull à 2 paramètres (Fig. 3.21a) et 0,188 mm et 0,552 mm pour celle à 3 paramètres (Fig. 3.21b).

Par comparaison des déplacements moyens obtenus expérimentalement qui sont respectivement égaux à 0,663 mm et 0,710 mm pour les deux formulations, on remarque que la distribution à 2 paramètres surestime les déplacements et celle à 3 paramètres, elle les sousstime, néanmoins les valeurs expérimentales restent plus proches de celles obtenues par Weibull à 2 paramètres.

Pour le module de Weibull, les valeurs de ce module pour les formulations avec G et GC sont respectivement $m_D = 8,5$ et $9,07$ pour Weibull à 2 paramètres et $m_D = 2,33$ et $6,31$ pour celle à 3 paramètres. Lorsque m_D est élevé, le cas de l'analyse à 2 paramètres, la répartition des défauts est relativement homogène, et on observera donc une faible dispersion des déplacements à la rupture dans le même volume. A partir de ces résultats, on peut dire, encore une fois, que la distribution de Weibull à 2 paramètres estime mieux les déplacements à la rupture.

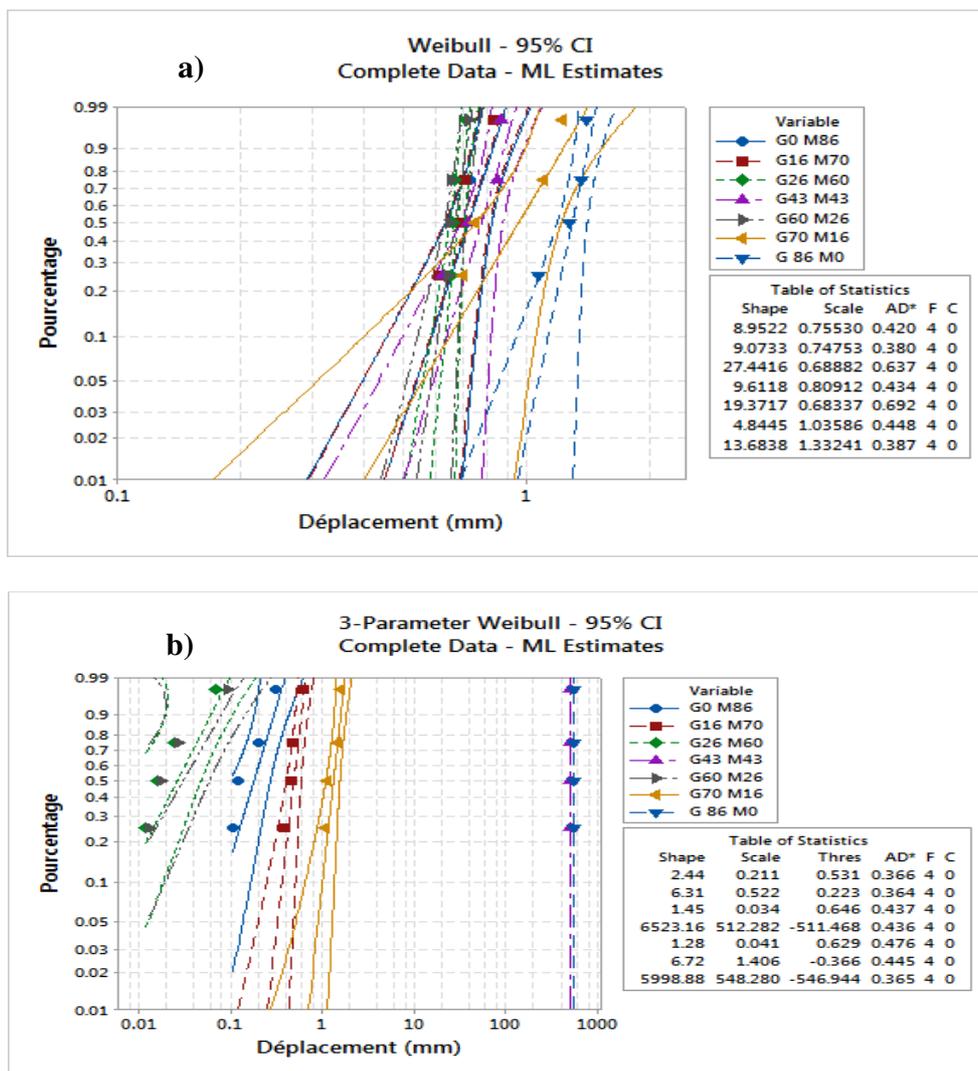


Figure 3. 21 : Distribution de Weibull pour les déplacements à la rupture des éprouvettes du BP avec G: (a) à 2 paramètres, (b) à 3 paramètres.

Tableau 3.8. Résultats des probabilités de Weibull à 2 et 3 paramètres pour les déplacements à la rupture des différentes formulations des BPs avec GC et G.

	Expérimentales	Weibull 2P		Weibull 3P		
	D_{moy} (mm)	D_0 (mm)	m_D	D_0 (mm)	m_D	s_D
GC0 M86	0,717 ± 0,083	0,943	3,3	0,320	1,20	0,550
GC16 M70	0,756 ± 0,096	0,817	8,37	0,292	2,70	0,513
GC26 M60	0,726 ± 0,010	0,727	117,6	0,121	19,31	0,605
GC43 M43	0,674 ± 0,014	0,675	33,7	512	25758	-511,4
GC60 M26	0,663 ± 0,043	0,701	8,5	0,188	2,33	0,500
GC70 M16	1,755 ± 0,391	1,722	3,9	1,163	2,55	0,527
GC86 M0	1,332 ± 0,859	1,031	4,3	1,191	5,10	-0,157
G0 M86	0,717 ± 0,083	0,755	8,95	0,211	2,44	0,531
G16 M70	0,710 ± 0,081	0,747	9,07	0,552	6,31	0,223
G26 M60	0,677 ± 0,023	0,689	27,44	0,034	1,45	,646
G43 M43	0,766 ± 0,100	0,809	9,61	512,28	6523,16	-511,47
G60 M26	0,667 ± 0,032	0,683	19,37	0,041	1,28	0,629
G70 M16	0,946 ± 0,240	1,036	4,84	1,406	6,72	-0,366
G86 M0	1,278 ± 0,149	1,332	13,68	548,28	5998,88	-546,94

La figure 3.22 et le tableau 3.9 permettent de comparer les valeurs des modules de Young (E_0) et des modules de Weibull (m_D) obtenus par les deux types de probabilités à deux et à trois paramètres.

Les valeurs obtenues par la distribution de Weibull à 2 paramètres pour les BPs avec GC et G sont respectivement de 26,68 GPa, 20,64 GPa pour E_0 et 20,21 et 6,54 pour m_D (Fig. 3.22a et 3.22b) et ceux obtenues par la distribution à 3 paramètres sont respectivement 11595,68 GPa, 20,38 GPa pour E_0 et 9225,2 et 6,5 pour m_D (Fig. 3.22c et 3.22d). Alors que, les valeurs du module de Young obtenues expérimentalement sont respectivement 25,90 et 20,86 GPa pour les BPs avec GC et G. L'analyse des résultats obtenus, montre que la

distribution de Weibull à deux paramètres est la plus adéquate car les estimations des modules E_0 obtenus par cette distribution sont les plus proches de ceux obtenus expérimentalement, Alors que celle à 3 paramètres surestime cette caractéristique mécanique.

Tableau 3.9. Résultats des probabilités de Weibull à 2 et 3 paramètres pour les modules d'élasticité en fonction des formulations des BPs avec GC et G.

	Expérimentales	Weibull 2P		Weibull 3P		
	$E_{S\text{ moy}}$ (GPa)	E_{S0} (GPa)	m	E_0 (GPa)	m	S
GC0 M86	21,10 ± 1,97	21,26	8,93	59,69	25,9	-38333
GC16 M70	19,55 ± 2,80	20,84	6,66	4,91	1,7	15204
GC26 M60	19,96 ± 1,80	20,82	11,44	4,45	2,4	16047
GC43 M43	23,00 ± 1,40	23,56	23,20	11648,25	11744,8	-11624670
GC60 M26	25,90 ± 1,80	26,68	20,21	11595,68	9225,2	-11568958
GC70 M16	5,23 ± 1,60	5,91	2,59	63,85	33,6	-58071
GC86 M0	7,00 ± 5,00	8,54	1,86	290,38	92,4	-283151
G0 M86	21,10 ± 1,97	21,26	8,93	5,97	25,9	38333
G16 M70	20,86 ± 1,80	20,64	6,54	20,38	6,5	263
G26 M60	20,92 ± 0,78	21,28	35,12	10802984	18210,5	-10781616
G43 M43	16,52 ± 1,93	17,37	8,69	2793	1,5	14031
G60 M26	12,58 ± 1,08	12,90	1,08	193297	31,6	-178612
G70 M16	3,91 ± 3,70	3,91	0,99	13848	4,5	-8668
G86 M0	3,08 ± 2,90	3,10	1,03	11735	4,9	7648

3.5. Valorisation de l'incorporation de la poudre de marbre M et la substitution du sable GC par G sur la résistance des poutres en flexion

Les résultats des essais expérimentaux obtenus, présentés dans les figures (3.16a et 16b), indiquent que le remplacement partiel des sables GC ou G par la poudre de marbre M dans le BP, fait augmenter la contrainte ultime de flexion de façon progressive jusqu'à un

ajout de 70%, cela peut être attribué à la diminution de la porosité. Au-delà de ce taux, au contraire la résistance diminue ceci est probablement due au manque de résine au vue de l'augmentation des surfaces de contact des grains fins conduisant ainsi à des insuffisances de collage entre les agrégats du BP.

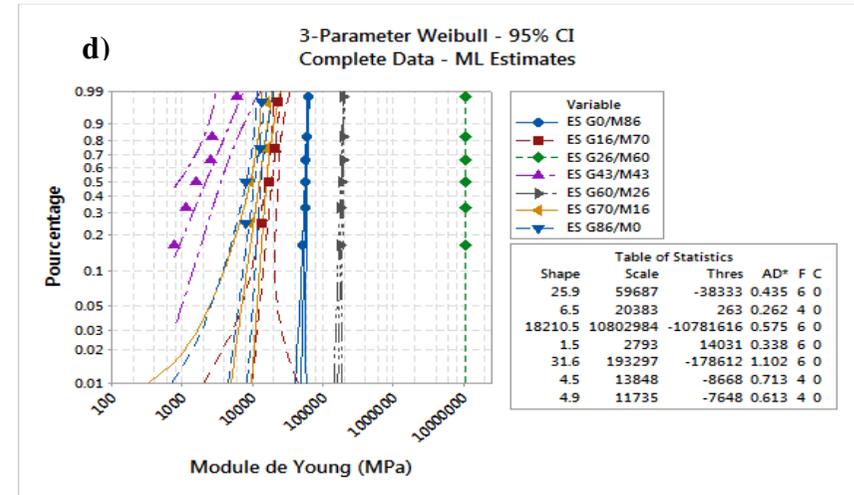
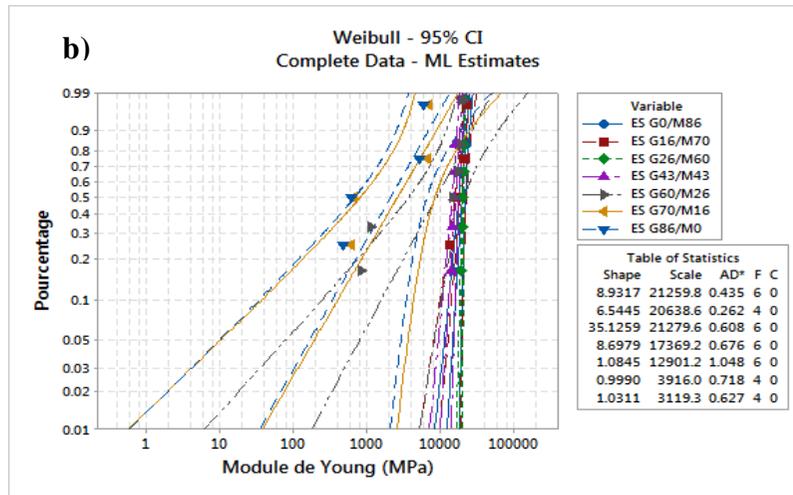
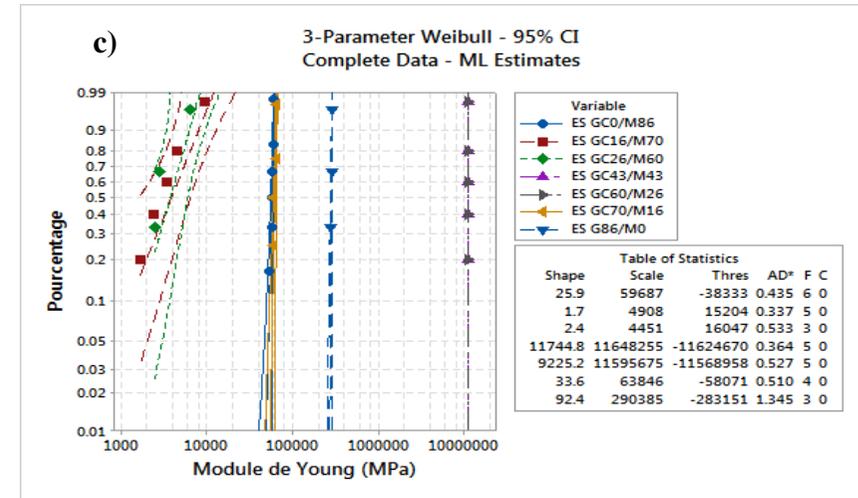
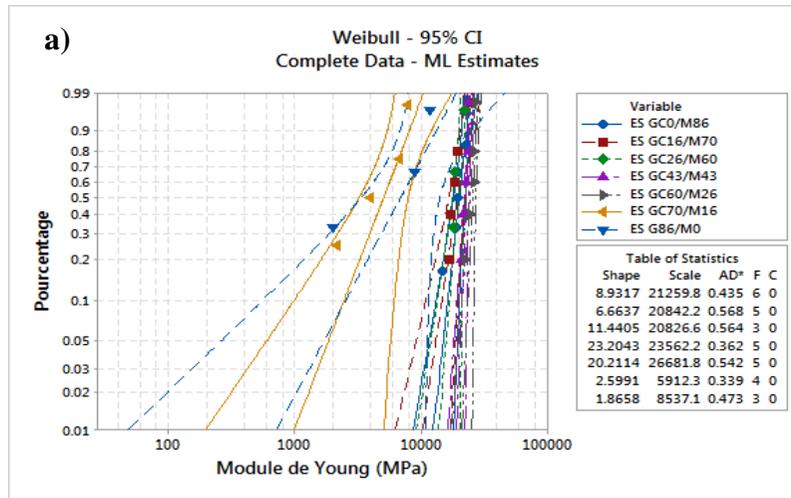


Figure 3.22 : Distribution de Weibull pour les modules d'élasticité des échantillons des BPs avec GC ou G: (a) et (b) à 2 paramètres, (c) et (d) à 3 paramètres.

Pour le BP fabriqué avec le sable GC, la meilleure contrainte est obtenue pour la formulation GC60M26, avec un taux de substitution de 26% de M qui a augmenté la contrainte de 202% par rapport à la formulation de base ne contenant pas de marbre (0% de M). Pour le BP conçu avec le sable G, la meilleure contrainte est enregistrée pour la formulation G16 M70, dans laquelle est incorporé 70% de marbre M, conduisant à une augmentation de 174% par rapport à la formulation de base G86 M0 (Tableau.3.3).

Une comparaison des prix a été aussi établie entre les deux meilleures formulations afin de déterminer la formulation la plus économique (Figure 3.23). On remarque que la formulation G16 M70 est moins chère de 61% que la formulation GC60M26. A partir de là on peut dire qu'en substituant le sable commercialisé (GC) par le déchet de sable de carrière (G), on peut obtenir effectivement un matériau écologique et économique (moins chère du fait du taux élevé de la poudre de marbre) avec de bonnes caractéristiques mécaniques.

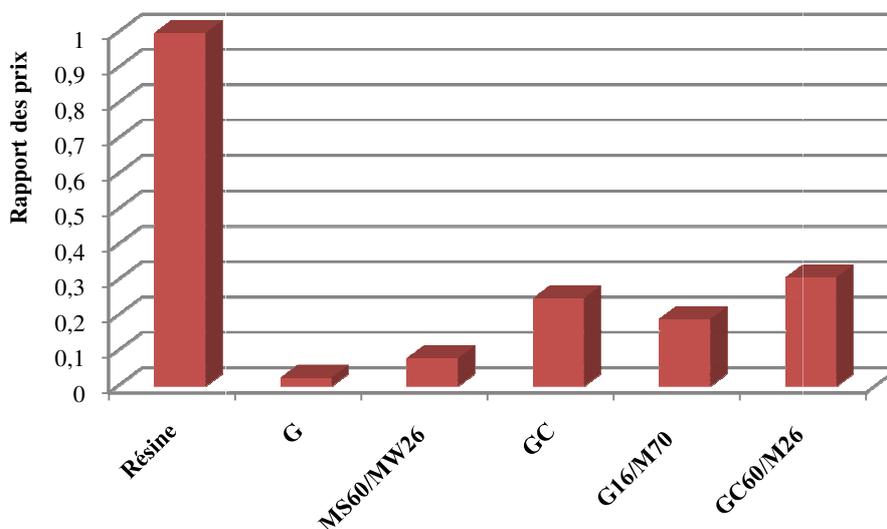


Figure 3.23 : Comparaison des prix des différents constituants et des meilleures formulations des BPs.

3.6. Conclusion

L'étude expérimentale sous chargement statique des différentes formulations en flexion 3-points permet de dégager les points suivants :

- ✓ le comportement contrainte/déplacement est quasi-linéaire ou linéaire jusqu'à la rupture ;
- ✓ L'incorporation de la poudre de marbre a permis une augmentation de la masse volumique suite à une diminution de la porosité ;
- ✓ 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 la caractéristique mécanique et que le facteur taux de poudre de marbre et granulats influe sur la résistance de flexion ;
- ✓ La substitution partielle des granulats de sable commercialisé par la poudre de marbre (M) contribue à une augmentation, atteignant jusqu'à 202% (pour GC60 M26), de la contrainte de flexion du BP, par rapport à celui ne contenant que du sable commercialisé (GC86 M0). De même, la substitution du déchet de sable de carrière G par M permet une amélioration de la contrainte du BP atteignant une augmentation 174% pour la meilleure formulation G16 M70 ;
- ✓ Le béton polymère G16M70 est moins cher de 61% que celui de GC60 M26 et possède une contrainte maximale plus faible de 15% seulement. De plus, le BP G16M70 proposé permet d'obtenir un matériau écologique car il contient 70% de déchet de marbre M et des grains de sable de carrière G de faible coût.

Chapitre IV

Analyse du comportement en fatigue cyclique d'un béton polymère

Introduction

On entend par phénomène de fatigue, la dégradation progressive d'une structure soumise à des sollicitations cycliques ou répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures endommageant ces structures et pouvant les amener à leur rupture même sous des contraintes bien inférieures à leur résistance ultime [BAT-08]. Le béton polymère (BP) est un matériau granulaire à base de résine possédant un large champ d'application et/ou le phénomène de fatigue peut être rencontré notamment dans le bâtiment et le génie civil, utilisé par exemple, dans les réparations des tabliers de ponts et aussi en industrie comme bâti de machine ou en revêtement des planchers industriels. Pour cela, l'étude du comportement en fatigue s'avère fondamentale. Dans ce chapitre les résultats des essais de fatigue sont présentés et discutés. Les tests de fatigue cyclique ont été effectués à 2 Hz de fréquence avec une forme d'onde sinusoïdale pour différents niveaux de chargement $r = 0,55$ à $0,90$, enregistrant ainsi des forces maximales variant entre 710 N et 1100 N. Le tracé des courbes d'hystérésis charge-déplacement permet de voir l'influence du nombre de cycles et le niveau de chargement sur la forme et la taille des boucles d'hystérésis permettant ainsi le calcul de l'énergie dissipée par cycle du BP. La courbe de Wöhler (S-N) a été aussi déterminée et discutée en utilisant le critère de rupture N_R .

4.1. Mécanismes de fatigue

Afin d'étudier les mécanismes qui sont responsables de l'endommagement et la rupture par fatigue d'un composite comme le béton polymère, plusieurs méthodes et/ou techniques peuvent être utilisées pour déterminer l'état d'avancement et le pilotage du dommage dans le matériau à chaque instant de l'essai et de quantifier avec précision l'endommagement du matériau en lui faisant correspondre le mécanisme physique responsable.

L'évolution de la rigidité d'un matériau sous un chargement cyclique est une méthode largement utilisée pour avoir un indicateur de quantification de l'endommagement à une échelle macroscopique. Dans cette étude, les indicateurs utilisés pour caractériser l'endommagement progressif d'un béton polymère durant l'essai de fatigue sont l'évolution de la rigidité (F/F_0), la perte d'énergie par boucles d'hystérésis.

4.2. Etude expérimentale de l'essai de fatigue

Les structures sont souvent soumises à des sollicitations variables dans le temps à des fréquences déterminées. Pour caractériser un matériau en fatigue, la structure (ou

l'éprouvette) est soumise à des sollicitations imposées. La forme du cycle est définie par le rapport de chargement R . Ce dernier est exprimé en fonction du chargement maximal et minimal imposé à la structure. Suivant le mode de pilotage, ce rapport peut être exprimé en déplacement (ou déformation) ou encore en force (ou contrainte). Les machines de fatigue électromécanique ou hydrauliques sont asservies de large gamme de fréquences et de formes des cycles de charge type carré, triangle sinusoïdale, etc.... Le rapport de chargement R peut être déterminé respectivement, en contrôle force ou en déplacement par :

$$R = \frac{F_{min}}{F_{max}} \quad (4.1)$$

et

$$R = \frac{d_{min}}{d_{max}} \quad (4.2)$$

où : F_{max} et F_{min} représentent les forces de chargement maximale et minimale;

d_{max} et d_{min} représentent les déplacements de chargement maximal et minimal.

4.2.1. Matériaux et conditions d'essais

Les essais de fatigue en flexion cyclique en contrôle déplacement avec une forme d'onde sinusoïdale d'une fréquence de 2 Hz ont été effectués sur les éprouvettes du BP pour la meilleure formulation obtenue en statique à savoir G16 M70. Le déplacement moyen est maintenu constant est égal à 50% du déplacement à la rupture en statique. Le niveau de chargement r imposé aux échantillons est défini par le rapport suivant [BEZ-07, BEZ-09] :

$$r = \frac{d_{max}}{d_{rup}} \quad (4.3)$$

où :

d_{max} et d_{rup} sont respectivement les déplacements maximal et celui à la rupture en statique ;

Huit différents niveaux de chargement ($r = 55\%$, $r = 60\%$, $r = 65\%$, $r = 70\%$, $r = 75\%$, $r = 80\%$, $r = 85\%$ et $r = 90\%$) ont été adoptés, pour suivre l'évolution de la rigidité F rapportée à la rigidité initiale du premier cycle de chargement F_0 ou encore appelé perte de charge (F/F_0), en fonction du nombre de cycles à la rupture. Ces essais ont été effectués à température ambiante (environ 24 °C) et un taux d'humidité de l'ordre de 60 %.

Le protocole de la mise en route de l'essai de fatigue est décrit sur la Figure 4.1, le chargement est appliqué progressivement à l'aide d'une rampe linéaire permettant de se positionner à la charge moyenne F_{moy} en statique. Une fois la valeur moyenne atteinte, un chargement cyclique, avec une amplitude fixée caractérisant le niveau de chargement r , est ensuite appliqué jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

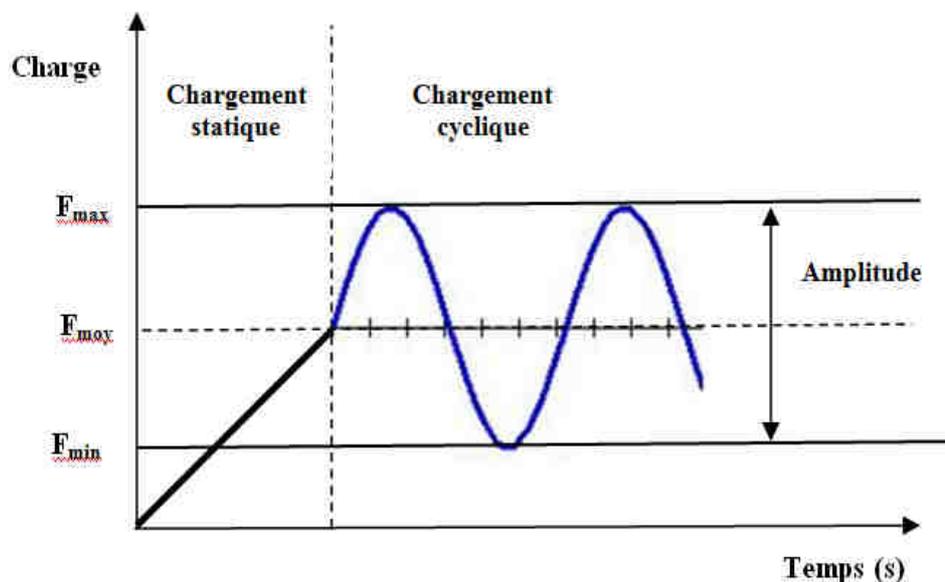


Figure 4.1 : Procédure de l'essai.

4.3. Résultats et discussions

4.3.1. Perte de charge F/F_0

La détermination de la perte de rigidité F/F_0 , ou encore perte de charge, constitue une des méthodes les plus utilisées pour suivre la progression de l'endommagement de différents matériaux sous chargement en fatigue cyclique.

Au cours de ces essais, l'évolution de la force F en fonction du nombre de cycles N a été enregistrée. La force maximale F est rapportée à celle obtenue lors du premier cycle F_0 . La perte de F/F_0 en fonction du nombre de cycles N pour différents niveaux de chargement r est représentée à l'échelle semi-logarithmique dans la figure 4.2.

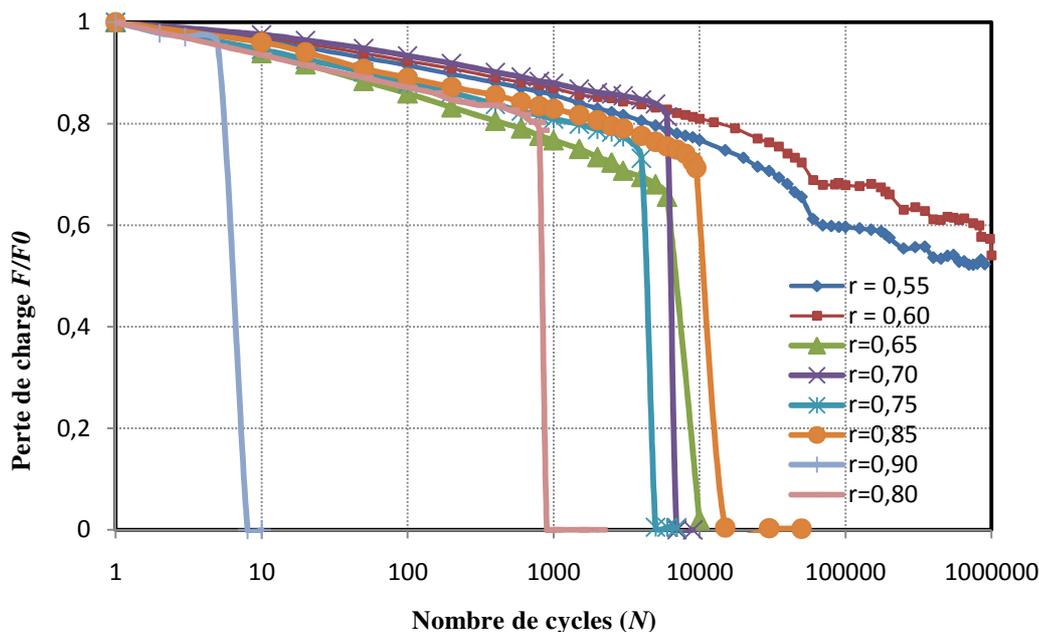


Figure 4.2: Evolution de la perte de charge F/F_0 en fonction du nombre de cycles N pour différents niveaux de chargement r .

L'analyse de la figure 4.2 montre que pour des faibles niveaux de chargement $r = 0.55$ et $r = 0.60$, la rupture n'est pas atteinte même lorsque le nombre de cycle est égale à 10^6 cycles, alors qu'au-delà de ces niveaux, l'évolution de la perte de charge (F/F_0) semble suivre trois étapes distinctes, ceci est en bonne concordance avec les travaux de Berbaoui [BER-10].

Au cours de la sollicitation cyclique de fatigue à déplacement imposé, on a pu distinguer trois phases dans l'évolution de F/F_0 en fonction du nombre de cycles. Elles sont représentées à titre d'exemple pour le niveau de chargement $r = 0,75$ sur la figure 4.3 :

Phase I : chute importante et rapide de F/F_0 d'environ 17% après les premiers 400 cycles, pendant laquelle les premières fissures dans la matrice vont se former. Cette dégradation est décrite par l'initiation de l'endommagement gouvernée par l'apparition des microfissures dans différents endroits de la matrice et aux interfaces granulats/matrice.

Phase II : un plateau légèrement incliné traduisant une baisse modérée de la perte de charge (phase la plus longue) et l'établissement d'un régime stable avec une lente évolution de l'endommagement correspondant à la multiplication des fissures transverses. Cette phase est caractérisée par la coalescence et la croissance des microfissures. Il faut remarquer que la phase II est très courte pour le cas de $r = 0,90$.

Phase III : décroissance accélérée de la perte de charge, développement rapide de fissures et macro-fissures, correspondant à l'endommagement final et à la ruine de l'éprouvette.

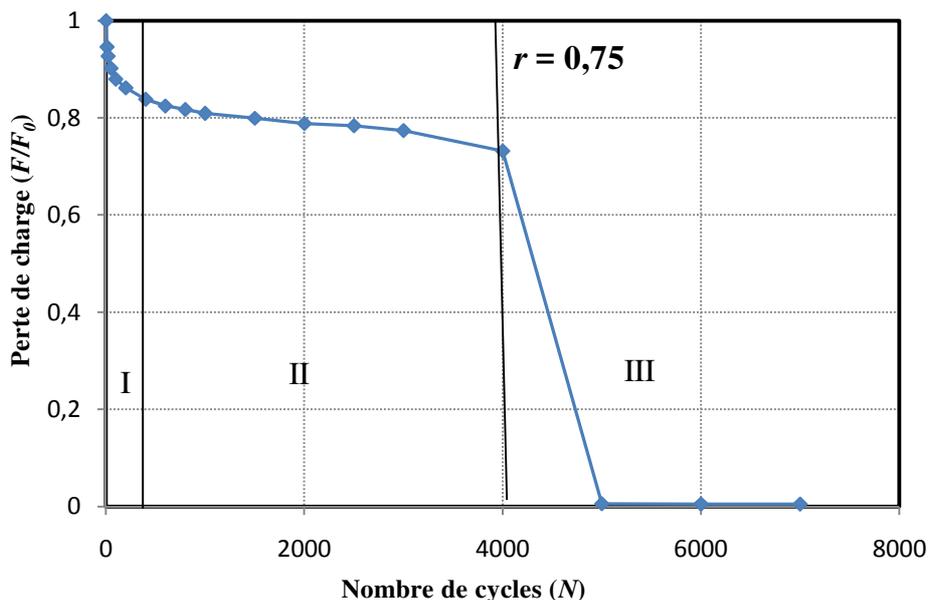


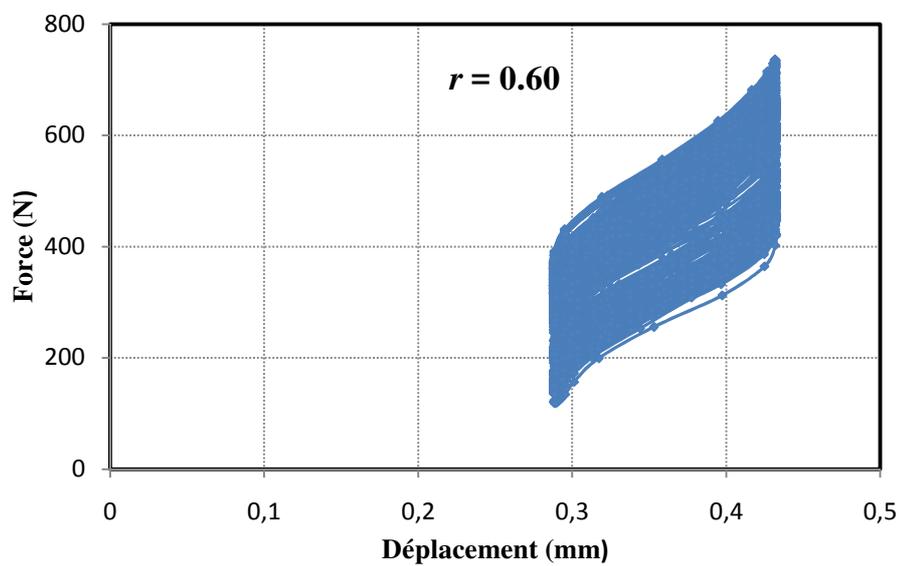
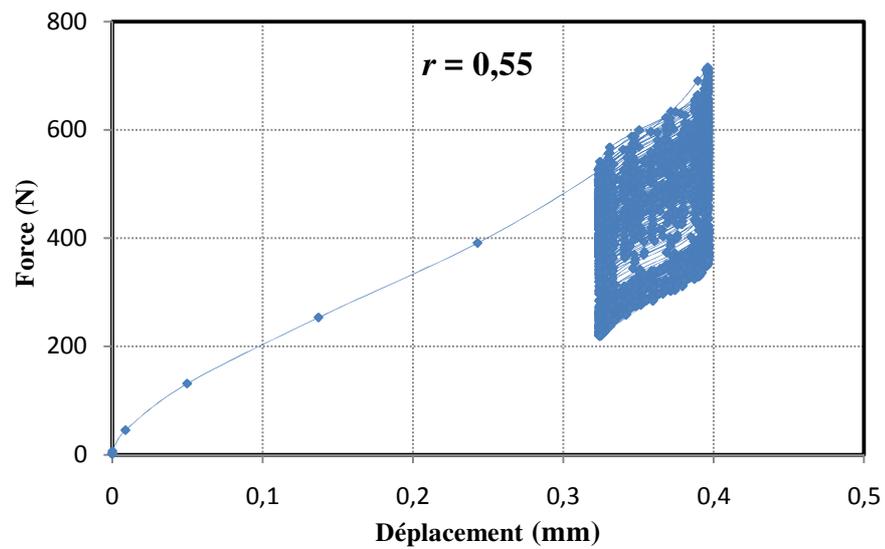
Figure 4.3: Evolution de F/F_0 en fonction du nombre de cycles N pour $r = 0,75$.

4.3.2. Analyse des boucles d'hystérésis

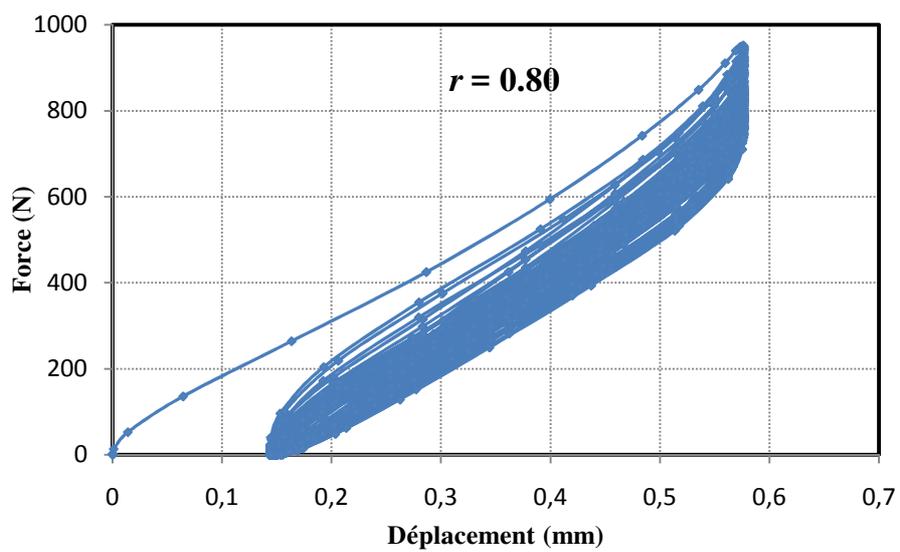
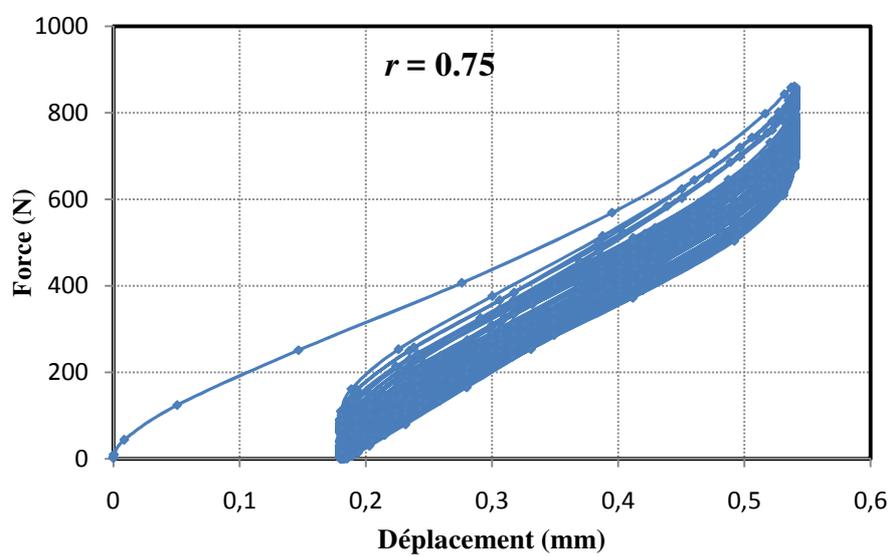
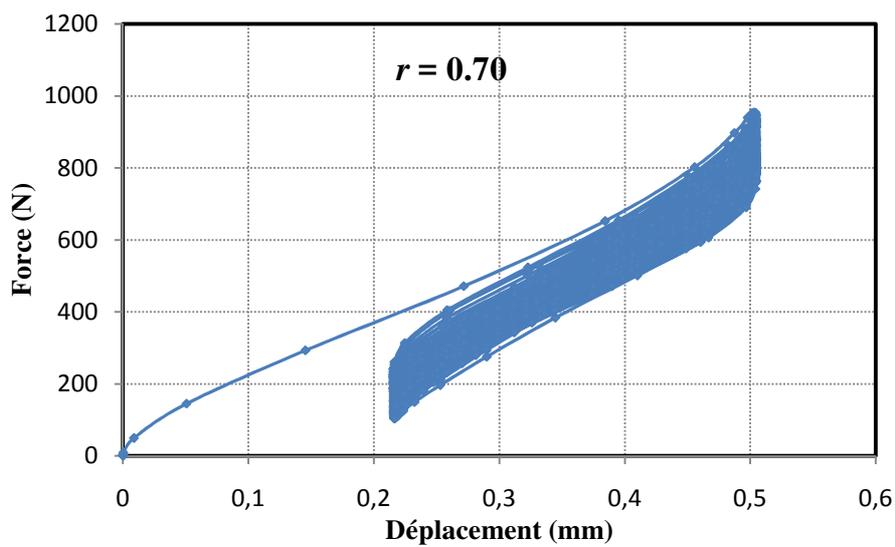
L'initiation et l'évolution ultérieure de l'endommagement dans une éprouvette peuvent être identifiées et approfondies grâce aux courbes d'hystérésis en fonction du nombre de cycles et cela pour différentes conditions de chargement [BEZ-07]. L'analyse et le suivi de la taille et de la forme des boucles d'hystérésis lors des essais de fatigue cyclique ont été effectués pour différents niveaux de chargement r (0,90 ; 0,85 ; 0,80 ; 0,75 ; 0,70 ; 0,60 et 0,55).

La figure 4.4 représente l'évolution des boucles d'hystérésis en fonction du nombre de cycles pour les différents niveaux de chargement. Ces courbes sont tracées avec le logiciel Excel à partir des données expérimentales obtenues directement de la machine d'essai de flexion. La lecture de ces courbes permet de donner des informations sur les déplacements maximales et minimales ainsi que les forces maximales (début du test) et minimales (rupture des éprouvettes) pour différents échantillons et niveaux de chargement.

Chapitre IV : Analyse du comportement en fatigue cyclique d'un béton polymère



Chapitre IV : Analyse du comportement en fatigue cyclique d'un béton polymère



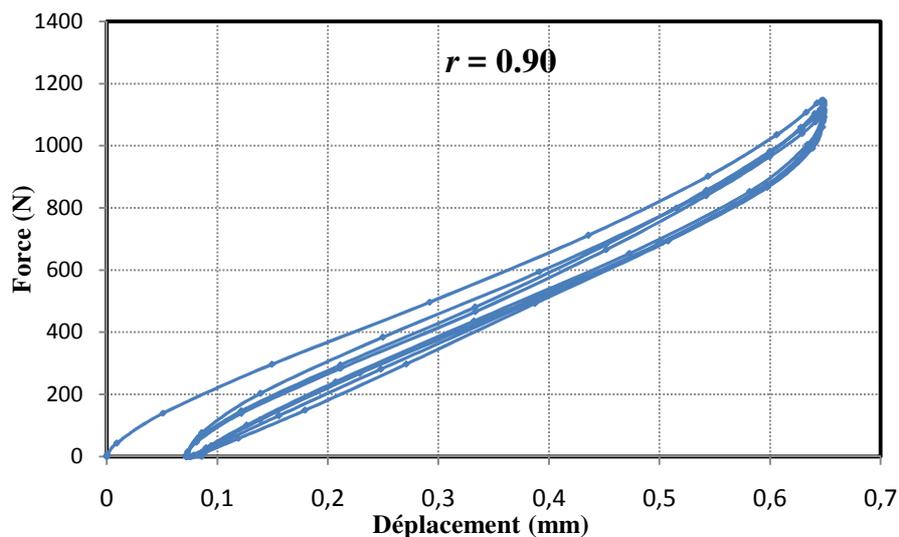


Figure 4.4: Boucles d'hystérésis pour les différents niveaux de chargement.

Les boucles d'hystérésis n'étant pas très visibles sur la figure 4.4, alors une présentation plus explicite est utilisée afin de comparer les boucles du premier cycle (c'est-à-dire $N = 1$ cycle) pour les différents niveaux de chargement r (voir figure 4.5). De plus, un déplacement sur l'axe des abscisses (X) a été effectué pour plus de clarté des boucles. La force maximale enregistrée est de l'ordre de 1100 N pour le niveau de chargement le plus élevé $r = 0,90$. Le déplacement ainsi que l'aire des boucles augmentent avec l'augmentation du niveau de chargement.

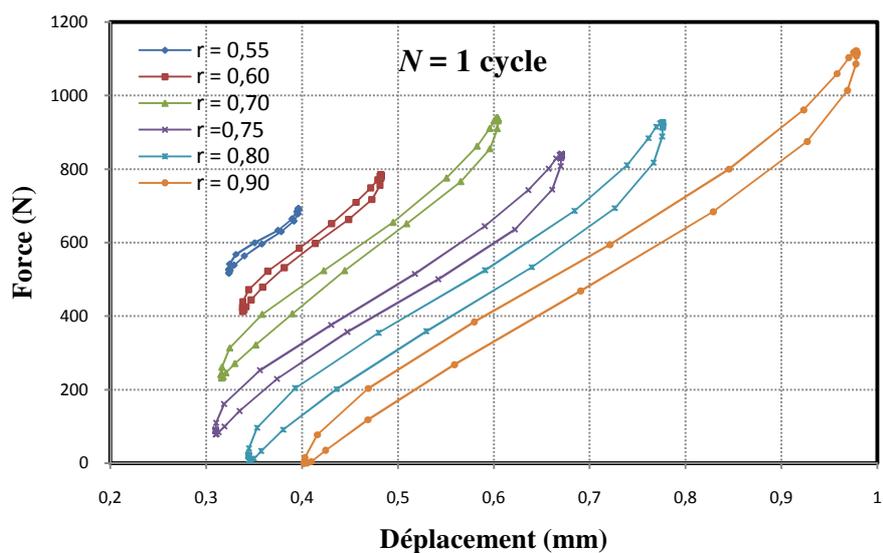
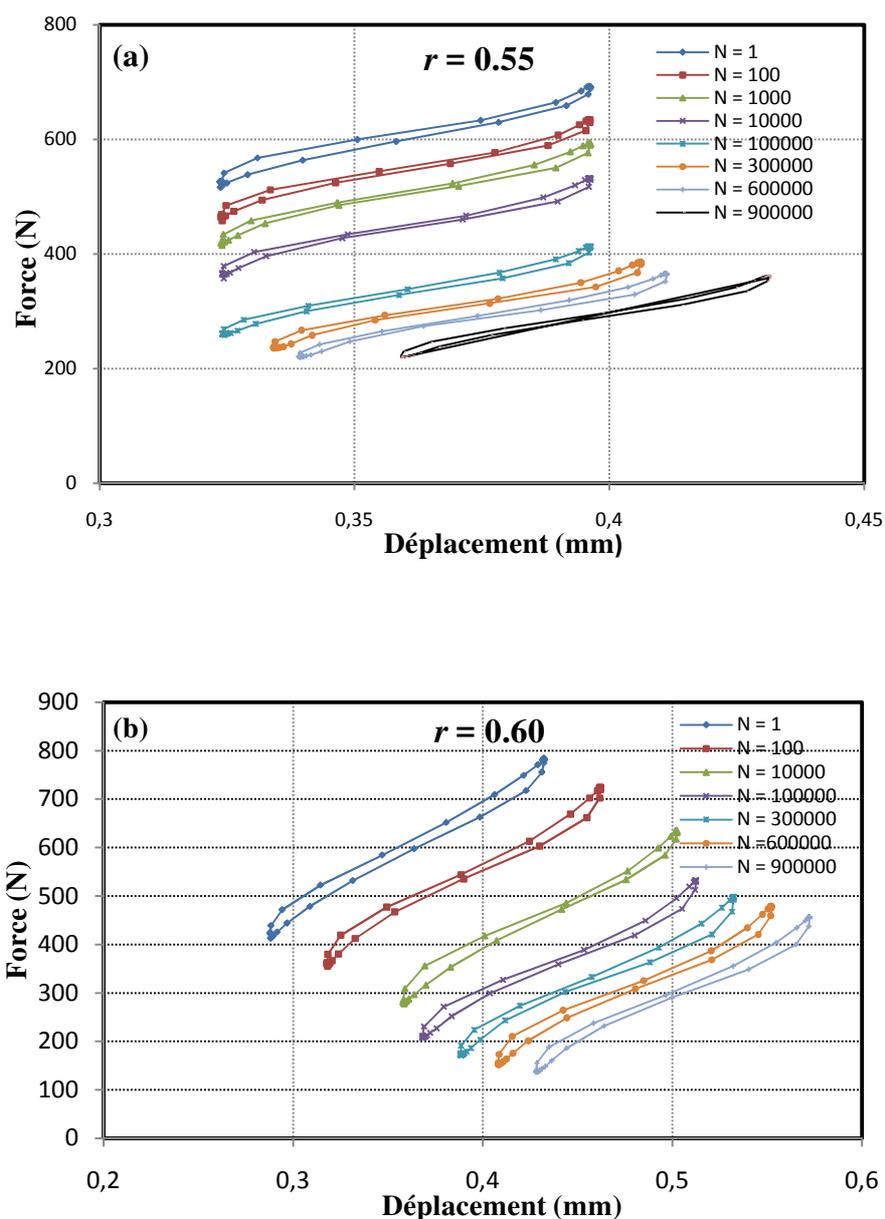


Figure 4.5: Boucles d'hystérésis à $N = 1$ cycle du BP pour les différents r .

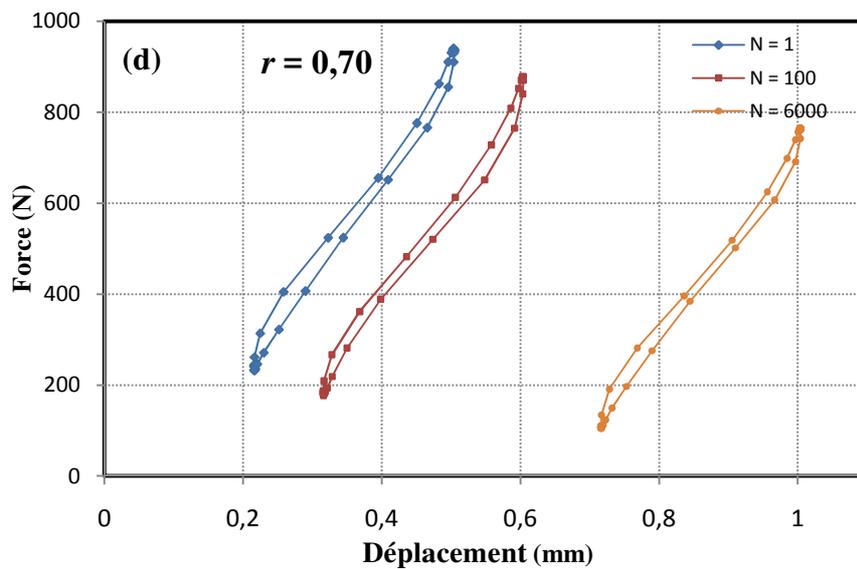
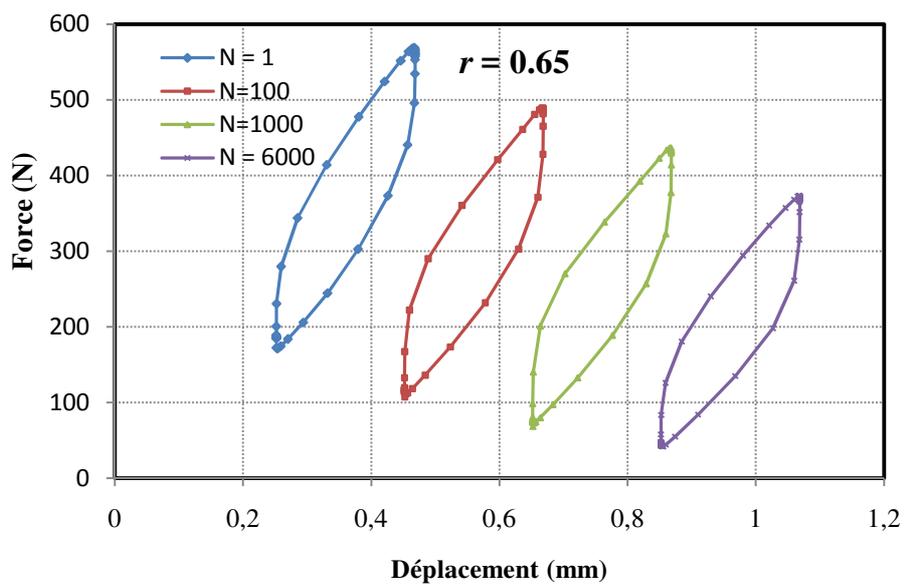
Chapitre IV : Analyse du comportement en fatigue cyclique d'un béton polymère

Les figures 4.6 (a-g) présentent les courbes d'hystérésis charge-déplacement pour des nombres de cycles N spécifiques des sept niveaux de chargement utilisés de $r = 0,55$ jusqu'à $r = 0,90$. Ces courbes sont obtenues à partir des enveloppes de différents cycles d'hystérésis au cours des tests de fatigue (elles sont extraites des données de la figure 4.4).

Un déplacement courbes d'hystérésis sur l'axe des abscisses est effectué, par exemple pour le niveau $r = 0,55$, les quatre dernières courbes d'hystérésis ont été déplacées afin d'éviter leur chevauchement. Les forces maximale et minimale diminuent au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de cycles, ceci est dû à la perte de rigidité.



Chapitre IV : Analyse du comportement en fatigue cyclique d'un béton polymère



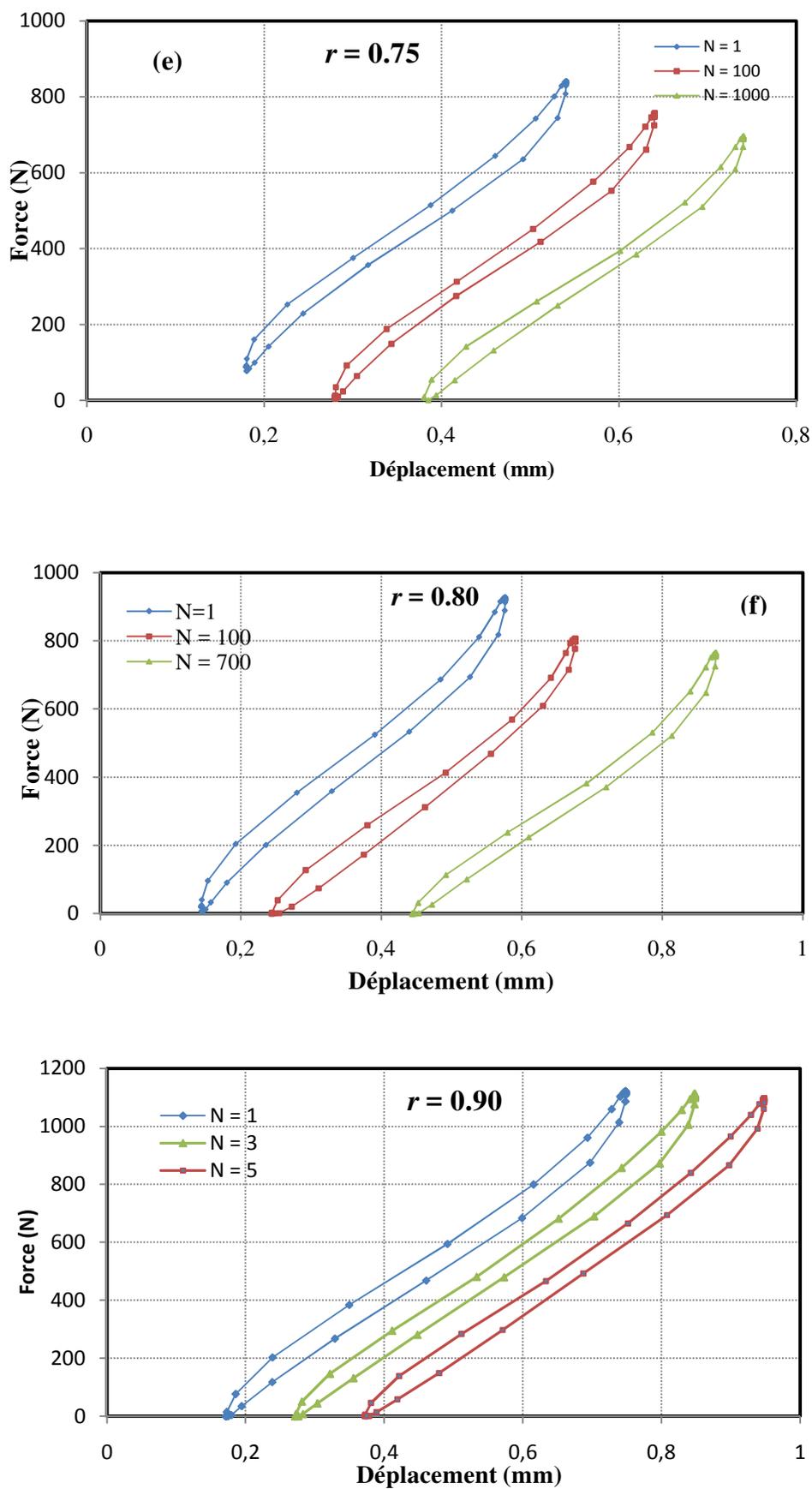


Figure 4.6: Courbes charge-déplacement pour des nombres de cycles N spécifiques.

4.3.3. Énergie dissipée

L'aire d'une boucle d'hystérésis (Figure 4.7) correspond à l'énergie dissipée E_d d'un cycle chargement/déchargement [BEZ-11]. L'énergie E_d peut être calculée numériquement par la méthode des trapèzes, en utilisant une simple sommation des aires.

$$E_d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\xi_{i+1} - \xi_i) \{ [f(\xi_{i+1}) + f(\xi_i)] - [h(\xi_{i+1}) + h(\xi_i)] \} \quad (4.4)$$

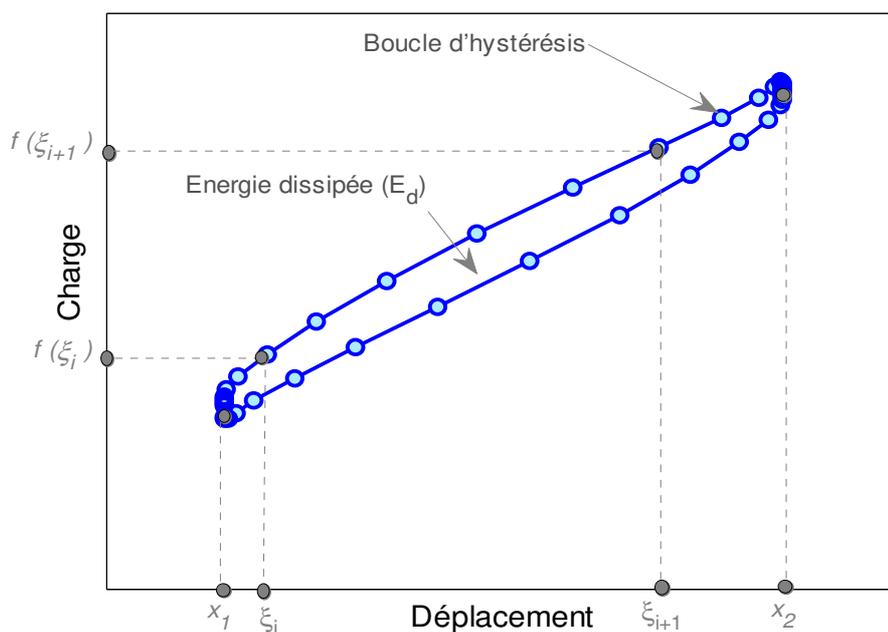


Figure 4.7 : Boucle d'hystérésis permettant de déterminer l'énergie dissipée E_d .

Les figures 4.8a et 4.8b montrent l'évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles à une échelle logarithmique et cela à titre d'exemple pour les niveaux de chargement $r = 0,55$ et $r = 0,80$. Elles laissent apparaître pour $r = 0,55$ (c à d niveau faible) deux phases distinctes, la première montre une diminution assez rapide dès les premiers cycles (20 cycles), suivis d'une région relativement stable où l'énergie se stabilise (pratiquement vers une valeur moyenne de 0,75 mJ) et ne diminue presque plus (comportement pseudo plateau) où on n'observe pratiquement aucune dépendance significative de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles. Pour le niveau $r = 0,80$ (niveau assez élevé) on distingue trois phases, la première caractérise une chute importante plus rapide (10 cycles) comparativement au niveau de $r = 0,55$ et suivi par la formation d'un plateau beaucoup plus stable dans la deuxième phase. Enfin la troisième phase survient aussi à

la suite d'une deuxième chute brutale obtenue pour $N = 850$ cycles caractérisant la rupture de l'échantillon.

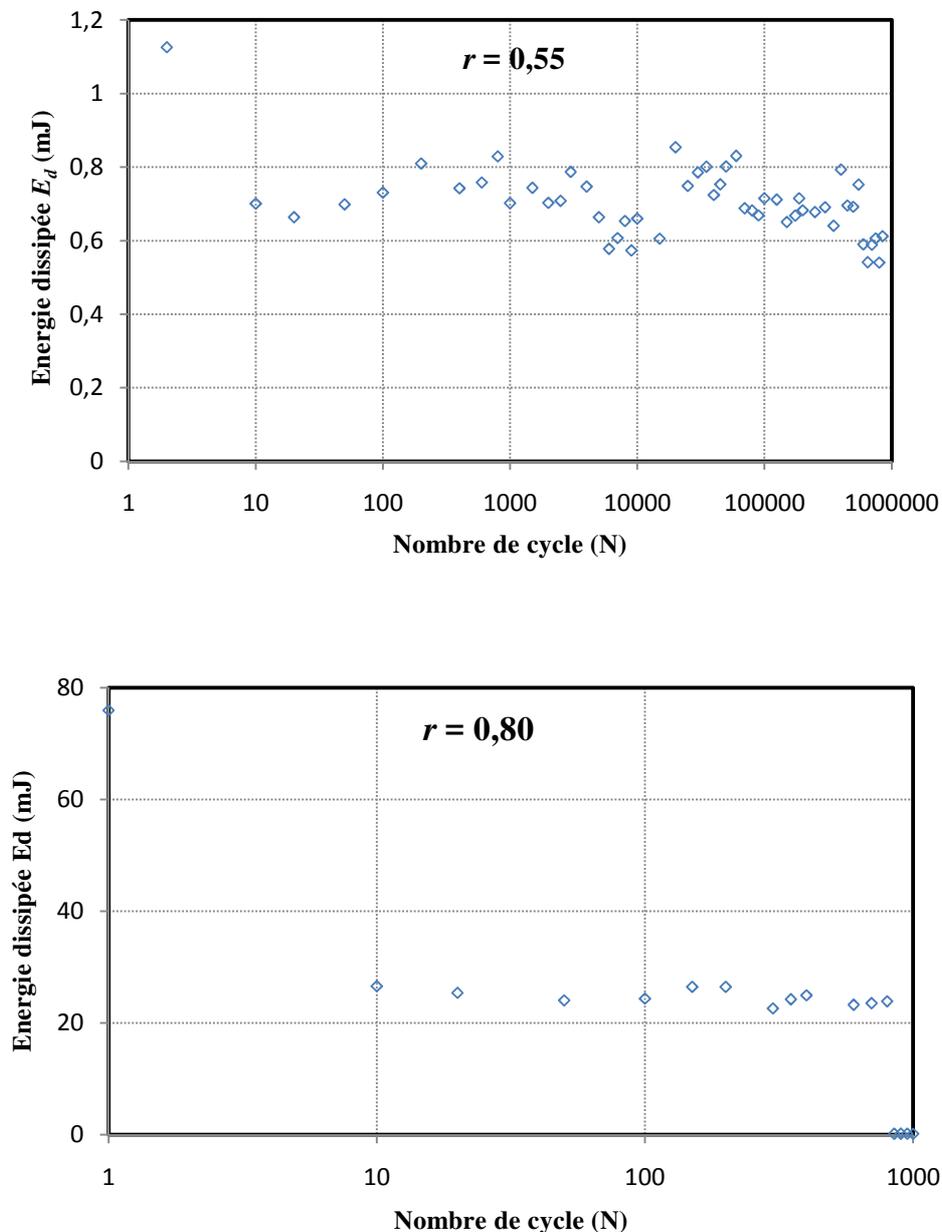


Figure 4.8 : Energie dissipée E_d en (mJ) en fonction du nombre de cycle N , pour :

(a) $r = 0,55$, (b) $r = 0,80$.

L'énergie dissipée (E_d) en fonction du nombre de cycles dépend fortement du niveau de chargement appliqué. En effet, l'énergie est maximale au premier cycle ($N = 1$) et elle a tendance à diminuer en fonction de l'augmentation du nombre de cycle et ceci est valable pour tous les niveaux de chargements (Figure 4.9). Pour les niveaux, le plus faible ($r = 0,55$)

Chapitre IV : Analyse du comportement en fatigue cyclique d'un béton polymère

ou la rupture totale n'a pas été atteinte et le plus grand ($r = 0,90$), les énergies dissipées maximales, à $N = 1$, sont égales respectivement à 1,12 mJ et 81,69 mJ, alors que leurs valeurs minimales obtenues juste avant la rupture des éprouvettes sont égales respectivement à : 0,61 mJ à $N = 1000\ 000$ cycles et 0,037 mJ à $N = 8$ cycles.

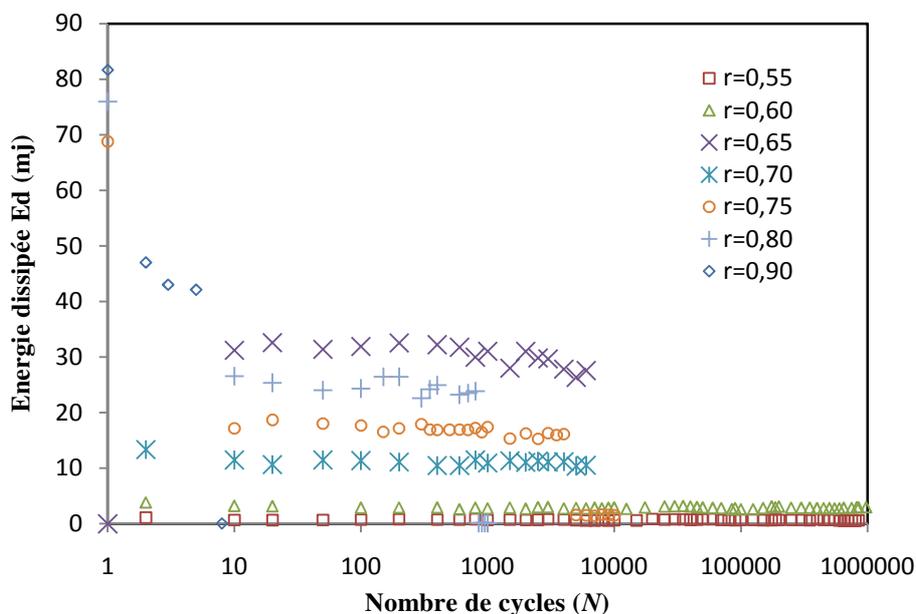


Figure 4.9 : Energie dissipée en fonction du nombre de cycle N .

4.3.4. Courbe de Wöhler (S-N)

Pour déterminer les performances des matériaux en fatigue, différents critères de la durée de vie (N_3 , N_5 , N_{10} et N_R) sont considérés dans la littérature à partir des courbes donnant l'évolution du déplacement en fonction du nombre de cycles. Les critères N_3 , N_5 et N_{10} correspondent respectivement à des chutes de 3%, 5% et 10% de la rigidité par rapport à sa valeur initiale. Le critère N_R correspond au nombre de cycles nécessaire à la rupture complète de l'éprouvette lorsqu'elle est atteinte. Ce critère a été choisi dans notre étude, vu qu'il est le plus utilisé dans la littérature pour les matériaux granulaire [BER-10]

Pour la propagation de l'endommagement en fatigue des matériaux composites. Mandell [MAN-82] a proposé l'équation suivante en traction fatigue à contrainte imposée :

$$\sigma = UTS - B \cdot \log N_R \quad (4.4)$$

où les constantes UTS et B dépendent respectivement du type du matériau et des conditions de chargement, alors que le critère N_R correspond au nombre de cycles final à la rupture. Plus

particulièrement, UTS indique un comportement mono-tonique imposé par la charge de vitesse de déformation, alors que B est directement lié au phénomène de fatigue. Afin de considérer le comportement comparatif de fatigue de différents types de matériaux, Caprino et Giorleo [CAP-99] ont proposé la formule suivante:

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = 1 - B \cdot \log N_{10} \quad (4.5)$$

En considérant les équations (4.4) et (4.5), la variation du niveau de chargement r en fonction du nombre de cycles N peut être décrite par l'équation suivante [BEZ-09, BEZ-03]:

$$r = A - B \cdot \log N_R \quad (4.6)$$

La représentation de la courbe de Wöhler qui a pour but de caractériser la durée de vie d'un matériau étudié donnée par l'équation (4.6), est donnée dans le diagramme d'endurance (Fig. 4.10). Cette forme de description permet de mieux décrire la tenue en fatigue des matériaux par l'intermédiaire de la valeur intrinsèque B , représentant la pente de la droite d'endurance correspondant au taux de chute du niveau de chargement admissible et N_R représentant le nombre de cycles à la rupture ou durée de vie correspondant au chargement appliqué. L'analyse de cette courbe montre que lorsque le chargement est voisin de celui de la rupture en statique, la rupture est obtenue dès les premiers cycles. Par contre pour des faibles niveaux de chargement, la rupture est obtenue pour des nombres de cycles élevés. Pour les niveaux de chargement inférieur ou égal à 0,60, la rupture n'est pas atteinte même au delà de 10^6 cycles.

La courbe $S-N$ pour le béton polymère basée sur le critère de rupture N_R est présentée dans la figure 4.10. Pour ce matériau, les valeurs des coefficients A et B qui est déterminé par la pente d'une droite linéaire (moindres carrés) dans l'équation (4.3), sont égales à 0,962 et 0,03 avec un bon coefficient de corrélation $R^2 = 0,958$. Ces résultats prouvent clairement que le nombre de cycles à la rupture à un niveau de chargement donné r augmente avec la diminution du niveau de chargement du béton résineux.

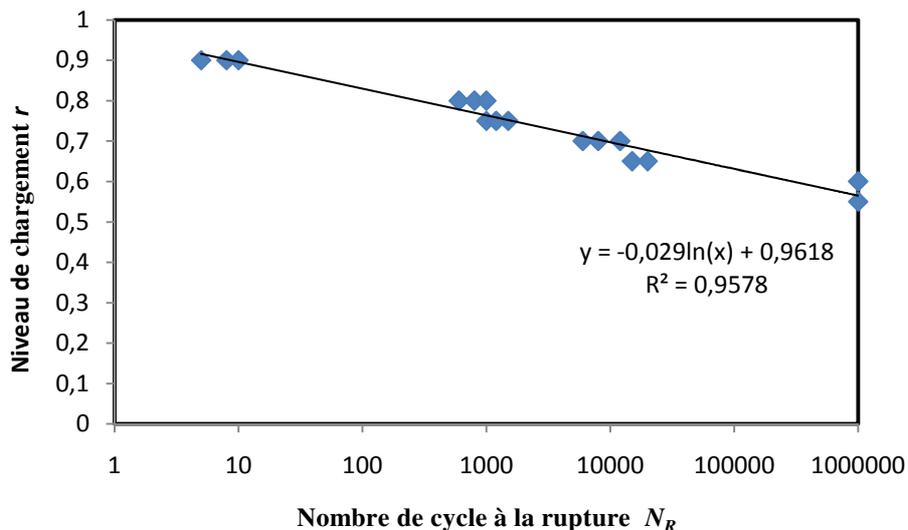


Figure 4.10 : Courbe de Wöhler.

4.4. Conclusion

Les résultats des essais de fatigue cyclique, en contrôle déplacement, sur les éprouvettes en BP font apparaître les points suivants :

- L'évolution de la perte de charge (F/F_0) en fonction du nombre de cycles N s'effectue en trois phases, la première est caractérisée par une chute importante et rapide, suivi par une deuxième phase sous forme d'un plateau légèrement incliné traduisant une baisse modérée de F/F_0 (phase la plus longue). Quand à la dernière phase, très courte ou l'endommagement total de l'éprouvette survient brutalement pour les niveaux de chargement supérieur à 0,60,
- L'aire des boucles d'hystérésis augmente avec l'augmentation du niveau de chargement. Les forces maximale et minimale de ces boucles diminuent en fonction du nombre de cycles, ceci est du à la perte de rigidité (F/F_0) ;
- L'évolution de l'énergie dissipée E_d en fonction du nombre de cycles est similaire à celle observée pour F/F_0 . En effet, E_d diminue très rapidement dès les premiers cycles, suivis d'une région stable où l'énergie se stabilise et ne diminue presque plus jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse est la valorisation de l'incorporation du déchet de poudre de marbre M issue des marbreries sur le comportement mécanique en flexion des bétons polymères ainsi que la substitution d'un sable commercialisé GC par le déchet de sable de carrière G issu d'enduit de maçonnerie. Le polymère jouant le rôle de liant entrant dans la fabrication du béton polymère est une résine polyester. Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- ✓ L'incorporation de la poudre de marbre (M) contribue au remplissage des pores ce qui conduit à la diminution de la porosité des BPs et par conséquent une augmentation de la masse volumique ;
- ✓ La substitution partielle des granulats de sable commercialisé par le déchet de poudre de marbre contribue à une augmentation, atteignant 202% (pour GC60 M26), de la contrainte de flexion du BP, par rapport à celui ne contenant que du sable commercialisé (GC86 M0). De même, la substitution du déchet de sable de carrière G où la meilleure formulation G16 M70 permet une amélioration de la contrainte du BP de l'ordre de 174% ;
- ✓ La contrainte maximale enregistrée pour le type du BP élaboré avec G et M est seulement plus faible de 15% par rapport à celle du BP constitué avec GC et M. Le BP proposé permet d'obtenir un matériau écologique préparé avec le déchet de poudre de marbre M et de grains de sable de carrière G, de faible coût (moins cher) et ayant une résistance acceptable ;
- ✓ 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 la caractéristique mécanique et que le facteur taux de poudre de marbre et granulats influe sur la résistance de flexion ;
- ✓ L'évolution de la perte de rigidité F/F_0 montre que pour les faibles niveaux $r = 0,55$ et $r = 0,60$, la rupture total n'est pas atteinte même lorsque le nombre de cycle est égale à 10^6 cycles ;
- ✓ L'aire des boucles d'hystérésis augmente avec l'augmentation du niveau de chargement. Les forces maximale et minimale de ces boucles diminuent en fonction du nombre de cycles, ceci est du à la perte de rigidité (F/F_0) ;
- ✓ L'évolution de l'énergie dissipée E_d en fonction du nombre de cycle laisse apparaitre deux phases distinctes, la première phase montre une diminution très rapide dès les premiers

cycles, suivis d'une région stable où l'énergie se stabilise et ne diminue presque plus (comportement plateau) où on n'observe pratiquement aucune dépendance significative en fonction du nombre de cycles.

- ✓ L'analyse de la courbe de Wöhler montre que lorsque le chargement est voisin de celui de la rupture en statique, la rupture est obtenue dès les premiers cycles. Par contre pour des faibles niveaux de chargement, la rupture est obtenue pour des nombres de cycles élevés. Pour le niveau de chargement inférieur ou égal à 0,60, la rupture n'est pas atteinte même au delà de 10^6 cycles.

Références bibliographiques

- [ACI-03] Reported by ACI Committee 548 A. O. Kaeding & J. E. Maass, Polymer-Modified Concrete, *ACI 548.3R-03*, 2003.
- [ADI-15] Aditya Rana, Pawan Kalla, Laszlo J. Csetenyi, Sustainable use of marble slurry in concrete, *Journal of Cleaner Production*, vol. 94, 2015, pp. 304-311.
- [AGA-12] L. Agavriloaie, S. Oprea, M. Barbuta, F. Luca, Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix, *Construction and Building Materials*, vol. 37, 2012, pp. 190–196.
- [AND-05] T. L. Anderson, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, 3rd Edition, *Taylor & Francis Ed.*, 2005.
- [ASM-85] Metals Handbook, ASM 1985.
- [BAT-08] C. Bathias, A. Pineau, Fatigue des matériaux et des structures 1. ISBN 978-2-7462-1710-2, 2008.
- [BER-10] R. Berbaoui, Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère, *Thèse de doctorat, Université Du Maine France*, 2010, pp. 104.
- [BEZ-07] A. Bezazi, S. Gareth Pierce, K. Worden, E. Harkati, Fatigue life prediction of sandwich composite materials under flexural tests using a Bayesian trained artificial neural network, *International Journal of Fatigue*, vol. 29, 2007, pp. 738–747
- [BEZ-09] A. Bezazi, F. Scarpa, Tensile fatigue of conventional and negative Poisson's ratio open cell PU foams, *International Journal of Fatigue*, vol. 31, 2009, pp. 488–494.
- [BEZ-11] A. Bezazi, N. Frioui, F. Scarpa, Tensile static, fatigue and relaxation behaviour of closed cell electrets PVDF foams, *Mechanics of Materials*, vol. 43, 2011, pp. 459–466.
- [BIG-00] M. C. Bignozzi, A. Sacconi and F. Sandrolini, New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 1: microstructure and mechanical properties. *Composites Part A*, Vol. 31(2), 2000, pp. 97–106.
- [BLA-75] A. Blaga, Les thermoplastiques, Conseil national de recherche Canada Publication de l'IRC-CNRC, *Institut national de recherche en construction du CNRC > CBD-158-F, le béton de résine*, 1975.

- [BLA-75] A. Blaga, Les thermoplastiques, Conseil national de recherche Canada Publication de l'IRC-CNRC, *Institut national de recherche en construction du CNRC > CBD-159-F, le béton de résine, 1975.*
- [BLA-85] A. Blaga, et J.J. Beaudoin. Polymer Concrete, *Canadian Building Digests, CBD-242 NRC-IRC publications November 1985.*
- [BLA-86] A. Blaga, et J.J. Beaudoin. Le béton modifié aux résines, *Conseil national de recherches Canada, Publication de l'IRC-CNRC, Institut national de recherche en construction du CNRC > CBD 241. F.*
- [CAP-99] G. Caprino, and G. Giolelo, Fatigue life of glass fabric/epoxy composites, *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 30, 1999, pp.299-304.*
- [CAS-13] A.C. Meira Castro, M.C.S. Ribeiro, J. Santos, J.P. Meixedo, F.J.G. Silva, A. Fiúza, M.L. Dinis, M.R. Alvim, Sustainable waste recycling solution for the glass fibre reinforced polymer composite materials industry, *Construction and Building Materials vol 45, 2013, pp. 87–94.*
- [CHA-94] S. Chandra & Y. Ohama, Historical background of the use of natural polymers. Polymers in concrete, *CRC press, Boca Raton USA 1994.*
- [CON-13] K. Shi-Cong and P. Chi-Sun, A novel polymer concrete made with recycled glass aggregates, fly ash and metakaolin. *Construction and Building Materials, Vol. 41, 2013, pp. 146–151.*
- [CZA-01] L. Czarnecki. Polymers in concrete on the edge of the millennium 10th International Congress on polymers in concrete, ICPIC,2001, Honolulu, Hawaii.
- [DIA-13] R. M. Diaconescu, M. Barbuta and M. Harjaa, Prediction of properties of polymer concrete composite with tire rubber using neural networks, *Materials Science and Engineering B 2013, Vol. 178 pp. 1259– 1267.*
- [ELA-12] O. Elalaoui, E. Ghorbal, V. Mignot, M. Ben Ouezdou Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250 °C. *Construction and Building Materials 2012, 27 pp. 415–424.*

- [ELA-12] O. Elalaoui. Optimisation de la formulation et la tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde, *Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2012. pp. 34.*
- [FAT-99] H. Abdel-Fattah, Moetaz M. El-Hawary, Flexural behavior of polymer concrete, *Construction and Building Materials vol. 13, 1999, pp. 253-262.*
- [FOW-99] D.W. Fowler Polymers in concrete: a vision for the 21st century *Cement & Concrete Composites vol. 21, 1999, pp. 449-452.*
- [GAR-13] A. Garbacz, J. Sokołowska, Concrete-like polymer composites with fly ashes – Comparative study, *Construction and Building Materials vol. 38,2013, pp. 689–699.*
- [GEN-12] O. Gencil, C Ozel, F. Koksall, E. Erdogmus, G. Martínez-Barrera, W. Brostow, Properties of concrete paving blocks made with waste marble, *Journal of Cleaner Production vol.21, 2012, pp 62-70.*
- [GOR-04] J. P. Gorninskia, D. C. Molinb, C.S. Kazmierczaka, Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete, *Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 2091–2095.*
- [HAI-11] M. Haidar, E. Ghorbel, H. Toutanji, Optimization of the formulation of micro-polymer concretes, *Construction and Building Materials vol.25 ,2011, pp. 1632–1644.*
- [HEB] H. Hebhouh, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, E. Ghorbel, Use of waste marble aggregates in concrete, *Construction and Building Materials vol. 25, 2011, pp. 1167–1171.*
- [HEI-14] M. Heidari-Rarani, M.R.M. Aliha, M.M. Shokrieh, M.R. Ayatollahi, Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings An experimental study, *Construction and Building Materials vol. 64, 2014, pp. 308–315.*
- [MAN-82] J. F. Mandell, Fatigue behavior of fiber resin composites, developments in reinforced plastics, in: G. Pritchard (Ed.), *Applied Science Publishers, London, New York,(1982, pp. 67–107.*
- [MAR-10] G. Martínez-Barrera and W. Brostow, Effect of marble particle size and gamma irradiation on mechanical properties of polymer concrete, *e-Polymers Vol. 061, 2010.*

- [MON-01] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiment, NY: John Wiley & Sons, Inc.2001.
- [MUT 04] M. Muthukumar, D. Mohan, Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion, *European polymer journal*, vol. 40, 2004 pp. 2167-2177.
- [NGU 08] H.G. Nguyen, Approche micromécanique pour la modélisation du comportement élastoplastique des composites : Application aux mortiers de résines, *Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2008. pp. 20.*
- [NÓV-04] P.R.O. Nóvoa, M. C. S. Ribeiro, A.T. Marques and A. J. M. Ferreira, Mechanical characterization of lightweight wood-modified polymer concrete, *Ciê Tecnol Mater Vol. 16, 2004, pp. 81–87.*
- [NUN-12] L.C.S. Nunes, J.M.L. Reis. Estimation of crack-tip-opening displacement and crack extension of glass fiber reinforced polymer mortars using digital image correlation method. *Materials and Design*, vol. 33, 2012, pp. 248–253.
- [OHA 10] Y. Ohama, Polymers in concrete, *13th International congress functional, 10-12 February 2010, Madeira, Portugal.*
- [REB 95] K.S. Rebeiz, Time - temperature properties of polymer concrete using recycled PET, *Cement and Concret Composites*, vol. 17,1995, pp. 119-124.
- [REI 03] J. M. L. Reis & A.J.M. Ferreira, Fracture behavior of glass fiber reinforced polymer concrete, *Polymer Testing vol.22, 2003, pp. 149-153.*
- [REI-03] [65] Reis JML, Ferreira AJM. The influence of notch depth on the fracture mechanics properties of polymer concrete. *Int J Fracture*, vol. 124, 2003, pp. 33–42.
- [REI-04] Reis JML, Ferreira AJM. Assessment of fracture properties of epoxy polymer concrete reinforced with short carbon and glass fibers. *Construction and Building Material*, vol. 18, 2004, pp. 523–528.
- [REI 06] J. M. L. Reis, Fracture and flexure characterization of natural fiber reinforced polymer mortar, *Construction and Building Materials*, vol. 20, 2006, pp. 673-678.
- [REI-09] J.M.L. Reis, Mechanical characterization of polymer mortars exposed to degradation solutions, *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, pp. 3328–3331.

- [REI 12] J. M. L. Reis. Sisal fiber polymer mortar composites: Introductory fracture mechanics approach, *Construction and Building Materials*, vol.37, 2012, pp. 177-180.
- [REI 14] J. M. L. Reis et E.P. Motta. Mechanical Behavior of piassava fiber reinforced castor oil polymer mortars, *Composite Structures*, vol.111, 2014, pp 468-472.
- [RIB-04] M.C.S. Ribeiro, P.R. Novoa, A.J.M. Ferreira, A.T. Marques, Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions, *Cement & Concrete Composites*, vol. 26, 2004, 803–809.
- [RIB 06] M. Ribeiro, New polymer mortar formulations development, characterization and application forms, *Department of Mechanical Engineering and Industrial Management, Faculty of Engineering of University of Porto Ph.D. Thesis Porto, October 2006.*
- [RIB-13] M.C.S. Ribeiro, A. Fiúza , A.C.M. Castro , F.G. Silva , M.L. Dinis , J.P. Meixedo , M.R. Alvim, Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials, *Composite Structures* vol. 105, 2013, pp.300–310.
- [SAB-07] F. Saboya Jr., G.C. Xavier, J. Alexandre, The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic, *Construction and Building Materials* vol. 21, 2007, pp. 1950–1960.
- [SAN-16] Sangkeun Ahn , Eun-Beom Jeon, Hyo-In Koh, Hak-Sung Kim and Junhong Park, Identification of stiffness distribution of fatigue loaded polymer concrete through vibration measurements, *Composite Structures*, vol. 136, 2016, pp. 11–15.
- [SAR-13]. M. Saribiyik, A. Piskin and A. Saribiyik, The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties, *Construction and Building Materials*, Vol. 47, 2013, pp. 840 – 844.
- [SHO-15]. M. M. Shokrieh, S. Rezvani, and R. Mosalmani. A novel polymer concrete made from fine silica sand and polyester. *Mechanics of Composite Materials*, vol.51 (5), 2015, pp. 807-820.
- [Taw-06] M. E. Tawfik and S. B. Eskander, Polymer Concrete from Marble Wastes and Recycled Poly(ethylene terephthalate), *Elastomers and Plastics*, vol. 38 (1), 2006, pp. 65-79.
- [VAR-95] K. T. Varughese & B. K. Chaturvedi, Fly Ash as Fine Aggregate in Polyester Based Polymer Concrete, *Materials Technology Division, Central Power Research Institute, Bangalore, 560 094, India November 1995.*

- [WAN-81] Y.Y Wang. Research and application of polymer concrete in China, 3rd *International Congress of Polymer in concrete, Koryama, Japan1981.*
- [NET-1]<http://www.machine-outil.com/actualites/la-societe/e1452-nodier-emag-industrie/page2.html>.

Productions scientifiques

Publication internationale

N. Benzannache, A. Bezazi, H. Bouchelaghem, M. Boumaaza, S. Amziane, F. Scarpa. Statistical analysis of the 3-point bending properties of polymer concrete made of marble ² powder waste, sand grains and polyester resin. *Mechanics of composite Materials*.

Communications :

1. **N. Benzannache**, A. Bezazi, H. Bouchelaghem, M. Boumaaza, S. Amziane, F. Scarpa. Comportement Mécanique en Statique des Bétons Polymères à base de déchets de marbre et de grains de sable Sollicités en Flexion 3-Points. *2016 EMI International Conference Metz, France, October 25-27, 2016*.
2. **N. Benzannache**, A. Bezazi, H. Bouchelaghem, M. Boumaaza, S. Amziane, F. Scarpa. Etude statistique et Caractérisation Mécanique des Bétons Polymères Sollicités en Flexion. *22^{ème} Congrès Français de Mécanique Lyon, 24 au 28 Août 2015*.
3. **N. Benzannache**, A. Bezazi, H. Bouchelaghem, M. Boumaaza, S. Amziane, F. Scarpa. Comportement Mécanique en Statique et en Fatigue des Bétons Polymères Sollicités en Flexion 3-Points. *3^{EME} Conférence Internationale sur les Matériaux et les Structures en Composite Décembre 02-03, 2014 Oran Algérie*.
4. **N. Benzannache**, A. Bezazi, H. Bouchelaghem, M. Boumaaza, S. Amziane, F. Scarpa. Caractérisation mécanique des bétons polymères à base de résine renforcés par des granulats et de poudre de marbre. *Congrès Matériaux 2014 Montpellier, France, 24-28 Novembre 2014*.