

Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des notations

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Chapitre I

Les bétons de résine : Recherche bibliographique

1. Développement et classification des bétons résineux	
1.1. Développement des bétons résineux.....	31
1.2. Classification des bétons résineux.....	32
2. Constituants des bétons de résine et domaines d'applications	
2.1. Constituants de bétons de résine.....	38
2.2. Domaine d'application des bétons de résine.....	44
3. Optimisation de la formulation : État de l'art	
4. Comportement mécanique	
4.1 Comportement mécanique à température ambiante et à hautes températures...55	
4.2 Différence entre le béton de résine et le béton classique.....57	
5. Théorie de Choc	
5.1 Mesure de GIC en choc méthode essai de Williams	59
6. Application de mode probabiliste de Weibull	
6.1 Modèle de Weibull.....	61
7. Comportement en et phénomène de fatigue	
7.1 Mécanismes de fatigue du béton.....	64
7.2 Déformation et endommagement du béton en fatigue.....	65

8. Réparation des bétons	
8.1 Techniques de réparation.....	67
8.2 Réparation par les composites.....	68
8.3 Réparation par TFC.....	68
9. Synthèse	

Chapitre II

Techniques expérimentales, caractérisation des matériaux et mode de préparation des bétons de résine polyester et Processus d'Optimisation de la formulation

Matériaux utilisés dans les formulations

1.1. Constituants des micro-bétons résineux	74
1.2. Caractérisation des charges minérales.....	78
2. Optimisation de la formulation du micro-béton de résine	
2.1 Procédure de formulation.....	82
2.2 Optimisation de la fraction massique du liant	85
2.3 Optimisation du squelette granulaire.....	87
3. Mode de préparation des micro-bétons	
4. Techniques expérimentales	
4.1 Essais de caractérisation mécanique.....	91
4.2 Essais de caractérisation d'analyses physico-chimiques.....	95
5. Synthèse	

Chapitre III

Résultats et analyse du micro-béton de résine optimal

Cas A : Utilisation de la résine polyester 1 (grenat)

1. Mortier de résine	
1.1. Influence de pourcentage des sables sur les résistances des mortiers	104
2. Micro-béton de résine	
2.1 Influence du rapport G/S sur les résistances mécanique de béton de résine	105
2.2 Influence de taux des fibres (Aléatoire) sur le micro-béton de résine	106
3. Conclusion	

Cas B: Utilisation de résine polyester 2 (Violet)

1. Mortier de résine

1.1 Influence de pourcentage de résine sur la masse volumique du mortier	109
1.2 Influence de pourcentage de résine polyester sur les résistances mécaniques.....	111
1.3 Courbe charge – déplacements	114
1.4 Observations microscopiques électronique à balayage (MEB)	117
1.5 Influence de pourcentage des sables sur les résistances mécaniques des mortiers	119
1.6 Porosité de mortier de résine	121
1.7 Faciès de rupture des mortiers de résine	123
1.8 Observations au MEB des faciès de rupture de mortier de résine optimal	124
1.9 Résistance des mortiers de résine optimal en fonction du l'âge de maturation..	126
1.10 Conclusion	127

2. Micro-béton de résine

2.1 Influence de rapport G/S sur la masse volumique de béton de résine	129
2.2 Influence de rapport Gravier/Sable (G/S) sur les résistances mécaniques de béton de résine	130
2.3 Courbes charge-déplacements	132
2.4 Faciès de rupture des micro-bétons de résine.....	133
2.5 Mode de rupture	134
2.6 Observation microscopique à balayage MEB de béton optimal	135
2.7 Conclusion.....	137

3. Béton de résine fibrée

3.1 Influence de taux de fibre de verre E (sous forme aléatoire) sur les résistances mécaniques	138
3.2 Influence du tissu des fibres sur les résistances des bétons de résine polyester..	141
3.3 Influence de la longueur de fibre polypropylène (6 mm et 12 mm) sur les résistances mécaniques de micro-béton.....	142
3.4 Porosité de micro-béton de résine fibré	144
3.5 Mode de rupture	146
3.6 Observation de MEB de micro-béton de résine fibré	148
3.7 Conclusion.....	149

4. Synthèse

Chapitre IV

Modélisation de la prévision du comportement

Cas A : Résine grenat

Cas B : Résine violet

Chapitre V

Approche probabiliste de la rupture «Application du modèle statistique de Weibull »

1. Application du modèle probabiliste de Weibull
2. Conclusion

Chapitre VI

Application de mécanisme de rupture aux essais de choc

1. Application de la mécanique de la rupture aux essais de choc sur le micro-béton de résine fibré et non fibré et sur résine pur

1.1 Résultats des éprouvettes de micro-béton de résine sans entaille168

Mélange I: Résine pure (résine polyester + durcisseur).

Mélange II: Béton de résine optimal sans fibre (35% de résine polyester, 80% de sable fin, 20% sable moyen et un rapport de G/S = 0,5).

Mélange III: Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 1% de fibre de verre).

Mélange IV: Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 2% de fibre de verre).

Mélange V: Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 3% de fibre de verre).

2.2 Résultats des éprouvettes de béton de résine avec entaille.....174

2. Conclusion

Chapitre VII

Influence du mode de réparation des fissures par le mortier de résine, le TFC et le TFV sur les performances mécaniques des bétons traditionnels

1. Introduction	
Problématique	
2. Eprouvettes à réparer	
3. Quantification des ouvertures de fissures	
3.1. Objectif expérimental.....	181
3.2. Constatations expérimentales.....	182
3.3. Mode de rupture avant la réparation.....	183
4. Technique de réparation	
4.1. Réparation sans bandage.....	185
4.2. Réparation avec bandage.....	185
5. Expérimentation : Essai de traction par flexion 4 points	
5.1. Réparation avec le mortier de résine polyester sans bandage.....	187
5.2. Mode de rupture.....	188
5.3. Réparation avec le mortier de résine et le TFC et le TFV avec bandage.....	189
5.4. Mode de rupture.....	190
6. Les avantages de la réparation par les matériaux composites	
7. Synthèse	

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1. Classification des composites bétons-résine.....	33
Figure 1.2. Modèle simplifié de la formation d'une Co-matrice latex-ciment.....	34
Figure 1.3. Fibres de verre.....	41
Figure 1.4. Fibre de carbone.....	42
Figure 1.5. Fibres métalliques.....	42
Figure 1.6. Fibres de polypropylène.....	43
Figure 1.7. Exemple de renforcement des dalles par le béton de résine.....	45
Figure 1.8. Exemples de renforcement des colonnes par le béton de résine fibré.....	45
Figure 1.9. Exemples d'utilisation des bétons de résine dans les travaux hydrauliques.....	47
Figure 1.10. Exemples d'utilisation des bétons de résine dans les planchers.....	48
Figure 1.11. Effet de la nature de résine et du pourcentage des CV sur les résistances.....	51
Figure 1.12. Résistances en Fonction de la quantité de polymère.....	52
Figure 1.13. Courbes granulométriques de conception.....	55
Figure 1.14. Phénomènes dus aux effets de températures élevées dans les composites.....	56
Figure 1.15. Représentation du mouton pendule de Charpy.....	59
Figure 1.16. Graphique de l'énergie en fonction de la géométrie.....	60
Figure 1.17. Représentation graphique de l'équation de probabilité linéaire.....	63
Figure 1.18. Courbe de Wöhler.....	64
Figure 1.19. Evolution du module d'élasticité et distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue.....	65
Figure 1.20. Evolution du module d'élasticité et de la déformation irréversible en fonction du nombre de cycles de fatigue.....	66
Figure 1.21. Evolution du facteur de dommage.....	67
Figure 1.22. Exemple de réparation par l'injection de résine époxydes.....	69

Chapitre II

Figure 2.1. Sable moyen.....	74
Figure 2.2. Sable fin.....	74

Figure 2.3. Gravier 3/8.....	75
Figure 2.4. Résine polyester.....	75
Figure 2.5. Fibres de verre E.....	77
Figure 2.6. Fibre de polypropylène.....	78
Figure 2.7. Courbes granulométriques des granulats.....	79
Figure 2.8. Caractéristiques physiques des granulats.....	81
Figure 2.9. Organigramme de la démarche expérimentale utilisée.	84
Figure 2.10. Tissu de verre utilisé et schéma de la disposition de la stratification au sein de l'éprouvette.....	88
Figure 2.11. Mode de renforcement trois couche dans la zone tendue.....	88
Figure 2.12. Schéma du dispositif de flexion trois points.....	92
Figure 2.13. Dispositif d'essai de compression sur un béton de résine.....	92
Figure 2.14. Machine d'essai Charpy avec affichage numérique.....	93
Figure 2.15. Téflon utilisé dans l'éprouvette de choc Charpy.....	94
Figure 2.16. Moule utilisé.....	95
Figure 2.17. Dispositif de mesure de la porosité par intrusion de mercure.....	96
Figure 2.18. Microscope électronique à balayage et porte échantillons.....	97

Chapitre III

Figure 3.1. Influence de pourcentage des sables sur la résistance à la traction par flexion et à la compression des mortiers de résine.....	104
Figure 3.2. Influence du rapport G/S sur la résistance à la flexion et à la compression du béton de résine.....	106
Figure 3.3. Influence de taux des fibres sur la résistance à la flexion et à la compression des bétons de résine polyester.....	107
Figure 3.4. Evolution de la masse volumique du mortier de résine en fonction du pourcentage du polyester avec sable fin.....	110
Figure 3.5. Evolution de la masse volumique du mortier de résine en fonction du pourcentage du polyester avec sable moyen.....	110
Figure 3.6. Masse volumique de mortier de résine.....	111
Figure 3.7. Influence de pourcentage de résine sur les résistances mécaniques traction par flexion et compression.....	112
Figure 3.8. Histogramme des résistances.....	113

Figure 3.9. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 30% de résine.....	115
Figure 3.10. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 35% de résine.....	115
Figure 3.11. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 40% de résine.....	116
Figure 3.12. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 45% de résine.....	116
Figure 3.13. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 50% de résine.....	117
Figure 3.14. Micrographes MEB des mortiers de résine pour 30%, 35% du polymère (agrandies 1000 X).....	118
Figure 3.15. Micrographes MEB des mortiers de résine pour 40% et 45% du polymère (agrandies 1000 X).....	118
Figure 3.16. Variation de la contrainte en traction par flexion et en compression en fonction de taux des sables des mortiers de résine.....	120
Figure 3.17. Distribution de la taille des pores des mortiers de résine obtenue par PIM pour 35% de résine.....	121
Figure 3.18. Micro-photo de mortier de résine polyester.....	122
Figure 3.19. EDX de mortier de polymère.....	123
Figure 3.20. Distribution des pores de mortier de résine optimal.....	123
Figure 3.21. Mode de rupture des éprouvettes en flexion.....	124
Figure 3.22. Mode de rupture des éprouvettes en compression.....	124
Figure 3.23. Micrographe MEB de mortier de résine optimal (80% sable fin et 20% sable moyen avec 35% de résine) agrandies 100X.....	125
Figure 3.24. Observation des microfissures (MEB) des faciès de rupture à la traction par flexion 3 pts (agrandies 1000X).....	125
Figure 3.25. Observation des microfissures (MEB) des faciès de rupture à la compression (agrandies 1000X).....	126
Figure 3.26. Effet du temps de maturation sur la résistance mécanique du mortier.....	127
Figure 3.27. Evolution de la masse volumique des bétons de résine.....	130
Figure 3.28. Influence du rapport G/S sur la résistance en flexion et en compression du béton de résine.....	131

Figure 3.29. Courbe charge-déplacement d'un micro-béton de résine, en flexion trois points.....	132
Figure 3.30. Morphologie de rupture des micro-bétons de résine pour les différents rapports G/S.....	133
Figure 3.31. Mode de rupture des éprouvettes en flexion.....	134
Figure 3.32. Mode de rupture des éprouvettes en compression.....	134
Figure 3.33. Image au (MEB) de micro particule de la calcite composant le granulat (a) avec son spectre 1 ESD (b).....	135
Figure 3.34. Image au (MEB) de micro particule sable résine du béton (a) avec son spectre 2 EDS (b).....	136
Figure 3.35. Compacité du contact granulat résine et absence de microfissures.....	137
Figure 3.36. Evolution des résistances en flexion et en compression en fonction du taux de fibres de verre.....	139
Figure 3.37. Histogramme des résistances.....	141
Figure 3.38. Evolution des résistances en flexion et en compression en fonction du taux de fibres de polypropylène (6 et 12mm).....	143
Figure 3.39. Effet de la nature de l'addition sur les résistances mécaniques.....	144
Figure 3.40. Distribution de la taille des pores de micro-béton de résine à base de fibre de verre obtenue par PIM.....	145
Figure 3.41. Distribution de la taille des pores de micro-béton de résine à base de fibre de polypropylène obtenue par PIM.....	145
Figure 3.42. Mode de rupture des éprouvettes en flexion de béton de résine fibré.....	147
Figure 3.43. Mode de rupture des éprouvettes en flexion de béton de résine fibré.....	147
Figure 3.44. Mode de rupture des éprouvettes en flexion de béton de résine.....	147
Figure 3.45. Mode de rupture des éprouvettes en compression de béton de résine fibré.....	148
Figure 3.46. Micrographe MEB de béton de résine avec trois couches de tissu de verre dans la zone tendue) agrandies 50X.....	149

Chapitre V

Figure 5.1. Contrainte à la rupture en fonction de la probabilité de rupture.....	160
Figure 5.2. Equation de probabilité linéaire.....	161
Figure 5.3. Observation de la microstructure des micro-bétons de résine.....	162

Chapitre VI

Figure 6.1. Courbe d'énergie de choc de mélange I.....	169
Figure 6.2. Courbe d'énergie de choc de mélange II.....	170
Figure 6.3. Courbe d'énergie de choc de mélange III.....	171
Figure 6.4. Courbe d'énergie de choc de mélange IV.....	172
Figure 6.5. Courbe d'énergie de choc de mélange V.....	173
Figure 6.6. Effet de taux des fibres sur la résilience.....	173
Figure 6.7. Énergie de choc en fonction des entailles.....	175
Figure 6.8. Énergie de rupture totale en fonction des surfaces rompues $BW\Phi$ de béton de résine.....	175

Chapitre VII

Figure 7.1. Fissure d'éprouvette après le chargement.....	181
Figure 7.2. Mesure d'ouverture à l'aide d'un fissuromètre.....	182
Figure 7.3. Éprouvette en BHPF après le chargement.....	182
Figure 7.4. Courbe charge-ouverture de fissures de BOF et BHPF à l'aide d'une fissuromètre.....	183
Figure 7.5. Éprouvettes rompues des différentes dimensions de béton sans fibre avant la réparation.....	184
Figure 7.6. Éprouvettes rompues de béton avec fibre avant la réparation.....	184
Figure 7.7. Tissu utilisé dans la réparation.....	185
Figure 7.8. Réparation avec le mortier de résine polyester (sans bandage).....	185
Figure 7.9. Réparation avec la résine polyester seul (méthode de bandage).....	186
Figure 7.10. Réparation avec le mortier de résine polyester (méthode de bandage).....	186
Figure 7.11. Dispositif d'essai de traction par flexion 4 points.....	187
Figure 7.12. Comparaison des résistances mécaniques en flexion des bétons ordinaires avant et après la réparation sans bandage.....	188
Figure 7.13. Mode de rupture des éprouvettes en flexion après la réparation.....	189
Figure 7.14. Résistance a la flexion avant et après la réparation avec bandage.....	190
Figure 7.15. Mode de rupture des éprouvettes en flexion après la réparation.....	190

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1.1. Propriété types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland...	31
Tableau 1.2. Propriété types des bétons.....	35
Tableau 1.3. Durabilité des bétons imprégnés de résine.....	36
Tableau 1.4. Propriété types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland...	37
Tableau 1.5. Principales différences entre les propriétés des résines TP et TD.....	39
Tableau 1.6. Variation de la résistance et du coût du béton de résine en fonction du pourcentage de résine.....	51
Tableau 1.7. Effets de température sur les propriétés en flexion des bétons de résine et résine pure.....	57
Tableau 1.8. Tableau comparatif de béton de polymère et béton traditionnel.....	58

Chapitre II

Tableau 2.1. Caractéristique de la résine polyester.....	76
Tableau 2.2. Caractéristique de durcisseur.....	77
Tableau 2.3. Propriétés physiques et mécaniques des fibres.....	78
Tableau 2.4. Caractéristiques des granulats.....	81
Tableau 2.5. Formulation des mortiers de résine 1 avec sable fin et moyen.....	86
Tableau 2.6. Formulation des mortiers de résine 2 avec sable fin et moyen.....	86
Tableau 2.7. Formulation des mortiers avec 27% de résine 1 et deux types de sable.....	87
Tableau 2.8. Formulation des mortiers avec 35% de résine 2 et deux types de sable.....	87
Tableau 2.9. Formulation des micro-bétons de résine.....	87
Tableau 2.10. Dimension de l'éprouvette de choc Charpy.....	94

Chapitre III

Tableau 3.1. Résistances mécaniques traction par flexion et compression des mortiers.....	104
Tableau 3.2. Résistances mécaniques des micro-bétons de résine.....	105
Tableau 3.3. Résistances mécaniques des bétons à base de fibres de verre E.....	106
Tableau 3.4. Résistances mécaniques traction par flexion et compression des mortiers.....	112
Tableau 3.5. Résistances mécaniques des mortiers de résine.....	119
Tableau 3.6. Résistances mécaniques des mortiers de résine en fonction du temps de maturation.....	126
Tableau 3.7. Résistances mécaniques des bétons de polymère.....	130
Tableau 3.8. Résultats EDS -nature des composants du spectre1.....	135
Tableau 3.9. Résultats EDS -nature des composants du spectre 2.....	136
Tableau 3.10. Résistances mécaniques des bétons à base de fibres de verre E.....	138
Tableau 3.11. Résistances mécaniques des micro-bétons à base de fibres de verres E sous forme de tissu.....	141
Tableau 3.12. Résistances mécaniques des micro-bétons à base de fibres polypropylène...	142
Tableau 3.13. Porosité des micro-bétons de résine fibré.....	146

Chapitre IV

Tableau 4.1. Valeurs des résistances mesurée et calculée.....	155
--	-----

Chapitre V

Tableau 5.1. Comparaison du module de Weibull expérimental et calculé selon les modèles de la littérature.....	164
---	-----

Chapitre VI

Tableau 6.1. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange I.....	168
Tableau 6.2. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange II.....	169
Tableau 6.3. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange III.....	170
Tableau 6.4. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange IV.....	171
Tableau 6.5. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange V.....	172
Tableau 6.6. Résultats de l'essai de choc avec entaille de béton de résine.....	174

Chapitre VII

Tableau 7.1. Résistances mécaniques de traction par flexion des éprouvettes en bétons ordinaires avant et après la réparation sans bandage.....	188
Tableau 7.2. Résistances de traction par flexion enregistrées lors de l'essai sur les éprouvettes avant et après la réparation avec bandage.....	189

Liste des notations

- PCC** : Polymer-Cement Concrete
PLC: Polymer-Latex Concrete
PIC: Polymer-impregnated concrete
BMO: Béton à matrice organique
TP : Résine thermoplastiques
TD : Résine thermodurcissables
PVC : Polychlorure de vinyle
PMMA : Polyméthacrylate de méthyle
CV: Cendres volantes
PI : Polyester isophtalique
PET : Polyéthylène téréphtalate
G_{IC} : Energie de rupture
U : Energie totale
∅ : Facteur de calibration
W.L.T: Weak Link Theory
B : Risque de rupture donné par l'intégrale de volume
σ : Contrainte appliquée
σ_μ : Contrainte au dessous de laquelle la probabilité de rupture est nulle.
σ : Contrainte de normalisation
m : Facteur d'inhomogénéité appelé « module de Weibull ».
σ_t: Contrainte de normalisation en traction
σ_f: Contrainte appliquée à l'extrémité de la zone la plus tendue de l'éprouvette.
E_D : Module d'élasticité
ε_D : Déformation
Ω_D : L'aire totale cumulée
Ω₀ : L'aire initiale
P : Porosité.
ρ_{abs} : Masse volumique absolue.
ρ_{app} : Masse volumique apparente.

ES : Equivalent de sable

$\sigma_f - \sigma_m$: Contraintes de rupture

$V_f - V_m$: Fractions volumiques

BO : Béton ordinaire

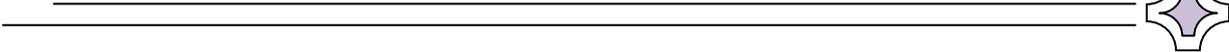
BOF : Béton ordinaire fibré

BHP : Béton a hautes performances

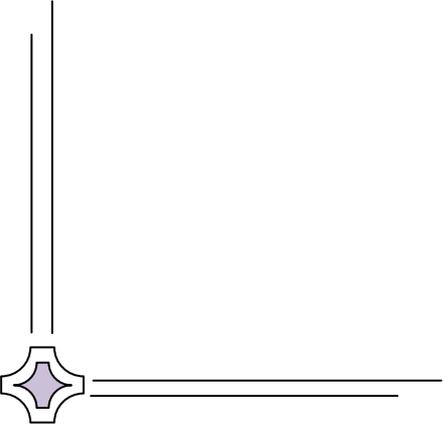
BHPF : Béton a hautes performances fibré

TFV : Tissu de fibre de verre E

TFC : Tissu de fibre de carbone



INTRODUCTION GÉNÉRALE



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Un ouvrage de génie civil est dimensionné pour une durée de vie de cent ans en moyenne. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle. Aujourd'hui, un ouvrage sur trois nécessite une maintenance pour assurer la sécurité des usagers [1]. La maintenance des ouvrages de génie civil consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages [2].

Pour éviter des travaux d'entretien onéreux ou des dégâts provoqués par des événements naturels exceptionnels (séismes, etc.), un bon niveau de fiabilité est essentiel. Les nouvelles technologies sont fondées l'apparition de nouveaux matériaux tels que les bétons de résine, les bétons de résine renforcés par des fibres [3].

À mesure que se développe la technologie de la construction, s'accroît le besoin en matériaux dont les caractéristiques et la méthodologie d'emploi sont mieux adaptées aux exigences de performance, de durabilité et de qualité. Cependant, la recherche des matériaux les plus appropriés doit prendre en compte les ressources disponibles, les solutions fonctionnelles visées et aussi les contraintes esthétiques [4]. Afin d'améliorer la tenue de certaines structures du BTP aux agressions environnementales, la matrice cimentaire peut être remplacée, dans certains cas, par une matrice organique en "une résine". Le béton qui en résulte est désigné béton de polymère ou "béton de résine" [5].

Cette classe de matériaux est constituée d'un liant de polymère de nature organique, comme les résines thermoplastique ou thermodurcissable, et d'une charge minérale comme le gravier, la pierre concassée et le sable. Les résines les plus généralement utilisées sont les polyesters, Poly (métha- crylate de méthyle), l'époxy et les époxydes.

Ces matériaux se sont développés pour pallier à certains inconvénients des bétons hydrauliques telles que [6] :

- une faible résistance en flexion
- une faible déformation
- une sensibilité aux effets du gel
- une faible résistance aux produits chimiques.

Cependant, les bétons de résine présentent certains inconvénients comme [6] :

- un coût très élevé
- une mauvaise résistance aux températures élevées
- le dégagement d'odeurs désagréables lors de la mise en œuvre.

Les applications de ces matériaux se sont développées vers la fin des années 1950 avec notamment les revêtements de bâtiment et la production de marbre cultivé. Leurs champs d'application se répandent rapidement grâce à leurs excellentes propriétés [7]. Dans les années 1970, la recherche et le développement du béton de résine ont connu un grand essor dans de nombreux. Actuellement ce matériau devient un matériau relativement bien utilisé dans la construction industrielle et son utilisation en tant que matériau de construction se généralise de plus en plus [8].

Par ailleurs, des renforts fibreux naturel ou synthétique ainsi que des charges sont ajoutés à la matrice afin d'améliorer le comportement mécanique des bétons de résine qui en résultent [9].

Les revêtements de béton de résine sont devenus extrêmement utilisés en raison de leur capacité à être employés en couches minces, en plus leur côté esthétique qui permet leur utilisation dans le domaine de la décoration. Les recouvrements sont utilisés pour les surfaces de ponts, les surfaces des salles de sports, des stades, des laboratoires, des hôpitaux, des usines et des de magasins [10].

Comparativement au béton de ciment Portland, le béton polymère possède une plus grande résistance mécanique, résiste mieux aux produits chimiques et aux agents corrosifs, absorbe moins d'eau et présente une plus grande stabilité aux cycles gel-dégel [5].

La connaissance du comportement de ces matériaux en statique ne suffit pas et son développement nécessite des informations complémentaires sur son comportement sous des charges importantes, variables et de longues durées. Une connaissance du comportement en fluage devient aussi intéressante. Dans ce domaine, les essais non destructifs comme les ultrasons et l'émission acoustique sont peu utilisés en fluage notamment en termes de prédiction de la rupture. Des travaux récents ont proposé une approche qui consiste à étudier la rupture à travers des phénomènes de transitions de phase en fluage [11-12].

Dans cette perspective Nechad et al [11] ont analysé l'évolution du taux de déformation en utilisant les techniques de l'émission acoustique en fluage dans les phases primaire et tertiaire, sur des matériaux composites à matrice polyester renforcée par des fibres de verre. Une relation est déduite entre le temps de transition primaire/secondaire correspondant au minimum du taux de déformation et le temps de rupture du matériau.

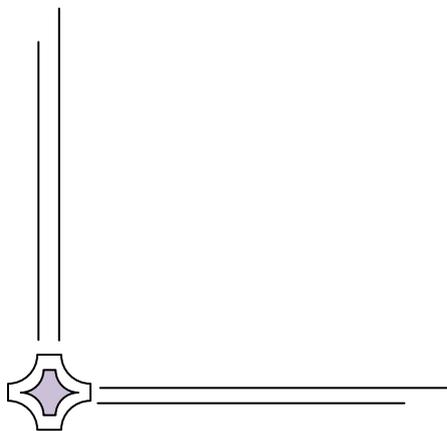
Le but de ce travail est de formuler des bétons à base de résine polyester renforcée de différents taux de fibres de verre injectées sous forme de couches et aussi aléatoire et d'étudier ainsi leurs influences sur le comportement global et les performances mécaniques de ces composites granulaires. Un renfort en fibres de polypropylène de différentes longueurs a aussi fait l'objet d'expérimentation. Un approche de formulation empirique basée sur le point de saturation de la résine avec le sable a été utilisé pour définir le taux minimal de matrice qui sature le sable et qui définit une pseudo-compacité optimale. Des essais de flexion et de compression ont été utilisés pour la détermination des résistances mécaniques. Une modélisation de la prévision des performances en flexion et en compression basée sur la loi des mélanges a été tirée à partir de l'expérience. L'aspect statistique probabiliste de la rupture aléatoire de ces matériaux est décrit à l'aide du modèle à deux paramètres de Weibull. La distribution et la taille des pores à l'intérieur des bétons de résine ont été analysées à l'aide d'un porosimètre à mercure (PIM). Des observations microscopiques au MEB ont permis d'analyser la microstructure.

Chapitre I

Les bétons de résine : Recherche bibliographique



Ce chapitre a pour objectif de présenter les différentes classes des bétons polymériques, les constituants éventuellement utilisées (liant, granulats, additions) ainsi que leurs applications potentielles dans le domaine du génie civil. Une synthèse bibliographique exhaustive sera effectuée sur les travaux réalisés sur l'optimisation, le comportement mécanique à température ambiante et finalement sur les propriétés à la rupture du béton polymérique.



Sommaire

1. Développement et classification des bétons résineux	
1.1. Développement des bétons résineux.....	31
1.2. Classification des bétons résineux.....	32
1.2.1 Le béton additionné de résine.....	33
1.2.2 Le béton imprégné de résine.....	35
1.2.3 Le béton de résine.....	36
2. Constituants des bétons de résine et domaines d'applications	
2.1. Constituants de bétons de résine.....	38
2.1.1 Le liant (la résine).....	38
2.1.2 Les granulats.....	39
2.1.3 Les charges et les additifs.....	40
2.1.4 Les renforts fibreux.....	41
a) les fibres de verre.....	41
b) les fibres de carbone.....	42
c) les fibres métalliques.....	42
d) les fibres de polypropylène.....	43
e) autres fibres.....	43
2.1.5 Les ignifugeants ou retardateurs de flamme.....	43
2.2. Domaine d'application des bétons de résine.....	44
2.2.1 Utilisation des bétons de résine dans les bâtiments.....	44
2.2.2 Utilisation des bétons de résine dans les travaux de drainage et Hydrauliques.....	45
2.2.3 Utilisation des bétons de résine dans l'agriculture et l'horticulture.....	47
2.2.4 Utilisation des bétons de résine pour le revêtement des chaussés et planchers.....	47
2.2.5 Utilisation des bétons de résine dans l'industrie.....	48
2.2.6 Utilisation des bétons de résine comme isolant phonique.....	48
2.2.7 Utilisation des bétons de résine dans le site d'enfouissement des déchets toxiques et radioactifs.....	49
2.2.8 Utilisation des bétons de résine en géothermie.....	49

3. Optimisation de la formulation : État de l'art	
4. Comportement mécanique	
4.1 Comportement mécanique à température ambiante et à hautes températures...	55
4.2 Différence entre le béton de résine et le béton classique.....	57
5. Théorie de Choc	
5.1 Mesure de GIC en choc méthode essai de Williams	59
6. Application de mode probabiliste de Weibull	
6.1 Modèle de Weibull.....	61
7. Comportement en et phénomène de fatigue	
7.1 Mécanismes de fatigue du béton.....	64
7.2 Déformation et endommagement du béton en fatigue.....	65
8. Réparation des bétons	
8.1 Techniques de réparation.....	67
8.2 Réparation par les composites.....	68
8.3 Réparation par TFC.....	68
9. Synthèse	

1. Développement et classification des bétons résineux

1.1. Développement des bétons résineux

Le béton résineux représente une nouvelle génération de matériaux qui en dépit d'une faible consommation en liant polymérique par unité de masse se caractérise par une grande densité, une bonne résistance aux agents chimiques [13], une bonne adhésion aux granulats, par des résistances mécaniques notamment à la traction plus élevées que les bétons hydrauliques [14] et beaucoup d'autres avantages (Tableau 1.1).

La grande proportion de fillers utilisés dans ce type de béton réduit énormément le retrait (égal à celui des bétons cimentaires) alors que le module d'élasticité est largement haussé. Ceci permet l'utilisation de ces bétons dans la fabrication des éléments porteurs et structuraux et aussi dans l'industrie de la construction [15].

Tableau 1.1. Propriété types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland [16].

Type de liant	Masse volumique (kg/dm ³)	Résistance en compression (MPa)	Résistance à la traction (Mpa)	Résistance en flexion (Mpa)	Module d'élasticité (GPa)	Coefficient de dilatation thermique 106C ⁻¹
Polyméthacrylate de méthyle	2,0-2,4	70-210	9-11	30-35	35-40	10-19
Polyester	2,0-2,4	50-150	8-25	15-45	20-40	10-30
Époxy	2,0-2,4	50-150	8-25	15-50	20-40	10-35
Résine furanique	1,6-1,7	48-64	7-8	-	-	38-61
Ciment	1,9-2,5	13-35	1,5-3,5	2-8	20-30	10-12

Les bétons de résine sont initialement utilisés comme des matériaux décoratifs et de revêtement et pour la fabrication des éléments structuraux stable chimiquement. En effet c'est vers la fin des années 50 que le béton polymère trouvait sa première application dans la production du revêtement des bâtiments et du marbre synthétique [7]. Ses excellentes propriétés étaient à l'origine du développement de son utilisation dans d'autres domaines d'application au point qu'ils sont utilisés dans l'industrie de la construction, dans la production d'énergie électrique, dans l'énergie atomique, le

réaménagement des terrains,... [15]. Le béton de polymère est devenu le matériau de construction dominant dans les pays développés dans les années 1970. Les mortiers et bétons résineux se sont développés entre la fin des années 1950 et le début des années 1960 et deviennent les matériaux de construction majeurs au Japon et en Europe vers les années 1970 et aux Etats-Unis dans les années 1980. À présent, ils sont des matériaux de construction courants [17].

Le béton polymère a l'avantage de résister à l'action des huiles et des liquides de refroidissement et ne nécessitent donc pas l'application d'une couche supplémentaire de peinture [15].

1.2. Classification des bétons résineux

La figure 1.1 montre la classification de la composition de Béton résineux [17]. Cette classification a été publiée pour la première fois par Blaga [16] qui a proposé de classer les bétons de résine en deux grandes catégories. Dans la première le liant est entièrement polymérique. La deuxième concerne des bétons cimentaires modifiés par des polymères. Dans cette dernière catégorie on retrouve le béton imprégné de résine.

L'utilisation des polymères dans les bétons se manifeste par l'introduction de liant organique dans la structure poreuse du ciment durci, de la roche ou du béton [17]:

- Le remplacement des granulats inorganique par d'autres organiques dans le but d'alléger les bétons et améliorer les caractéristiques liées à l'isolation thermique. Les propriétés des bétons utilisant des agrégats organiques ou inorganiques sont comparables.
- Le remplacement partiel ou complet du liant inorganique par un liant organique : le remplacement partiel de la matrice inorganique implique la présence d'une interaction entre la résine synthétique et le ciment donnant naissance à un nouveau matériau avec des caractéristiques un peu particulières. [17].

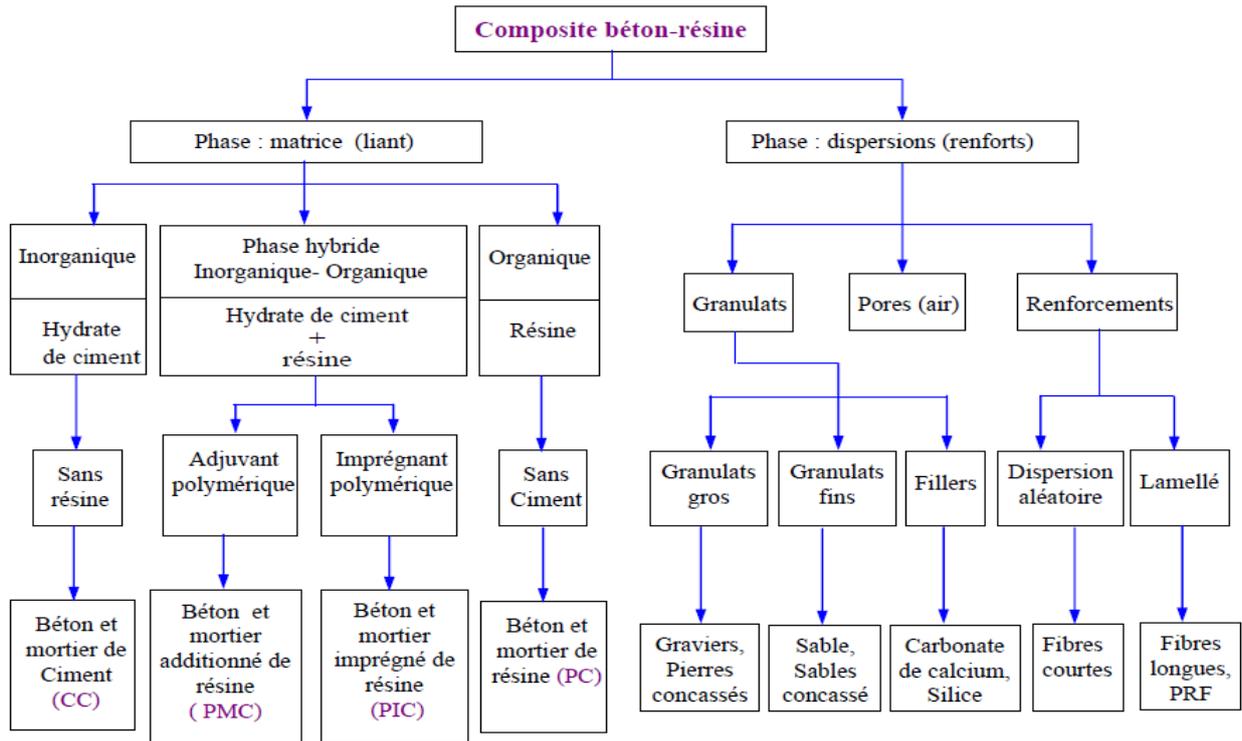
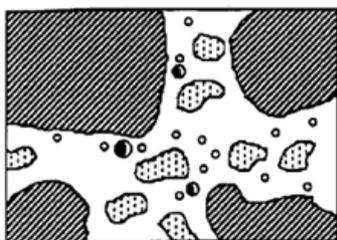


Figure 1.1. Classification des composites béton-résine [17].

1.2.1. Le béton additionné de résine :

Ce béton connu sous le nom anglophone Polymer-Cement Concrete (PCC) ou aussi Polymer-Latex Concrete (PLC) est un composite où l'on ajoute un polymère non réactif (souvent du genre latex, (figure 1.2) ou un monomère réactif (résine) au mélange du béton hydraulique à l'état frais (avant la prise) et le résultat est un hybride ayant les propriétés caractéristiques de chaque matériau [18].

(A) Immédiatement après le malaxage



Grains de ciment non hydratés

Granulats
Particules de Latex

Entraîneur
(Les espaces interstitiels sont de l'eau)

(B) Première étape



Mélanges de grains de ciments non hydratés et du gel de ciment
(Les particules de latex sont partiellement déposées)

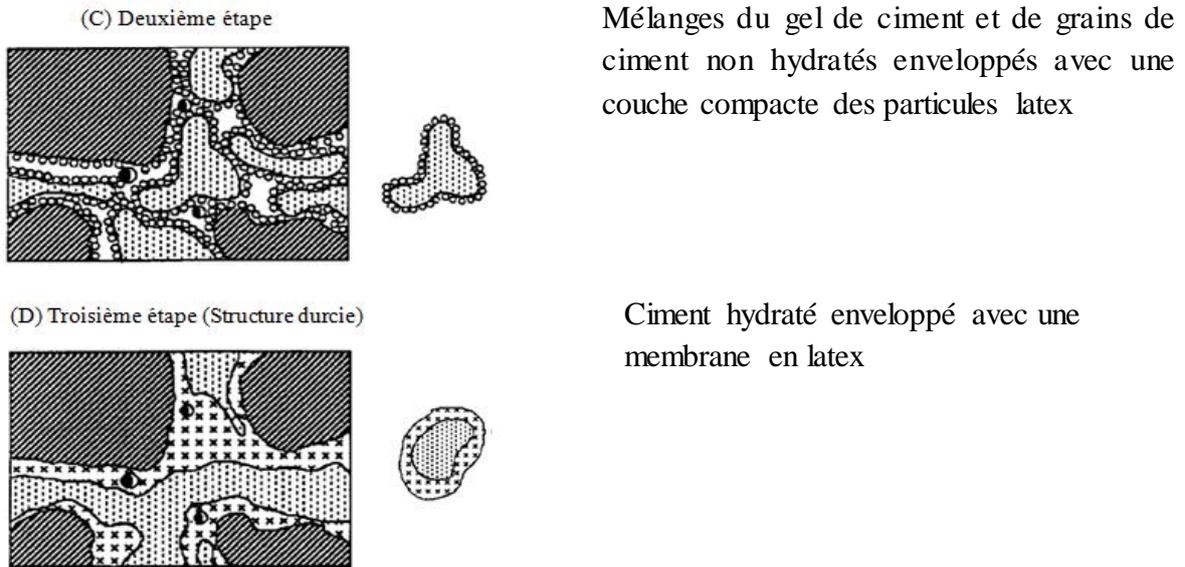


Figure 1.2. Modèle simplifié de la formation d'une Co-matrice latex-ciment [18].

Le concept du béton additionné de résine n'est donc pas nouveau. En effet la modification d'un composé de ciment avec du polymère afin de modifier les propriétés physiques a été pratiquée pendant plus de 80 ans et le premier brevet déposé par Cresson date de 1923 [18].

Au début des années 20 et des années 30, des émulsions en polymères aqueuses (Latex) ont été employées mais sa résistance à l'altération n'était pas bonne. Pendant les années 40 les polymères synthétiques, qui se détériorent une fois exposé à l'humidité, tels que les acétates polyvinyliques (PVA) sont devenus disponibles et sont utilisés comme substitution aux Latex. Les PVA modifiés, moins susceptibles à ce type de détérioration, ont été par la suite développés. Ils améliorent, une fois combinée avec les ciments, les propriétés physiques en augmentant l'ouvrabilité, la durabilité et la résistance à l'eau (latex acrylique) en plus de la résistance en flexion et en traction du béton résultant [19] pour un coût raisonnable.

D'autres propriétés y compris la perméabilité à l'eau, la ductilité, l'adhésion à l'acier d'armature et au béton ancien, la résistance en flexion, la résistance en traction, le module d'élasticité et la résistance aux chocs sont modifiées par la présence du polymère dans la matrice (Tableau 1.2) [20].

Tableau 1.2. Propriété types des bétons ([21], [22])

Matériau	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en compression (MPa)	Résistance au cisaillement (MPa)	Conductivité thermique W/(m.K)	Coeff. de dilatation thermique (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
Béton imprégné de résine	10.3	42	144	26.2	2.19	9.28
Béton modifié au résine	4.1	26.2	41.4	13.8	2.26	7.74
Béton de résine	9.6	36.4	137.9	25.5	2.89	9.54
Béton de ciment Portland	1.7	24.8	34.5	7.6	2.30	7.2

L'ajout des modificateurs peuvent être réalisé selon deux procédés [23]:

- Les additions modificatrices sont ajoutées au béton frais sous forme d'émulsion polymère. Un tensioactif est nécessaire pour éviter la coagulation et la séparation des polymères (latex, élastomères, thermoplastiques) avant le début de prise;
- Les éléments (résine synthétique chimiquement réactive, ou des pré-polymères et des monomères) sont ajoutés au béton frais et la polymérisation est réalisée par un amorçage chimique en même temps que l'hydratation du ciment.

Étant donné que le polymère forme une pellicule superficielle qui empêche dans une certaine mesure l'humidité de s'échapper du béton, la période de cure du béton modifié au latex est habituellement plus courte que celle du béton ordinaire grâce au maintien de l'hydratation [23].

1.2.2. Le béton imprégné de résine

Polymer-impregnated concrete (PIC) est l'appellation anglophone de ce béton imprégné de résine, obtenu en imprégnant des éléments préfabriqués en béton cimentaire avec un monomère, et le béton additionné de résine, obtenu en remplaçant une partie du ciment par un polymère. La polymérisation se fait l'imprégnant par la méthode la plus économique et la plus pratique [24].

L'imprégnation du béton assure une augmentation remarquable de la résistance en tension (3.6 à 3.9 fois plus grande que celle d'un béton témoin pour des bétons imprégnés avec

6.4% de MMA, [25]. La grande amélioration de la durabilité est essentiellement le résultat de la baisse significative de la perméabilité due à l'évacuation de l'eau avant l'imprégnation (Tableau 1.3).

Tableau 1.3. Durabilité des bétons imprégnés de résine [24].

		Béton témoin	Béton imprégné de résine (MMA)	Béton imprégné de résine (Styrène)
Gel-dégel	Nombre de cycles	740	3650	5440
	Perte de masse (%)	25	2	2
Attaque de sulfate	Dilatation (%)	0.466	0.006	0.03
	Nombre de jours	480	720	690
Résistance aux acides (15% HCl)	Perte de masse (%)	27	9	12
	Nombre de jours	105	805	805
Résistance à l'usure	Profondeur d'usure (mm)	1.25	0.38	0.93
	Perte de masse (g)	14	4	6

Le principal inconvénient du béton imprégné est son coût. Les monomères utilisés pour l'imprégnation étant chers et le procédé de fabrication est plus compliqué que pour le béton ordinaire.

1.2.3. Le béton de résine

Il fait partie de la catégorie de matériaux à matrice organique d'où sa désignation de béton à matrice organique BMO. Il est connu aussi sous l'appellation de béton résine synthétique ou de béton de résine plastique ou tout simplement de béton de résine [26].

Ce béton est un matériau composite dont le liant est formé entièrement d'un polymère organique synthétique.

Lorsque les renforts sont formés par des sables ou des inclusions de dimensions plus petites, le composite est dit mortier de résine. Dans les autres cas, on parle de béton de résine. Le remplacement de la matrice cimentaire dans le cas des bétons conventionnels par une matrice polymérique est justifié par l'amélioration de la tenue des bétons aux différentes agressions environnementales de types mécaniques, chimiques ou autres. En effet ce type de matériaux présente certains avantages ([27], [13], [28]) :

- une bonne résistance aux agents chimiques et aux agents corrosifs.

- une plus faible perméabilité à l'eau et une bonne résistance aux cycles de gel-dégel
- un faible coefficient de dilatation thermique.
- un durcissement rapide.
- une bonne adhésion aux granulats et aux bétons anciens.
- des résistances mécaniques meilleures que celles des bétons hydrauliques surtout en tension (Tableau 1.4).
- Une bonne résistance à l'abrasion.
- une excellente durabilité avec un coût raisonnable.

Tableau 1.4. Propriété types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland [16].

Matériau	Masse volumique (Kg/dm ³)	Absorption d'eau (%)	Résistance en compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Poly (méthacrylate de méthyle	2-2.4	0.05-0.6	70-210	9-11	30-35	35-40
Polyester	2-2.4	0.3-1	50-150	8-25	15-45	20-40
Époxy	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 Portland	1.9-2.5	5-8	13-35	1.5-3.5	2-8	20-30

Le béton résine possède toutefois quelques inconvénients. En effet, le coût de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois) comparé à celui des bétons hydrauliques.

Par contre le béton de résine peut assurer dans certains domaines d'application une réduction du coût de la main d'œuvre pouvant atteindre 2/3 et une diminution du prix des produits à base de résine qui sont seulement 10 à 25% plus chères que les produits de bétons hydrauliques. Cette économie est réalisable compte tenu de la réduction de l'économie de matières (jusqu'à 50%, [16]) en réduisant les dimensions des produits grâce aux résistances élevées du béton résineux, de la réduction des frais de transport grâce aux volumes plus petites et de la diminution considérable des dépenses d'investissements pendant les opérations

de manutention et pendant la fabrication et le stockage comme résultat de décoffrage rapide et de durcissement rapide du matériau qui diminue l'espace nécessaire pour la production et le stockage des produits finis [29]. De plus, ces bétons se caractérisent par une mauvaise odeur et une toxicité provenant de la partie liante du matériau c'est-à-dire la résine et le durcisseur pendant le malaxage et la mise en place.

Mais, à l'heure actuelle, le frein majeur quant à leurs développements est leurs comportements aux températures élevées et au feu. Ceci est d'une importance cruciale surtout lorsqu'on utilise ce béton comme matériau de parement ou pour la décoration intérieure puisque les résines agissant comme liant dans les bétons de résine sont des substances organiques qui résistent beaucoup moins à la chaleur que les matières inorganiques et l'exposition prolongée à des températures élevées n'est donc pas recommandée, car elle entraîne la dégradation de la résine, ce qui se traduit éventuellement par une perte de résistance mécanique.

Bien que l'élément polymère soit inflammable, les produits en béton de résine ne brûlent pas facilement, car ils contiennent une forte charge minérale et le degré de résistance à la chaleur des pièces en béton de résine dépend du type de résine utilisé comme liant.

2. Constituants des bétons de résine et domaines d'applications

2.1. Constituants des bétons de résine

2.1.1. Le liant (la résine)

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques en deux grandes familles à savoir les thermoplastiques (TP) et les thermodurcissables (TD) comme l'illustre le tableau 1.5. Dans les thermoplastiques Polychlorure de vinyle (PVC), Polystyrène, Polycarbonate, Polyméthacrylate de méthyle (PMMA), Polypropylène et le polyéthylène..., [30]), les très longues chaînes sont reliés les unes aux autres par des faibles forces de Van der Waals. Une fois le matériau chauffé, les forces intermoléculaires s'affaiblies et de cette façon il devient malléable et flexible, ce qui permet leur mise en œuvre [31]. À hautes températures le thermoplastique devient visqueux et il se solidifie si on le laisse refroidir.

Tableau 1.5. Principales différences entre les propriétés des résines TP et TD ([32], [33]).

Propriétés	Thermoplastiques (TP)	Thermodurcissables (TD)
Etat de base	solide (prêt a l'emploi : polymérisé)	liquide visqueux à polymériser
Stockage de la matière de base	illimité	Temps réduit (précautions à prendre)
Mouillabilité des renforts	difficile	aisée
Cycle	court	plus long (polymérisation)
Caractéristiques spécifiques		
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite sauf nouveaux TP thermostables	meilleure
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de mise en œuvre	bonnes + propreté	émanations pour méthode humide (allergie possible)

Les thermodurcissables qui durcissent sous l'action de la chaleur ou par addition d'un additif sont constitués d'un enchaînement covalent tridimensionnel de motifs moléculaires répétitifs [34]. Dans les polymères thermodurcissables, dont les plus utilisés sont les époxydes, polyesters, phénoliques, furanes [30], les chaînes macromoléculaires sont reliées entre elles par des nœuds de réticulation et sous l'action de la température, ils conservent un comportement solide. À température plus élevée, ils se dégradent sans fondre; ils ne se ramollissent donc pas.

2.1.2. Les granulats

Ils forment le squelette du béton et ils jouent donc 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 et la durabilité du matériau. La variation de la quantité des agrégats introduits et le choix de la

granulométrie peut aussi considérablement changer les propriétés finales des matériaux élaborés.

En principe, n'importe quel granulat utilisable pour la fabrication du béton hydraulique peut être utilisé pour la confection du béton de résine à condition qu'il soit propre et sec, deux propriétés essentielles dans le processus de fabrication des bétons de résine visant à obtenir une bonne cohésion entre les agrégats et la résine par la diminution de l'humidité à moins de 0,5%.

Les granulats influencent les modules élastiques, la durabilité, l'ouvrabilité, le prix du produit en béton de résine et les propriétés mécaniques principalement la résistance à travers la granulométrie et l'adhésion avec le liant [35].

2.1.3. Les charges et les additifs

Différents produits peuvent être ajoutés à la résine pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et physiques, faciliter sa mise en œuvre ou simplement pour en diminuer le coût. On parlera de charge quand la quantité ajoutée est de quelques dizaines de %, et d'additifs lorsque cette quantité ne dépasse pas quelques % [36].

a. Les charges

Les charges renforçantes : Elles sont incorporées aux résines pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Selon leur forme géométrique elles sont classées en :

- charges sphériques : sphères de faible diamètre, de 10 à 150 μm généralement appelées aussi microbilles. La forme sphérique évite les concentrations de contraintes dans la matrice et diminue par conséquent sa sensibilité à la fissuration. Les microbilles de verre creuses représentent 99% des charges sphériques utilisées.
- charges non sphériques : le mica sous forme d'écailles est le matériau le plus utilisé. Des écailles de dimensions allant de 100 à 500 μm et d'une épaisseur de 1 à 20 μm sont incorporées à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables pour des applications électriques et électroniques.

Les charges non renforçantes : Les charges non renforçantes sont ajoutées pour diminuer le coût de la résine sans altérer ses performances ou bien pour améliorer certaines de ses propriétés :

- charges de faible coût : extraites de roches ou de minerais (carbonates, silicates, silices, etc.), leur incorporation augmente le module d'élasticité, la dureté, la viscosité et la stabilité dimensionnelle mais diminue la résistance à la traction et à la flexion.

- charges ignifugeantes : ont pour rôle de réduire ou d'empêcher la combustion de la résine.
- charges conductrices et antistatiques : ces charges sont utilisées pour rendre la matrice conductrice de chaleur et d'électricité dans certaines applications [36].

b. Les additifs

Les lubrifiants et agents de démoulage : Ils sont utilisés pour faciliter le façonnage de la résine et réduire sa tendance à adhérer aux moules et mandarins.

Les pigments et colorants : En fonction de la nature de la résine et de l'utilisation du matériau composite, ce dernier est coloré soit par des pigments (particules insolubles d'oxydes ou de sels métalliques) dispersées dans une pâte, soit par des colorants (composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant) [36].

Les agents anti-retraits et les agents de fluage : Le retrait de la résine après polymérisation peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement ou à des microfissurations des pièces moulées. L'ajout des produits spécifiques anti-retrait, à base de thermoplastiques ou d'élastomères, permet de diminuer ou même d'annuler le phénomène.

Les agents anti-ultraviolets : Ils ont pour rôle de protéger la résine des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. En les absorbant, ils évitent une dégradation prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par photo-oxydation.

2.1.4. Les renforts fibreux

a. Les fibres de verre (Figure 1.3)

Les fibres sont obtenues à partir du verre textile composé d'un mélange d'oxydes : silice, alumine, chaux, magnésie, et oxyde de bore. Les proportions du mélange, et l'ajout d'oxydes modificateurs donnent au matériau final ses propriétés spécifiques. Différents types de verre peuvent être distingués [36].



Figure 1.3. *Fibres de verre* [36].

- Le verre E à usage général, bonne propriétés électriques et à forte teneur en bore. Elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment.

- Le verre D à hautes propriétés diélectriques, utilisé pour la construction de matériel de télécommunications ;
- Le verre C résistant aux agents chimiques, enrobage des structures sévèrement exposées.
- Les verres R et S à caractéristiques mécaniques élevées, utilisés pour la réalisation de structures de hautes performances mécaniques.
- Les fibres « AR » (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis [37].

b. Les fibres de carbone

Les fortes liaisons entre atomes voisins d'un même plan cristallographique donnent un module de Young de l'ordre de 1200 GPa et une contrainte à la rupture de 20000 MPa dans les directions parallèles aux plans cristallographiques, pour une masse volumique inférieure à 2000 Kg/m³.

Malgré les imperfections des cristaux obtenus par les procédés industriels, l'élaboration de fibres d'axes parallèles aux plans cristallographiques, permet d'obtenir des fibres de caractéristiques : 650 GPa pour le module de Young et 4000 MPa pour la contrainte à la rupture [36] (Figure 1.4).



Figure 1.4. Fibre de carbone [36].

c. Les fibres métalliques (Figure 1.5)

La recherche de la bonne adhérence au béton a donné naissance à une grande variété de fibre susceptibles, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton :



Figure 1.5. Fibres métalliques [38].

- Fils étirés et coupés, ondulés crantés, torsadés, avec crochets...
- Fibres usinées à surface rugueuse.

- fibre de fonte sous forme d'un mince ruban de 30 μm d'épaisseur. [38].

d. Les fibres de polypropylène

Elles conçues et fabriquées à base de polypropylène ayant fait l'objet d'un traitement particulier. Elles sont exclusivement utilisées pour renforcer les bétons et les mortiers (Figure 1.6) [38].

Les quantités à mettre en œuvre sont de l'ordre de 0.5Kg jusqu'à un maximum de 2Kg par m^3 de béton. Dans la majorité des cas les dosages habituels sont de 600 g/m^3 ou 900 g/m^3 et très rarement 1200 g/m^3 ... [39].



Figure 1.6. Fibres de polypropylène [38].

e. Autres fibres

- **Les fibres céramiques :** Diverses fibres sont obtenues par dépôt chimique en phase vapeur d'un revêtement céramique :
 - fibre de bore B
 - le bore-carbure (fibres B-B4C)
 - le bore-silicium (fibres Bor-Sic) [36].
- **les fibres d'origine végétale**
 - le bois, utilisé sous forme de fibres orientées, feutres, papiers imprégnés, etc.
 - le sisal, le jute, le lin, de moins en moins utilisés au profit des fibres de verre.
- **les fibres d'origine minérale**
 - l'amiante (interdite dans certaines utilisations)
 - la silice.
- **les fibres synthétiques**
 - fibres polyester (tergal, dacron, térylène, etc.)
 - fibres polyamides.

2.1.5. Les ignifugeants ou retardateurs de flamme :

Pour assurer une protection supplémentaire contre les feux et augmenter le temps nécessaire pour la fuite au moment du déclenchement du feu, des méthodes pour retarder la propagation des flammes ont été développées. L'approche la plus courante consiste à

utiliser des ignifugeants ou retardateurs de flamme, des produits chimiques additionnés aux polymères, pour améliorer la tenue aux feux de ces matériaux. Quelques polymères sont moins inflammables en raison de la structure plus stable de ces matériaux ce qui explique le coût habituellement plus cher que celui des autres polymères [40].

L'ignifugation des polymères peut se faire selon deux approches [41]:

- approche réactive
- approche additive

2.2. Domaines d'applications des bétons de résine

Aujourd'hui, le béton de résine a plusieurs domaines d'application dans le génie civil et il est utilisé comme un matériau de construction courant pour fabriquer un large éventail de produits ([31], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50]).

2.2.1. Utilisation des bétons de résine dans les bâtiments

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

A présent, l'industrie de façades s'est enrichie avec l'utilisation du béton de résine comme matériau de revêtement influençant ainsi la conception des façades surtout avec les formes de ces dernières de plus en plus complexes de point de vue architecturale et les exigences économiques et techniques plus strictes.

Certes le prix de matière première du béton de résine est 8 fois plus cher que celui de béton hydraulique, mais une contre partie estimée 80% du prix initial est récupérable[29] par la réduction des dimensions des éléments produites grâce aux résistances élevées du béton de résine, la réduction des frais pendant les opérations de production (décoffrage rapide), stockage, manutention et transport. En plus de ces dépenses considérablement diminuées, le béton de résine est une excellente alternative des roches naturelles pour la fabrication des éléments tels que les panneaux, appuis de fenêtres, marches d'escalier, table de travail, haut de table, équipements techniques sanitaires, etc. [19] le béton de résine peut être considéré comme un matériau ami à l'environnement figure 1.7.

Les dalles :



Figure 1.7. Exemple de renforcement des dalles par le béton de résine.

Les colonnes :

Plusieurs techniques différentes ont été développées pour renforcer des colonnes existantes et la réparation des ouvrages endommagés en béton armé en utilisant des polymères renforcé avec des tissus (béton de résine) figure 1.8.



Robo Wrapper par Xx sys Technologie

Enveloppement de colonne (l'enroulement filamentaire)

Figure 1.8. Exemples de renforcement des colonnes par le béton de résine fibré.

2.2.2. Utilisation des bétons de résine dans les travaux de drainage et hydrauliques

L'utilisation du béton de résine pour la fabrication des différents systèmes de drainage et le réseau de canalisation est très répandue comme résultat de la faible absorption d'eau et une résistance exceptionnelle au gel-dégel. Par conséquent, les éléments fabriqués en

béton de résine peuvent avoir jusqu'à 15 mm d'épaisseur (réduction de 1/3 du poids par rapport au béton cimentaire pour des produits similaires) [29].

La figure 1.9 présente des exemples d'utilisation des bétons de résine dans les travaux hydrauliques.



Bassin de rétention – Ville de Troyes



Local technique pour le Tram-Train Aulnay Bondy – SNCF



Cunettes Avenue Jean Jaurès – Chantier de Paris



Ovoïde T 230 – Hôpital la salpêtrière PARIS



Galerie multi-réseaux – Chantier de Mulhouse



Poste de refoulement – Chantier de La Rochelle



Chambre à vannes – Chantier de
Strasbourg



Regard pour tuyaux PRV –
Chantier de Sète

Figure 1.9. Exemples d'utilisation des bétons de résine dans les travaux hydrauliques.

2.2.3. Utilisation des bétons de résine dans l'agriculture et l'horticulture

Dans de nombreux pays, le béton de résine est employé pour réaliser des réservoirs d'aliments pour les porcheries et les fermes de bétails. En horticulture, le béton de résine est utilisé pour fabriquer des petites formes et des bacs pour les plants. [49] Ces conteneurs sont à déplacer selon les conditions météorologiques et c'est ici que réside l'avantage de profiter de béton de résine plus léger et robuste.

2.2.4. Utilisation des bétons de résine pour le revêtement des chaussées et planchers

Un exemple très connu témoignant du succès quant à l'utilisation du béton de résine pour la protection des surfaces des chaussées est la réparation du pont de Brooklyn à New York.

Le revêtement peut supporter la totalité de la charge du trafic après 4 heures de son étalement et la circulation sur le pont n'est pas complètement interrompue puisque le travail est fait voie par voie [19]. Les bétons de résine sont également utilisés comme matériaux décoratifs en leur ajoutant des charges colorées figure 1.10.

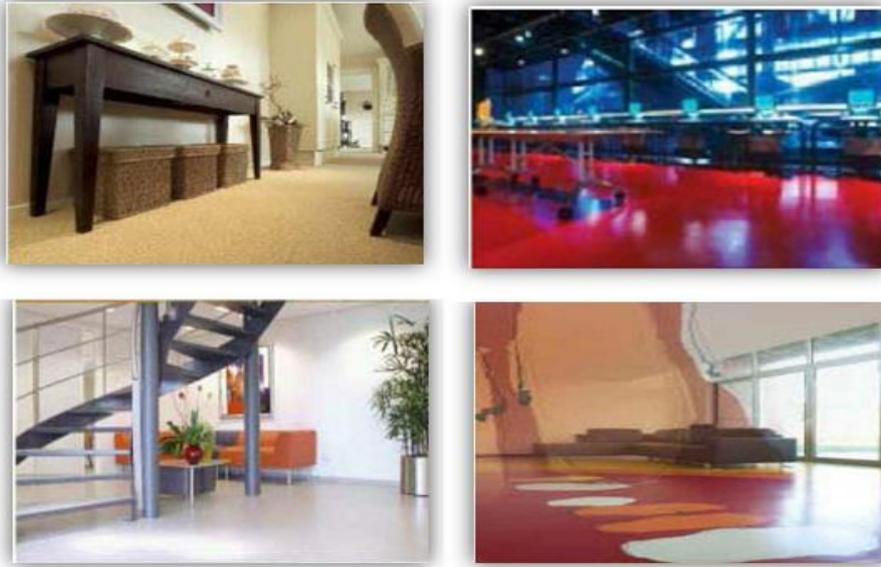


Figure 1.10. Exemples d'utilisation des bétons de résine dans les planchers.

2.2.5. Utilisation des bétons de résine dans l'industrie

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

Des bétons de résine résistent jusqu'à 250 KV (le coût estimatif d'un isolateur en béton de résine est moins que la moitié du coût de celui en porcelaine [51]). Des super-isolateurs, des supports et des regards de visite ont été confectionnés aux USA, ex-URSS, et Japon en utilisant le béton de résine.

Une application du béton de résine dans le secteur industriel est la fabrication des bases pour des tours, des rectifieuses, des fraiseuses et des perceuses (Emag-Index, Elb-Shlif, SKFKalle, Burkhat-Weber) grâce à la qualité anti-vibrations meilleure de 6 à 10 fois que celle du fer [29].

2.2.6. Utilisation des bétons de résine comme isolant phonique

Pour produire des systèmes d'isolation phonique (écrans phoniques en autoroutes), le produit doit avoir une bonne résistance mécanique surtout sous l'action des vents intenses et une résistance à l'humidité, aux gaz d'échappement, aux huiles et aux antigels. Il est connu que le béton de résine satisfait tous ces exigences contrairement à plusieurs

matériaux. Des renforts comme le verre et le caoutchouc, autres que minéraux (usuels), considérés comme des déchets peuvent être utilisés [50].

2.2.7. Utilisation des bétons de résine dans le site d'enfouissement des déchets toxiques et radioactifs

Le béton de résine grâce au durcissement rapide, à la faible perméabilité, à la haute résistance mécanique (2 ou 3 fois plus grande que celle du béton conventionnel [42]) et à la résistance aux agents chimiques rend l'utilisation d'un tel matériau favorable pour l'usage dans la gestion de déchets dangereux ([19], [43]) et les applications récentes ont montré des résultats prometteurs. Le béton de résine peut assurer longévité et résistance désirés [50].

Le risque résiduel des déchets non traités est alors considérablement réduit une fois confinés dans espace limité par une barrière avec un couvercle étanche au-dessus (peut être également composé en béton de résine) [42].

Comparé aux polymères, les bétons résineux sont rentables puisque seulement 20 à 25% (par le volume) du polymère est employé dans le béton composite [49] et comparé au béton cimentaire, le béton de résine est plus résistant et plus durable [48].

2.2.8. Utilisation des bétons de résine en géothermie

La disponibilité des matériaux de construction durables et économiques pour manipuler la saumure et la vapeur chaude, à des températures atteignant 260°C, est un sérieux problème dans le développement de l'énergie géothermique. Les saumures produites en géothermie sont généralement caractérisés par des teneurs en sel élevées, des faibles PH, de dioxyde de carbone et de l'hydrogène sulfuré dissous et des quantités de sulfate de calcium, de carbonate de calcium et de silice. Ces composés dissous dans l'eau à des températures élevées, rendent la saumure très corrosive à beaucoup de matériaux de construction ce qui affecte la durée de vie des usines géothermiques et la quantité d'énergie produite.

Des bénéfices importants sont enregistrés en remplaçant l'usage des conduites en acier inoxydable, tantale et des alliages Hastelloy par des conduites en béton de résine ([52], [53], [54], [55]). Comme conséquence de cette économie quant aux frais des usines, le prix du courant électrique fourni est réduit de 9,7% ([26], [4], [56]).

3. Optimisation de la formulation : État de l'art

La majorité des travaux effectués sur les bétons et mortiers résineux avait pour objectif d'optimiser leur formulation en diminuant le pourcentage du polymère et en ajoutant d'autres composants pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques et la durabilité des bétons de résine renforcés ou non tout en satisfaisant les exigences économiques qui se rapporte au coût du produit fini, de nombreux travaux se sont intéressés à l'optimisation de la formulation par le remplacement ou l'ajout d'une partie du squelette granulaire conférant aux béton des qualités meilleures ou dans le cas extrême garder des propriétés physiques et mécaniques acceptables tout en abaissant le prix du matériau. Les méthodes et moyens utilisés par les chercheurs sont dans la plupart des cas purement expérimentale. D'autres méthodes basées sur la discipline des statistiques enregistrent aussi leurs présences dans les travaux d'optimisation :

Andries cité par (*M. Helal [57]*) montre dans une étude que la combinaison optimale entre le furfural (F), le furfural-acétone (FA) et des sables fins est donnée pour des proportions 1,6 ($\approx 16\%$) de monomère-sable et 1,7 de F-FA. La résistance en compression à 28 jours est de 75,80 MPa et la résistance à la flexion est de 12,84 MPa.

(*M. Barbuta et al., [58]*) se sont intéressés à des mortiers et bétons d'époxyde dans lesquels est incorporée de la fumée de silice. Pour les mortiers la fraction massique de liant variait entre 24,2% et 58,87% alors que pour les bétons elle se situe entre 12,4% et 18,8%. L'ajout de la fumée de silice permet à la fois de diminuer la fraction massique du liant et d'augmenter les résistances mécaniques.

(*W. Jo et al., [48]*) ont formulés des bétons résineux avec différents pourcentages de polyester insaturés issus du recyclage du PET et réticulés avec du Peroxyde de méthyléthylcétone. Les fractions massiques de liant s'étendaient de 9 à 17%. Il en ressort qu'une fraction massique de 13% de polymère est optimale en termes de résistances mécaniques pour les bétons à granulats naturels.

(*J. Gorninski et al., [59], [5]*) ont étudié l'influence de type de résine polyester isophtalique (PI) et ortho-phtalique (en fraction massique de 12% et 13% respectivement) réticulés avec du styrène et de la quantité des cendres volantes (CV), sur les résistances mécaniques. Les résultats montrent que la quantité de cendre volante introduite (12%, 16% et 20% de la masse granulaire) et la nature du pré-polymère affecte les résistances mécaniques et la rigidité des bétons de résine. Au delà de 16%, les cendres volantes CV n'améliorent pas significativement les propriétés mécaniques des bétons de résine (Figure 1.11).

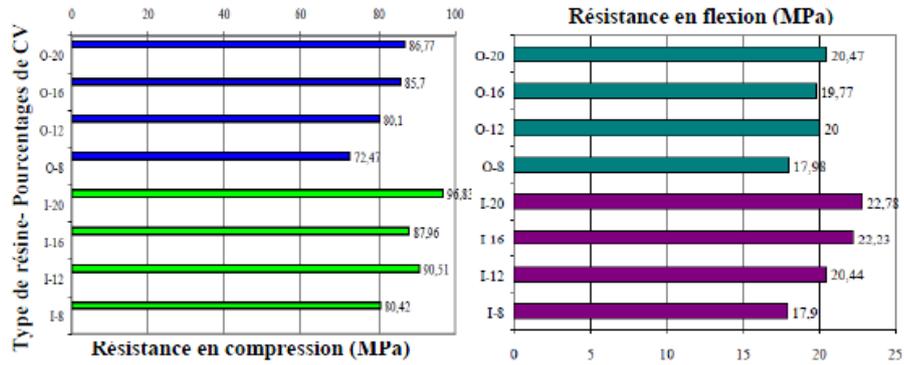


Figure 1.11. Effet de la nature de résine et du pourcentage des CV sur les résistances [59].

(J. Gorninski [60]), a abordé le problème de l’optimisation du béton de résine de point de vue économique. La composition optimale pour la résine polyester isophtalique et ortho-phtalique de 12% et de 13% en fraction massique respectivement, est choisie sur la base d’un facteur résistance/coût, de l’absorption du béton de résine dans des milieux saturés en agents chimiques et sur la base de l’ouvrabilité du mélange à l’état frais (Tableau 1.6). En divisant la résistance du béton polymère par son coût un facteur indiquant la relation bénéfice/coût est défini.

Tableau 1.6. Variation de la résistance et du coût du béton de résine en fonction du pourcentage de résine [60].

Pourcentage de résine (%)	Coût de 1Kg de béton Résine (R\$)	Résistance en compression (MPa)	Facteur résistance/coût
E-10	0,546	71,40	130,76
E-11	0,596	77,50	130,03
E-12	0,646	82,50	127,71
E-13	0,686	86,39	125,93
E-14	0,736	91,00	123,64
E-15	0,786	93,25	118,63
E-16	0,826	94,00	113,80
E-17	0,866	96,00	110,85
E-18	0,916	94,57	103,24
P-10	0,316	66,00	208,86
P-11	0,339	74,00	218,29
P-12	0,366	78,50	214,48
P-13	0,396	89,90	227,02
P-14	0,419	87,50	208,83
P-15	0,446	91,21	204,50
P-16	0,470	94,50	201,06
P-17	0,494	98,00	198,38
P-18	0,516	94,96	184,03

(C. Vipulanandran *et al.*, [61], [62]) se sont intéressés à des bétons de résine à matrice polyester et époxyde. En variant la quantité de résine entre 10 et 20%, les valeurs des propriétés mécaniques (résistances et module d'Young) augmentent en fonction de la quantité de résine introduite jusqu'à atteindre un maximum où elles commencent alors soit à décroître, soit à se stabiliser (Figure 1.10). Les auteurs définissent la quantité optimale de résine, comprise entre 14 et 16%, comme étant la quantité minimale pour laquelle les propriétés sont optimales. Par ailleurs, ils notent que le procédé par compactage donne des propriétés mécaniques meilleures (de 50%) par rapport à la méthode de vibration (figure 1.12).

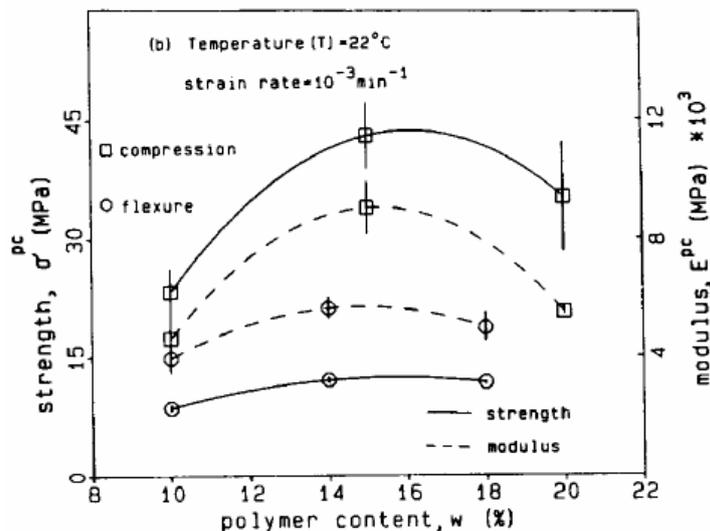


Figure 1.12. Résistances en Fonction de la quantité de polymère [61].

Des nombreuses études se sont intéressées à l'utilisation de résine provenant du recyclage des bouteilles en plastique PET (polyéthylène téréphtalate) pour la fabrication du béton de résine. Ces tentatives visent en premier lieu à préserver l'environnement par l'élimination d'une partie des déchets et la réduction de l'exploitation excessive des ressources minérales naturelles et en deuxième lieu à abaisser le coût de production des bétons de résine ([48], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72]).

Traitant l'aspect écologique, (J. Reis *et al.*, [73], [7]) ont tenté d'introduire des déchets de textiles et du liège dans la composition du béton de résine époxydique. Il a été montré que les granulés ou fibres ajoutés influencent négativement le module d'élasticité et les résistances mécaniques en compression et en flexion. L'augmentation de la quantité de résine de 10 à 12% donne un béton de résine 25% plus résistant avec la présence de textiles. La même tendance est enregistrée en présence de liège.

Effectuant des mesures de résistance en compression, (M. Tawfik *et al.*, [71]) affirment que la composition optimale massique du béton de résine fabriqué à partir de résine recyclée à partir

de PET et des déchets de marbres et de basalte est comme suit : 60% de PI, 40% styrène, 2% de MEKP comme initiateur et 0.5% de naphthénate de cobalt comme accélérateur. L'optimisation du squelette granulaire donne un béton de résine ayant des résistances en compression les plus élevés pour les fractions massiques suivantes : 30% de la poudre de marbre ($\emptyset > 0.1$ cm): 30% de basalte (0.5–1.0 cm) et 40% de marbre (0.1–0.5 cm). Le béton de résine obtenu possède des propriétés physiques acceptables, une bonne intégrité mécanique et de bonnes caractéristiques chimiques.

(*K. Rebeiz et al., [66]*), rapportent que les utilisations des PET offrent la possibilité d'avoir des matériaux à prix réduits. Ces auteurs ont appliqués la même idée pour la préparation du mortier de polymère (PM). Le travail de ces auteurs a pu contribuer au développement de la technologie de béton/mortier de polymère et également à la résolution du problème écologique lié à la gestion des déchets et des articles en plastique utilisés.

(*K. Rebeiz et al., [66], [68]*) a formulé un béton optimal a base de polyester insaturé issu du recyclage du PET avec 10% de résine, 45% de gros agrégats étuvés, 32% de sables secs et 13% de CV séchées aussi. Cette optimisation a été faite vis à vis de l'ouvrabilité et des résistances mécaniques.

Dans d'autres études de ces mêmes auteurs cités par (*M. Haidar [74]*), rapportent que l'ajout de 15% de CV au mélange comportant de la résine en proportion de 10% en masse améliore les résistances mécaniques et la rigidité des bétons de résine.

L'influence du pourcentage de PET dans les résines a été étudiée (d'une basse concentration de 15% à une forte concentration de 40%) donnant ainsi une panoplie de résines allant des rigides (avec un haut module, une la basse élongation à la rupture convenables pour la préfabrication) [67]. De variations importantes des propriétés ont été obtenues grâce aux différents rapports agrégats-résine et aux différents types de résines employés [61].

(*R. Maksimov et al., [75]*) ont montré que le pourcentage optimal de polyester insaturé pour la fabrication de bétons résineux dans lesquels sont incorporés des fillers calcaires est de l'ordre de 9,8% de la masse totale du béton (20% en volume). L'optimisation de la formulation est faite en deux étapes : recherche du dosage du mortier résineux nécessaire pour remplir les vides entre les graviers dans un premier temps puis optimisation de la formulation du mortier de telle sorte à obtenir le mélange le plus dense et le plus compact dans un second temps.

(*A. Alzaydi et al., [76]*) ont optimisé un béton à base de résine d'urée-formaldéhyde en adoptant quatre pourcentages massiques à savoir 6%, 8%, 10% et 13,3%. et notent que la température et le temps de traitement influencent la résistance en compression.

(*O. Sezan [77]*) montre expérimentalement que la qualité anti-vibration du béton de résine à base de 20% polyester et de grains quartz est de 5 à 7 fois meilleure que celle de l'acier. Cette qualité est assurée par le béton de résine pour une large gamme de fréquences alors que l'efficacité de l'acier est maintenu juste pour une petite étendue de fréquences comme le montre Cortés et al. [78]. Le béton de résine est donc un matériau très convenable pour la fabrication des socles anti-vibrations (amortissement) pour des machines-outils.

(*H. Abdel-Fattah et al., [43], [79]*) ont formulé des bétons à base de polyester insaturé et d'époxyde. Les fractions massiques ont été adoptées en se basant sur les travaux d'Ohama (*Y. Ohama [80]*) et variaient de 9 à 15%. Ils montrent qu'une fraction massique en liant de 12% conduit aux résistances mécaniques les plus élevées.

L'étude menée par (*K. Varughese et al., [81]*) concernant l'influence des fillers CV, révèle que le remplace du sable fin par des CV (jusqu'à 75%) améliore les propriétés mécaniques et de résistance à la pénétration d'eau et qu'un excès de CV engendre des baisses significatives des ces caractéristiques pour le béton de résine à base de polyester. Ces résultats sont confirmés par une étude menée par (*Y. Soh et al., [82]*).

Ces constats sont en parfaite concordance aussi avec les résultats trouvé par (*M. Harja et al., [83], [84]*) pour un béton de résine à matrice époxydique. En effet l'ajout des CV améliore les propriétés mécaniques. L'ajout de résine est jugé bénéfique entre 12,4-15,6%. Les quantités de résine adoptées varient entre 12,4 et 18,8 %, des quantités imposées par la viscosité du mélange et du prix du béton de résine.

L'influence de la distribution granulaire des granulats quartz sur le béton de résine époxydique et polyester a été étudiée par (*A. Ergun et al., [85]*). Les courbes granulométriques testés sont au nombre de sept comme montrées par la (figure 1.13) et les pourcentages acceptables de résines 16, 18, 20, 22, 24, 26, et 28% pour la résine polyester et 14.3%, 18%, et 22% pour la résine époxydique. Les résistances en compression les plus élevées sont données pour un taux de résine-renforts 18-82%.

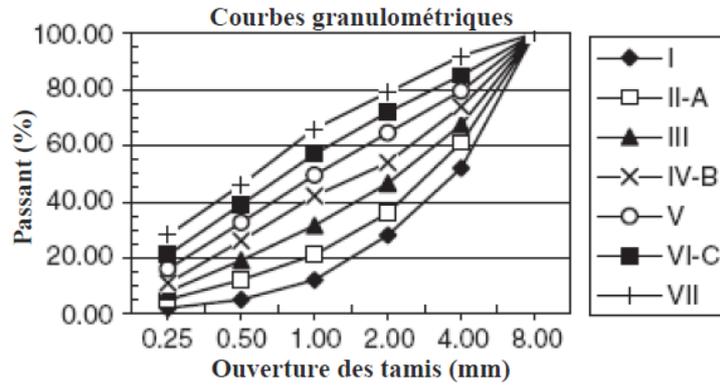


Figure 1.13. Courbes granulométriques de conception [85].

Par comparaison avec le béton de résine époxydique, le béton de résine à base de polyester présente un optimum de résine pour la même étendue (entre 16 et 20%), dite zone économique.

4. Comportement mécanique

4.1. Comportement mécanique à température ambiante et à hautes températures

L'étude de l'influence de la température sur le comportement mécanique des bétons et mortiers résineux est d'une importance cruciale. Ceci est expliqué par le fait que ces matériaux, pendant leurs durées de service, sont exposés à des sollicitations thermiques qui peuvent engendrer la rupture de la matrice résine, le composant le plus sensible aux températures élevées (Figure 1.14). Une autre raison favorisant l'étude de l'effet de la température élevée sur les bétons résineux est l'utilisation de ces matériaux comme des matériaux de réparation des ouvrages en béton ordinaire. Ce dernier, à matrice cimentaire, résiste bien aux températures élevées et possède un coefficient de dilatation thermique faible en le comparant au béton à matrice résine. Cette différence de comportement vis-à-vis la haute température affaiblit la liaison à l'interface BR-BHC [86].

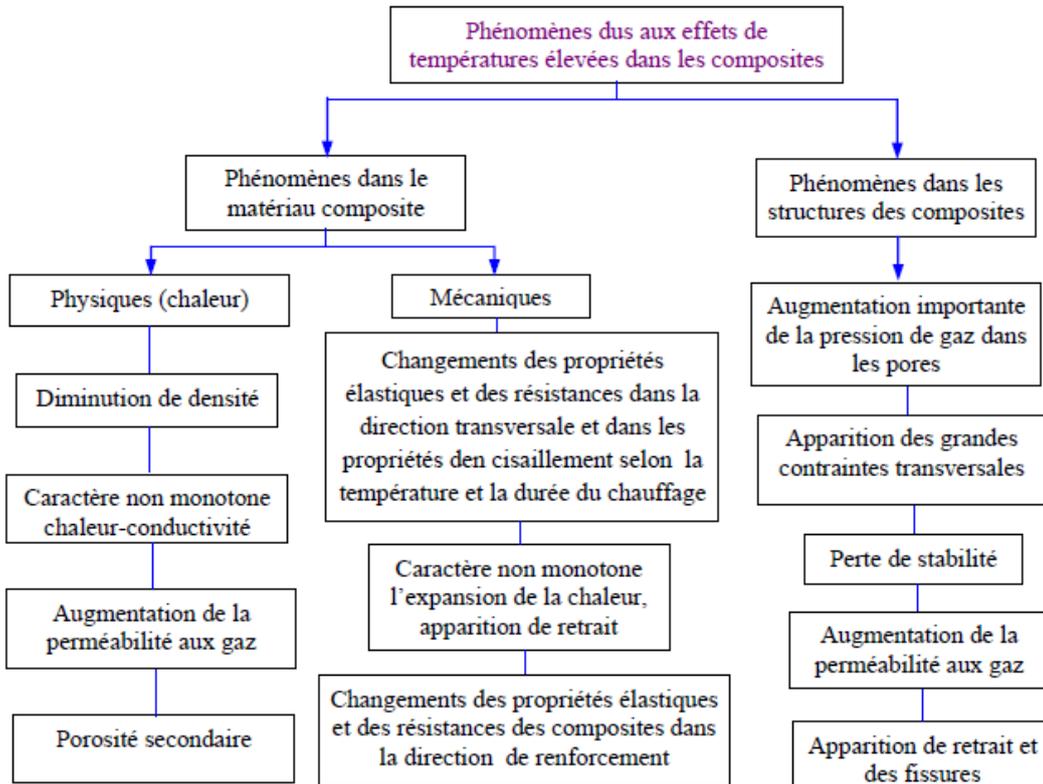


Figure 1.14. Phénomènes dus aux effets de températures élevées dans les composites [86].

Dans une étude complémentaire à celle (H. Abdel-Fattah et al., [43], M. El-Hawary et al., [79]) ont formulés des bétons de résine qui sont sollicités en compression et en traction pour des températures allant de 20 à 200°C. Les propriétés mécaniques de ces bétons résineux varient selon le type de résine utilisé.

(C. Vipulanandran et al., [61], [62]) notent les propriétés mécaniques à la flexion (résistances, comportement, rigidité) sont plus sensibles à l'exposition aux moyennes températures que celles à la compression (Tableau 1.7). Cette température maximale (110°C) est choisie sur la base de la température de transition vitreuse (entre 125°C et 150°C) des bétons de résine et les échantillons sont exposés pendant 3h.

Tableau 1.7. Effets de température sur les propriétés en flexion des bétons de résine et résine pure [61].

Quantité massique de résine (%)	Variation des propriétés par rapport à 22°C (%)					
	Résistance à la flexion			Module en flexion		
	22°C(MPa)	80°C	110°C	22°C(MPa)	80°C	110°C
14 (compacté)	18.9	- 10	- 21	7.7	-29	- 38
14 (vibré)	12.3	- 7	- 13	5.4	-21	- 40
18 (vibré)	11.9	- 6	- 20	4.8	- 25	- 37
10 (vibré)	8.7	-21	- 41	3.8	- 19	- 44
100	89.4	- 18	- 31	3.2	- 35	- 41

Le comportement de l'époxyde et du polyester en flexion à la température ambiante est fragile avec des courbes contrainte-déformation linéaires. Avec l'augmentation de la température, les relations deviennent non linéaires et le comportement devient ductile [87]. De plus, les propriétés mécaniques de l'époxyde sont plus sensibles aux températures que celles du polyester.

4.2. Différence entre le béton de résine et le béton classique

Le tableau 1.8 résume l'ensemble des différences entre le béton classique et le béton polymère.

Tableau 1.8. Tableau comparatif de béton de polymère et béton traditionnel [15].

Caractéristiques	Béton Polymère	Béton Traditionnel
Liant	Résine + Quartz	Ciment + Eau
Temps de fabrication	24 heures	28 jours
Valeur de compression	De 80 à 90 MPa	De 20 à 30 MPa
Valeur de traction par flexion	De 20 à 25 MPa	De 4 à 6 MPa
Module de Young (élasticité)	21300 MPa	20000 MPa
Abrasion	1,15	> 2
Absorption d'eau	0,2%	8,10%
Masse volumique	2109 kg/m ³	2300 Kg/m ³
Coefficient d'écoulement (Manning Strickler)	108 moyen	De 60 à 90
Résistance au gel	Inaltéré	Dommmages, lézardes avec pertes de masse
Résistance au feu	M0 – M1	M0
Étanchéité	Totale dans la masse Très faible porosité de surface	Porosité importante
Résistance aux tags	Sans traitement, nettoyage facile à l'Acétone, car faible porosité	Traitement préalable de surface avec tenue limitée dans le temps

5. Théorie de choc

Cet essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette. On utilise un mouton-pendule muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc (figure 1.15). L'utilisation très répandue du pendule de choc, a conduit à étudier le comportement des matériaux vis à vis des ruptures par choc. Cependant les très nombreuses méthodes utilisées n'ont pas de points communs et la caractérisation des matériaux varie souvent d'une méthode à l'autre [88].

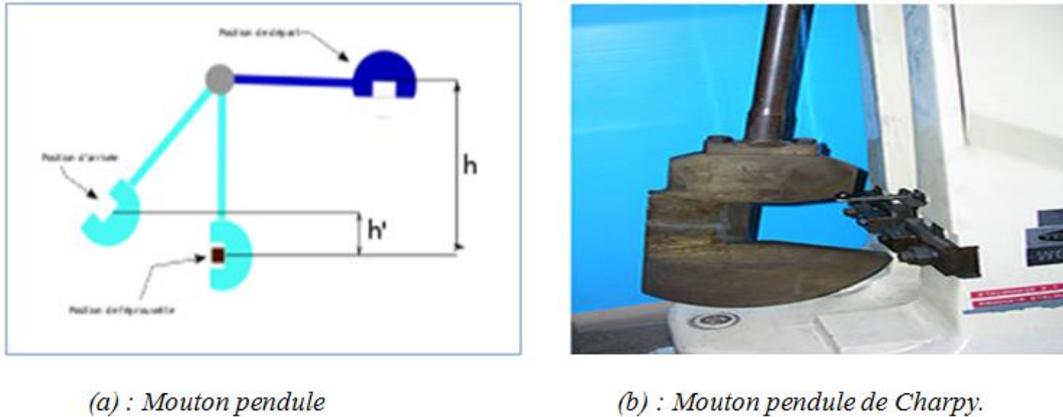


Figure 1.15. Représentation du mouton pendule de Charpy [88].

5.1. Mesure de G_{IC} en choc méthode essai de Williams

J G.Williams a proposé une méthode d'interprétation nouvelle des essais de choc sur des essais de choc basée sur les principes de la mécanique de la rupture. Cette méthode permet une estimation de l'énergie de rupture (G_{IC}) à partir de l'énergie totale (U) au moment d'un choc. Considérant l'énergie perdu par le marteau au moment du choc égale à l'énergie élastique emmagasinée par l'éprouvette au moment de la rupture (figure 1.16).

$$U = \frac{1}{2} P\Delta \dots \dots \dots (1) \quad \text{compliance} \quad C = \Delta/P \dots \dots \dots (2)$$

$$G_{IC} = \frac{1}{2} \frac{P^2 \delta_c}{B \delta_a} \dots \dots \dots (3)$$

$$U = \frac{1}{2} P^2 C \dots \dots \dots (4)$$

$$G_{IC} \cdot C = \frac{1}{2} \frac{P^2}{B} C \frac{\delta_c}{\delta_a} \dots \dots \dots (5)$$

$$G_{IC} \cdot C = \frac{U \delta_c}{B \delta_a} \dots \dots \dots (6)$$

$$U = \frac{G_{IC} \cdot C \cdot B}{\frac{\delta_c}{\delta_a}} \dots \dots \dots (7)$$

$$U = \frac{G_{IC} \cdot C \cdot B \cdot W}{B \cdot \frac{\delta_c}{\delta_a}} \dots \dots \dots (8)$$

$$U = \frac{G_{IC}.BW}{\frac{\delta_c}{\delta_a}.W} \dots\dots\dots(9)$$

$$U = \frac{G_{IC}.B.W}{\frac{\delta_c}{c.\delta(\frac{a}{w})}} \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{\delta_c}{\delta(\frac{a}{w})} = \emptyset \dots\dots\dots(11)$$

\emptyset : Facteur de calibration définie par les normes pour les différentes longueurs de fissures.

Alors :

$$U = G_{IC}.B.W.\emptyset \dots\dots\dots(12)$$

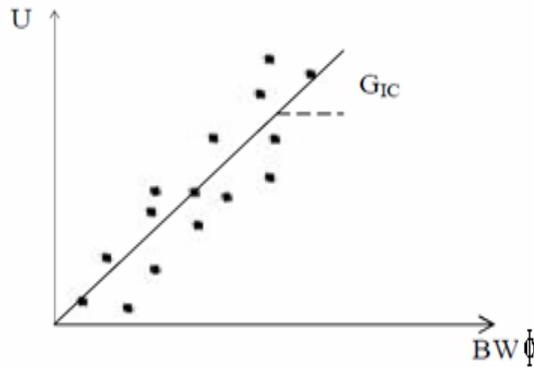


Figure 1.16. Graphique de l'énergie en fonction de la géométrie [89].

6. Modèle probabiliste de WEIBULL

D'une manière générale, les matériaux contiennent des défauts qui sont dus essentiellement à leur nature et à leur fabrication. Déjà à l'époque de Leonard De Vinci cette notion sur les matériaux existait. En faisant un essai de traction sur un fil en acier, il aboutit à la conclusion que la résistance du fil diminue si la longueur augmente, ce qui illustre clairement la nature statistique de la rupture [90].

En théorie des probabilités, la loi de Weibull est une loi de probabilité continue [91]. L'interprétation de Weibull sur le phénomène de rupture se résume en l'effet de taille et de volume [92]. Son raisonnement est basé sur le principe qu'une structure possède la résistance de la partie la plus faible, en d'autre terme du maillon le plus faible. Ce principe est connu sous le nom de W.L.T (Weak Link Theory).

Les statistiques de Weibull permettent de calculer une caractéristique empirique notée (m) qui représente à la fois un facteur d'homogénéité et le degré de fragilité du matériau [93].

6.1. Modèle de Weibull

Selon cette théorie la probabilité de rupture d'un matériau de volume V, soumis à une distribution de contraintes σ est :

$$P = 1 - \exp[- B(\sigma)] \dots \dots \dots (13)$$

B : représente le risque de rupture donné par l'intégrale de volume :

$$B = \int V f(\sigma) dV \dots \dots \dots (14)$$

Avec :

$$f(\sigma) = \left[- V \left(\frac{\sigma - \sigma_\mu}{\bar{\sigma}} \right)^m \right] \quad \text{pour } \sigma > \sigma_\mu$$

$$f(\sigma) = 0 \quad \text{pour } \sigma < \sigma_\mu$$

σ : Contrainte appliquée.

σ_μ : Contrainte au dessous de laquelle la probabilité de rupture est nulle. En général elle est prise égale à 0

σ̄ : Contrainte de normalisation sans signification physique obtenue pour une probabilité de rupture de 0,632.

m : Facteur d'inhomogénéité appelé « module de Weibull ».

Les deux paramètres σ et m sont considérés comme des propriétés du matériau. Ainsi le risque de rupture n'est fonction que de la distribution des contraintes dans l'éprouvette essayée.

Pour une éprouvette de volume V_t soumise à des contraintes de traction uniformément réparties, l'équation (14) s'écrit :

$$B_t = V_t \left(\frac{\sigma_t}{\bar{\sigma}_t} \right)^m \dots \dots \dots (15)$$

L'indice t est relatif à la traction.

L'équation (42) peut alors s'écrire :

$$P(\sigma_t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_t}{\bar{\sigma}_t} \right)^m \right] \dots \dots \dots (16)$$

σ̄_t : Contrainte de normalisation en traction donnée par :

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\bar{\sigma}}{V_t^m} \dots\dots\dots(17)$$

L'intégration de l'équation (43)(14) a été établie par Weibull et Daniel pour la flexion 3 points:

$$B_{3p} = \frac{V_f}{2(m+1)^2} \left(\frac{\sigma_f}{\bar{\sigma}}\right)^m \dots\dots\dots(18)$$

L'indice f est relatif à la flexion 3 point.

σ_f correspond à la contrainte appliquée à l'extrémité de la zone la plus tendue de l'éprouvette.

La substitution de (18) dans (13) donne :

$$P(\sigma_f) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_f}{\bar{\sigma}_f}\right)^m\right] \dots\dots\dots(19)$$

Avec

$$\bar{\sigma}_f = \bar{\sigma} \left[\frac{2(m+1)^m}{V_f}\right]^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots(20)$$

Ainsi l'essai de flexion 3 points aboutit à une distribution de Weibull à 2 paramètres avec le même facteur m que pour l'essai de traction, mais un facteur de normalisation σ_f différent. Combinant les équations (16) et (19) pour d'égales probabilités de rupture, le rapport entre la contrainte maximale de rupture en flexion et celle de traction est donnée par :

$$\frac{\sigma_{rf}}{\sigma_{rt}} = \left[2(m+1)^2 \left(\frac{V_t}{V_f}\right)\right]^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots(21)$$

L'indice r est relatif à la rupture.

La technique la plus utilisée pour la détermination du paramètre de WEIBULL consiste en la linéarisation de l'équation (16) de la probabilité de rupture. Nous obtenons :

$$\text{Ln} [\ln (1/1 - P_f)] = m \cdot \ln(\sigma - \sigma_\mu) + \ln V_t - m \cdot \ln \bar{\sigma} \dots\dots\dots(22)$$

$$\text{Ln} \left[\ln \left(\frac{1}{1} - P_f \right) \right] = m \cdot \ln(\sigma - \sigma_\mu) + \ln V_f - m \cdot \ln \bar{\sigma} 2(m+1) \dots\dots\dots(23)$$

La représentation graphique de $\text{Ln} [\ln (1/1 - P_f)]$ en fonction de $\ln (\sigma - \sigma_\mu)$ est une droite de pente m. La figure 1.17 illustre un exemple d'application du modèle de Weibull en flexion.

Analytiquement, le calcul de la probabilité se fait à partir des expressions du rang médian

« Médian Rank » suivantes:

$$P_f = \frac{i}{N+1}$$

ou:

$$P_f = \frac{i - 0,3}{i + 0,4}$$

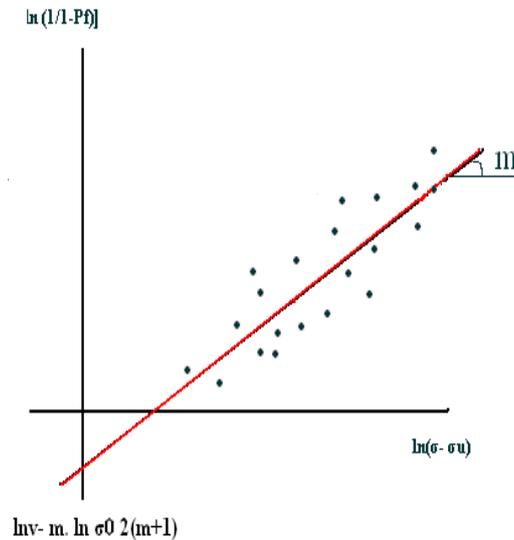


Figure 1.17. Représentation graphique de l'équation de probabilité linéaire [93].

7. Comportement en fatigue et phénomènes de fatigue

Les premières études relatives à l'effet de fatigue remontent au début du XIXe siècle. Parmi les étapes essentielles dans l'étude de ce phénomène, on peut citer l'introduction des courbes d'endurance par Wöhler à partir de 1860, puis les travaux de Miner en 1945 [94] sur la prévision de la rupture sous sollicitation de niveau variable.

La représentation classique des résultats d'essais de fatigue est la courbe de fatigue ou la courbe de Wöhler (figure.1.18). Cette courbe fait correspondre une durée de vie à un niveau de sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation imposée.

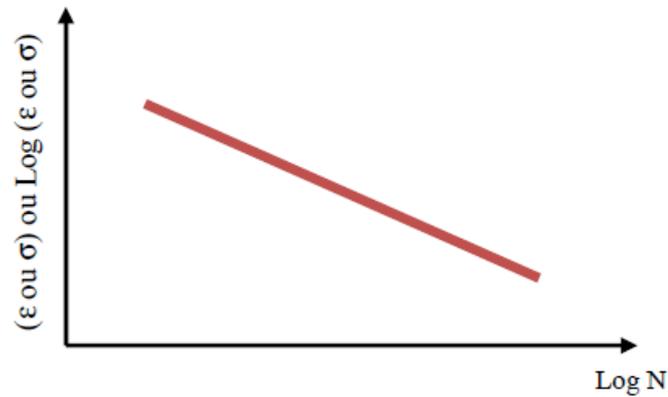


Figure 1.18. Courbe de Wöhler.

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. Les expériences montrent que la forme propre du signal n'a pas beaucoup d'influence sur la durée de vie en fatigue comme l'a annoncé **Wang** [95]. D'autres comme **Raithby et al** [96] estiment que cette forme est très importante pour l'analyse des résultats des essais de fatigue surtout à travers l'influence de la vitesse d'application de la charge.

Il existe deux modes différents de sollicitation

- *Force imposée* : l'essai est piloté en force l'amplitude et la fréquence de ce signal restent constantes pendant l'essai et dans ce cas, c'est la déformation qui varie. Si, sous l'application de la force, le champ de contraintes dans l'éprouvette est homogène, alors le mode de l'essai est à "contrainte imposée" (la contrainte est identique en chaque point de l'éprouvette).
- *Déplacement imposé* : le signal de sollicitation appliquée à l'éprouvette est un signal de déplacement avec une amplitude et une fréquence constantes. La force nécessaire pour créer ce déplacement évolue au cours de l'essai. Si le champ de déformation dans l'éprouvette est homogène, le mode de l'essai est alors à "déformation imposée" (la déformation est identique en chaque point de l'éprouvette).

7.1. Mécanismes de fatigue du béton

La représentation graphique d'un essai de fatigue, quelle que soit la sollicitation imposée en fonction du nombre de cycles appliqué, fait apparaître trois phases dans le processus de fatigue de béton (figure. 1.19) [97] :

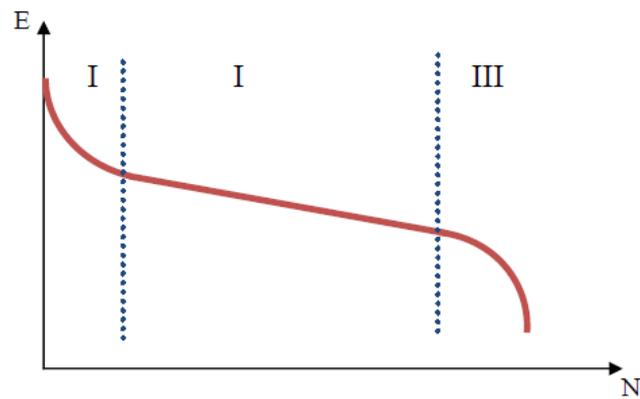


Figure 1.19. Evolution du module d'élasticité et distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue [97].

- Phase I ou phase initiale d'amorçage, correspond à une évolution rapide de la dégradation du béton. Cette phase se traduit par une chute rapide de la valeur du module et couvre entre 7% et 10% du nombre de cycles nécessaires pour provoquer la rupture.
- Phase II ou phase de propagation et d'évolution du dommage en fatigue, durant laquelle la vitesse de dégradation est stabilisée. L'évolution de dommage est lente. Cette phase constitue la partie la plus importante de la durée de vie du matériau sollicité en fatigue, elle couvre entre 80% et 90% du temps à rupture.
- Phase III ou phase de rupture, correspond à une accélération progressive du processus d'endommagement et mène à la rupture finale de l'éprouvette.

7.2. Déformation et endommagement du béton en fatigue

Ainsi le développement de la microfissuration s'accompagne d'un affaiblissement du module d'élasticité ainsi que du développement d'une déformation irréversible après déchargement.

La représentation graphique du module d'élasticité (E_D) et de la déformation, (ϵ_D) en fonction du nombre de cycles appliqués, montre une évolution en S (figure 1.20). On observe un affaiblissement progressif du module selon les trois phases discutées précédemment ([98], [99]).

L'allure de la courbe dépend des paramètres de la sollicitation cyclique (fréquence, niveau de chargement, type de sollicitation ...).

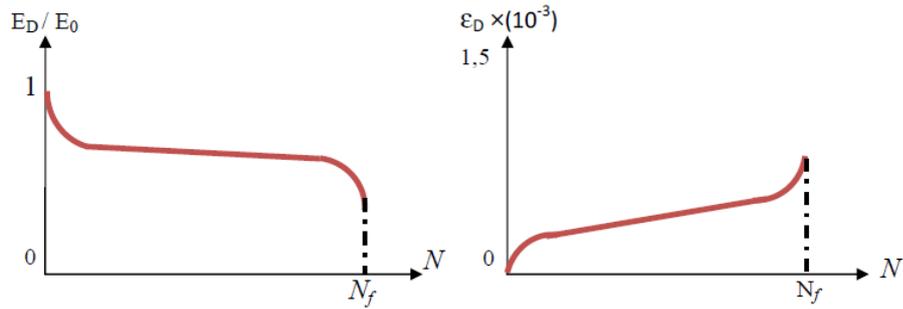


Figure 1.20. Evolution du module d'élasticité et de la déformation irréversible en fonction du nombre de cycles de fatigue [98].

Pour faire le lien entre la dégradation physique subie par le matériau et l'altération de ses caractéristiques mécaniques, un facteur de dommage D a été défini. Ce facteur caractérise l'état de dégradation du matériau à un instant donné :

- d'un point de vue physique, le facteur de dommage D est donné par [99]:

$$D = \frac{\Omega_D}{\Omega_0} \dots\dots\dots (24)$$

Où Ω_D est l'aire totale cumulée des micro-décohésions provoquées par la sollicitation cyclique, et Ω_0 est l'aire initiale (matériau vierge).

- d'un point de vue mécanique le facteur de dommage est défini par [99]:

$$D = 1 - \frac{E_D}{E_0} \dots\dots\dots (25)$$

Où E_D est le module d'élasticité au cours de la sollicitation et E_0 est le module d'élasticité initial.

La figure 1.22 montre l'évolution du facteur d'endommagement déduit de la courbe d'évolution du module d'élasticité à l'aide de la relation précédente. L'évolution croissante du facteur de dommage résulte du caractère irréversible de la fissuration [100].

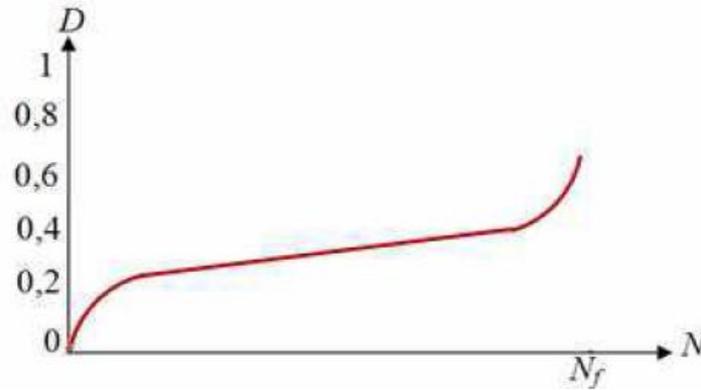


Figure 1.21. Evolution du facteur de dommage [100].

8. Réparation des bétons

Le principe du renforcement ou de la réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées.

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de protection de l'ouvrage visant à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion. La notion de réparation vise à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de renforcement ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes technologies de réparation et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années [101].

Il existe de nombreuses méthodes de réparation des fissures. Certaines méthodes sont spécifiquement conçues pour réparer des fissures actives, tandis que d'autres sont mieux adaptées pour réparer des fissures stables. Certaines méthodes permettent de restaurer la capacité portante de l'élément (améliorer la résistance mécanique), alors qu'il existe aussi des méthodes qui permettent de rétablir l'étanchéité de la structure (améliorer l'apparence) [102].

8.1. Techniques de réparation

Une réparation efficace doit pouvoir résister aux contraintes ou aux agents qui ont causé la détérioration du béton d'origine. Les techniques de réparation que nous traitons ici concernent la remise en service et l'aspect esthétique. La remise en service est la remise en état des surfaces aux normes de service, tandis que les réparations esthétiques visent à améliorer l'apparence de l'ouvrage.

Une fois la principale cause de détérioration déterminée et le béton détérioré enlevé, la sélection des matériaux et des techniques de réparation devrait se fonder sur :

- Les propriétés des matériaux de réparation.
- La compatibilité de ces matériaux avec le béton en place.
- La stabilité en service [103].

8.2. Réparation par les composites

Certaines propriétés des matériaux composites ont conduit le secteur du bâtiment à les considérer pour du renforcement d'ouvrages d'art. Il est intéressant de pouvoir remplacer le renforcement traditionnel par des matériaux composites relativement inertes à l'oxydation.

Les expériences menées jusqu'à présent utilisent des matériaux composites en fibres de verre, en fibres de carbone ou en fibres d'aramide. Les matériaux composites utilisés pour le renforcement de poutres se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalablement fabriquées. Les comportements observés avec ce type de renforcement sont plus performants que ceux des poutres renforcées par des tôles en acier. Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites [101] :

- La rigidité (pour les fibres en carbone), la résistance mécanique, la résistance à la corrosion et l'étanchéité. De plus, ces matériaux permettent une conception du renfort plus adaptée.
- Au besoin de la structure grâce à des procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation.
- Le matériau est fabriqué en même temps que la structure, les directions de renfort sont complètement paramétrables.

8.3. Réparation par TFC

Des applications avec succès est l'utilisation des externes composites renforcements pour la réparation et la réhabilitation des colonnes en béton armé. Ce champ d'application s'élargit de plus en plus aux autres types de structures comme les poutres [Chafika, 1998] et les dalles [Ayman. 2003] où les bandes composites sont collées sur leur surface tendue dans l'espoir de réparer et d'améliorer leur capacité portante en flexion [104].



Figure 1.22. Exemple de réparation par l'injection de résine époxydes [104].

9. Synthèse

Dans ce chapitre, les matériaux granulaires et leurs applications dans le génie civil sont présentés. Ces matériaux sont constitués d'un liant (polymère) et des charges minérales comme le gravier ou la pierre concassée et du sable. Ils présentent donc une microstructure hétérogène, par la présence de plusieurs constituants, les pores et les microfissures.

Des différents travaux publiés dans la littérature, dont les plus importants ont été cités précédemment, il se dégage un certain nombre de points remarquables qui sont à l'origine de certains choix effectués :

- La fraction massique optimale des polymères thermodurcissables dépend du type de polymère et des matériaux granulaires.
- Les fractions massiques de liant les plus fréquemment utilisés se situent entre 9 et 28% de résine. Des résistances à la compression atteintes varient de 20 à 120 MPa.

Les bétons de résine résistent bien à l'action des produits chimiques et autre agents corrosifs, absorbent très peu l'eau, résistent bien à l'abrasion et possèdent une grande stabilité aux cycles gel-dégel.

Les différentes études bibliographiques qui traitent de l'existence de relations entre les approches empiriques et physiques révèlent une bonne corrélation entre le pourcentage massique du polymère et les propriétés physiques et mécaniques des bétons de résine.

L'analyse expérimentale a permis de mieux cerner l'influence de quelques paramètres sur le comportement mécanique de ces matériaux soumis aux différentes sollicitations.

Chapitre II

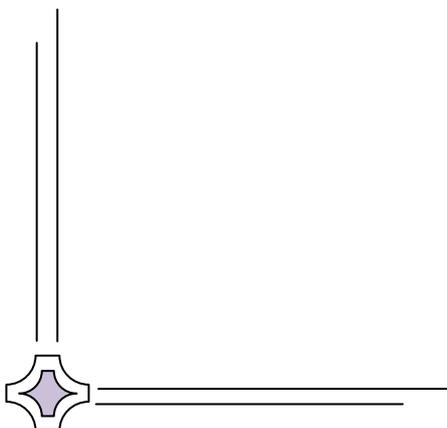
Techniques expérimentales de caractérisation des matériaux et processus d'optimisation de la formulation et mode de préparation des micro-bétons de résine polyester



Ce second chapitre sera consacré en premier partie à la présentation détaillée des méthodes et techniques expérimentales de caractérisation utilisées pour déterminer les propriétés physiques et mécaniques des différents matériaux utilisés : liants, granulats et micro-bétons de résine sur lesquelles s'appuie une grande partie de cette étude

On décrira également les techniques d'élaboration utilisées pour la réalisation de ce béton de résine ainsi que les conditions expérimentales d'exposition des formulations adoptées.

En deuxième partie d'optimiser la fraction massique du liant à base de polyester permettant d'obtenir des caractéristiques mécaniques et physiques optimales. Cette optimisation consiste à trouver la fraction massique de liant minimale tout en alliant caractéristiques physico-mécaniques et rentabilité économique (coût). On visera à optimiser le squelette granulaire en confrontant les résultats issus de l'expérience à ceux trouvés par des variations sur le pourcentage des deux types de sable avec une variation de rapport de G/S.



Sommaire

1. Matériaux utilisés dans les formulations	
1.1. Constituants des micro-bétons résineux	74
a) Sables.....	74
b) gravier 3/8.....	75
c) Liant : résine polyester.....	75
d) le durcisseur	76
e) les fibres.....	77
1.2. Caractérisation des charges minérales.....	78
1.2.1 Analyse granulométrique.....	78
1.2.2 Propriétés physiques des constituants.....	79
a) mesure de la masse volumique apparente.....	79
b) mesure de la masse volumique absolue.....	79
c) la porosité.....	80
d) module de finesse.....	80
e) propreté de sable (essai d'équivalent de sable).....	80
2. Optimisation de la formulation du micro-béton de résine	
2.1 Procédure de formulation.....	82
2.2 Optimisation de la fraction massique du liant	85
2.2.1 Préparation de mortier de résine avec un seul type de sable.....	86
2.2.2 Préparation de mortier de résine avec deux types de sable.....	86
2.3 Optimisation du squelette granulaire.....	87
2.3.1 Préparation de micro-béton de résine.....	87
2.3.2 Préparation de micro-béton de résine à basse des fibres (verre E, polypropylène).....	87
3. Mode de préparation des micro-bétons	
4. Techniques expérimentales	
4.1 Essais de caractérisation mécanique.....	91
4.1.1 Essai de traction par flexion 3 points.....	91

4.1.2 Essai de compression.....	91
4.1.3 Essai de choc.....	93
4.2 Essais de caractérisation d'analyses physico-chimiques.....	95
4.2.1 Mesure de la porosité totale par intrusion de mercure (PIM).....	95
4.2.2 Observation au microscope électronique à balayage (MEB).....	96
5. Synthèse	

Chapitre II Techniques expérimentales, caractérisation des matériaux et mode de préparation des bétons de résine polyester et processus d'optimisation de la formulation

1. Matériaux utilisés dans les formulations

Dans ce deuxième chapitre, nous allons nous intéresser dans un premier temps à la caractérisation des différents matériaux qui seront utilisées dans cette étude. Les différentes propriétés physico-chimiques seront présentées.

On s'intéressera par la suite, aux procédures de fabrication, des différentes compositions des mortiers et des micro-bétons de résine et les différentes formulations adaptées.

Deux fractions du sable de dune de même nature minéralogique, l'un fin et l'autre moyen ont été utilisées. Ces fractions ont servi à la fabrication des différents mélanges de mortier de résine et du micro-béton. Ces sables ont été caractérisés par des essais physiques.

1.1. Constituants des micro-bétons résineux

a) Sables

Le sable moyen est un sable naturelle roulé qui provient des dunes de la localité (Région de Annaba). Il est caractérisé par une finesse granulaire qui donne un module de finesse de 2.1 (figure 2.1) .Le deuxième est un sable fin, roulé fin qui provient de la localité (Région de Annaba). Sa granulométrie est caractérisée par un module de finesse de 1.51 (figure 2.2).

Les deux types du sable ont des dimensions (0/ 5) mm.



Figure 2.1. Sable moyen.



Figure 2.2. Sable fin.

b) Gravier

Le gravier utilisé est de fraction (3/8) mm, de la région de Annaba (figure 2.3).

La figure 2.6 regroupe les différentes courbes granulométriques des différents granulats.



Figure 2.3. Gravier 3/8

Pour avoir une bonne représentativité des résultats obtenus, 3 essais ont été effectués pour chaque cas.

c) Liant : résine polyester

Le polymère utilisé en tant que liant est à base d'un polyester sous forme de liquide de deux natures différentes dénommé 1 et 2. La viscosité la de résine polyester 1 est de 14 dPa.s et de la masse volumique d'environ 1.08 g/cm³. La viscosité de la résine polyester 2 est de 20 dPa.s et de la masse volumique 1.11 g/cm³ (figure 2.4). Ces deux résines sont insolubles dans l'eau comme toutes les résines.



a) Résine polyester 1



b) Résine polyester 2

Figure 2.4. Résine polyester

Les caractéristiques physico-mécaniques de ces deux résine polyester sont données par le fabricant et sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Caractéristique de la résine polyester.

Caractéristiques	Unité	Résultats	
		Résine 1	Résine 2
Masse volumique	g/cm ³	1.08	1.11
Viscosité	dPa.s	14	20
Couleur	-	Rouge foncé(grenat)	Violet
Etat	-	Liquide	
Dangereux	-	Inflammable	
Temps de gel (23°C)	min	25	
Résistance a la traction	MPa	45	
Résistance a la compression	MPa	50-150	
σ_{rupt} en traction	(MPa)	(50 à 80)	
A_{rupt}	%	2.5	
Température Max	(°C)	200	
E	(GPa)	(2.5 à 3.5)	
G	(GPa)	1.4	
ρ	(Kg.m ⁻³)	1300	

Précaution à prendre :

Sécurité : dangereuse car irritante et facilement inflammable.

Odeur : A manipuler avec précaution avec des masques appropriés.

d) Le durcisseur

Les additifs que sont un accélérateur et un durcisseur (amine) ont été fournis sous forme de liquide dans des flacons hermétiques. Le tableau 2.2 rassemble les caractéristiques du durcisseur utilisé.

Tableau 2.2. Caractéristique de durcisseur.

Caractéristiques	Résultats
Etat	Liquide
Couleur	Incolore
Dangereux	inflammable

e) Les fibres

L'utilisation des fibres courtes dans une matrice organique constitue un composite de caractéristiques thermomécaniques très améliorées par rapport aux résines seules dans les bétons de polymère. Ces fibres jouent un rôle de renfort de la résine afin d'augmenter la rigidité.

Verre E

Les fibres de verre considérées ici sont de type E (figure 2.5). Ces fibres sont les plus répandues pour les composites de grande diffusion. Les résines de polyester sont en général associées à des fibres de verre pour obtenir des matériaux composites économiques. Elles doivent être utilisées à température ambiante. Les fibres sont utilisées sous deux formes : injectées de façon aléatoire dans le volume de la matrice et en tissu sous forme de stratification (verre E).

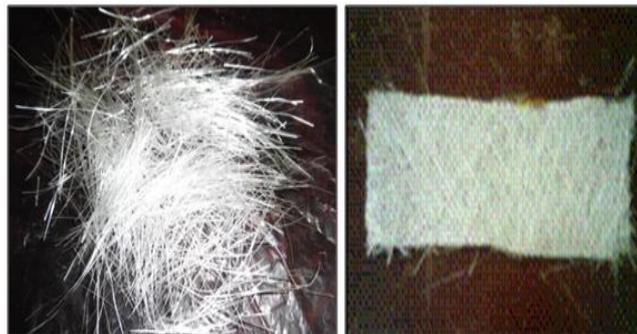


Figure 2.5. Fibre de verre E.

Polypropylène

Les fibres de polypropylène utilisées sont de deux longueurs différentes (6 mm et 12 mm) (figure 2.6). Les fibres sont injectées de façon aléatoire dans le volume de la matrice (polypropylène). Leurs propriétés physique et mécanique sont données par le fabricant.



Figure 2.6. Fibre de polypropylène.

Les propriétés physiques des fibres de verre E et de polypropylène sont présentées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Propriétés physiques et mécaniques des fibres.

Caractéristiques	Unité	Fibres	
		Verre E	polypropylène
Longueur de la fibre	mm	40	6 - 12
Densité	g/cm ³	2.6	0.9
Module de Young	GPa	80	30
Point de fusion	C°	200	150
Allongement à la rupture	%	3.5	50
Section de la fibre	microns	15	30

1.2. Caractérisation des charges minérales

1.2.1. Analyse granulométrique

La figure 2.7 représente les analyses granulométriques réalisées sur le gravier et le sable utilisés dans les formulations. L'essai, par voie sèche selon la norme NF P 18-560, consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtes les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont

décroissantes du haut vers le bas : pour le sable : 5, 3.15, 2.5, 2, 1.25, 0.63, 0.315, 0.2, 0.08 mm.

Ces courbes se caractérisent par une évolution monotone croissante et continue indiquant que les fractions utilisées se distinguent par une granularité homogène les prédestinant à l'utilisation à juste titre dans la composition des bétons de résine.

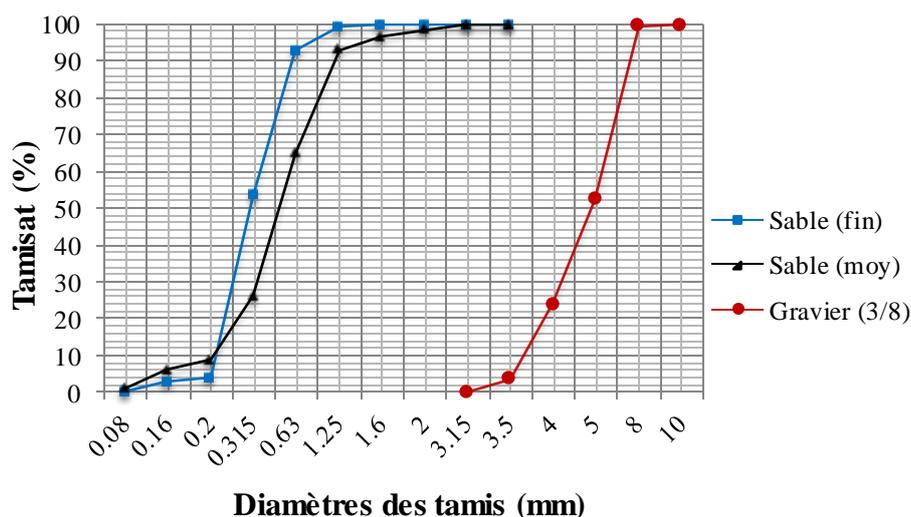


Figure 2.7. Courbes granulométriques des granulats.

1.2.2. Propriétés physiques des constituants

a) Mesure de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume y compris les vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme (NF EN 1097-3).

L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau. On calcule la valeur de la masse volumique par le rapport :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \text{ g/cm}^3 \dots\dots\dots(26)$$

b) Mesure de la masse volumique absolue

Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de la poudre dans un liquide inerte, si la matière est hydraulique, sinon, dans de l'eau. La différence de volume rapporté à la masse de matériau nous donne la masse volumique absolue. Cet essai est réalisé selon la norme NF

EN 1097-3. Cet essai est répété trois fois pour chaque matériau. La moyenne des essais constitue la masse volumique absolue.

c) La porosité

A partir de la masse volumique absolue on déduit la porosité qui a été défini par la formule suivante :

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100 \dots \dots \dots (27)$$

P : la porosité.

ρ_{abs} : masse volumique absolue.

ρ_{app} : masse volumique apparente.

d) Module de finesse

La norme XP P 18-540 définit le module de finesse d'un sable, qui caractérise sa granularité, comme le 1 /100ème de la somme des refus, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série suivante : (5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.16) mm.

e) Propreté de sable (Essai d'équivalent de sable)

Le degré de propreté du sable est fourni par l'essai d'équivalent de sable selon la norme P 18-597. L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur **h₁** : sable propre + éléments fins.
- Hauteur **h₂** : sable propre seulement.

On déduit l'équivalent de sable (ES) qui, par convention :

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100 \dots \dots \dots (28)$$

Cet essai est répété trois fois. La moyenne des essais constitue la valeur d'équivalent de sable.

Le tableau 2.4 regroupe les principales caractéristiques des fractions granulaires :

Tableau 2.4. Caractéristiques des granulats.

Caractéristiques	unité	Sable moyen	Sable fin	Gravier 3/8
Le module de finesse	-	2.1	1.51	-
La masse volumique apparente	g/cm ³	1.32	1.34	1.26
La masse volumique absolue	g/cm ³	2.30	2.50	2.502
La porosité	%	42.60	46.4	49.64
La propreté (ES)	%	89.78	89	-

La figure 2.8 illustre ces caractéristiques mesurées des sables et de gravier.

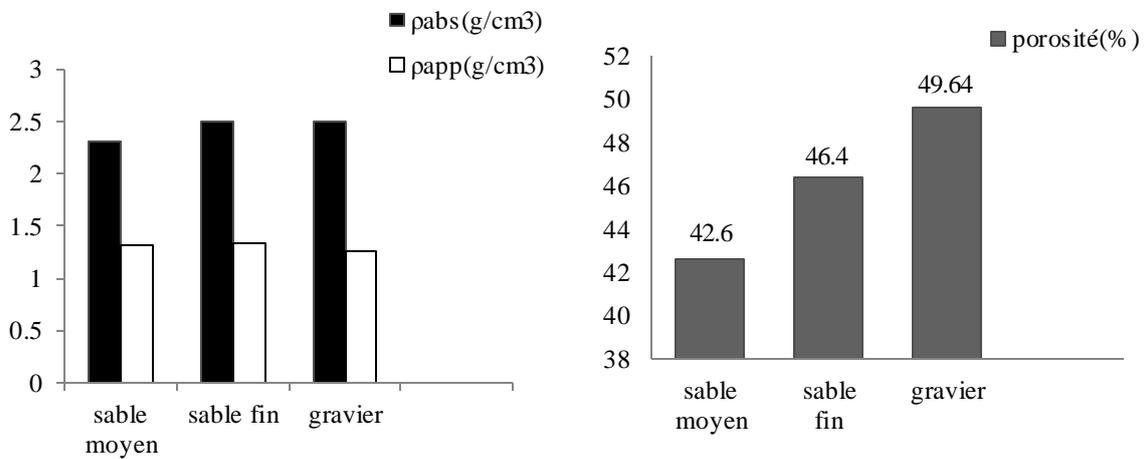


Figure 2.8. Caractéristiques physiques des granulats.

Les constats suivants peuvent être relevés:

- Le module de finesse de sable moyen est plus grand que celui du sable fin (le sable moyen possède la meilleure granulométrie).
- La masse volumique de sable moyen est inférieure à celle du sable fin et du gravier (le sable moyen est plus poreux).
- A partir de la masse volumique apparente et absolue on déduit la porosité définie par la formule (27) :
$$P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100$$
- Le gravier est plus poreux que les deux types de sable (P = 49.64%)
- Les valeurs moyennes des ES montrent que les sables utilisés sont très propres (ES > 80).

2. Optimisation de la formulation du micro-béton de résine

Les performances mécaniques des bétons de polymère dépendent fortement de la nature de la matrice, des charges (sable, gravier, granulats) et de la qualité de l'adhérence entre les composants. Le micro-béton de résine utilisé est constitué par un liant à base de polyester insaturé avec un durcisseur. Deux types de sable ont été utilisés : un sable fin de module de finesse égale à 1.51 un sable moyen de module de finesse égale à 2.1.

Ce paragraphe vise à optimiser la formulation de micro-béton de résine. Cette tâche est composée de deux parties. La première partie est consacrée à l'optimisation de la fraction massique du liant à base de polyester sur la base des essais expérimentaux de caractérisation mécaniques et physiques. Cette optimisation a pour objectif la détermination de la fraction massique de liant minimale qui allie propriétés physiques et mécaniques et coût. Ces formulations se différencient par la fraction massique de liant qui varie entre 10 et 50%. L'étude expérimentale est entièrement réalisée au Laboratoire de Génie Civil LGC de l'Université de Badji Mokhtar de Annaba, Algérie.

La deuxième partie est consacrée à l'optimisation de la composition du squelette granulaire formé par deux types de sable (fin et moyen) et un rapport G/S composé du gravier de classe granulaire 3/8.

2.1. Procédure de formulation

L'approche de formulation qui a servi à la confection des différents mélanges de cette étude est empirique basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant sur le point de saturation avec la résine :

- Le pourcentage de résine polyester est fixé en fonction de la saturation nécessaire pour obtenir une pâte compacte, pour les deux types de sable (fin et moyen).
- Les pourcentages des sables (fin, moyen) sont déterminés de façon expérimentale, sur la base d'essais mécaniques sur le mortier de résine, de telle sorte que lorsqu'on augmente le % massique du sable fin, on obtient des résistances supérieures.
- L'optimisation du squelette granulaire a été réalisée à l'aide des essais mécaniques (traction par flexion 3 points et compression) .Elle est basée sur une méthode empirique appliquée aux bétons de résine avec la variation de rapport G/S = (0,5 – 1– 1,5 – 2).

- L'amélioration des performances mécaniques s'est faite par l'addition des fibres. Ces fibres de verre E et du polypropylène sont des renforts avec des propriétés supérieures à celle de la résine seule. On distingue deux façons d'injections : les injections aléatoires avec un taux de (1 – 5%) et les injections sous forme tissu. (*W. Bai et al., [105]*) utilisant l'emploi du pourcentage important des fibres de verre de longueur de (5 – 25) mm, ajoutent de 1 à 5 % en poids dans un béton de résine pour augmenter ses propriétés. (*K. Sett et al., [106]*) montrent que la résistance à la compression augmente de 40% par l'addition des fibres de verre de 0 à 6% dans le béton de résine polyester.

La démarche expérimentale utilisée au cours de cette étude est schématisée sur la figure 2.9 et les différentes compositions de béton de résine fibré et non fibré élaborées sont présentées respectivement dans les tableaux 2.8 – 2.9 et 2.10. Par souci de simplification, on désigne le mortier de résine par (MR) le béton de résine par (BR), la fibre de verre E par (FV) et la fibre de polypropylène par (FP). Le numéro qui suit chaque appellation correspond au dosage de l'addition exprimée en pourcent (pourcentage massique).

Remarque : le dosage en addition (fibre de verre E, polypropylène) pour la formulation des bétons de résine fibré a été limitée à l'intervalle 1% - 5% du poids du liant (résine polyester).

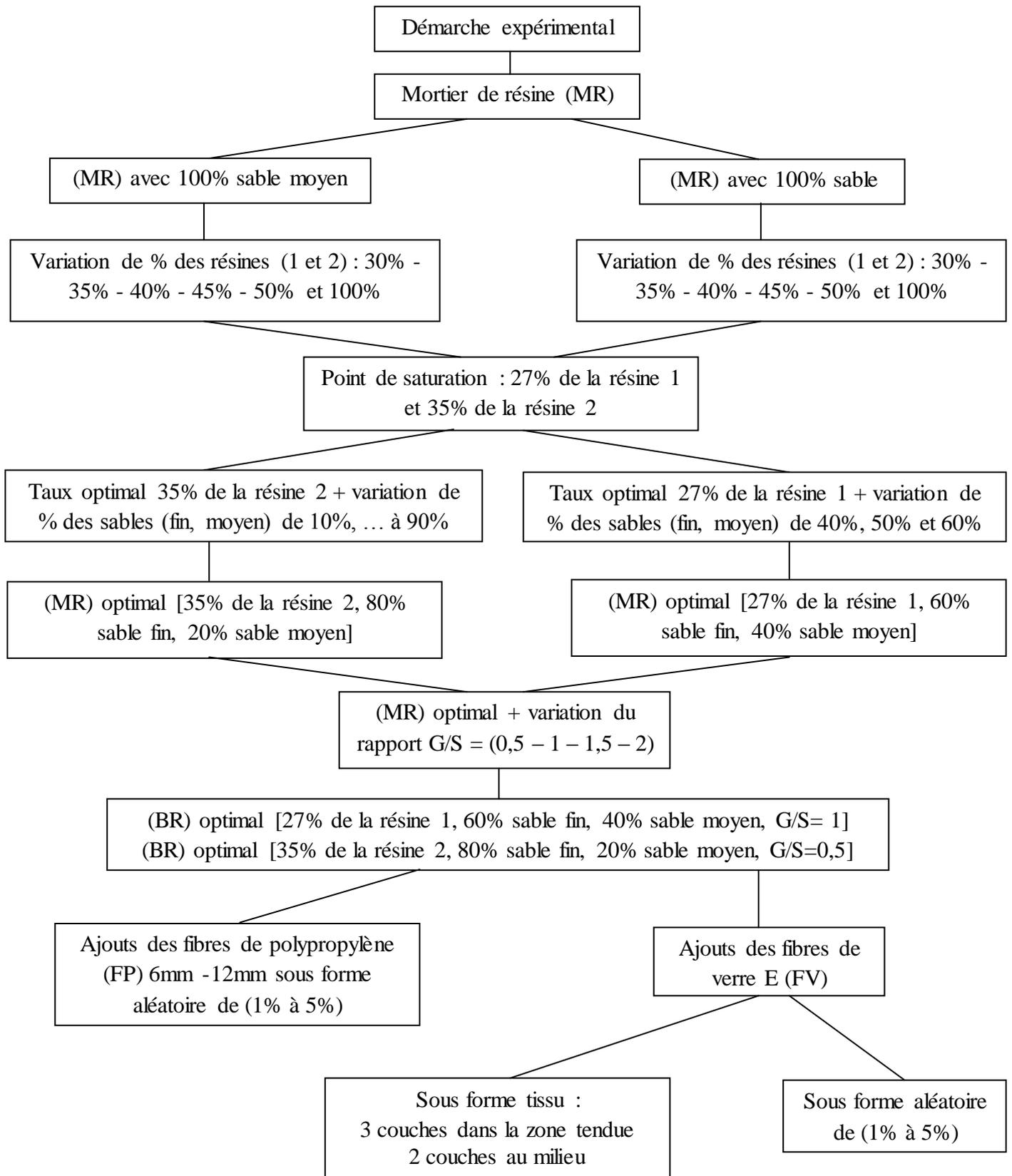


Figure 2.9. Organigramme de la démarche expérimentale utilisée

2.2. Optimisation de la fraction massique du liant

L'étude bibliographique faite dans le Chapitre I révèle une forte dépendance des performances mécanique et des propriétés physiques du béton de résine par rapport à la nature de ses composantes (résine, granulats, renforts, fibres,...) ainsi que leurs fractions massiques.

- Cas de la résine grenat : les pourcentages expérimentés de résine polyester grenat sont 25%, 27% et 30%.
- Cas de la résine violet : les pourcentages expérimentés de résine polyester violet sont 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 100% (pourcentage massique).

Ces valeurs dans les deux cas sont supérieures à celles obtenues par (A. Ergun et al., [85]) et qui ont expérimentés : 16, 18, 20, 22, 24, 26, et 28% . Ce pourcentage est choisi par rapport à la masse totale du mortier de résine est considérée comme étant la plage optimale qui allie performances mécaniques. Cependant cet intervalle varie selon la composition du mortier et de micro-béton de résine. En effet, la valeur minimale de la fraction massique optimale pour notre formulation d'un micro-béton de résine polyester est estimée à 27% dans le cas de la résine 1 et à 35% dans le cas de la résine 2.

(M. Barbuta et al., [58]) se sont intéressés à des mortiers et bétons d'époxyde dans lesquels est incorporée de la fumée de silice. Pour les mortiers la fraction massique de liant variait entre 24,2% et 58,87% alors que pour les bétons elle se situe entre 12,4% et 18,8%. Ils montrent que l'ajout de la fumée de silice permet à la fois de diminuer la fraction massique du liant et d'augmenter les résistances mécaniques.

(R. Berbaoui et al., [107]) ont formulé des micro-bétons de résine à partir de 40% de sable fin, 30% d'agrégats et 30% de résine époxyde.

Théoriquement la fraction massique optimale se situe entre 16 et 28%. Cette différence de la composition par rapport à la littérature s'explique notamment par la différence dans les processus d'élaboration ainsi que dans la nature des résines.

Les expériences qui ont été réalisées sur la formulation des micro-bétons et des mortiers de résines montrent que ce taux est jugé insuffisant car il a été observé une non saturation du sable dont une grande partie n'a pas été mouillée à cause des techniques de fabrication manuel du béton. Une élévation du taux varie avec un pas de 5% a été opérée dans cette étude. Neuf formulations de béton de résine, se différenciant essentiellement par la

fraction massique du liant polyester qui varie entre 10% et 50% de la masse totale du béton de résine, ont été adoptées dans le cadre de l'optimisation de la fraction massique du liant. Ainsi, après des essais préliminaires deux formulations se sont distinguées selon la nature de la résine :

- Cas de la résine 1 : couleur grenat un taux moyen de 27 % a été adopté comme point de saturation optimisé avec 2,4% de durcisseur.
- Cas de la résine 2 : couleur violet un taux de 35 % de résine a été adopté comme point de saturation optimisé avec 1% de durcisseur par rapport au pourcentage de la résine.

2.2.1. Préparation de mortier de résine avec un seul type de sable

Les tableaux 2.5 et 2.6 résume les compositions préliminaires retenues, pour la formulation des mortiers de résine de référence. Les deux mortiers de résine sont formulés une fois avec 100% de sable fin et une fois avec 100% de sable moyen.

Tableau 2.5. Formulation des mortiers de résine 1 avec sable fin et moyen.

Constituants	Mélange I	Mélange II	Mélange III
Résine 1 (%)	25	27	30
Durcisseur (%)	2,5	2,5	2,5

Tableau 2.6. Formulation des mortiers de résine 2 avec sable fin et moyen.

Constituants	Mélange I	Mélange II	Mélange III	Mélange IV	Mélange V	Mélange VI
Résine 2 (%)	30	35	40	45	50	100
Durcisseur (%)	1	1	1	1	1	1

2.2.2. Préparation de mortier de résine avec deux types de sable

L'élaboration de nos mortiers consiste dans la première série à faire varier le pourcentage de résine par rapport au poids de sable fin à partir de 27% pour la résine 1 et 35% pour la résine 2. On renouvelle les mêmes étapes dans la deuxième série avec le sable moyen. Ainsi les pourcentages de 27% et de 35% respectivement pour les résines 1 et 2 sont les pourcentages massiques les plus économiques qui donnent les bons résultats en termes des résistances mécaniques qui ont été choisis comme référence d'élaboration des mortiers de résine avec deux fractions de sable.

Les compositions des mélanges réalisées (MI, MII, MIII,..... MIX) sont données dans le tableau 2.7 et 2.8.

Tableau 2.7. Formulation des mortiers avec 27% de résine 1 et deux types de sable.

Constituants	MI	II	III
Sable fin(%)	40	50	60
Sable moyen(%)	60	50	40

Tableau 2.8. Formulation des mortiers avec 35% de résine 2 et deux types de sable.

Constituants	M I	M II	M III	M IV	M V	M VI	M VII	M VIII	M IX
Sable fin(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sable moyen(%)	90	80	70	60	50	40	30	20	10

2.3. Optimisation du squelette granulaire

2.3.1. Préparation du micro-béton de résine

Différents pourcentages massiques du rapport G/S ont alors fait l'objet d'expérimentation : G/S = 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2. Les différentes compositions des micro-bétons sont présentées dans le tableau 2.9.

Tableau 2.9. Formulation des micro-bétons de résine.

Rapport G/S	Constituants	
G/S = 0,5	Sable fin = 60%	Sable fin = 80%
G/S = 1	Sable moyen = 40%	Sable moyen = 20%
G/S = 1,5	Résine 1 = 27%	Résine 2 = 35%
G/S = 2		

2.3.2. Préparation des micro-bétons de résine à base des fibres de verre E et de polypropylène (6–12) mm

a) Renfort aléatoire

La méthode de conception est similaire à la méthode de préparation du micro-béton déjà adoptée à la différence qu'au début de la préparation du mélange on additionne les fibres, et on fait varier leurs taux d'addition par rapport au liant "résine". Cinq pourcentages de

taux de fibres injectés de façon aléatoire dans le mélange ont été expérimentés à savoir : 1% - 2% - 3% - 4% et 5%.

b) Renfort tissu

Deux modes de renforcement ont été utilisés :

Des micro-bétons à base des fibres constituées de deux couches étalées sous forme de tissu à l'intérieur de l'échantillon et à égale distance des extrémités, séparées par une couche intermédiaire de résine comme l'indique la figure 2.10. Celle-ci montre le tissu de verre utilisé sous forme de bande ainsi que la schématisation de la stratification au sein de l'échantillon.

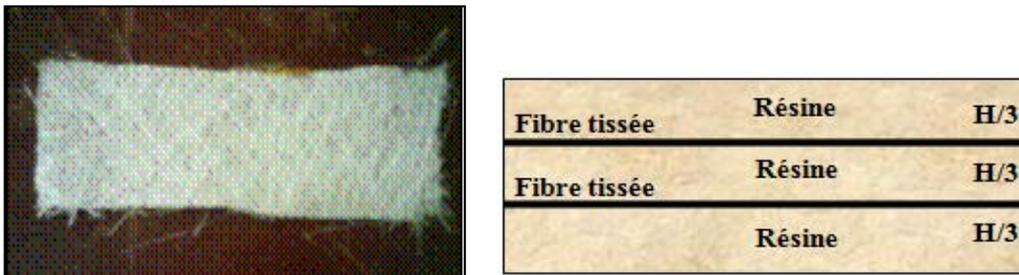


Figure 2.10. Tissu de verre utilisé et schéma de la disposition de la stratification au sein de l'éprouvette.

Des micro-bétons à base de fibres constituées de trois couches étalées sous forme de tissu uniquement dans la zone tendue. La procédure précédente est renouvelée pour concevoir un stratifié à la différence que dans cette étape la distance entre les tissus est changée et les couches de tissu sont uniquement concentrées dans la zone tendue comme l'illustrent la figure 2.11.



(a) : Emplacement du tissu dans la zone tendue

(b) : Schématisation de la stratification dans la zone tendue

Figure 2.11. Mode de renforcement trois couche dans la zone tendue.

3. Modes de préparation des micro-bétons

Avant de procéder à la fabrication proprement dite de micro-béton de résine de polyester, 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 micro-béton de résine à fabriquer et aussi à la méthode de fabrication. Les constituants doivent être donc stockés dans les conditions favorables selon les règles de l'état de l'art. En effet, les granulats (sable et gravier) doivent être séchés à 105°C pour plus de 24 heures et la résine (durcisseur et résine polyester) doit être stockée dans un conservateur à température contrôlée.

Une autre étape importante est le nettoyage des moules et l'application d'une couche séparatrice entre le béton de résine et les moules pour assurer un démoulage facile et sans risque d'exercer des contraintes parasites autres que les contraintes appliquées aux échantillons pendant les essais mécaniques. On a enduit toutes les parois de ces derniers de l'huile afin d'assurer un parfait démoulage.

Le processus de fabrication se déroule comme suit :

- Mélange pendant 30 seconde de la résine polyester et du durcisseur en respectant les proportions massiques étudiées. Le malaxage se fait manuellement à l'aide d'une tige métallique.
- On prépare le mélange des sables et de gravier à l'état sec dans un récipient tout en respectant le dosage des constituants étudié.
- On ajoute le mélange déjà préparé séparément de résine et de durcisseur avec un taux du polymère nécessaire.



- Chaque introduction est suivie d'un malaxage pendant 2 minutes (afin d'éviter la cristallisation brusque) Ainsi, la phase de malaxage se termine ; on obtient alors du béton de résine à l'état frais et la phase de remplissage peut commencer.



- les moules sont remplis sur trois couches pour assurer sa stabilité à l'état frais et éliminer les risques de ségrégation (prismatiques 4x4x16 cm) et chaque couche reçoit 30 coups (compactage) avec une barre métallique pendant 30 seconde. Cette phase s'achemine par l'arasement de la surface supérieure des éprouvettes avec une réglette selon mouvement de scie.



(*Vipulanandran et al., [61]*) prouvent que le procédé de fabrication par compactage donne des propriétés mécaniques meilleures (supérieures de 50%) par rapport à la méthode de vibration.

- Après 24h, le mélange est arrivé à sa résistance maximale. Démoulage des échantillons et conservation dans une salle à température ambiante jusqu'à l'échéance des essais mécaniques.



4. Techniques expérimentales

4.1 Essais de caractérisation mécanique

Plusieurs essais ont été effectués pour déterminer les caractéristiques mécaniques du micro-béton de résine. On s'est attaché à la détermination des résistances mécaniques, des propriétés physiques et mécaniques.

4.1.1. Essai de traction par flexion 3 points

Des essais de flexion 3 points sont menés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm. Les éprouvettes sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge concentrée.

Des essais ont été effectués sur une machine universelle (Zwick/Roell) de type Z020 piloté par microordinateur équipé du logiciel spécifique testXpert V9.0 ; et dotée d'un capteur de force de 20 KN. La chaîne d'acquisition permet l'enregistrement simultané de la force et du déplacement lors de la flexion avec une vitesse d'essai de 5mm/mn (figure 2.12).

Les éprouvettes sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs selon les dimensions des échantillons conformément aux normes considérées.

Les essais sont réalisés à température ambiante et la charge maximale est enregistrée au cours de l'essai ainsi que la courbe charge-déplacement.

La résistance à la flexion est calculée par la formule classique de la résistance des matériaux à savoir :

$$R_{tf} = \frac{3 P L}{2 b h^2} \text{ [Mpa]} \dots\dots\dots (29)$$

P, L, b et h représentent respectivement la force enregistrée au moment de la rupture, la distance entre les appuis prise égale à 100 mm, la largeur et la hauteur de l'éprouvette. Il est à signaler que cette formule tirée de la théorie des poutres donne une approche satisfaisante de la résistance à la flexion qui représente selon la norme NF EN ISO 178, la contrainte locale de la matière au niveau des fibres externes dans la section de l'éprouvette à l'aplomb de la charge. Dans le cas de l'éprouvette considérée dans cette étude, de section transversale carré avec un rapport $(h/L) = 4$, l'approximation utilisée pourrait être bonne dans la mesure où nous supposons que son élancement répond aux deux hypothèses fondamentales de la théorie des poutres, ce qui permet de négliger l'effet du cisaillement transversal.

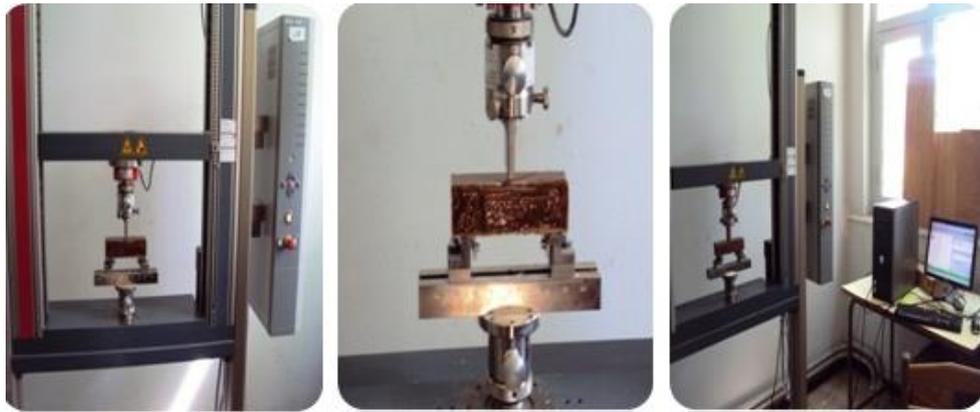


Figure 2.12. Schéma du dispositif de flexion trois points.

4.1.2. Essai de compression

Les demi-échantillons obtenus après l'essai de flexion destinés à être testés en compression. Des plaques d'acier standard permettent de régler les surfaces d'écrasement en contact avec les plateaux de la machine à 4x4 cm².

Les essais de compression ont été conduits sur une presse de compression hydraulique 4274-1972 de capacité 50 t en contrôlant la vitesse de chargement 10 mm/min (figure 2.13). Il s'agit de déterminer la contrainte de compression conduisant à l'écrasement d'une demi-échantillon de micro-béton de résine selon la norme NF P 18- 406. La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \text{ [Mpa]} \dots \dots \dots (30)$$

P et **S** représentent respectivement la charge enregistrée au moment de la rupture.



Figure 2.13. Dispositif d'essai de compression sur un béton de résine.

4.1.3. Essai de choc

Les essais de choc sur les éprouvettes utilisés ont été effectués sur une machine de choc Charpy Zwick/Roell 5113 conforme aux normes EN 10045-2, DIN 51 222, DIN 51 233, ISO 442 et ASTM D 256.

L'avantage de cette machine est l'aptitude à l'installation même dans un bureau grâce à sa petite taille et à son poids réduit. La machine offre différents pendule d'énergie : 7.5, 15 ,25 ,50 joule avec un angle de déclenchement de 160°. La longueur de pendule est de 390 mm. La machine dotée d'un jeu d'appuis et de portes éprouvette interchangeable.

Dans notre cas, l'énergie maximale de 25 joules est suffisante pour rompre ce type de matériau. L'affichage des résultats d'essai apparaît sur un afficheur direct (affichage digital). L'interface sectorielle de l'appareil permet de le raccorder à un PC. Un logiciel testXpert interactif permet un traitement facile des données déterminées lors de l'essai (Figure 2.14).

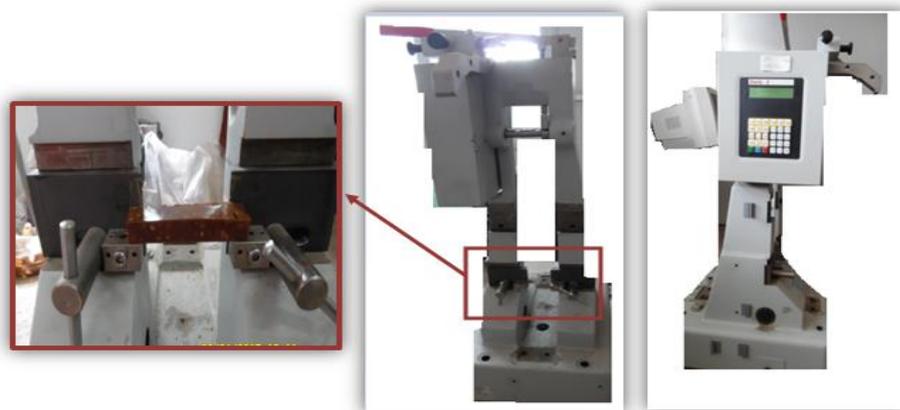


Figure 2.14. Machine d'essai Charpy avec affichage numérique.

- **Géométrie d'éprouvette**

L'éprouvette est constituée d'un barreau entaillé en son milieu. La forme d'entaille la plus fréquente est la forme en V. Les entailles sont toutes comprises dans le rapport suivant la formule :

$$0,2 \leq \frac{a}{w} \leq 0,6 \dots \dots \dots (31)$$

(type A dans la norme ASTM).

Les dimensions générales des éprouvettes sont regroupées dans le tableau 2.10 et la figure 2.15.

Tableau 2.10. Dimension de l'éprouvette de choc Charpy.

Dimension en (mm)	Eprouvette en V
Longueur (l)	90
Hauteur (B)	15
Largeur (D)	20
Hauteur éprouvette à fond d'entaille (mm)	4 - 10
Rayon à fond d'entaille	0.25
Angle de l'entaille	45°

- **Entaillage simulation par du Téflon**

Le téflon est un polymère thermostable qui possède une grande inertie chimique et un très grand pouvoir anti adhésif. Son étymologie est : (tétra – fluor éthylène + terminaison on des plastiques). Ce Téflon-PFA qui désigne le perfluoalkoaxy est facilement transformable et supporte des Température jusqu'à 250 C°.



Figure 2.15. Téflon utilisé dans l'éprouvette de choc Charpy.

- **Fabrication des éprouvettes**

La fabrication des éprouvettes adoptées se limite à la forme géométrique du moule en plastique transparent de dimensions 90x15x20 mm pour permettre d'avoir la position d'entaille dans le micro-béton de résine . Ces moules sont placés après avoir être remplis de micro-béton dans des caissettes en bois pour garder la forme géométrique dimensionnelle de l'éprouvette et éviter le dévoilement (figure 2.16).



Figure 2.16. Moule utilisé.

- **Mise en œuvre de la simulation de la fissure**

Les procédés de mise en œuvre des micro-bétons de résine nécessitent trois étapes :

- malaxage du micro-béton de résine à l'état frais.
- Remplissage du mélange dans les moules appropriés fabriqués à cet usage. (figure 2.1).
- Simulation de l'entaille à l'aide des pièces en téflon fabriquées pour cette opération et avant la polymérisation de la résine.

4.2 Essais de caractérisation d'analyses physico-chimiques.

4.2.1 Mesure de la porosité totale par intrusion de mercure (PIM).

Les modifications irréversibles de la structure poreuse du béton soumis à différentes sollicitations thermiques et mécaniques peuvent être identifiées par une analyse de l'évolution de la porosité et de la distribution de la taille des pores dans le béton. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques que la durabilité du béton par l'intermédiaire des propriétés de transferts.

Les mesures de la porosité ont été effectuées à l'aide d'un porosimètre à mercure placé dans une salle climatisée à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (Figure 2.17).

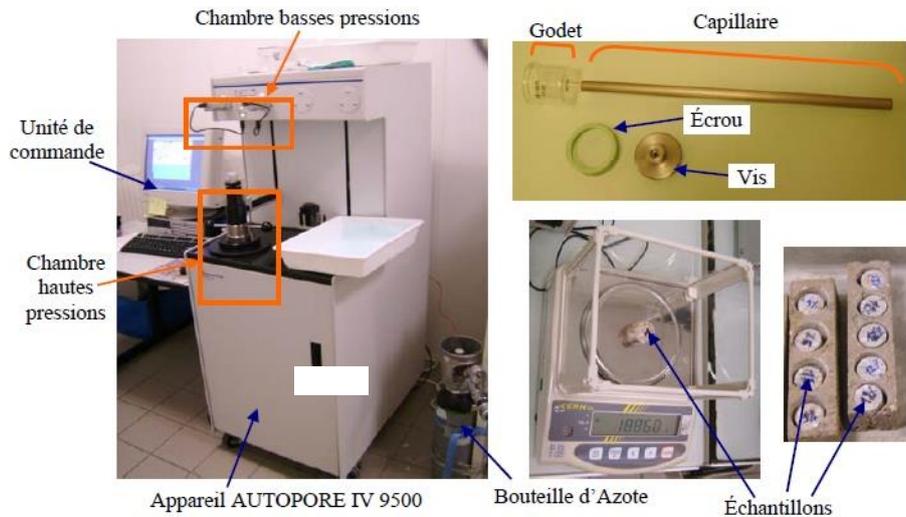


Figure 2.17. Dispositif de mesure de la porosité par intrusion de mercure.

L'instrument considéré comme complet, compact, de fonctionnement simple et commandé automatiquement par un ordinateur, permet la détermination de divers paramètres comme les tailles des pores, la distribution de la taille des pores, les surfaces spécifique, les familles des pores (les macro-pores de diamètres 50-200 nm et les mésopores de 3nm – 50nm [108]) et la densité apparente et absolue du matériau. Le prosimètre à mercure utilisé pour nos mesures, possédant deux chambres de basses pression et une autre de haute pression, permet de délivrer une pression maximum d'intrusion d'environ 414 MPa. Seuls les pores dont les diamètres sont compris entre 3,6nm et 360 μ m sont donc accessibles avec cet appareil. Ces mesures ont été effectuées au niveau de département des sciences de l'ingénieur pour l'environnement LaSIE Université de la Rochelle France.

4.2.2 Observations au microscope électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM anglais pour Scanning Electron Microscopy en) est une technique d'observation capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon (Figure 2.18). Certes le coût du MEB est comparable à celui d'un microscope optique, mais la technique apporte les informations et les avantages suivants [109]:

- pratiquement aucune préparation de l'échantillon, mais juste un prélèvement d'un échantillon cubique de quelques centimètres de volume.

- reprise ultérieure de l'examen grâce à l'observation non destructive de la méthode.
- observation du microrelief de l'échantillon à un grandissement de variable de 20 à 40000 avec un pouvoir de résolution latéral inférieure à et une profondeur de champ d'environ 1 mm pour un grandissement de 20 et $1\mu\text{m}$ pour un grandissement de 20000.
- possibilité d'une analyse chimique locale.

Les échantillons des micro-bétons de résine ont été préalablement découpés sur des échantillons cubiques de dimension 10x10x10 mm. Après le découpage on lisse la surface des échantillons à l'aide d'un métaliseur. Les faciès sont analysés dans le MEB de type TESCAN VEGA 3LMU sous une tension de l'ordre de 230 V. Cette première partie d'analyse a été réalisé au niveau de département de Chimie de l'Université de Skikda Algérie. La deuxième partie de l'analyse des échantillons pour la réalisation de certaines études microscopiques au MEB a été faite au niveau du service CMEBA au niveau des départements de Génie Civil et de Génie mécanique de l'INSA de l'Université de Rennes (France).



Figure 2.18. Microscope électronique à balayage et porte échantillons.

5. Synthèse

Afin de mettre en évidence les propriétés mécaniques et physico-chimiques des compositions des micro-bétons de résine, une caractérisation complète des constituants utilisés dans la fabrication des micro-bétons ainsi des matériaux élaborés et une mise en place de procédures expérimentales s'est avérée nécessaire. Cette caractérisation s'est faite à la base des normes française. Ce deuxième chapitre a été consacré à cet effet, dans lequel, nous avons exposé les

différents matériaux utilisés pour la formulation des suspensions de micro-béton de résine ainsi que leurs propriétés physico-chimiques. Il a été de même des méthodes de fabrication et des séquences de malaxage des différents mélanges de pâtes, mortiers de résine et micro-bétons de résine utilisés.

La résine polyester a été choisie parmi les résines commerciales disponibles sur le marché industriel local de la capacité d'incorporer et de traiter à la température ambiante, et un bon rapport entre le prix et les propriétés mécaniques.

Une étude préliminaire a été menée sur une série des formulations des mortiers de résine. Le polymère incorporé à la pâte de micro-béton est un liant (polyester) agit tel un accélérateur de durcissement et conduit aussi à une amélioration de la résistance de la matrice organique. Ces propriétés sont particulièrement intéressantes dans le cadre d'une application en préfabrication à démoulage immédiat qui nécessite d'améliorer les performances mécaniques au très jeune âge (24h). Les deux types de fibres testées dans cette étude sont des fibres de verre E, et de polypropylène (6mm–12mm).

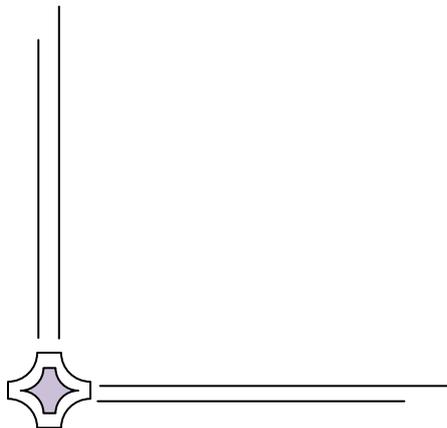
Chapitre III :

**Résultats et analyse du mortier et du micro-
béton de résine optimal**



Ce chapitre vise à optimiser la fraction massique du liant à base de polyester permettant d'obtenir des caractéristiques mécaniques et physiques optimales. Cette optimisation consiste à trouver la fraction massique de liant minimale. Elle est basée sur une caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des différentes formulations de micro-mortier de résine. La fraction massique de 35% de résine est trouver comme étant optimal pour fabriqué le micro-béton de résine. Ce micro-béton est amélioré par l'ajout des fibres de verre et de polypropylène. Une analyse statistique a été jugée nécessaire.

Ces propriétés sont aujourd'hui des critères incontournables pour valider la valorisation d'un sous matériau composite dans le domaine des matériaux de construction.



Sommaire

Cas A : Utilisation de la résine polyester 1 (grenat)

1. Mortier de résine

1.1. Influence de pourcentage des sables sur la résistance des mortiers104

2. Micro-béton de résine

2.1 Influence du rapport G/S sur les résistances mécanique de béton de résine105

2.2 Influence de taux des fibres (Aléatoire) sur le micro-béton de résine106

3. Conclusion

Cas B: Utilisation de résine polyester 2 (Violet)

1. Mortier de résine

1.1 Influence de pourcentage de résine sur la masse volumique du mortier109

1.2 Influence de pourcentage de résine polyester sur les résistances
mécaniques.....111

1.3 Courbe charge – déplacements114

1.4 Observations microscopiques électronique à balayage (MEB)117

1.5 Influence de pourcentage des sables sur les résistances mécaniques des mortiers
..... 119

1.6 Porosité de mortier de résine121

1.7 Faciès de rupture des mortiers de résine123

1.8 Observations au MEB des faciès de rupture de mortier de résine optimal124

1.9 Résistance des mortiers de résine optimal en fonction du l'âge de maturation..126

1.10 Conclusion127

2. Micro-béton de résine

2.1 Influence de rapport G/S sur la masse volumique de béton de résine129

2.2 Influence de rapport Gravier/Sable (G/S) sur les résistances mécaniques de béton
de résine130

2.3 Courbes charge-déplacements132

2.4 Faciès de rupture des micro-bétons de résine.....133

2.5 Mode de rupture134

2.6 Observation microscopique à balayage MEB de béton optimal135

2.7 Conclusion.....137

3. Béton de résine fibrée

3.1 Influence de taux de fibre de verre E (sous forme aléatoire) sur les résistances mécaniques	138
3.2 Influence du tissu des fibres sur les résistances des bétons de résine polyester..	141
3.3 Influence de la longueur de fibre polypropylène (6 mm et 12 mm) sur les résistances mécaniques de micro-béton.....	142
3.4 Porosité de micro-béton de résine fibré	144
3.5 Mode de rupture	146
3.6 Observation de MEB de micro-béton de résine fibré	148
3.7 Conclusion.....	149

4. Synthèse

Chapitre III : Résultats et analyse du mortier et du micro-béton de résine optimal

Dans ce travail on a étudié les résistances mécaniques en traction par flexion trois points et en compression et des observations microscopiques (MEB) des différents mélanges, dans le but de mettre en évidence la contribution des pourcentages de résine à l'amélioration des propriétés mécaniques de ce matériau. À cet effet, une comparaison a été réalisée pour la même classe des mélanges avec une variation sur le taux de résine constitué.

Ainsi, les formulations ont été élaborées pour chaque type de mélange granulaire. Elles se différencient essentiellement par la fraction massique du liant à base de polyester. Les fractions massiques de polymère (polyester+durcisseur) sélectionnées varient entre 25 et 100% de la masse totale du mortier de résine pour les deux cas de résine polyester (grenat et violet).

Cas A : Utilisation de la résine polyester 1 : couleur grenat

Dans cette étude expérimentale on s'est basé sur une méthode empirique se basant sur le principe du point de saturation des sables avec la résine.

Notre démarche consiste à déterminer une formule proposée en utilisant deux types de sable, le premier est fin et le second est moyen en partie égale (50% sable fin, 50% sable moyen). Le but de l'utilisation de deux types de sable est surtout d'améliorer le squelette granulaire.

Pour obtenir la saturation du béton on a entamé la variation de taux de résine sur le mortier.

Le pourcentage de résine est choisi par rapport au poids du sable.

Théoriquement le taux de résine suffisant pour saturer le béton est de 13% (pourcentage massique) selon les données bibliographiques. Dans notre cas 13% comme taux de résine est jugé insuffisant car on observe une non saturation du sable dont une grande partie n'a pas été mouillée. Nous avons alors procédé à une élévation du taux jusqu'à 25%.

Cette expérience a encore montré un non saturation totale mais s'est révélé un bon indicateur référence pour arriver à l'optimisation. Nous avons alors procédé par la suite avec un pas de 5%. Avec 30% de résine on obtient une pâte liquide indiquant une sursaturation. Nous avons alors opté pour le milieu entre 25% et 30% et nous avons adopté un taux moyen entre ces deux expérimentations qui est de 27%.

1. Mortier de résine

1.1. Influence de pourcentage des sables sur la résistance des mortiers

Le pourcentage des sables influe sur la nature du mortier d'étude. Ceci est déjà observé de façon qualitative lors de l'écrasement des éprouvettes en flexion et des demi-éprouvettes en compression. Comme il apparaît, les valeurs mesurées montrent une dispersion caractéristique des matériaux granulaires hétérogènes. Celle-ci est toutefois inférieure à celle généralement observée sur les bétons ordinaires ou sur les mortiers. L'ensemble des résultats obtenus des résistances mécaniques des 3 mélanges de mortiers sont regroupés dans le tableau 3.1 et illustrés par la figure 3.1. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

M I : Mortier I (40% sable fin et 60% sable moyen).

M II : Mortier II (50% sable fin et 50% sable moyen).

M III : Mortier III (60% sable fin et 40% sable moyen).

Tableau 3.1. Résistances mécaniques traction par flexion et compression des mortiers.

Résistance MPa	Mélange I	Mélange II	Mélange III
Flexion 3 pts	20±(1,08)	19(±0,19)	23±(1,4)
Compression	5±(3,72)	58±(2,7)	70±(2,3)

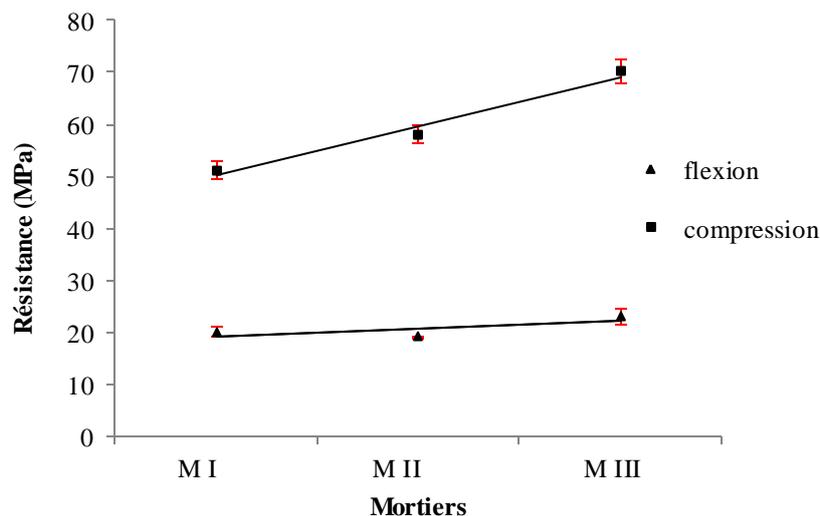


Figure 3.1. Influence de pourcentage des sables sur la résistance à la traction par flexion et à la compression des mortiers de résine.

Dans notre cas, la figure 3.1 montre clairement que plus le pourcentage du taux de sable fin augmente et plus les résistances en flexion et en compression des mélanges du mortier de résine augmentent. Ce constat a été observé sur tous les mélanges du mortier.

Cependant en ce qui concerne la flexion trois points on note plutôt une légère diminution de la résistance du mortier II c'est-à-dire avec 50% de sable fin. Cette chute est certainement la conséquence d'un nombre limité d'essais ainsi que de l'effet de la dispersion observée dans les mesures des caractéristiques des matériaux granulaires. Elle ne peut en aucun cas caractériser un comportement. Le mortier III présente la meilleure résistance à la traction et la compression (II est composé du 60% de sable fin et de 40% sable moyen) à cause probablement de la bonne granulométrie de l'étendue granulaire du sable de dune fin et moyen. Les résistances augmentent en fonction de l'augmentation du taux de sable fin.

2. Micro-béton de résine

2.1. Influence du rapport G/S sur les résistances mécanique de béton de résine

Les résultats obtenus de la résistance à la compression et à la traction par flexion des micro-bétons de résine sont regroupés dans le tableau 3.2 et sont illustrés par la figure 3.2. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

B I: Béton (G/S=0.5).

BII: Béton (G/S=1).

BIII: Béton (G/S=1.5).

BIV: Béton (G/S=2).

Tableau 3.2. Résistances mécaniques des micro-bétons de résine.

Résistance	B I	B II	B III	B IV
MPa	G/S=0,5	G/S=1	G/S=1,5	G/S=2
Flexion 3 pts	20±(1,82)	27±(1,68)	18±(0,89)	19±(1,6)
Compression	84±(0,96)	118±(1,4)	79±(3,42)	66±(1,76)

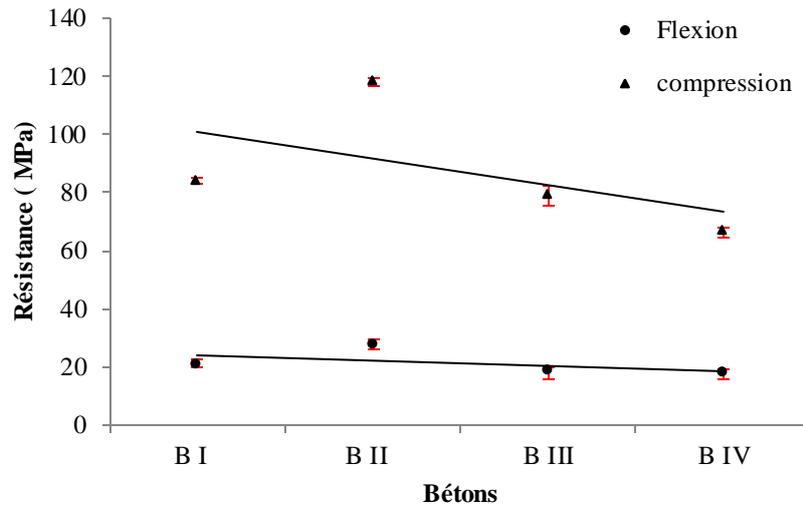


Figure 3.2. Influence du rapport G/S sur la résistance à la flexion et à la compression du béton de résine.

D’après la figure 3.2. Il apparaît ainsi que la résistance à la traction par flexion diminue lorsque le rapport G/S augmente. Lorsque le rapport G/S est élevé l’adhérence entre la résine et les granulats devient mauvaise ce qui confère au manque de la quantité de la pâte liante entre les granulats. On peut aussi noter que les meilleures résistances à la traction par flexion et à la compression sont obtenues pour le rapport G/S =1 par rapport aux autres bétons de résine qu’il assure un bon arrangement granulaire.

2.2. Influence de taux des fibres (Aléatoire) sur la résistance de micro-béton de résine

Les fibres sont ajoutées au béton essentiellement pour réduire la fragilité de béton de résine.

Les résultats obtenus de la résistance à la compression et à la traction par flexion sur les bétons de résine renforcés avec des fibres de verres E sont regroupés dans le tableau 3.3 et sont illustrés par la figure 3.3. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

Tableau 3.3. Résistances mécaniques des bétons à base de fibres de verre E.

Vf (%)	0%	1%	2%	3%	4%
Flexion 3 pts	27,5±(1,68)	27,5±(1,8)	29±(1,27)	31±(1,8)	33±(0,37)
compression	118±(1,4)	121±(1,6)	127±(2,1)	133±(1,9)	144±(1,5)

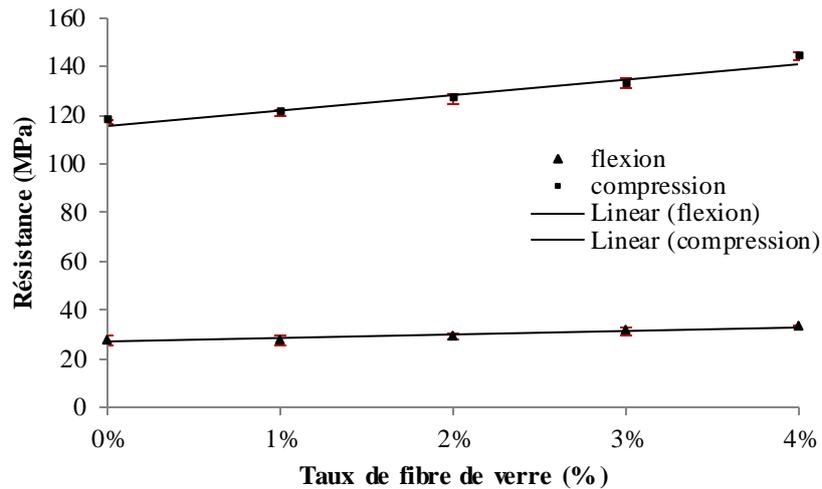


Figure 3.3. Influence de taux des fibres sur la résistance à la flexion et à la compression des bétons de résine polyester.

L'augmentation de taux des fibres de verre E augmente la résistance mécanique des micro-bétons de résine pour un taux de 4% d'ajout, au-delà duquel, l'incorporation d'addition des fibres de verre a un effet négatif sur la maniabilité du micro-béton. La résistance mécanique en flexion et en compression augmente avec l'augmentation du pourcentage massique des fibres.

On observe une légère augmentation de la résistance à la traction par flexion par rapport à l'augmentation rapide de la résistance à la compression.

Les fibres influencent de façon positive la ductilité de béton de résine et améliorent ses performances.

3. Conclusion

Les essais décrits dans le cas « A » donnent des informations intéressantes sur les comportements de micro-béton de résine polyester. A cet effet l'utilisation des essais mécaniques de flexion et de compression s'avère la meilleure investigation pour contrôler et mesurer la résistance maximale à la traction par flexion et à la compression.

Dans cette étude on montre que de nombreux paramètres influencent la résistance. Ainsi la bonne granulométrie de l'étendue granulaire 60% de sable fin et 40% de sable moyen abouti à un béton de bonne compacité et de bonne résistance avec l'augmentation de pourcentage de sable fin.

Pour améliorer davantage les caractéristiques mécaniques (la résistance à la traction par flexion et la ductilité du béton de résine) nous avons ajouté des fibres de verre E.

L'incorporation des fibres de verre dans la composition des bétons de résine avec une variation du taux de fibres de 1% montre que le taux des fibres influe de façon positive sur les résistances mécaniques.

La relation entre l'augmentation de la résistance et le taux des fibres est une relation proportionnelle qui fera faire l'objet d'une modélisation linéaire (régression linéaire sur les points expérimentaux) dans le chapitre suivant.

Cas B: Utilisation de résine polyester 2 : couleur Violet

Différentes formulations élaborées à partir des études basées sur la variation des différents taux de résine polyester ont été élaborées et sont résumées dans les points suivants :

- Pour le taux de 10% à 25% la quantité de résine utilisée est insuffisante pour saturer la quantité des sables.
- Pour le taux de 30% cette quantité donne une pâte un peu dure qui n'est pas maniable et qui est difficile à mouler.
- Le taux de 35% de résine polyester donne une quantité de résine suffisante pour obtenir une pâte maniable facile à mouler.
- Pour un taux supérieur à 35% de résine on obtient un excès de résine et la pâte devient très mouillée et fluide.

Les caractéristiques mécaniques des différentes formulations de micro-béton de résine ont été évaluées afin d'obtenir la formulation alliant au maximum performances mécaniques et coût. Les mêmes formulations optimisées vis-à-vis des propriétés physiques seront testées pour une optimisation sur la base des résistances mécaniques.

1. Mortier de résine

Des mortiers de résine ont été confectionnés afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques des différents taux du polymère par des mesures des masses volumiques et des résistances mécaniques en compression et en flexion trois points. Le principe des essais consiste à définir l'influence d'augmentation du pourcentage du polyester sur ces propriétés. Six types des mortiers ont été fabriqués dans des conditions identiques.

1.1. Influence de pourcentage de résine sur la masse volumique du mortier

L'évolution de la masse volumique apparente des différentes éprouvettes (4x4x16) cm fabriquées a été déterminée expérimentalement grâce à la formule suivante :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V} \text{ g/cm}^3.$$

Les valeurs de la masse volumique des mortiers de résine obtenues pour chaque fraction massique de polymère (30%, 35%, 40%, 45%, 50% et 100%) se caractérisent par de faibles variabilités bien qu'une diminution est observée quand le pourcentage de résine augmente. Les figures 3.4 et 3.5 présentent la variation de la masse volumique de mortier de résine (sable fin, sable moyen) en fonction de pourcentage du polymère.

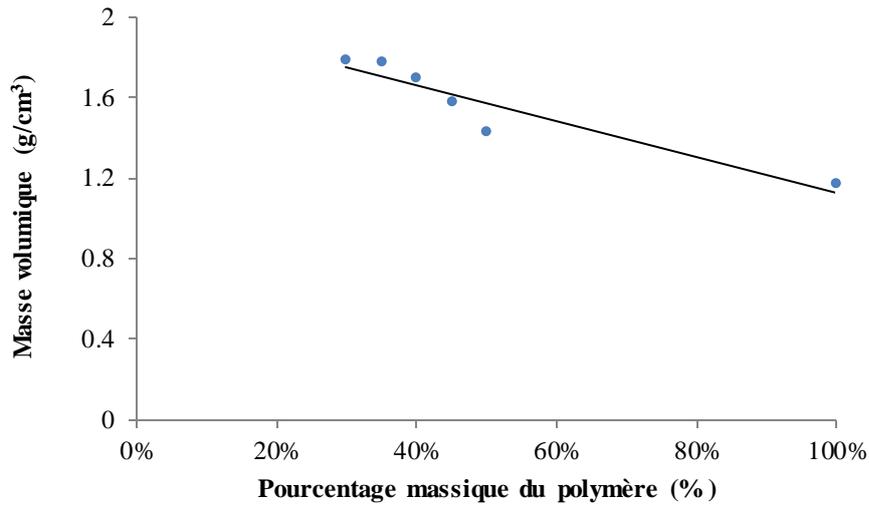


Figure 3.4. Evolution de la masse volumique du mortier de résine en fonction du pourcentage du polyester avec sable fin.

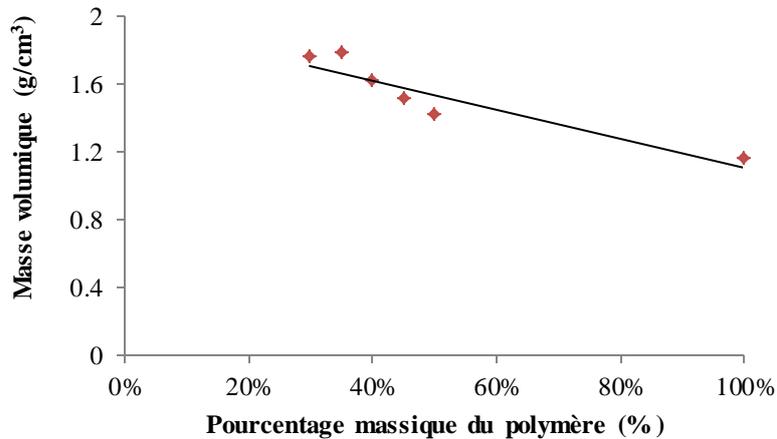


Figure 3.5. Evolution de la masse volumique du mortier de résine en fonction du pourcentage du polyester avec sable moyen.

La figure 3.6 décrit l'évolution de la valeur moyenne de la masse volumique en fonction de la fraction massique du polymère. ρ diminue proportionnellement à l'augmentation de pourcentage de résine polyester. Un tel phénomène a été déjà observé dans une autre étude traitant un mortier de résine (Nguyen Gia., [6]).

Les masses volumiques des deux mortiers de résine (résine + sable fin) et (résine + sable moyen) deviennent assez proches pour la fraction massique de polymère égale à 35% (Figure 3.6).

Pour le mélange de 35% la consistance de la pâte est jugée acceptable.

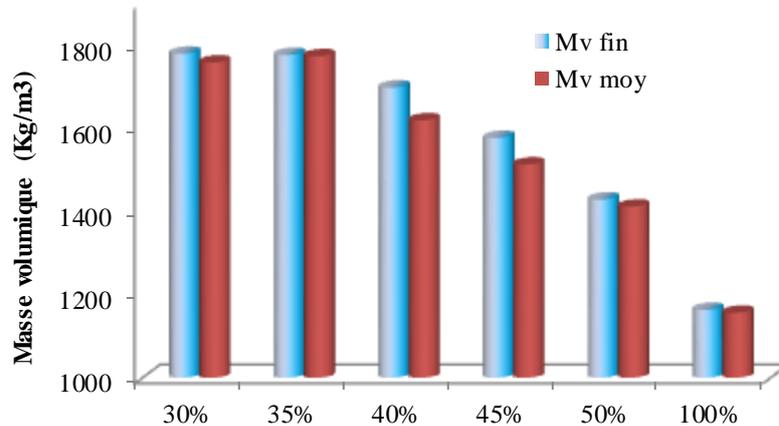


Figure 3.6. Histogramme de la masse volumique de mortier de résine.

1.2. Influence de pourcentage de résine polyester sur les résistances mécaniques

Afin d'étudier l'effet de pourcentage de résine polyester sur les performances mécaniques de mortier de résine, six mélanges différents de 30%, 35%, 40%, 45%, 50% et 100% par rapport à la masse total du sable ont été formulées. Chaque essai de flexion trois points et de compression a été répété 3 fois. Pour chaque condition de sollicitation, six échantillons ont été testés en compression. Les caractéristiques mécaniques des différentes formulations de mortier de résine ont été évaluées afin d'obtenir la formulation alliant au maximum performances mécaniques et coût. L'ensemble des résultats obtenus des résistances mécaniques des mélanges de mortiers avec sable fin et moyen (MI, MII, MIII, MIV, M V, MVI) sont regroupées dans le tableau 3.4 et sont illustrés par les figures 3.7 et 3.8. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

Tableau 3.4. Résistances mécaniques traction par flexion et compression des mortiers.

Résine %	sables 100%	Résistance Traction par Flexion	Résistance Compression
M I 30%	S. fin	19±(0,94)	59±(0,62)
	S.moy	18±(0,52)	55±(0,47)
M II 35%	S. fin	22±(0,98)	64±(0,34)
	S.moy	20±(0,80)	62±(0,42)
M III 40%	S. fin	24±(1,09)	68±(1,65)
	S.moy	23±(2,12)	65±(0,20)
M IV 45%	S. fin	25±(0,25)	72±(0,72)
	S.moy	24±(1,59)	70±(0,95)
M V 50%	S. fin	28±(1,08)	75±(0,62)
	S.moy	27±(0,72)	76±(0,65)
M VI 100%	S. fin	45±(0,63)	79±(1,8)
	S.moy	43±(1,60)	80±(0,95)

S. fin : sable fin

S.moy : sable moyen

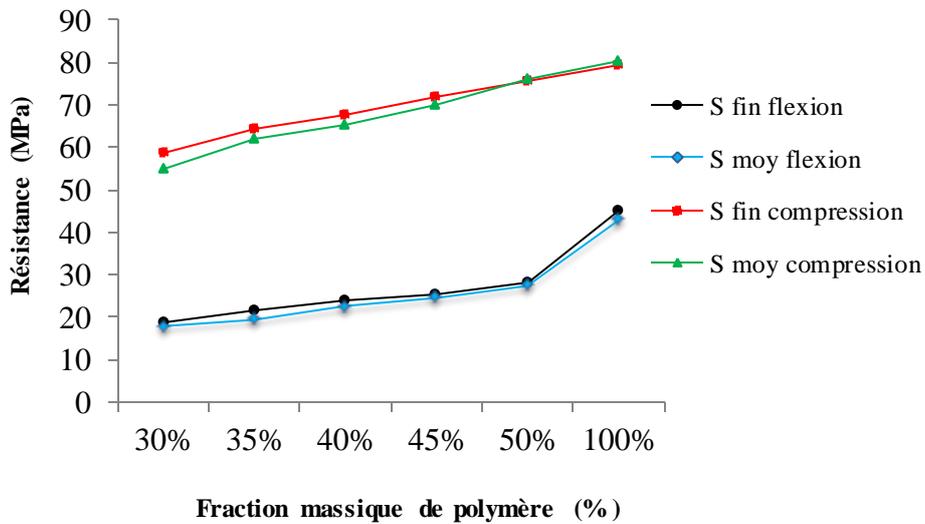


Figure 3.7. Influence de pourcentage de résine sur les résistances mécaniques traction par flexion et compression.

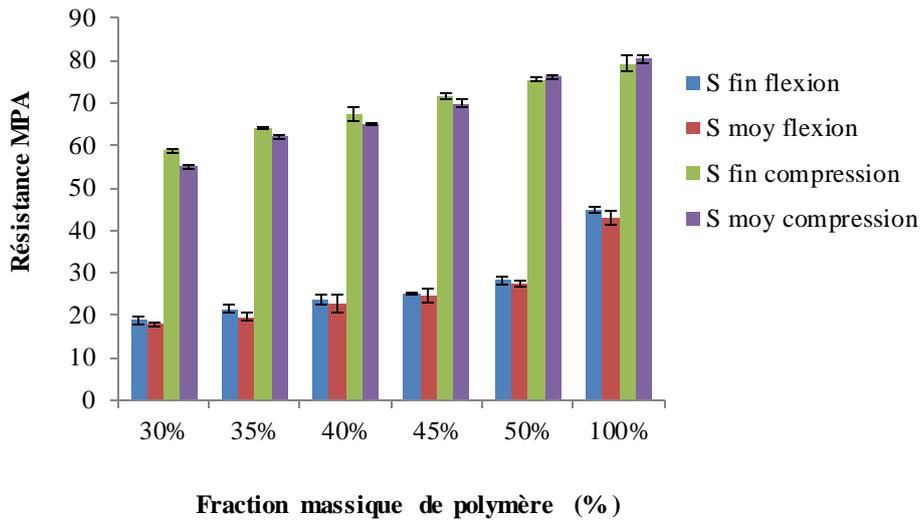


Figure 3.8. Histogramme des résistances.

Pour étudier l'effet granulométrique sur la résistance à la compression et à la traction par flexion du mortier de résine, les mêmes formulations de mortier de résine ont été étudiées en utilisant le mélange granulaire (résine polyester+sable fin) et (résine polyester+sable moyen).

On observe une augmentation de la résistance à la compression et à la traction par flexion trois points en fonction de l'augmentation de la fraction massique du polymère (Figure 3.7). Pour des taux inférieurs à 40% de polymère, la résistance à la traction par flexion trois points montre une vitesse d'augmentation lente. (Nóvoa et al., [7]) ont trouvé que la résistance à la flexion du mortier de polymère est égale à 38 MPa avec 20% de résine d'époxy.

En effet, la rigidité et la résistance en flexion augmentent en augmentant la fraction massique du polymère. Un tel comportement a été observé par (Vipulanandran et al., [61]-[62]) pour un béton à base d'époxyde et pour un béton à base de polyester. La valeur maximale de la contrainte en flexion est égale à environ 26 MPa pour un béton de résine 13% du polymère.

Les résistances à la compression montre la même allure que celles des résistances à la flexion en fonction de la variation de taux de résine

Le mortier de résine est plus résistant en flexion que le béton hydraulique dont la résistance en flexion est de l'ordre de 2 à 8 MPa.

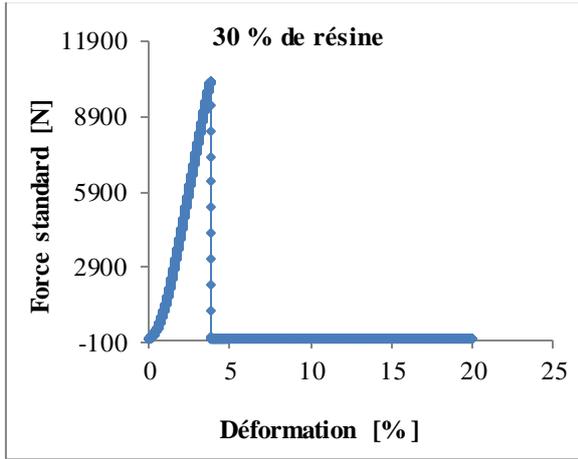
Les valeurs maximales des résistances à la compression varient entre 55 et 80 MPa pour de fractions massiques de liant variant de 30% à 100%. Ces valeurs sont supérieures à

celles obtenues par (Novoa et al., [7]) qui sont de l'ordre de $\sigma_c = 68$ MPa pour une fraction massique de liant de 20% de résine. Les résultats de la masse volumique et la résistance en traction par flexion trois points et en compression obtenue sur les différents formulations du mortier de résine polyester optimisé montrent que le mélange de 35% présente un mortier de résine économique et compact et dense avec des propriétés mécaniques acceptables. (Vipulanandran et al., [61]) ont étudié les valeurs des propriétés mécaniques des résistances et du module d'Young qui augmentent en fonction de la quantité de résine polyester et époxyde introduite jusqu'à atteindre un maximum où elles commencent alors soit à décroître, soit à se stabiliser.

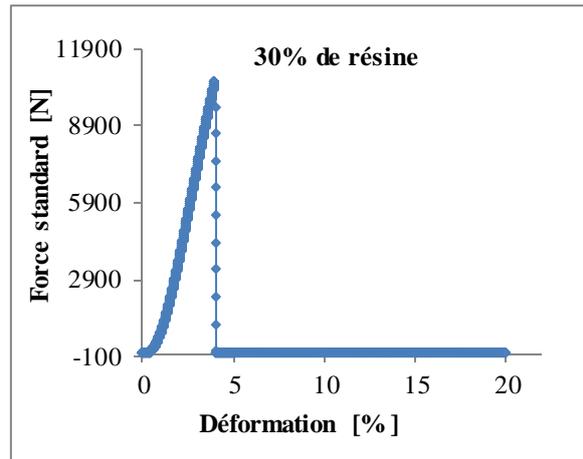
1.3. Courbe charge – déplacement

Les essais ont été effectués sur les mortiers de résine avec sable fin et les mortiers de résine avec sable moyen. Les pourcentages massiques de résine expérimentés sont : 30%, 35%, 40%, de 45% et de 50%. Les caractéristiques mécaniques ont été mesurées sur une machine universelle (Zwick/Roell) de 20 KN de capacité. Cependant la caractérisation des mortiers avec 100% de résine en traction par flexion 3 points a été réalisée sur une machine manuelle de 50 KN de capacité car les forces de la rupture dépassent la capacité de la machine universelle de 20 KN.

Les figures (3.9 – 3.10 – 3.11 – 3.12 et 3.13) montrent un exemple de courbe charge-déplacement obtenus sur des éprouvettes en mortiers de résine pour différents pourcentages de la résine et des sables.

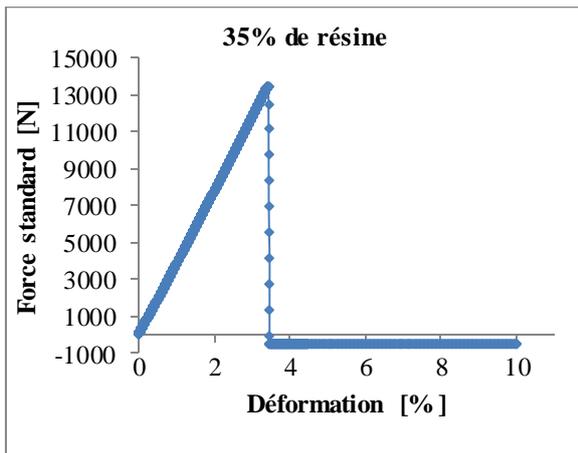


(a) sable fin

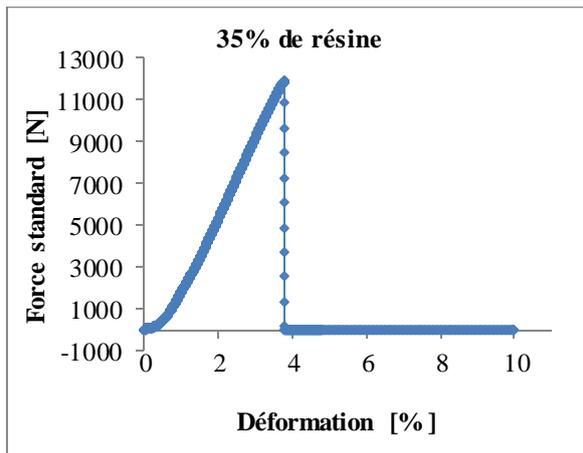


(b) sable moyen

Figure 3.9. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 30% de résine.

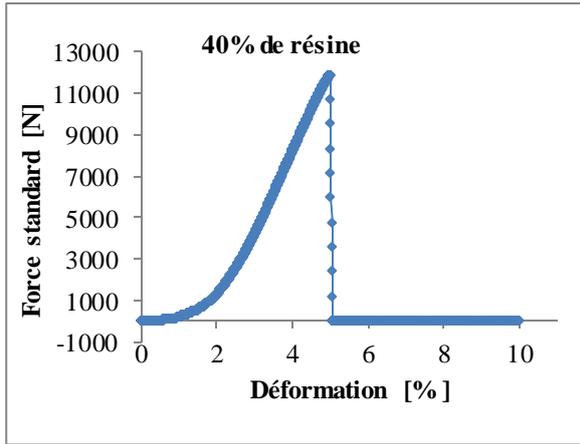


(a) sable fin

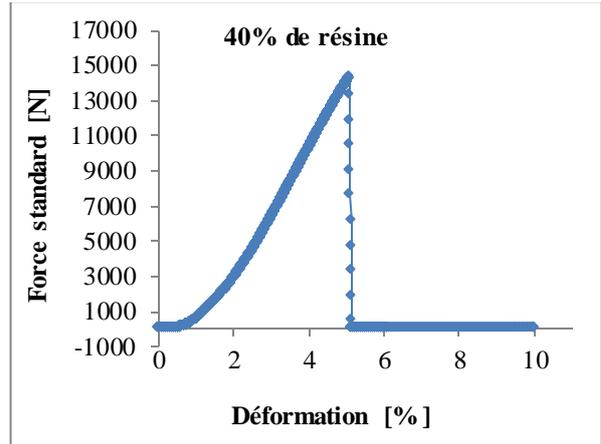


(b) sable moyen

Figure 3.10. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 35% de résine.

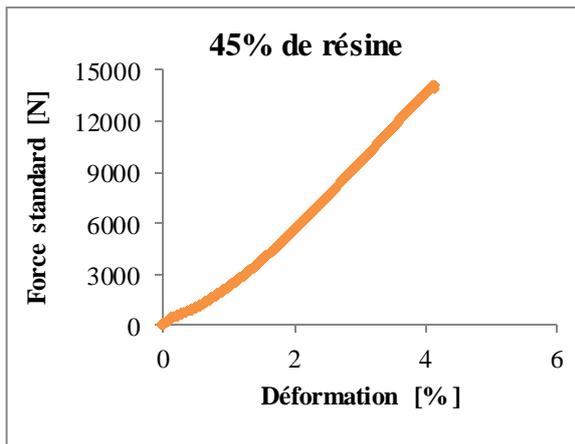


(a) sable fin

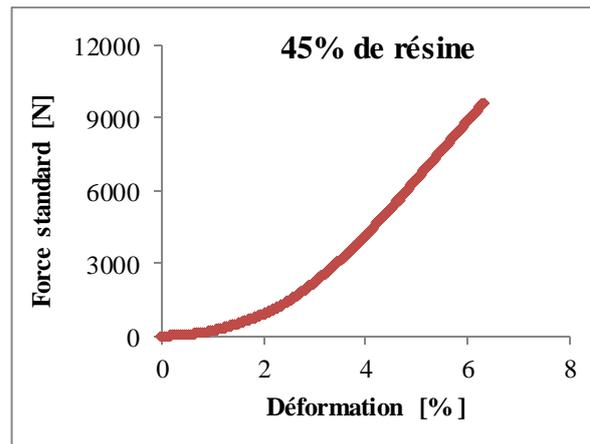


(b) Sable moyen

Figure 3.11. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 40% de résine.



(a) sable fin



(b) sable moyen

Figure 3.12. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contient 45% de résine.

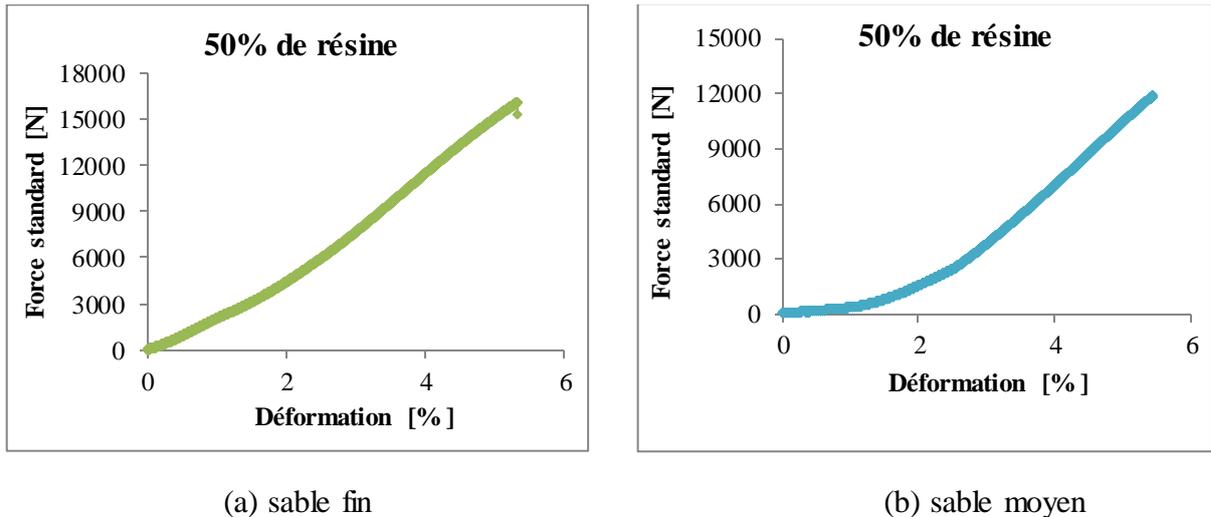


Figure 3.13. Evolution de la force en fonction du déplacement pour le mortier en sable fin et moyen contenant 50% de résine

Les figures 3.9 – 3.10 et 3.11 représentent les courbes type de l'évolution de la charge en fonction de la déformation sur les éprouvettes des mortiers de résine en sable fin et en sable. Cette évolution est linéaire traduisant le comportement élastique du matériau suivie de la chute brutale après le maximum de charge caractérisant ainsi la rupture de l'éprouvette.

Les figures 3.12 – 3.13 représentent l'ensemble des courbes charge-déplacement des essais effectués du mortier contenant 45%, 50% et 100% de résine.

La rupture de ces matériaux est soudaine, franche accompagnée d'un bruit montrant le caractère fragile de ces matériaux.

1.4. Observations microscopiques électronique à balayage (MEB)

Des observations au MEB ont été effectuées sur les différentes formulations de mortier de résine sur des éprouvettes saines. Ces observations sont présentées sur les figures 3.14 – 3.15.

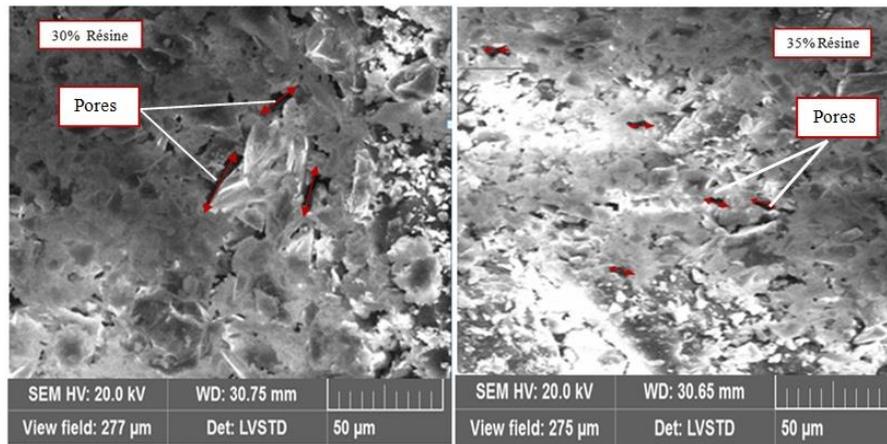


Figure 3.14. Micrographes MEB des mortiers de résine pour 30%, 35% du polymère (agrandies 1000 x).

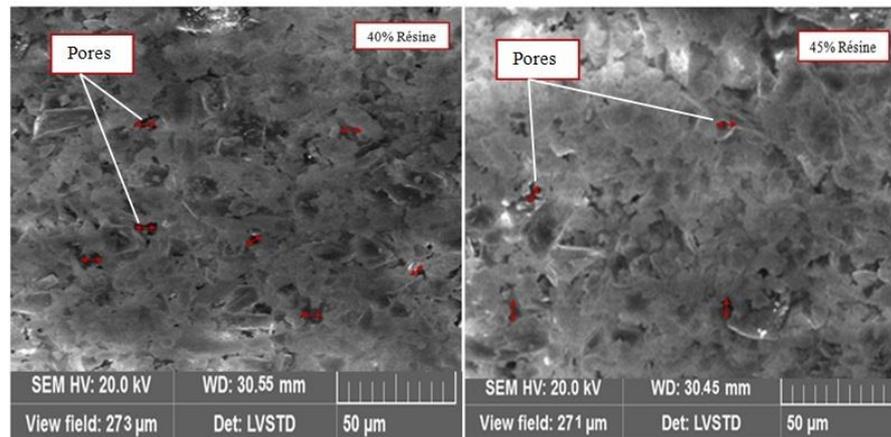


Figure 3.15. Micrographes MEB des mortiers de résine pour 40% et 45% du polymère (agrandies 1000 x).

L'observation microscopiques au MEB confirme que l'augmentation de pourcentage du polymère influe sur la distribution des pores à l'intérieure du mortier de résine. Les vides entre les granulats et la matrice sont réduits clairement en augmentant la quantité du polyester (Figure 3.14– 3.15). Les diamètres des pores deviennent plus fins et diminuent en augmentant la fraction massique du liant. La porosité devient distribuée d'une manière homogène. En réduisant la quantité de polymère, le risque de la création des vides et le mauvais enrobage des granulats augmentent. Ce phénomène est principalement dû au manque de la quantité de polymère nécessaire pour envelopper les renforts et remplir les vides dans le squelette granulaire. La saturation du béton de résine avec la quantité

nécessaire du polymère permet un meilleur enrobage des granulats et conduit à combler complètement les vides entre les granulats par le liant liquide.

(Haidar, [74]) montre dans une étude que l'observation au microscope électronique à balayage confirme les résultats obtenus par le porosimètre à intrusion de mercure qui mettent en évidence une diminution de la porosité et du diamètre des pores, avec l'augmentation de la fraction massique du liant polymérique.

1.5. Influence de pourcentage des sables sur les résistances mécaniques des mortiers

Plusieurs essais ont été effectués pour déterminer les caractéristiques mécaniques des mortiers de résine. Afin d'améliorer le squelette granulaire de nos mortiers on a varié les taux de sable fin et de sable moyen. L'influence de taux des sables est constatée lors de chargement des éprouvettes en traction par flexion trois points et en compression. Les résultats obtenus pour les différents mélanges sont regroupés dans le tableau 3.5 et présentés sur la figure 3.16. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

Tableau 3.5. Résistances mécaniques des mortiers de résine.

	Flexion 3 pts(MPa)	Compression (MPa)
M I 10% S fin90% S moyen	18,70±(0,28)	61,97±(0,67)
M II 20% S fin80% S moyen	19,19±(2,47)	62,32±(0,06)
M III 30% S fin70% S moyen	19,69±(0,22)	62,81±(0,28)
M IV 40% S fin60% S moyen	19,93±(0,08)	63,17±(0,62)
M V 50% S fin50% S moyen	20,64±(0,87)	63,55±(0,16)
M VI 60% S fin40% S moyen	20,96±(0,15)	63,90±(0,08)
M V II 70% S fin30% S moyen	21,25±(1,31)	64,12±(0,33)
M VIII 80% S fin20% S moyen	21,97±(0,14)	64,79±(0,95)
M IX 90% S fin10% S moyen	21,39±(1,13)	64,33±(0,13)

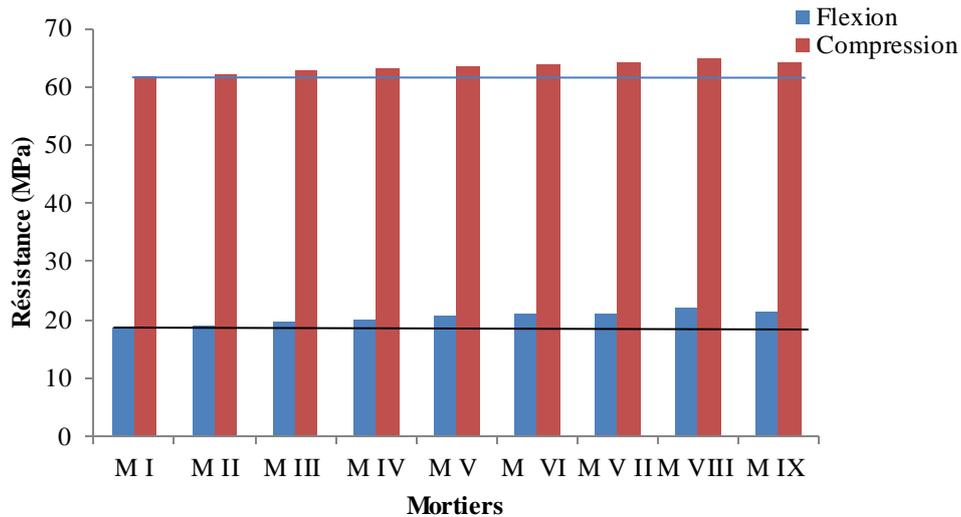


Figure 3.16. Variation de la contrainte en traction par flexion et en compression en fonction de taux des sables des mortiers de résine.

La figure 3.16 illustre les résistances en traction par flexion et en compression du mortier de résine après des essais mécaniques.

La propriété étudiée montre une vitesse d'augmentation lente en fonction de l'augmentation du pourcentage de sable fin. Ceci est expliqué par la continuation de la réticulation de la résine avec les grains du sable fin qui diminué la propagation des fissures.

Si l'on compare le comportement des mortiers classiques avec notre mortier de résine optimal, on constate que les résistances en flexion du béton de résine dépassent de loin celles du béton hydraulique (4 à 5 fois plus grandes, 18,70 à 21,97 MPa). Ceci peut être expliqué par le volume du liant dans le mortier de résine qui est nettement supérieur à celui utilisé pour la fabrication du mortier classique en plus de la meilleure adhésion des polymères avec les substrats par comparaison aux liants cimentaires.

L'utilisation des deux types de sables améliore les résistances mécaniques par effet de remplissage. L'augmentation du taux de sable fin entraîne une amélioration des résistances mécaniques à tous les mélanges (Figure 3.16). Ce phénomène est dû à l'effet du remplissage qui améliore la compacité dont le but essentielle d'obtention le moins de vides possibles (meilleure compacité) dans un mélange de deux types de sable et un liant de 35 % de résine polyester.

1.6. Porosité de mortier de résine

La porosité totale a été mesurée par le porosimètre par intrusion de mercure (PIM) pour la formulation optimal de mortier de résine. Le volume de pore est calculé en déterminant le volume de mercure restant dans la tige du pénétromètre. À mesure que la pression augmente, le mercure entre dans les pores témoin, évacuant la tige. L'intrusion de différents pores de taille se produit à différentes pressions. La pression plus grande, le plus petit est le diamètre de pore dans lequel le mercure peut être obligatoire ([108]-[110]).

La figure 3.17 présente la porosité totale mesurée par intrusion de mercure. Une mesure plus précise de la distribution des tailles est obtenue en choisissant un mode logarithmique à la place du mode linéaire. Cette figure montre les courbes de distribution différentielle des diamètres des pores du mortier de résine polyester à 35% du polymère.

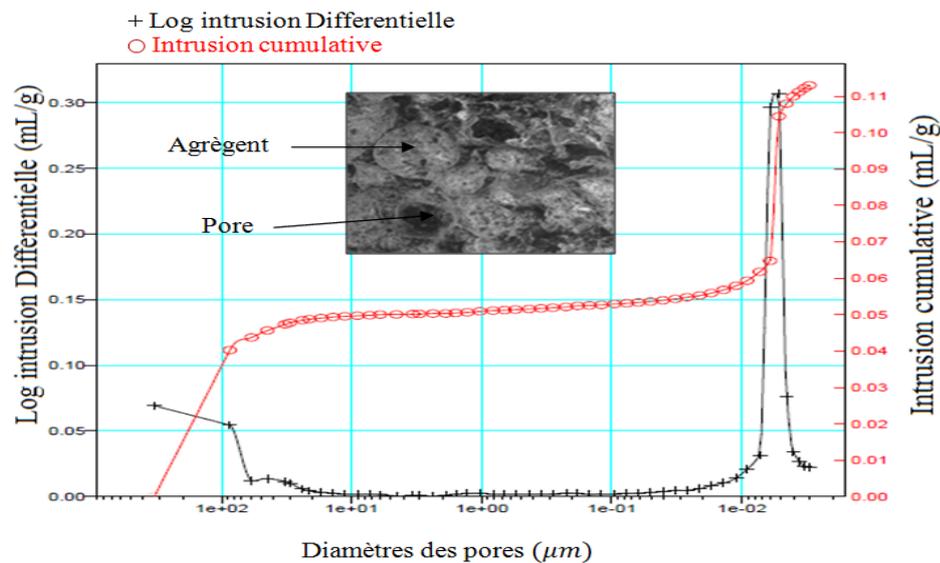


Figure 3.17. Distribution de la taille des pores des mortiers de résine obtenue par PIM pour 35% de résine.

Le mortier de résine conçu a une porosité totale de 21,53%, Ces courbes soulignent l'existence d'une population de pores capillaires détectable clairement pour les fractions massiques de polymère égale à 35% de résine. Le diamètre de pore le plus distribué est de 60 µm environ. En augmentant la fraction de polymère, les diamètres des pores deviennent plus distribués et le volume de mercure injecté diminue.

(José T. San-Jose et al., [48]) montre que le béton de polymère orthophtalic conçu a une porosité totale de 4.8%, avec une densité en absolue et une densité apparente

respectivement de 2390 kg/m^3 et de 2270 kg/m^3 , respectivement, et un secteur moyen de pore de $3484 \text{ m}^2/\text{g}$.

Ces valeurs confirment que le mortier de résine est un matériau plus compact que le béton traditionnel. La figure 3.18 présente des micro-photos observées par MEB. Dans les deux vues on observe une couche plus mince de résine (enrobage des agrégats). Les formes irrégulières des agrégats, améliorent leur effet d'ancrage en matrice de résine. La figure 3.19 présente l'analyse semi-quantitative du contact résine-agrégat obtenue par l'analyse élémentaire (EDX) du mortier de résine. La prédominance des deux éléments **C** et **O** correspondent à la présence d'orthophtalic de la résine polyester. Le composant **Ca** mentionne uniquement la calcite. Le composant **Si** semble être dû à la présence des agrégats de silice.

La microstructure du mortier de résine présentée confirme le fait d'obtenir un matériau de construction durable et plus résistant. La continuité de la microstructure et la nature du liant organique de mortier de polymère facilitent la protection contre les conditions atmosphériques, contre la corrosion et contre les attaques de produits chimiques. Le béton de résine orthophtalic, présente une interface compacte (la couche de résine enveloppant les agrégats est plus grande). En d'autres termes, ce béton de résine devrait présenter une continuité élevée pour transférer les charges, figure 3.18.

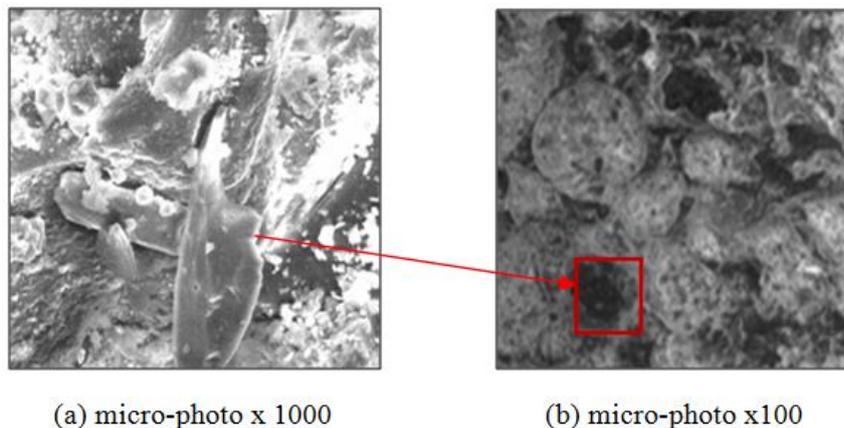


Figure 3.18. Micro-photo de mortier de résine polyester.

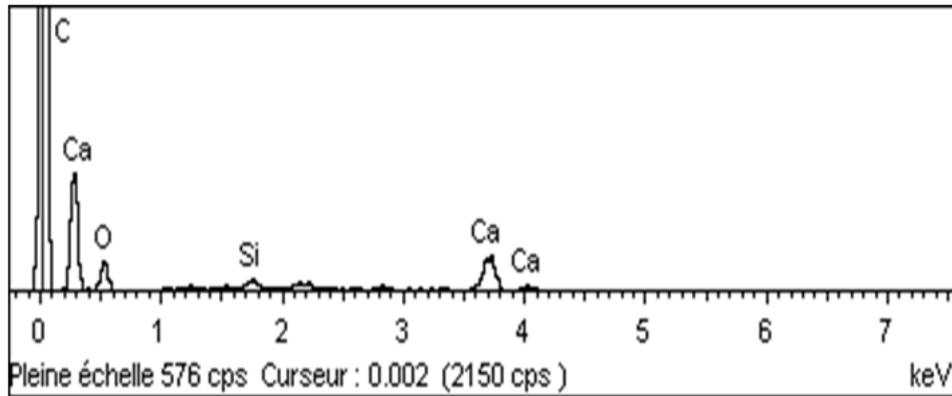


Figure 3.19. EDX de mortier de polymère.

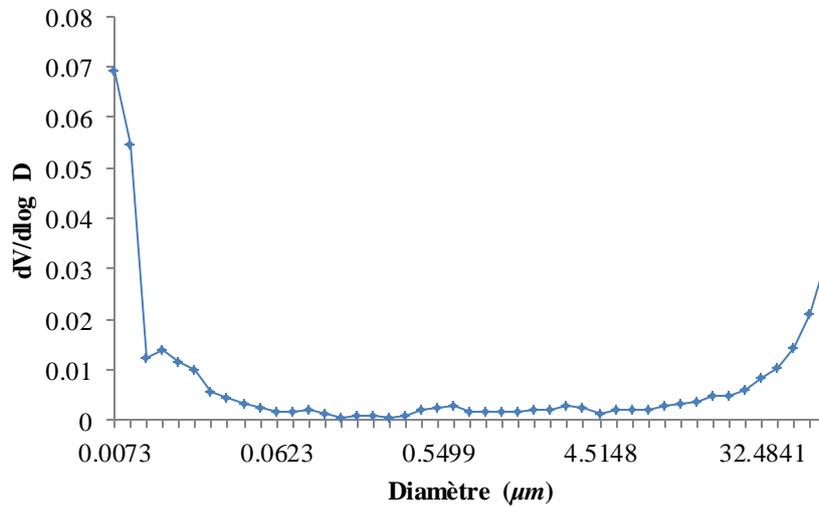


Figure 3.20. Distribution des pores de mortier de résine optimal.

On remarque que l'utilisation d'un mélange avec des grains fins (80% sable fin, 20% sable moyen et 35% de résine polyester) conduit à un mortier de résine moins poreux pour des diamètres des pores plus distribués inférieurs à 4,514 µm (Figure 3.20).

1.7. Faciès de rupture des mortiers de résine

Les photos des figures 3.21 et 3.22 montrent des illustrations du mode de rupture des éprouvettes respectivement en flexion et en compression.



Figure 3.21. Mode de rupture des éprouvettes en flexion.



Figure 3.22. Mode de rupture des éprouvettes en compression.

Pour les différents mortiers de résine élaborés, Il à été remarqué que la propagation de la fissuration en flexion trois points se fait au niveau de l'appui central avec une rupture soudaine accompagnée du bruit de la cassure. Les deux morceaux de l'éprouvette rompue sont projetés hors du dispositif. C'est une rupture fragile.

Dans le cas de la compression, On assiste beaucoup plus à des craquelures éparpillées un peu partout dans le corps de la demi-éprouvette. Ce mécanisme semble être le même pour les différents mortiers de résine fabriqués et il est différent des fissurations longitudinales généralement observées dans les bétons traditionnels et dans les mortiers cimentaires.

1.8. Observations au MEB des faciès de rupture de mortier de résine optimal

La figure 3.23 représente un échantillon de mortier de résine optimal avant la rupture et montre le contact résine granulat. Il est clair que l'adhérence est très correcte (pas de microfissures).



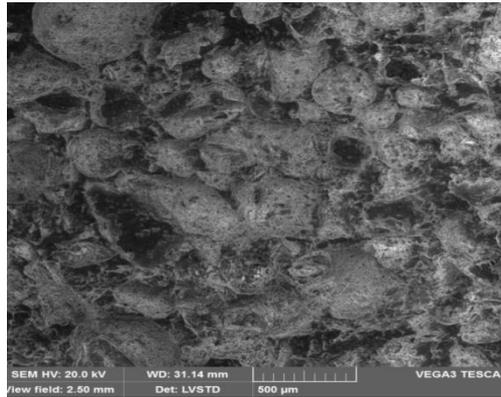


Figure 3.23. Micrographie MEB de mortier de résine optimal (80% sable fin et 20% sable moyen avec 35% de résine) agrandies 100x.

Les faciès de rupture des demi-éprouvettes obtenues lors des essais de flexion trois points et de compression sur le mortier de résine sont observés au MEB et sont présentés dans les figures (3.24, 3.25).

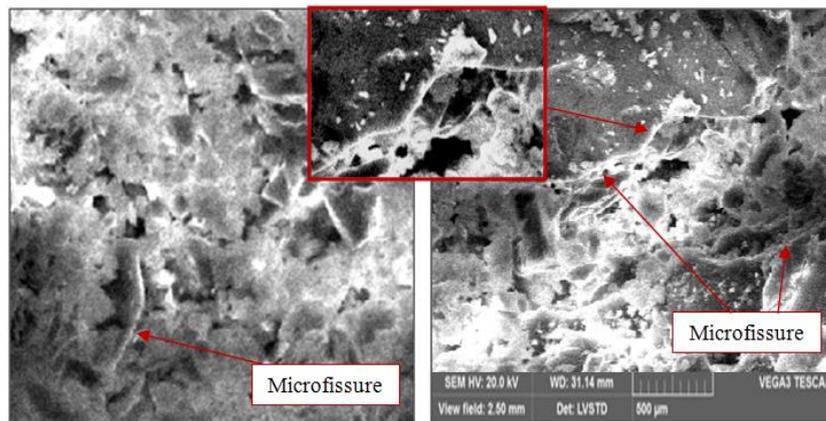


Figure 3.24. Observation des microfissures (MEB) des faciès de rupture à la traction par flexion 3 pts (agrandies 1000X).

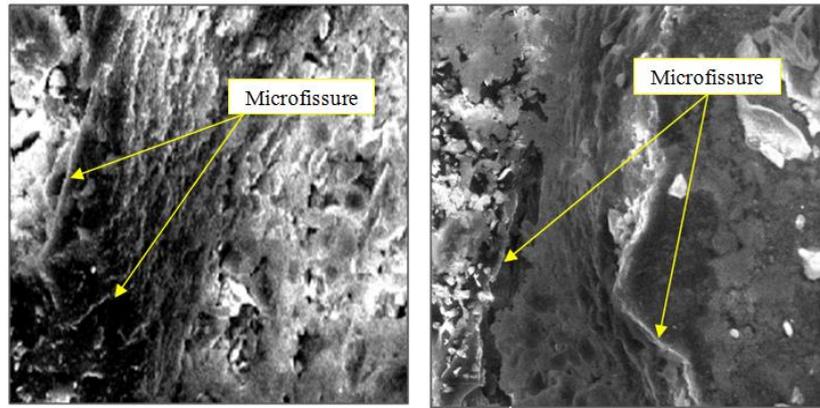


Figure 3.25. Observation des microfissures (MEB) des faciès de rupture à la compression (agrandies 1000X).

Ces figures 3.24 et 3.25 montrent l'aspect du mortier de résine après rupture totale. Il est possible de constater des microfissures sur la surface des faciès de rupture. Nous observons également quelques microfissures qui traversent la pâte et les interfaces pâte-granulat. Ceci peut s'expliquer par le traitement subi lors de la préparation des échantillons ou lors des essais mécaniques.

On constate également l'apparition d'un grand nombre de fissures supplémentaires dans la pâte et aux interfaces pâte-granulat, ce qui se traduit par une réduction considérable de la cohésion du liant (résine polyester) avec les granulats.

1.9. Résistance des mortiers de résine optimal en fonction du l'âge de maturation

Les essais de compression et de traction par flexion trois points ont été effectués après jour (24h), 7jours, 14jours et 28jours de maturation. Les résultats sont illustrés dans le tableau 3.6 et la figure 3.26. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

Tableau 3.6. Résistances mécaniques des mortiers de résine en fonction du temps de maturation.

Résistance (MPa)	j (24h)	7j	14j	28j
flexion (3Pts)	21,50±(1,3)	21,73±(0,30)	21,81±(0,14)	21,90±(1,01)
Compression	64,62±(0,08)	64,75±(1,5)	64,77±(0,93)	64,82±(0,86)

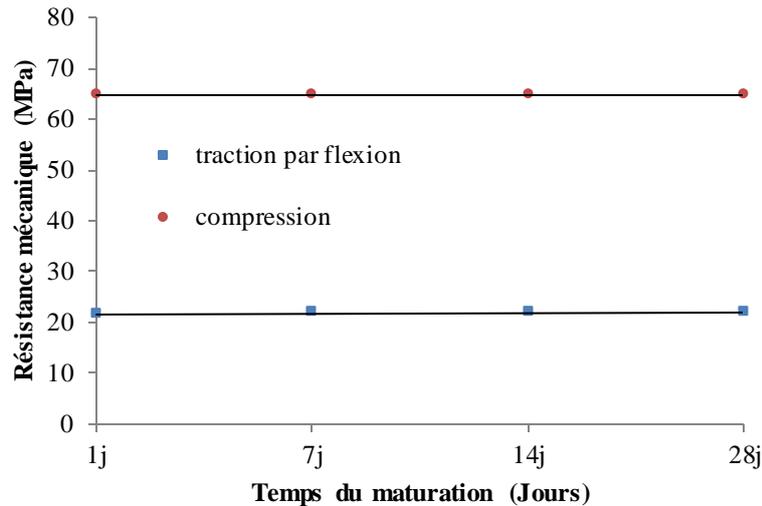


Figure 3.26. Effet du temps de maturation sur la résistance mécanique du mortier.

On observe une légère augmentation des résistances à la flexion et à la compression avec l'âge de maturation.

On remarque que les résistances mécaniques au jeune âge (1 jour juste après le démoulage) atteint sa résistance maximale, et que les mortiers de résine atteignent leurs résistances maximales en flexion après (24h), durée qui correspond à la fin de la réticulation du polymère (Figure 3.26). De façon générale, la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage de polymère.

(Haidar, [74]) Ont trouvé que de béton de résine à l'âge d'un jour atteint 33% de la résistance maximale à la compression et à la flexion. Après 3 jours de conservation le béton de résine atteint sa résistance maximale.

1.10. Conclusion

Les essais réalisés sur cinq formulations de mortier de résine se différencient uniquement par la fraction massique du polymère. Ces essais sont intéressants pour la prise de décision quant au choix de la formulation optimale à prendre vis-à-vis des propriétés physiques et mécaniques.

La formulation à 35% de résine est la plus dense parmi toutes les formulations testées et la masse volumique n'évolue pas significativement au-delà de la valeur seuil. La masse volumique (ρ) diminue proportionnellement avec l'augmentation de pourcentage de résine polyester. Un tel phénomène a été déjà observé dans une autre étude traitant un mortier de résine (Nguyen Gia, [6]). Les résistances mécaniques à la flexion et à la compression

augmentent avec l'augmentation de la fraction massique du liant polyester. L'utilisation des deux types de sable (fin et moyen) a pour objectif d'optimiser la fraction massique conduisant à un mortier de résine plus compact et plus dense et moins perméable. On montre que le mélange granulaire influence les propriétés physiques et les résistances mécaniques de mortier de résine. Ainsi, le mélange contenant des éléments fins (80% sable fin, 20% sable moyen et 35% de résine polyester) est plus compact et conduit à des structures moins poreuses que celles élaborées avec les autres mélanges obtenus avec des différents pourcentages. Les résistances mécaniques à la flexion et à la compression augmentent avec l'augmentation de pourcentage de sable fin. Les valeurs des résistances les plus élevées sont obtenues pour le mélange qui contient 80% de sable fin, 20% de sable moyen et 35% de résine polyester.

En effet, ces essais révèlent que la porosité totale par intrusion de mercure (PIM) ainsi que les diamètres de pores deviennent plus distribués inférieur à $4,5\mu\text{m}$. Les diamètres des pores deviennent plus fins et diminuent en augmentant la fraction massique du liant. La porosité devient distribuée d'une manière homogène.

Comparé au béton hydraulique cimentaire (BHC), le mortier de résine possède des propriétés physiques meilleures (plus isolant, moins poreux, plus isolant thermiquement) pour toutes les formulations sauf pour la densité (le BHC est plus dense avec $\rho = 2.37 \text{ g/cm}^3$). De point de vue mécanique le mortier de résine est plus résistant en flexion (4 fois) et en compression (3fois).

Au jeune âge, le mortier de résine optimal présente les meilleures résistances à 24 heures.

Sur la base des essais physiques et mécaniques il apparait que la formulation du mortier de résine polyester avec 35% de polymère, 80% de sable fin et 20% de sable moyen est celle optimale qui allie propriétés physiques, mécaniques et coût les plus avantageux.

2. Micro-béton de résine

Le béton de résine polyester apparaît comme un matériau innovant qui peut remplacer le béton ordinaire dans plusieurs domaines et notamment pour la réparation des ouvrages endommagés, pour la décoration et le revêtement extérieur des murs ainsi que pour la réalisation d'éléments structuraux exposés à des agressions chimiques et climatiques.

L'optimisation de la formulation du béton de résine polyester s'articule sur une démarche empirique utilisant le principe du point de saturation des sables (fin et moyen) avec la résine.

La démarche a consisté à déterminer la formulation du mortier de résine pour obtenir la saturation. Il a été procédé à la variation du taux de résine dans le mortier par pas (paragraphe 1). Avant d'entamer la préparation du béton de polymère, nous avons d'abord déduit dans le mortier le rapport du sable fin sur le sable moyen qui donne les meilleurs résultats des propriétés physiques et mécaniques. Le mortier contenant 80% de sable fin, 20% de sable moyen et 35% de résine polyester est alors apparu comme étant le mélange optimal à prendre comme référence dans la formulation.

Les différentes formulations des micro-bétons de résine ont ainsi consisté à fixer la formulation de mortier de résine et à faire varier le taux du rapport gravier/sable noté (G/S). Le pourcentage de résine est évalué par rapport au poids du mélange (sable + gravier). Quatre formulations de bétons ont été adoptées et expérimentées, correspondantes respectivement aux rapports $G/S = 0,5 ; 1 ; 1,5$ et 2 .

2.1. Influence de rapport G/S sur la masse volumique de béton de résine

Les mesures de masses volumiques ont été réalisées suivant cette formule

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V} \text{ g/cm}^3.$$

Cette caractéristique permet de vérifier la masse volumique de ce matériau. L'essai a été réalisé sur toutes les formulations avec les rapports $G/S = (0,5 - 1 - 1,5 - 2)$ de telle sorte que les résultats obtenus de la densité des micro-bétons de résine sont illustrés par le figure 3.27.

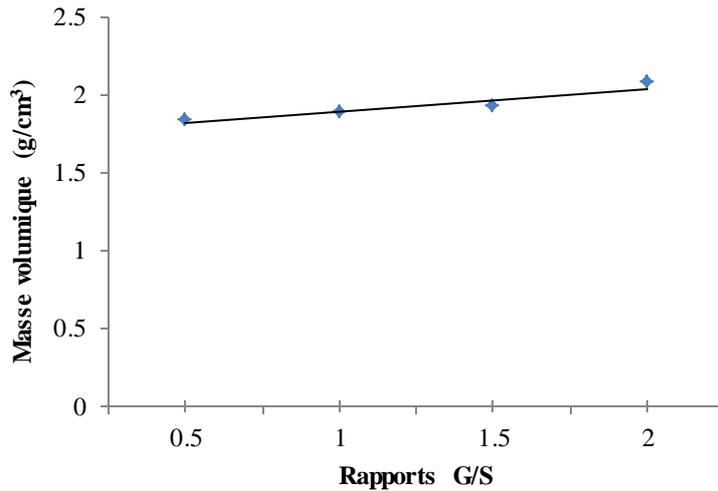


Figure 3.27. Evolution de la masse volumique des bétons de résine.

D'après la figure 3.27 on déduit :

La densité de béton de résine varie entre 1.83 g/cm^3 et 2.07 g/cm^3 par comparaison à celle du béton de ciment portland qui est égale à 2.5 g/cm^3 . Ainsi, les bétons de résine sont des matériaux composites généralement classés comme béton léger.

On constate que la masse volumique (ρ) augmente en augmentant le pourcentage de gravier.

2.2. Influence de rapport Gravier/Sable (G/S) sur les résistances mécaniques de micro-béton de résine

Les résultats obtenus de la résistance à la compression et à la traction par flexion des bétons de résine pour les différents rapports G/S expérimentés sont regroupés dans le tableau 3.7. Ces résultats sont illustrés par la figure 3.28. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

Tableau 3.7. Résistances mécaniques des bétons de polymère.

Résistance (MPa)	G/S = 0,5	G/S = 1	G/S = 1,5	G /S = 2
Traction par flexion	21±(0,09)	19±(0,67)	18±(0,19)	17±(0,24)
Compression	86±(0,42)	84±(0,92)	82±(0,50)	80±(0,90)

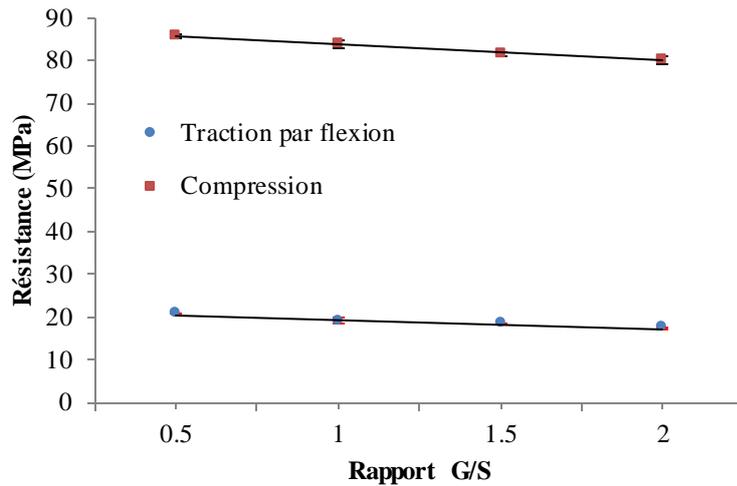


Figure 3.28. Influence du rapport G/S sur la résistance en flexion et en compression du béton de résine.

Des essais mécaniques ont été réalisés sur les micro-bétons de résine polyester et à différents rapports G/S. Les résistances obtenues varient entre (17 et 20) MPa à la flexion et (80 et 85) MPa à la compression. L'augmentation de la quantité du granulats (gravier) diminue les résistances mécaniques des micro-bétons de résine. La figure 3.28 montre une diminution progressive de la résistance à la flexion par une valeur importante (3 MPa) et à la compression d'une valeur (5 MPa) ; l'équivalent de la résistance mécanique à la flexion des bétons hydrauliques. Pour l'ensemble des micro-bétons de résine l'augmentation de rapport G/S fait diminuer l'adhérence entre la résine et les granulats qui devient mauvaise ce qui confère au micro-béton de résine de mauvaise qualité. L'augmentation de G/S diminue la quantité de la pâte liante entre les granulats. Le liant doit être insuffisant pour lier tous les grains et remplir les vides laissés par les grains de dimensions supérieures

Le rapport G/S est un rapport qui correspond directement à la diminution de résistance mécanique. Les meilleures résistances à la traction par flexion et à la compression sont obtenues pour le rapport G/S égal à 0,5 (un mélange composé de 33,33% en masse de gravier et 66,66% de sable). Ces résultats confirment ceux de nombreuses études qui ont montré l'effet de rapport G/S sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux organiques. Cependant, certains résultats sont controversés. (Elalaoui, [111]) qui a travaillé sur le micro-béton de résine est arrivé à un rapport G/S massique égal à 0,54 (35% de gravier et 65% de sable). D'autres études (Haidar, [74]) menées sur des micro-bétons

de résine, montrent que un rapport $G/S=0,25$ conduit à une compacité maximale de 0,78 avec deux types de mélange granulaire utilisés : $(S+G_1)$ et $(S+G_2)$.

2.3. Courbes charge-déplacements

Pour analyser le comportement de micro-béton de résine vis-à-vis des sollicitations en traction par flexion trois points, les courbes charge-déformation ont été tracées pour les différents rapports de $(G/S = 0,5 - 1 - 1,5 - 2)$. La figure (Figure 3.29) montre un exemple de courbe charge-déplacement obtenue en flexion 3 points.

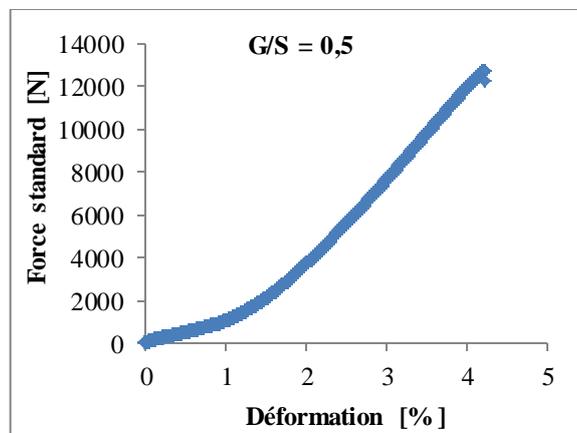


Figure 3.29. Courbe charge-déplacement d'un micro-béton de résine, en flexion trois points.

Tous les autres micro-bétons de résine pour les différents rapports G/S expérimentés montrent le même comportement et les courbes charge-déplacement la même allure. Ces courbes sont linéaires au début jusqu'à la ruine brutale de l'échantillon traduisant le comportement élastique fragile de ces matériaux. La force augmente linéairement avec le déplacement pour atteindre la charge maximale. Cette phase entraîne la propagation de microfissures d'interface et la propagation de microfissures dans la matrice. La fracture soudaine est toujours accompagnée d'un bruit craquant. Il faut signaler que la première partie concave de la courbe correspond à un réarrangement de l'éprouvette dans le dispositif expérimental avant la stabilisation totale de l'ensemble et son alignement. La même allure de courbe est relevée lors des essais de compression. Les éprouvettes testées enregistrent une résistance mécanique moyenne de 18,92 MPa en traction par flexion et une valeur maximale de 20,76 MPa.

2.4. Faciès de rupture des micro-bétons de résine

Les faciès de rupture des demi-éprouvettes obtenues lors des essais flexion sur le micro-béton à base de polymère sont montrés sur la figure 3.30. Les différents squelettes illustrent les différentes morphologies obtenues en fonction du rapport G/S.

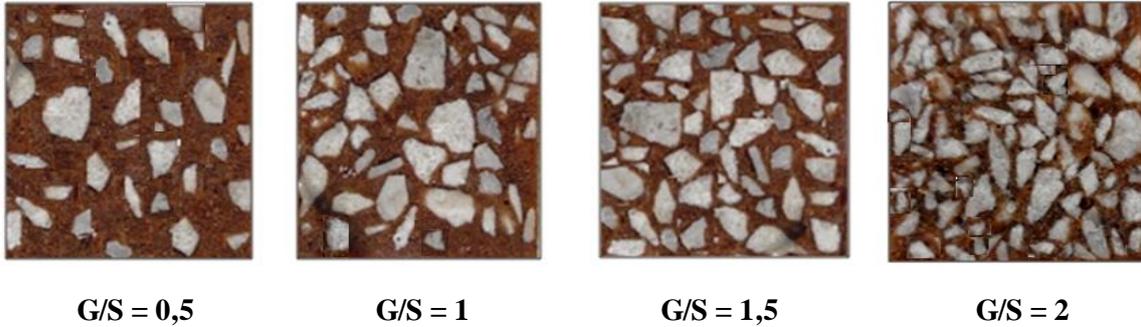


Figure 3.30. Morphologie de rupture des micro-bétons de résine pour les différents rapports G/S.

Les observations de différents types des micro-bétons sont effectuées après la rupture des échantillons. Ces morphologies sont reportés dans la figure 3.30. Ceci permet de visualiser les mécanismes d'endommagement qui ont mené à la rupture des échantillons. Nous observons différentes distributions des granulats. Ceci confirme que l'augmentation de la quantité du gravier fait diminuer la quantité de la pâte liante grâce à l'augmentation de volume des agrégats qui influe de façon négative sur la résistance mécanique.

Des observations des faciès de rupture visuellement obtenus, pris après rupture des échantillons de $G/S = 0,5$ permettent de distinguer très nettement quelques microfissures dans le corps d'échantillon. Les agrégats (sable, gravier) semblent rester intacts.

Dans le cas de $G/S = 1 - 1,5$ et 2 l'endommagement dans ces types d'échantillons se manifeste par une microfissuration matricielle et une décohésion entre la résine et le gravier. Les grains des sables fin et moyen semblent rester intacts. L'observation de ces faciès permet de visualiser nettement les ruptures des graviers. Dans le cas du béton polymère les trois mécanismes d'endommagements sont déjà rapportés par (Berbaoui et al., [107]) après des essais statiques en fatigue.

2.5. Mode de rupture

La figure 3.31 montre des exemples de modes de rupture observés sur des éprouvettes rompues en flexion pour les différents rapports G/S.

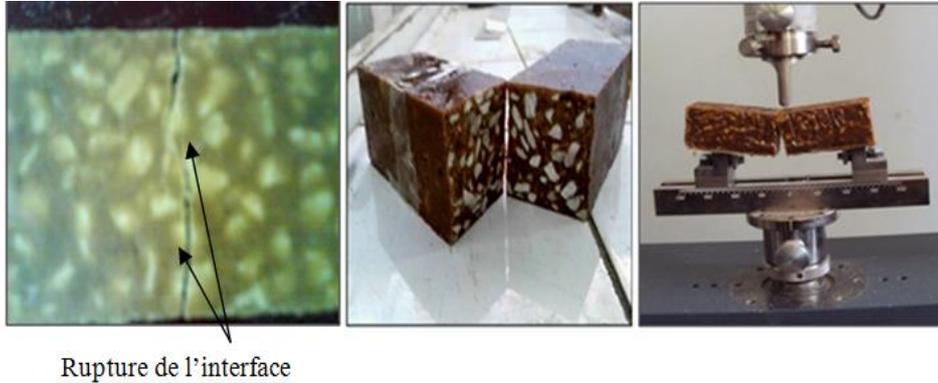


Figure 3.31. Mode de rupture des éprouvettes en flexion.

Comme on peut le constater, le micro-béton de résine montre une rupture franche qui se produit au milieu de l'échantillon sans aucune bifurcation significative du trajet. L'aspect et la forme des faciès sont clairs et sont indicateurs d'une rupture soudaine et fragile comme le montre la figure 3.31.

Les photos de la figure 3.32 montrent des illustrations du mode de rupture des éprouvettes en compression.

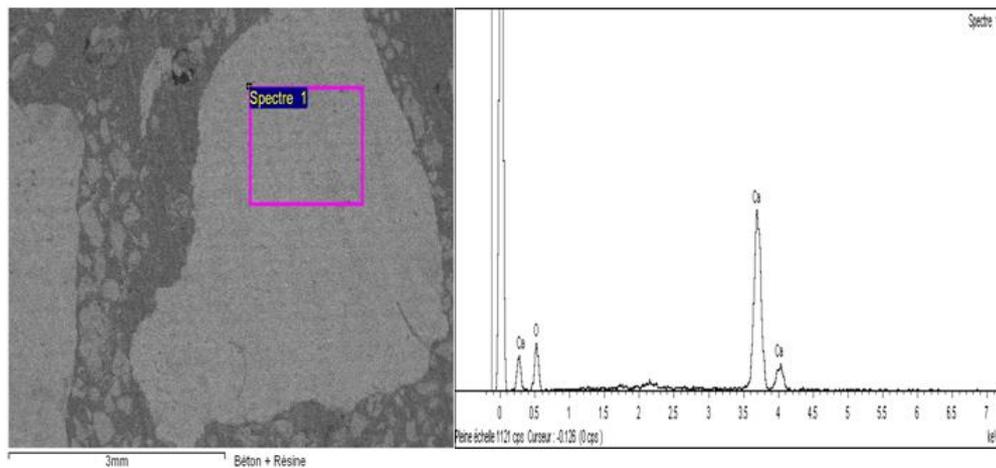


Figure 3.32. Mode de rupture des éprouvettes en compression.

Dans le cas de compression, on a remarqué des fendillements disséminés un peu partout dans le corps de la demi-éprouvette. Ce mécanisme semble être le même pour les différents mortiers de résine fabriqués et il est différent des fissurations longitudinales généralement observées dans les bétons traditionnels et dans les mortiers cimentaires.

2.6. Observation microscopique au MEB de micro-béton optimal

Des échantillons découpés sur le facies de rupture des demis éprouvettes rompues en flexion ont été observés au MEB et analysés. La figure 3.33 montre un exemple des observations effectuées en électrons rétro diffusés. Cette microanalyse dans le carré mauve illustre une micro particule résine et poussière de sable et de granulat sur des surfaces de micro-béton de résine optimal confectionné avec le pourcentage massique de 35% de résine polyester et G/S = 0,5 et deux types de sable 80% de sable fin, 20% de sable moyen.



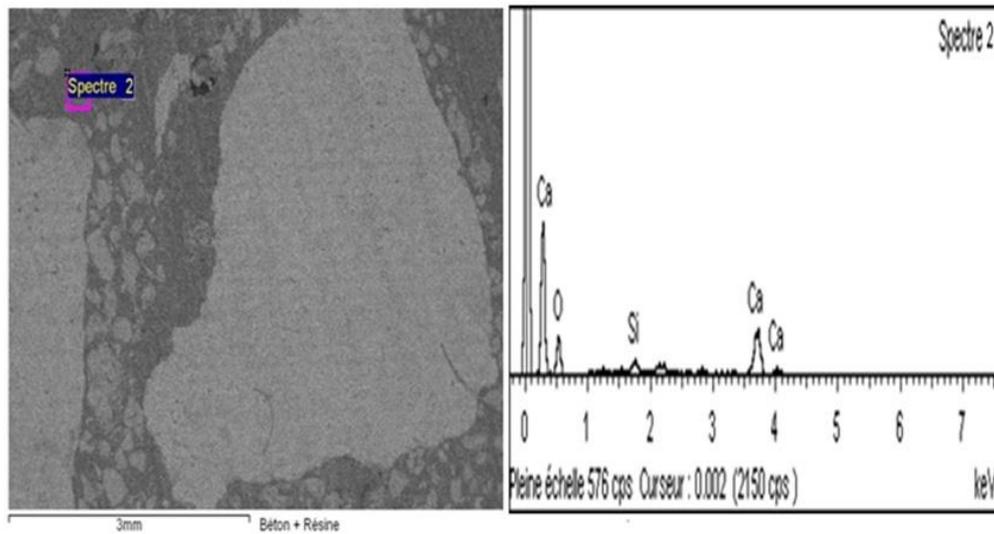
(a) : image au MEB (b) : Analyse élémentaire (EDX) au Spectre 1

Figure 3.33. Image au (MEB) de micro particule de la calcite composant le granulat (a) avec son spectre 1 ESD (b).

Tableau 3.8. Résultats EDS -nature des composants du spectre 1.

Elément	%Masse	%Atomique
O K	67.96	84.16
Ca K	32.04	15.84
Totaux	100.00	

La figure 3.34 montre des observations réalisées en électrons rétro diffusés. Ces micro-analyses (EDS) mettent clairement en relief l'aspect du contact de la résine avec les poussières de sable et de granulat spectre 1 (carré mauve). Ceci était prévisible sur la rupture des échantillons : à l'œil nu les ruptures étaient traversantes à l'intérieur des granulats. L'analyse du spectre 2 (carré mauve) et la micro-analyse (EDS) effectuées aussi, révèlent la présence des pics intenses de calcite (Ca K) et de silice (Si K).



(a) : image au MEB (b) : Analyse élémentaire (EDX) au Spectre 2

Figure 3.34. Image au (MEB) de micro particule sable résine du béton (a) avec son spectre 2 EDS (b).

L'analyse du spectre 2 et la microanalyse EDS effectuées permettent de vérifier la nature des composants des microparticules sable résine et révèlent ainsi la présence de traces de calcite (Ca K) et de silice (Si K) caractérisées par des pics intenses de ces éléments. Les résultats d'identification de ces éléments sont illustrés par la figure 3.34. Le pourcentage quantifié de ces éléments est donné dans le tableau 3.9. La calcite qui reste l'élément prédominant affiche un pourcentage en masse moyen de 5,4 fois supérieur et un pourcentage atomique moyen de 3,78 fois supérieur à ceux de la silice respectivement.

Tableau 3.9. Résultats EDS -nature des composants du spectre 2.

Elément	%Masse	%Atomique
O K	78.47	89.54
Si K	3.38	2.19
Ca K	18.15	8.27
Totaux	100.00	

Des exemples d'observations en électrons secondaires réalisées montrent le caractère compact des contacts granulat-résine. L'adhérence est correcte comme le révèle la microphotographie de la figure 3.35. En général et comme il a été rapporté dans une

précédente étude, les ruptures des échantillons des micro-bétons de résine sont traversantes à l'intérieur des granulats. Il est à signaler que les pores à l'intérieur du micro-béton de résine sont les espaces occupés par les bulles d'air qui apparaissent et se forment surtout lors du malaxage et qu'il est très difficile d'évacuer lors de la préparation des corps d'éprouvettes (fabrication manuelle).

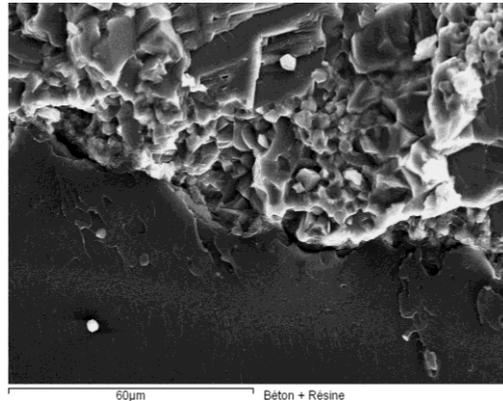


Figure 3.35. Compacité du contact granulat résine et absence de microfissures

2.7. conclusion

Les résistances mécaniques à la flexion, à la compression diminuent avec l'augmentation du rapport G/S. Les valeurs des résistances les plus élevées sont obtenues pour le rapport $G/S = 0,5$. Les fractions massiques des agrégats correspondent à celles qui conduisent aux formulations les moins résistants. La rigidité la plus élevée est obtenue lors l'essai de compression pour un micro-béton de résine formulé avec $G/S = 0,5$ est atteinte à l'âge de 24 heures. Le mélange granulaire influence les propriétés physiques et les résistances mécaniques de micro-béton de résine. Ainsi, le mélange contenant des pourcentages de sable fin élevé est plus compact et conduit à des structures moins poreuses que celles élaborées avec le mélange (35% de résine, $G/S = 0,5$ et 80% de sable fin et 20% de sable moyen) comme révélé des observations microscopiques (MEB).

3. Béton de résine fibrée

Cette partie d'étude traite de l'effet d'incorporation des renforts de fibres de verre ainsi que du mode de ce renfort (aléatoire et tissu) et de fibre de polypropylène (6mm-12mm) sur les performances mécaniques (résistance en flexion et en compression) de béton de. Ce type de matériau composite est appelé à avoir une place intéressante et importante dans le marché des matériaux de construction de grande diffusion. Nous développons ces performances au niveau de notre laboratoire pour obtenir des produits plus ductiles, multi-fissurant, capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue.

3.1. Influence de taux de fibre de verre E (sous forme aléatoire) sur les résistances mécaniques

Dans notre travail expérimental on améliore les propriétés mécaniques des micro-bétons de résine avec du renforcement par des fibres de verres E sous deux formes (aléatoires et tissu). La composition utilisée pour le micro-béton renforcé de fibres est basée sur le rapport G/S optimal qui est égal à 0,5 et 80% de sable fin et 20% de sable moyen et un pourcentage massique du polymère de 35% de résine polyester. Les fibres sont ajoutées au béton essentiellement pour réduire la fragilité de béton de résine. Les résultats obtenus de la résistance à la compression et à la traction par flexion sur les micro-bétons de résine renforcés avec des fibres de verres E aléatoire sont regroupés dans le tableau 3.10 et sont illustrés par la figure 3.36. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types.

Tableau 3.10. Résistances mécaniques des bétons à base de fibres de verre E.

Résistance (MPa)	Taux de fibre de verre E (%)					
	0%	1%	2%	3%	4%	5%
Flexion 3 pts	21±(0,09)	23±(1,73)	24±(0,98)	27±(1,11)	31±(1,17)	33±(0,87)
compression	86±(0,42)	87±(1,58)	90±(2,78)	94±(1,97)	99±(0,76)	105±(1,65)

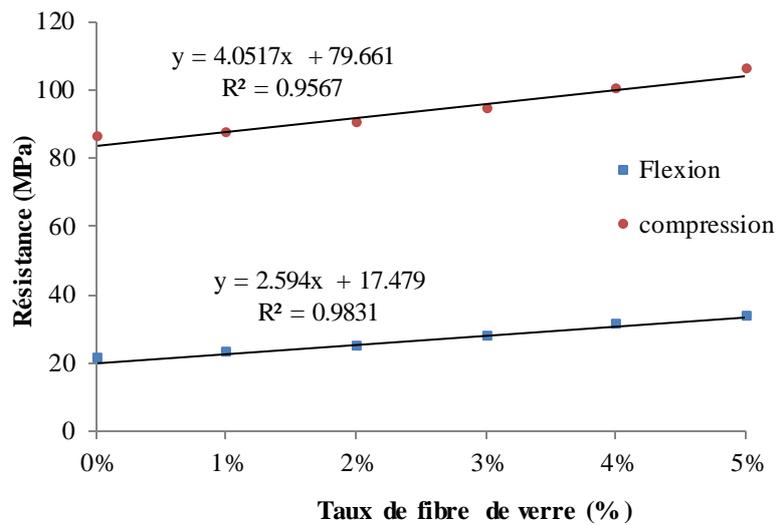


Figure 3.36. Evolution des résistances en flexion et en compression en fonction du taux de fibres de verre.

Dans notre cas, la figure 3.36 montre clairement que plus le pourcentage massique de fibre augmente et plus la résistance mécanique des différents mélanges du micro-béton de résine augmente. L'introduction des ajoutes des fibres entraine une amélioration des résistances mécaniques par rapport au béton de référence (sans fibre) pour tous les mélanges. Les fibres influencent de façon positive la ductilité de micro-béton de résine et améliorent ses performances.

Les résultats expérimentaux se distinguent par une dispersion comme il fallait s'y attendre caractéristique de ces matériaux granulaires et qui est due en grande partie au caractère hétérogène de ces derniers. En effet les éprouvettes sont nominalement non identiques dans la mesure où elles montrent un aspect aléatoire de la distribution du taux de fibres et de leur orientation qui ne sont pas uniformes, une densité de la porosité et de sa distribution qui diffèrent d'un échantillon à un autre, une hétérogénéité de la structure et des compositions locales qui peuvent être aussi différentes d'une éprouvette à une autre. Par ailleurs une observation de la microstructure des micro-bétons de résine fibreux permet de révéler deux types de dispersion liés à la présence de zones riches en matrice et de zones riches en renfort fibreux. Ainsi la distribution des contraintes dans les fibres, sur les interfaces et dans la matrice est très sensible à la distribution de fraction volumique locale. Par conséquent les cinétiques d'évolution de l'endommagement et de la rupture seront fortement modifiées de part les variations significatives de contraintes locales. D'autre part, la présence de porosités plus ou moins marquées, plus ou moins

volumineuses et dans certains cas plus ou moins rapprochées des fibres et même localisées pour certaines sur les interfaces provoque localement une variation de contrainte locale relativement importante.

Tous ces phénomènes conjugués à d'autres comme la nature des essais mécaniques et leur conduite conduisent à un mécanisme de rupture dans ces composites qui peut s'amorcer à différents niveaux de contraintes selon l'orientation, la localisation, la densité et les dimensions des défauts ainsi que selon la qualité de l'interface fibre-matrice. Signalons tout simplement que la dispersion observée sur les résultats des essais de compression est faible par rapport à celle observée sur les essais de flexion. La nature facile de la mise en œuvre de l'essai de compression est un paramètre important qui lui évite l'ensemble des erreurs parasites de manipulation comme le mauvais alignement de l'axe de l'éprouvette avec l'axe de la machine, les défauts et les difficultés de serrage des éprouvette au niveau des mors de traction, l'apparition de moments fléchissant parasites etc... constatés dans les autres essais comme ceux de traction directe, de flexion ou de cisaillement [112]. Les valeurs des résistances obtenues rentrent dans les plages des valeurs données par la littérature scientifique et sont ainsi concordantes. (*Nguyen, [6]*) rapporte pour le cas des bétons de résine polyester des plages allant de 50 à 150 MPa pour la résistance à la compression, de 8 à 25 MPa pour celle à la traction directe et de 15 à 45 MPa pour celle à la flexion. Pour cette dernière sollicitation, (*Haider et al., Ghorbel, [113]*) obtiennent la valeur de 25,5 MPa sur un béton contenant une fraction massique de 9% de résine époxyde. (*Nóvoa et Reis et al., [7]*) a été montré que les granulés ou fibres ajoutés influence négativement sur le module d'élasticité et sur les résistances mécaniques surtout en compression qu'en flexion.

(*Abdel-Fattah et al., [43]*) ont formulés des bétons de résine avec 2 types de résine (d'époxyde et un polyester). Ils concluent que l'addition des fibres de verre (1, 2, 3%) augmente la résistance, rigidité et ténacité du béton de résine polyester. L'augmentation des propriétés du béton de résine renforcé sont proportionnelles à la fraction volumique des fibres.

Malgré que les éprouvettes testées (béton de résine optimal + fibre de verre) soient de la même mixture, on remarque une dispersion entre les résultats à la flexion et à la compression. Ceci peut être dû à la préparation des éprouvettes (fabrication manuelle) provoquant une distribution non uniforme des agrégats et des fibres, à l'hétérogénéité du

matériau, et à des dispersions dans les dimensions. Pour cela une analyse statistique a été jugée nécessaire.

3.2. Influence du tissu des fibres sur les résistances mécaniques des micro-bétons de résine polyester

Les résultats obtenus de la résistance à la compression et de celle à la traction par flexion dans ce type de renforcement sont regroupés dans le tableau 3.11. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types. Comme on peut le constater, ces résultats se caractérisent par une dispersion due essentiellement au caractère hétérogène de ces matériaux. Cette dispersion qui n'est toutefois pas importante comparativement à celle observée d'ordinaire sur les valeurs des bétons traditionnels est acceptable et elle est en moyenne de l'ordre de 5%. La figure 3.37 montre l'influence du mode de renforcement avec le tissu sur les résistances en flexion et en compression.

Tableau 3.11. Résistances mécaniques des micro-bétons à base de fibres de verres E sous forme de tissu.

Résistance (MPa)	2 couches de tissu de verre (au milieu)	3 couches de tissu de verre (zone tendue)
Flexion 3 pts	34± (1,67)	59± (1.49)
Compression	83± (3.67)	85± (1.02)

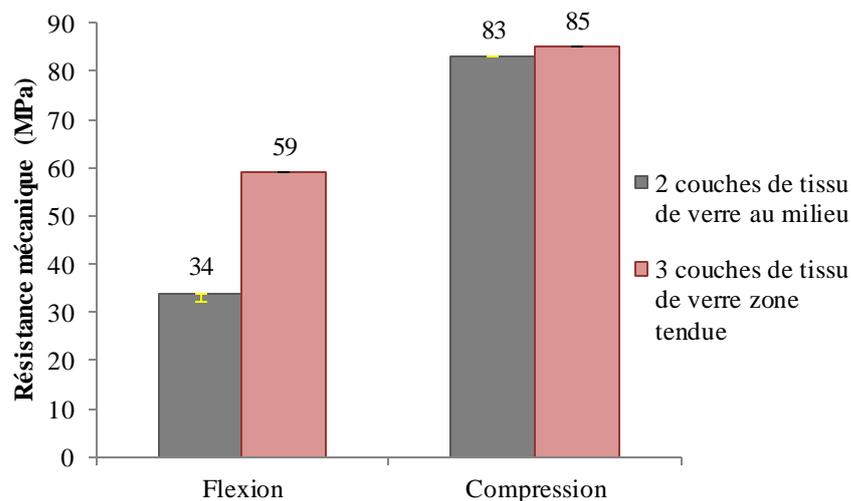


Figure 3.37. Histogramme des résistances

Les résultats se caractérisent par une dispersion due essentiellement comme il a été rapporté au caractère hétérogène de ces matériaux. Cette dispersion n'est toutefois pas

importante et elle est de l'ordre de 5% au maximum. Ces résultats sont illustrés par l'histogramme de la figure 3.37. Il semble que la résistance à la flexion est améliorée avec un renforcement de trois couches de tissu de verre dans la zone tendue qu'avec deux couches au milieu. Le rapport est d'environ 1,7. Au vu de la dispersion et des écarts type faibles, la résistance à la compression n'a pas évolué de façon significative dans les deux cas de figure. Ce phénomène du non renforcement des fibres dans le cas de la compression est souvent observé dans les composites granulaires. On observe une augmentation de la résistance à la traction par flexion dans les bétons de résine avec les fibres sous forme tissu par rapport aux autres bétons de résine avec les fibres aléatoires.

3.3. Influence de la longueur de fibre polypropylène (6 mm et 12 mm) sur les résistances mécaniques de micro-béton

On se propose dans ce paragraphe d'étudier la résistance mécanique en traction par flexion trois points et en compression des différents mélanges des micro-bétons de résine, dans le but de mettre en évidence la contribution des fibres de polypropylène (6mm, 12mm) à l'amélioration des propriétés mécaniques et l'influence de la longueur de fibre. À cet effet, une comparaison a été réalisée pour des différents taux de fibre polypropylène sur l'effet de la longueur aux propriétés de micro-béton de résine polyester.

Ces résultats obtenus sont illustrés sur les figures 3.38 et 3.39 sont regroupés dans le tableau 3.12 qui traduit la variation de la résistance à la flexion et celle à la compression en fonction du taux de fibres de polypropylène (6-12mm) Les chiffres entre parenthèses représentent les écarts-types calculés.

Tableau 3.12. Résistances mécaniques des micro-bétons à base de fibres polypropylène.

Vf (%)	Polypropylène (6mm)		Polypropylène (12mm)	
	Flexion (MPa)	Compression (MPa)	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
0%	20,76 ± (0,09)	85,8 ± (0,42)	20,76 ± (0,09)	85,8 ± (0,42)
1%	20,89 ± (0,51)	85,89 ± (1,48)	20,95 ± (0,74)	86,12 ± (1,79)
2%	21,01 ± (0,36)	86,58 ± (1,68)	21,35 ± (0,83)	87,20 ± (1,97)
3%	21,58 ± (1,22)	87,40 ± (1,33)	22,49 ± (1,12)	89,69 ± (2,71)
4%	21,77 ± (0,48)	88,07 ± (1,10)	23,14 ± (2,08)	90,82 ± (0,98)
5%	21,91 ± (0,64)	89,03 ± (1,95)	23,48 ± (1,19)	92,17 ± (1,03)

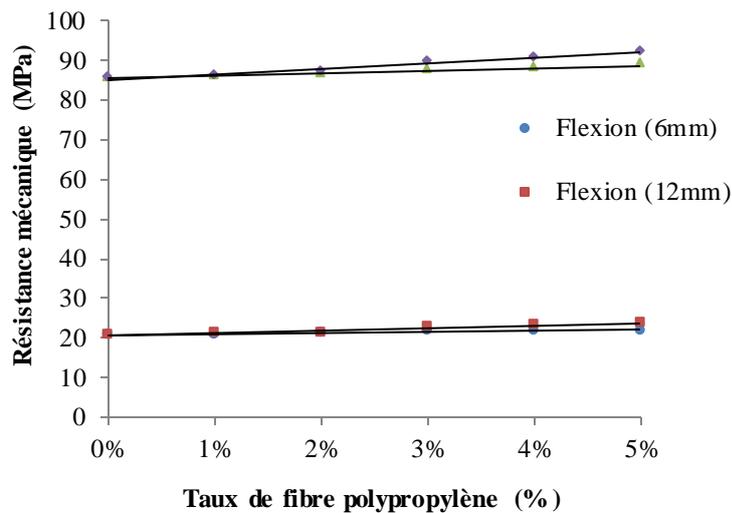


Figure 3.38. Evolution des résistances en flexion et en compression en fonction du taux de fibres de polypropylène (6 et 12mm).

Les résultats obtenus ont permis de tracer l'évolution de la résistance mécanique en fonction de la nature des fibres additionnées. On observe une légère augmentation de la résistance à la traction par flexion trois points par rapport à l'augmentation de la résistance à la compression de valeur de l'ordre de 7 MPa (de 85,8 MPa jusqu'à 92,17 MPa). Malgré une légère dispersion observée sur les résultats expérimentaux, il apparaît que l'augmentation du pourcentage de fibre de polypropylène influe de façon positive la ductilité du micro-béton de résine qui améliore ses performances mécaniques e. Cependant une action négative sur la maniabilité pendant le malaxage a été observé lors de la fabrication des poly-composites

(Barbut M et al., [58]) pour un béton de résine à base de 16,4% de résine époxy et des fibres de cellulose ont trouvé une valeur de résistance en compression de 62,62 MPa et en flexion de 17,57 MPa.

L'ajout d'addition (fibres) au micro-béton de résine augmente la compacité de la pâte liante (polymère) par rapport à une suspension de polymère seul pour un dosage de 1%, 2%,...5%) d'addition de fibre de polypropylène (6mm et de 12mm). Pour des dosages supérieurs à cette limite, la compacité diminue en fonction de l'augmentation du dosage en addition ce qui provoque une action négative sur la maniabilité. L'incorporation de fibre de polypropylène de longueur 6mm n'a pas influé la résistance mécanique par rapport à la fibre de longueur de 12mm et cela même pour tous les dosages des fibres.

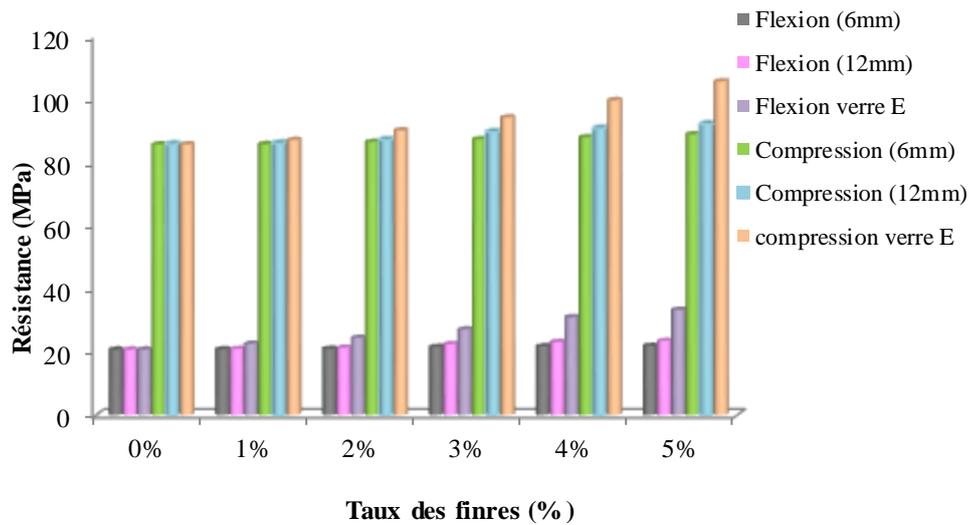


Figure 3.39. Effet de la nature de l'addition sur les résistances mécaniques.

Dans notre cas, la figure 3.39 montre clairement que plus le pourcentage massique de fibre augmente et plus la résistance mécanique des différents mélanges du micro-béton de résine augmente. Ce constat a été observé sur tous les types de renfort, quelle que soit leur nature. À chaque augmentation du pourcentage des fibres, les résistances mécaniques des mélanges augmentent. L'augmentation du pourcentage de fibre de verre contrairement à celui du polypropylène n'a pas une influence significative sur les résistances à la flexion et sur celles à la compression de ces micro-bétons. Les résistances dans les deux cas semblent afficher une tendance constante jusqu'au taux de 5%. Cependant, dans certains cas, l'ajout de fibre de verre E améliore la rigidité et la ductilité des mélanges. On constate que le micro-béton de résine à base de polyester présente de meilleures propriétés mécaniques. C'est important de noter que les trois principales phases du composite, à savoir les fibres verre, la résine polyester insaturé et les charges minérales, ont toutes un comportement élastique fragile [114].

3.4. Porosité de micro-béton de résine fibré

Des mesures de porosité par intrusion au mercure (PIM) sur le micro-béton de résine à base deux types différents des fibres (verre E, polypropylène) ont été effectuées. Les figures 3.40 – 3.41 présentent la distribution des diamètres des pores du micro-béton. L'étude de microstructure indique que le béton de polymère est constitué par les pores fermés internes. Cette technique a été entreprise pour observer l'interface entre les agrégats et la résine. On peut observer la distribution de pores et l'aspect interne de pores

des micro-bétons de polymère analysés, ainsi qu'un détail matériel (35) pris par la photo microscopie transmise polarisée.

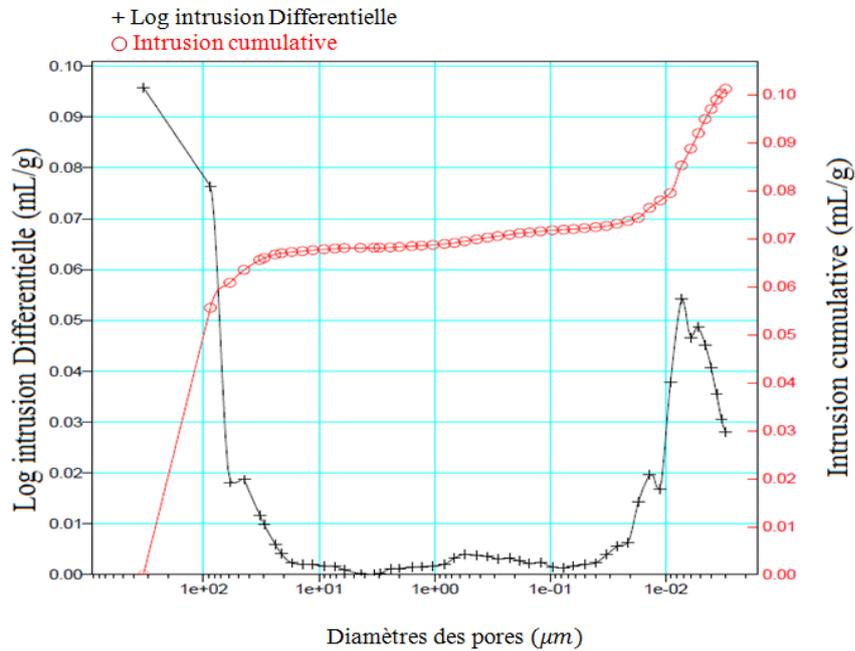


Figure 3.40. Distribution de la taille des pores de micro-béton de résine à base de fibre de verre obtenue par PIM.

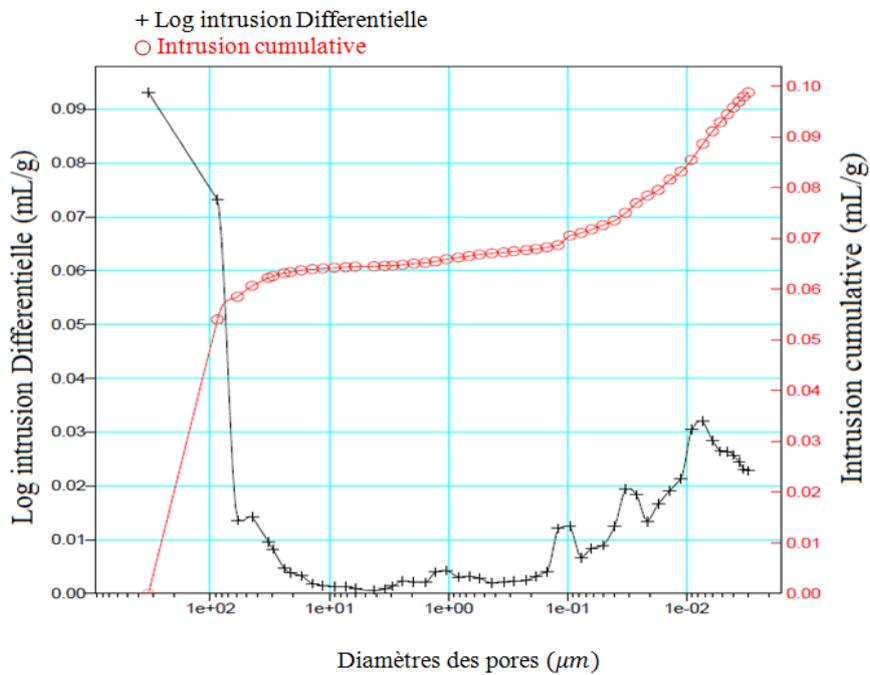


Figure 3.41. Distribution de la taille des pores de micro-béton de résine à base de fibre de polypropylène obtenue par PIM.

Nous constatons d'une manière générale que le gonflement semble contribuer à une modification de la distribution de la taille des pores, car nous avons pu observer au cours du temps un décalage vers les plus grands pores. Ainsi, les expansions semblent probablement contribuer à une formation de pores ayant des tailles plus importantes que celles des pores initiaux.

Dans les figures 3.40 et 3.41 on peut observer la distribution de pores et l'aspect interne de pores des bétons de polymère analysés. Cette technique a été entreprise pour observer l'interface entre les agrégats et la résine (tableau 3.13).

Tableau 3.13. Porosité des micro-bétons de résine fibré.

Type des bétons	Porosité	Densité absolue	Densité apparente	Diamètre moyen de pores
Béton (verre E)	19.92 %	2.458 g/cm ³	1.968 g/cm ³	113.183 μm
Béton (polypropylène)	16.91 %	2.060 g/cm ³	1.711 g/cm ³	114.139 μm

3.5. Mode de rupture

La comparaison des modes de rupture du béton de résine témoin et celui des bétons de résine fibrés en flexion, illustrée par les photos de les figures 3.42 – 3.43 et 3.44 montre clairement que ces derniers possèdent un caractère légèrement ductile lors de la rupture. Les éprouvettes après fracture restent attachées par les fibres de verre E et de polypropylène au delà 3% sans aucun éclat constaté contrairement à l'éclatement en deux morceaux manifesté lors de la rupture des éprouvettes du béton témoin. Le renfort engendre une rupture au milieu et le chemin de fissuration se fait au niveau de l'appui central. Dans le cas des fibres avec des couches au milieu le même mécanisme est aussi constaté. Pour le cas du renforcement avec des couches disposées dans la zone tendue on assiste plutôt à un délaminage qui s'opère dans cette région et qui évolue transversalement à travers la longueur de l'échantillon.

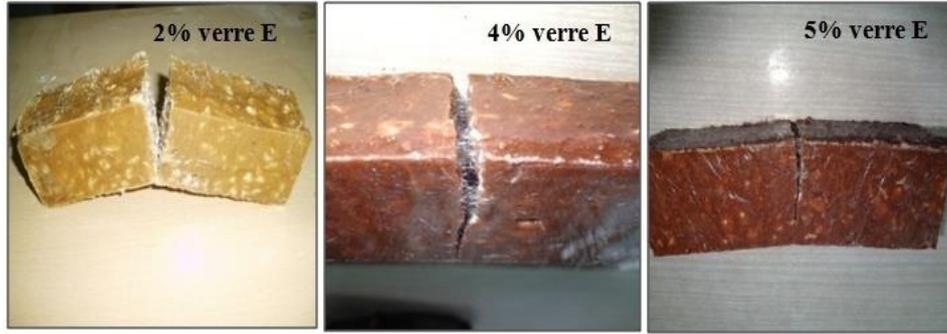


Figure 3.42. Mode de rupture des éprouvettes en flexion de béton de résine fibré.

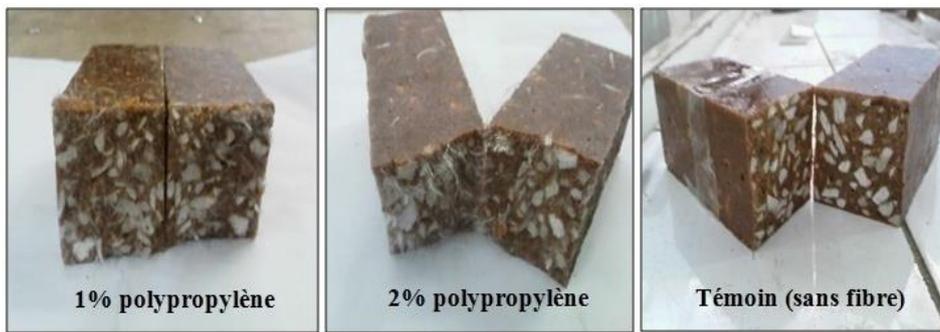


Figure 3.43. Mode de rupture des éprouvettes en flexion de béton de résine fibré.

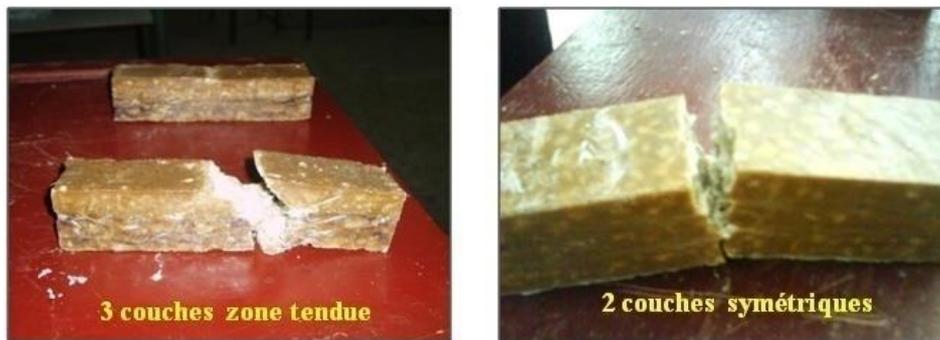


Figure 3.44. Mode de rupture des éprouvettes en flexion de béton de résine.

Les photos de la figure 3.45 montrent des illustrations du mode de rupture des éprouvettes en compression.



Figure 3.45. Mode de rupture des éprouvettes en compression de béton de résine fibré.

La figure 3.45 montre des modes de rupture en compression des éprouvettes testées. Dans le cas de cette sollicitation, les mécanismes de fissurations observés semblent être les mêmes aussi bien ceux observés sur les bétons de résine non fibrés que ceux sur les bétons renforcés de fibres. On assiste beaucoup plus à des craquelures multiples éparpillées un peu partout dans le corps des éprouvettes. Elles se développent au cours du chargement jusqu'à la ruine complète de l'échantillon. Ce mécanisme est différent des fissurations longitudinales généralement observées en compression dans les bétons traditionnels et dans les mortiers cimentaires.

3.6. Observation de MEB de micro-béton de résine fibré

Des observations à différentes échelles à l'aide d'un microscope électronique à balayage sont effectuées après la rupture des échantillons. Ces observations sont reportés dans la figure 3.46.

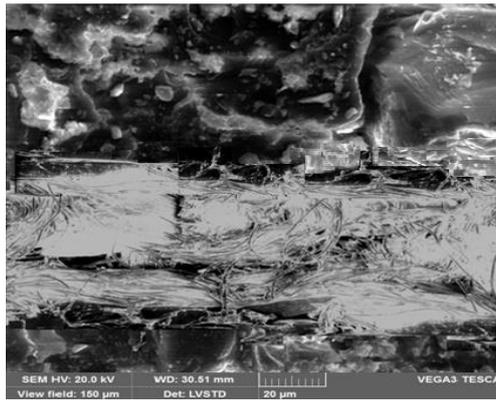


Figure 3.46. Micrographie MEB de béton de résine avec trois couches de tissu de verre dans la zone tendue) agrandies 50x.

Les observations microscopiques effectués ont permis de constater que la déchirure suit en général le chemin des nœuds du tissu de verre E. La propagation de la rupture est toujours accompagnée d'un changement d'aspect d'une décoloration du micro-béton de résine qui change vers la couleur blanche (cas de flexion et de compression). La figure 3.45 illustre ce phénomène. Au niveau de la zone endommagée et du délaminage on peut mettre en évidence la rupture des fibres ainsi que certains mécanismes de rupture de la matrice (microfissuration matricielle) telle que les craquelures.

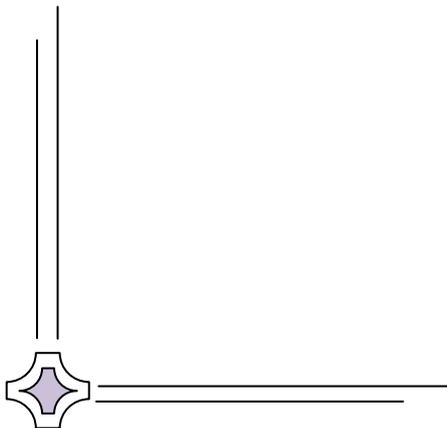
3.7. Conclusion

L'incorporation des fibres de verre et des fibres de polypropylène dans la composition des bétons de micro-résine par pas de taux de 1% montre que l'augmentation de la fraction volumique des fibres influe de façon positive sur les résistances mécaniques à la flexion et à la compression de ces matériaux. On observe une augmentation de la résistance à la traction par flexion dans les bétons de résine avec les fibres sous forme tissu par rapport aux autres bétons de résine avec les fibres aléatoires. Ainsi, les résultats obtenus permettent d'ouvrir la voie pour l'emploi des fibres de verre dans la fabrication des bétons de résine pour l'amélioration notamment de la ductilité de ce type de matériau composite appelé à avoir une place intéressante et importante dans le marché des matériaux de construction de grande diffusion.

Chapitre IV :
Modélisation de la prévision du
comportement



L'incorporation des fibres de verre dans la composition des micro-bétons de résine par pas de taux de 1% montre que l'augmentation de la fraction volumique des fibres influe de façon positive sur les résistances mécaniques à la flexion et à la compression de ces matériaux. Des modèles empiriques basés sur les méthodes d'homogénéisation et prenant en compte les caractéristiques spécifiques des constituants permettent la prévision du comportement à la rupture des bétons de résine en fonction du taux de renfort avec une bonne probabilité.



Sommaire

Modélisation du comportement

Cas A : Résine grenat

Cas B : Résine violet

Chapitre IV : Modélisation de la prévision du comportement

La prévision des propriétés de rupture des matériaux composites en général et de ceux granulaires à matrice polymère comme les micro-bétons de résine renforcés de fibres courtes orientées au hasard est encore un domaine très mal maîtrisé à cause principalement de la complexité des mécanismes de déformation à l'échelle microscopique. De plus, la mauvaise connaissance de certaines caractéristiques structurales comme la distribution de longueur et d'orientation des fibres après la mise en forme ou après le malaxage pour les bétons de résine ainsi que les origines multiples des initiateurs de rupture compliquent davantage le problème. La rupture peut se produire différemment selon l'orientation, la fraction volumique et la densité des renforts, la qualité de l'interface granulats-matrice et fibre-matrice ainsi que la nature des résines utilisées.

Les différentes approches mécaniques proposées dans la littérature scientifique sont généralement peu vérifiées par l'expérience et restent physiquement suspectes et discutables car elles ne prennent pas en compte des paramètres importants tels que le rapport d'aspect longueur/diamètre de la fibre, la longueur des fibres, la concentration des contraintes en bout de fibres. L'écart entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux est aussi aggravé souvent par la forte anisotropie dans ces matériaux induite par les méthodes de fabrication. De nombreux chercheurs se basant sur des hypothèses différentes exigeant souvent une analyse de la microstructure ainsi que l'identification et la connaissance de certains paramètres caractérisant la nature et la répartition spatiale des différents composants proposent alors de décrire les résultats expérimentaux par des modèles empiriques relatifs aux matériaux bétons hydrauliques cimentaires étudiés [115] [116] [117]. Dans notre cas, l'approche de la modélisation du comportement à partir des équations de régressions linéaires se fonde sur la méthode d'homogénéisation qui permet d'estimer et de prédire les propriétés macroscopiques du composite béton de résine renforcé de fibres de verre à partir des propriétés mécaniques de base des principales phases qui le constituent à savoir la matrice constituée du béton de résine polyester et le renfort constitué de fibres de verre courtes E. L'objectif est de remplacer le matériau hétérogène réel par un matériau homogène équivalent ayant la même structure à l'échelle macroscopique. Ainsi, en utilisant la forme générale de la loi d'homogénéisation des mélanges en traction, la contrainte de rupture σ_c d'un matériau

composite renforcé de fibres courtes orientées au hasard est donnée en fonction des caractéristiques des constituants par l'équation :

$$\sigma_c = K \cdot \sigma_f V_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \dots \dots \dots (32)$$

σ_f et σ_m sont respectivement les contraintes de rupture de la fibre et de la matrice.

V_f et V_m représentent respectivement les fractions volumiques de la fibre et de la matrice.

K est un paramètre représentant la combinaison de deux coefficients : l'un d'orientation dû à la distribution isotrope des fibres dans le plan et l'autre d'efficacité de longueur de fibres et qui est lié surtout à la qualité des interfaces fibre-matrice et granulat matrice [118] [119] [120].

Cette équation qui peut être adaptée au cas de la compression et de la flexion, peut aussi s'écrire :

$$\sigma_c = (K \cdot \sigma_f - \sigma_m) \cdot V_f + \sigma_m \dots \dots \dots (33)$$

Comme le révèle clairement la figure 3.3 chapitre 3 (l'ajout de verre E aléatoire dans le cas A) et la figure 3.35 chapitre 3 (l'ajout de verre E aléatoire dans le cas B), les points expérimentaux sont approximativement disposés selon une droite pour les deux types de sollicitations. Les régressions linéaires effectuées sur ces points sont données par les équations suivantes :

Cas A : Résine grenat

Flexion

$$\sigma_c = 145 \cdot V_f + 27 (c_r = 0,926) \dots \dots \dots (34)$$

Compression

$$\sigma_c = 640 \cdot V_f + 116 (c_r = 0,954) \dots \dots \dots (35)$$

Cas B : Résine violet

Flexion

$$\sigma_c = 2,594 \cdot V_f + 17,5 (c_r = 0,983) \dots \dots \dots (36)$$

Compression

$$\sigma_c = 4,051 \cdot V_f + 80 (c_r = 0,956) \dots \dots \dots (37)$$

σ_c représente la contrainte à la rupture du composite béton de résine fibré. Les coefficients de corrélation (c_r) sont satisfaisants et très proches de 1 traduisant ainsi la bonne approche.

L'ordonnée à l'origine de ces droites de régression permet d'estimer la valeur calculée de la contrainte à la rupture de la matrice σ_m pour chaque type de sollicitation et qui est comparée à celle mesurée expérimentalement dans le tableau 4.1. L'écart entre la valeur expérimentale et celle théorique est faible pour les deux cas et apparaît non significatif. La comparaison est ainsi raisonnable.

Tableau 4.1. Valeurs des résistances mesurée et calculée.

Type de sollicitation	σ_m mesurée (MPa)		σ_m théorique (MPa)	
	Cas A	Cas B	Cas A	Cas B
Flexion 3 points	21	27,5	17	27
Compression	86	118	80	116

Par analogie avec les équations de régression linéaire des droites de les figures 3.3 et 3.35, la prévision du comportement mécanique à la rupture des micro-bétons de résine peut être traduite en adoptant comme contrainte à la rupture de la fibre de verre la même valeur en flexion et en compression à savoir $\sigma_f = 2400$ MPa correspondante à la rupture d'un fil silicone industriel [121].

Cas A : Résine grenat

En flexion, en adoptant σ_m égale à 27 MPa pour le cas A (résine grenat), le comportement à la rupture des micro-bétons de résine polyester peut ainsi être approché par le modèle empirique suivant :

$$\sigma_c = 0,071 \sigma_f \cdot V_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \dots \dots \dots (38)$$

En compression et en prenant σ_m égale à 116 MPa pour le cas A (résine grenat), le modèle s'écrit :

$$\sigma_c = 0,315 \sigma_f \cdot V_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \dots \dots \dots (39)$$

Cas B : Résine violet

En flexion, en adoptant σ_m égale à 21 MPa pour le cas B (résine violet), le comportement à la rupture des micro-bétons de résine polyester peut ainsi être approché par le modèle empirique suivant :

$$\sigma_c = 0,035 \sigma_f \cdot V_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \dots \dots \dots (40)$$

En compression et en prenant σ_m égale à 86 MPa pour le cas B (résine violet), le modèle s'écrit :

$$\sigma_c = 0,0079 \sigma_f \cdot V_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \dots \dots \dots (41)$$

Les valeurs du coefficient K égale à 0,071 pour le cas A (résine grenat) et 0,035 pour le cas B (résine violet) sont très inférieure à celle de 3/8 rapportée par la littérature dans le cas général de prévision du comportement à la rupture des matériaux composites traditionnels à renforts fibreux orientés au hasard soumis à la traction directe [122].

Cette divergence est probablement la conséquence de nombreux paramètres difficiles à identifier. On notera toutefois que dans notre cas, la différence peut s'expliquer en partie par la nature de la matrice qui est en micro-béton ainsi que par la nature de la sollicitation qui est la flexion.

Ces modèles empiriques en compression peuvent être utilisés dans un souci d'efficacité pour les utilisateurs industriels ainsi que pour les chercheurs, techniciens et ingénieurs des laboratoires pour comparer, optimiser et évaluer le comportement des différents micro-bétons de résine composés.

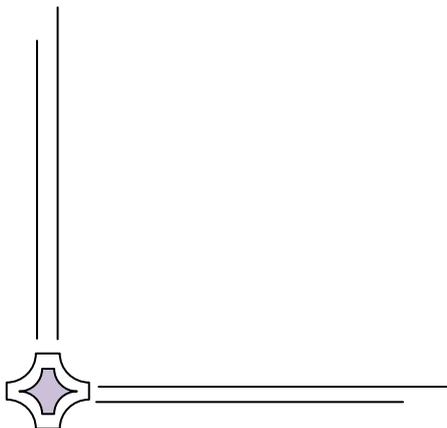
Chapitre V :

Approche probabiliste de la rupture « Application du modèle statistique de Weibull »



En théorie des probabilités, la loi de Weibull est une loi de probabilité continue. L'interprétation de Weibull sur le phénomène de rupture se résume en l'effet de taille et de volume. Son raisonnement est basé sur le principe qu'une structure possède la résistance de la partie la plus faible, en d'autre terme du maillon le plus faible. Ce principe est connu sous le nom de W.L.T (Weak link theory).

La distribution de Weibull est souvent utilisée dans le domaine de l'analyse de la durée de vie. Grâce à sa flexibilité elle peut reproduire le comportement d'autres lois de probabilités telles que la loi normale et la loi exponentielle.



Sommaire

1. Application du modèle probabiliste de Weibull
2. Conclusion

1. Application du modèle probabiliste de Weibull

La théorie statistique de Weibull est souvent utilisée pour la modélisation de la rupture des matériaux hétérogènes fragiles et notamment les matériaux composites céramiques et fibrés à matrice fragile (Curtin, 1998; Charles et Hild, 2002; Hild et al., 2003; Mishnaevsky). Cette théorie a aussi été utilisée dans le cas des bétons pour assoir un modèle probabiliste d'endommagement implanté dans un code de calcul en éléments finis par (P. Rossi[123]) pour développer son modèle stochastique probabiliste de fissuration des bétons et des bétons à fibres métalliques. Ce dernier modèle correctement validé constitue un outil performant d'application aussi bien pour la recherche que pour la résolution de problèmes industriels.

L'application du modèle à deux paramètres de Weibull au cas des micro-bétons de résine de cette étude est traduite par la figure 5.1 qui montre la probabilité de rupture pour chaque niveau de contrainte de rupture atteint dans les essais de flexion en fonction de la contrainte ultime appliquée mesurée. Ces essais ont été effectués sur un lot de 31 éprouvettes d'une même gâchée, fabriquées, moulées et essayées dans les mêmes conditions correspondantes à un micro-béton résineux avec un rapport G/S = 0,5. La courbe lissant les points de la figure 5.2 est une sigmoïde traduisant la distribution de Weibull des contraintes à la rupture mesurées en flexion trois points.

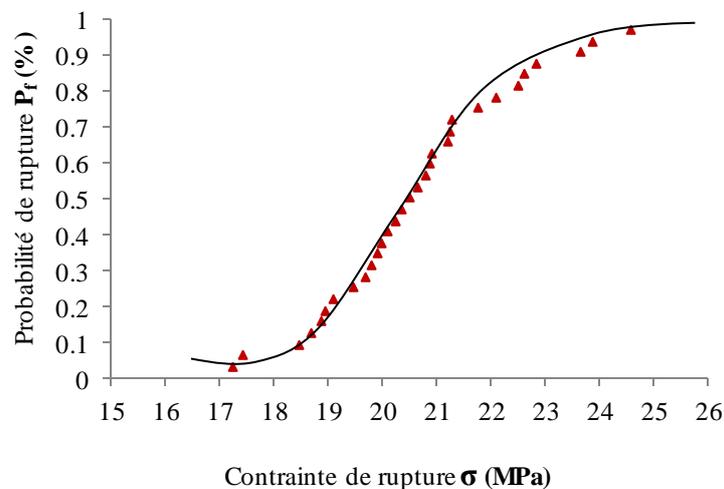


Figure 5.1. Contrainte à la rupture en fonction de la probabilité de rupture.

La représentation graphique de l'équation de probabilité linéaire pour la détermination du module de Weibull et de la contrainte de normalisation est illustrée par la figure 5.2. Il existe une légère dispersion des points expérimentaux autour de la droite de régression linéaire. Ces écarts des positions des points par rapport à la droite peuvent être dus à l'existence de plusieurs types de défauts comme révélées par les observations microscopiques et qui conduit probablement à plusieurs distributions qui déterminent le comportement de ces matériaux.

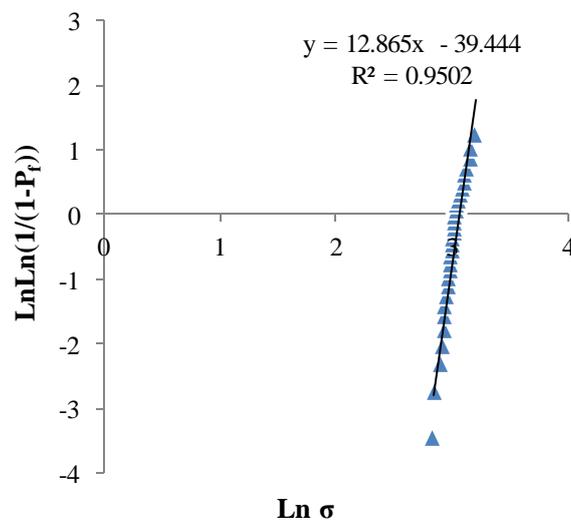


Figure 5.2. Equation de probabilité linéaire.

De nombreuses variables, autre que la taille des défauts qui affectent la résistance de ces matériaux, qui apparaissent et qui se développent durant le processus de rupture comme la densité des pores et des microfissures, leur croissance lente au cours du chargement, les bifurcations des chemins de fissuration au croisement des granulats et d'obstacles et leur contournement, les origines multiples des initiateurs de rupture dans ces matériaux ainsi que Les différents modes de ruine accentuent les phénomènes de dispersion autour des droites de régressions linéaires.

L'observation de la microstructure des micro-bétons de résine distingue la présence de zones relativement riches en matrice et de zones concentrant les granulats ce qui pourrait engendrer deux types de dispersions relatives (figure 5.3).

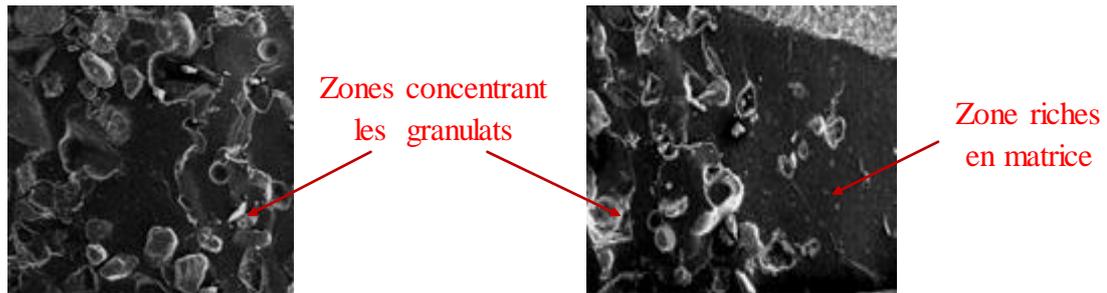


Figure 5.3. Observation de la microstructure des micro-bétons de résine.

Ainsi la distribution des contraintes dans la matrice, sur les interfaces granulat/matrice et dans les granulats se trouve très sensible à la distribution de fraction volumique locale des éléments constitutifs. La présence plus ou moins marquée et plus ou moins volumineuse de porosités distribuées dans le volume et plus ou moins rapprochées des granulats dans certains cas et pour certaines localisées même sur les interfaces matrice/granulat provoque localement une variation de contrainte locale relativement importante ce qui modifie les cinétiques d'endommagement et de rupture d'une éprouvette à une autre.

D'autre part, tous ces défauts peuvent ne pas appartenir à la même famille statistique et un mélange de deux ou plusieurs familles statistiques influence forcément les valeurs estimées du module de Weibull comme il a été rapporté dans le cas de matériaux composites [124]. Les éprouvettes qui se caractérisent surtout par une différence d'état, une variabilité dans leur géométrie due aux méthodes de fabrication et une différence dans leur poids et leur densité sont ainsi nominalement non identiques et par conséquent peuvent aussi appartenir à des populations statistiquement non comparables.

Il convient de noter que les résultats obtenus divergent souvent de la représentation de Weibull pour les valeurs les plus élevées et les plus faibles c'est à dire les valeurs extrêmes des contraintes ou des probabilités.

La valeur du module de Weibull mesurée égale à 12,86 semble être raisonnable pour ce type de matériau. Ainsi comme rapporté dans la littérature scientifique et technique cette valeur du module de Weibull inférieure à 20 est jugée faible et représente donc un indicateur de la distribution des défauts qui est très variable d'un échantillon à un autre ce qui explique la dispersion importante relevée sur les valeurs des contraintes à la rupture mesurées.

Ainsi les défauts peuvent avoir une sévérité différente et les charges nécessaires pour amorcer des fissures successives sont d'autant plus élevées que les défauts sont peu sévères ou peu prononcés. Ceci rejoint les conclusions de (*J. Lamon [125]*) qui estime qu'il est clair et même

logique qu'une faible dispersion engendre une même sévérité des défauts microstructuraux et par conséquent les fissures se forment donc pour la même force.

A titre indicatif et comparatif, il est intéressant de noter que pour les aciers qui sont des matériaux homogènes et moins dispersifs dans leurs caractéristiques mécaniques, le module de Weibull est généralement compris entre 50 et 100. Pour les matériaux céramiques fragiles, (*G. Fantozzi [126] [17]*) avance que le module de Weibull est compris entre 5 et 30.

Sur la base d'une adaptation à des essais de flexion de l'approche de Weibull le plus souvent utilisée pour des essais de traction, (*C. Arvieu et al. [127]*) proposant une méthode originale de caractérisation à la rupture des filaments céramiques de diamètre 100 et 150 microns avancent des valeurs de 11,9 pour un matériau Sic et de 32 et 38 pour un matériau SCS6. Ces deux céramiques se distinguent par des substrats filamentaires de départ et des microstructures différentes. Ces valeurs sont confirmées par des essais de traction directe sur des mèches. Les auteurs concluent que la comparaison entre la sollicitation de flexion et celle de la traction permet de situer les défauts à l'origine des ruptures.

La dispersion des valeurs du module de Weibull rencontrées dans la littérature résulte selon (*K. Trustum et A.S. De Jayatilaka [128]*) de l'écart type lié au nombre d'échantillons testés. Des relations empiriques rapportées dans la littérature permettent de relier expérimentalement le module de Weibull m au coefficient de variation c , paramètre de mesure de la dispersion observée sur les contraintes à la rupture. (*J. Margetson & B.E. Brokenbrow [129]*) proposent la relation suivante : $c = 1,27 / (m + 0,56)$. Pour un coefficient de variation de 10% généralement mesuré sur la dispersion des contraintes à la rupture de matériaux composites à base de ciment renforcée de fibres de verre, la valeur du module de Weibull est de l'ordre de 10 selon une estimation de (*L.J. Broutman & R.H. Krock [130]*). Pour (*C. Zweben [131]*) le module de Weibull m et le coefficient de variation c des contraintes à la rupture en traction de matériaux composites sont reliés de façon inverse par la relation empirique suivante : $m=1,2/c$. (*R.C. Wetherhold [132]*) propose une relation analogue et rapporte des valeurs de m comprises entre 12,9 et 16,6 pour des matériaux composites contenant une modeste concentration de fibres et montrant une variabilité significative des contraintes à la rupture.

Le tableau 5.1 résume les valeurs du module de Weibull m mesurées expérimentalement et celles calculées à partir des relations empiriques citées précédemment.

Tableau 5.1. Comparaison du module de Weibull expérimental et calculé selon les modèles de la littérature.

	J. Margetson & B.E. Brokenbrow [129]	L.J. Broutman & R.H. Krock [130]	C. Zweben [131]	R.C.Wetherhold [132]	
Module de Weibull m	12,86	12,26	10	12	12,9 – 16,6

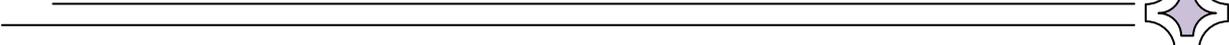
Comme il apparaît sur ce tableau, la valeur expérimentale mesurée de m se situe de façon satisfaisante à la borne inférieure de la plage donnée par *R.C. Wetherhold*. La relation de *C. Zweben* et celle de *J. Margeston et B.E. Brokenbrow* aboutissent à des valeurs calculées de m comparables. Ces valeurs sont toutefois légèrement inférieures à celle mesurée par l'expérience. La relation de *L.J. Broutman et R.H. Krock* donne la valeur de m la plus faible par rapport à l'expérience. Le degré élevé de la dispersion relevée sur les valeurs mesurées des contraintes à la rupture des bétons de résine en flexion trois points peut être à l'origine de ces différences. Cette dispersion acceptée aujourd'hui comme une caractéristique des matériaux granulaires est la conséquence de la présence de défauts d'origines multiples répartis au sein du volume. Ces défauts de différentes formes, tailles, orientations et sévérités peuvent appartenir à des populations statistiques non comparables. Par conséquent tous ces paramètres conjugués à d'autres inhérents au caractère hétérogène et complexe des matériaux composites granulaires ne peuvent rendre compte d'une bonne application des corrélations appliquées comme signalé dans le cas de matériaux composites à résine synthétique renforcés de tissus de verre et de perlon [123].

2. Conclusion

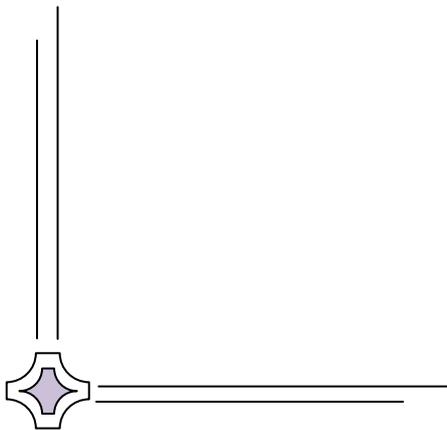
Le modèle probabiliste de Weibull à deux paramètres semble être adapté à la description du comportement à la rupture fragile en flexion trois points des micro-bétons de résine. Cette application satisfaisante provient essentiellement de la souplesse qui lui est conférée par ses deux paramètres σ_0 et m qu'il est toujours possible d'ajuster aux résultats expérimentaux. Le paramètre de Weibull a permis, d'une part, de mesurer d'une manière générale le degré de fragilité du matériau et, d'autre part, de quantifier la dispersion des résultats des contraintes à la rupture mesurées.

Chapitre VI :

**Application de mécanisme de rupture aux
essais de choc**



La méthode de Williams basée sur les principes de la mécanique linéaire élastique de la rupture a été utilisée pour interpréter les résultats des essais de choc sur des éprouvettes entaillées. Cette méthode permet d'obtenir une estimation de l'énergie ou ténacité G_{IC} paramètre intrinsèque du matériau à partir de l'énergie totale dissipée U lors du choc.



Sommaire

1. Application de la mécanique de la rupture aux essais de choc sur le micro-béton de résine fibré et non fibré et sur résine pur

1.1 Résultats des éprouvettes de micro-béton de résine sans entaille168

Mélange I: Résine pure (résine polyester + durcisseur).

Mélange II: Béton de résine optimal sans fibre (35% de résine polyester, 80% de sable fin, 20% sable moyen et un rapport de G/S = 0,5).

Mélange III: Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 1% de fibre de verre).

Mélange IV: Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 2% de fibre de verre).

Mélange V: Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 3% de fibre de verre).

1.1.1 Effet du taux de renfort de verre sur la résilience173

2.2 Résultats des éprouvettes de béton de résine avec entaille.....174

2. Conclusion

1. Application de la mécanique de la rupture aux essais de choc sur le micro-béton de résine fibré et non fibré et sur résine pur

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus lors des essais de choc. Notre étude s'intéresse à une caractérisation mécanique expérimentale du micro-béton de résine polyester. Cette caractérisation se fait à travers des essais de choc ainsi que l'obtention des lois de comportement de ce matériau composite par la méthode de Williams. Ces essais sont effectués sur des machines spécialisées, qui s'appellent les pendules de Charpy.

Choc Charpy

L'essai Charpy a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. On mesure ce que l'on appelle leur résilience, c'est-à-dire l'énergie consommée pour rompre une éprouvette de référence de section égale à 1 cm^2 en utilisant un « mouton-pendule ».

Les essais de Charpy ont été effectués sur des éprouvettes composites non-entaillées selon la norme NF EN ISO 179-1 et suivant deux positions de percussion « ep » et « fn » (figure 2.14 et 2.15) en utilisant un mouton pendule CP300A (figure 2.16).

1.1. Résultats des éprouvettes de micro-béton de résine sans entaille

Les résultats de mesure de la résilience de la résine pure sont rassemblés dans le tableau 6.1 et présentés sur la figure 6.1. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types des Résiliences.

Mélange I : Résine pure (résine polyester + durcisseur).

Tableau 6.1. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange I.

Mélange I	Epaisseur B (mm)	Hauteur W (mm)	Energie de choc U (joule)	Résilience R (joule/m ²)	R moyenne joule/m ²
Eprouvette 1	15,22	19,48	0,52	1,76	
Eprouvette 2	15,06	16,32	0,61	2,47	3,87
Eprouvette 3	17,03	19,35	1,77	5,37	± (2,48)
Eprouvette 4	17,22	19,46	1,78	5,89	

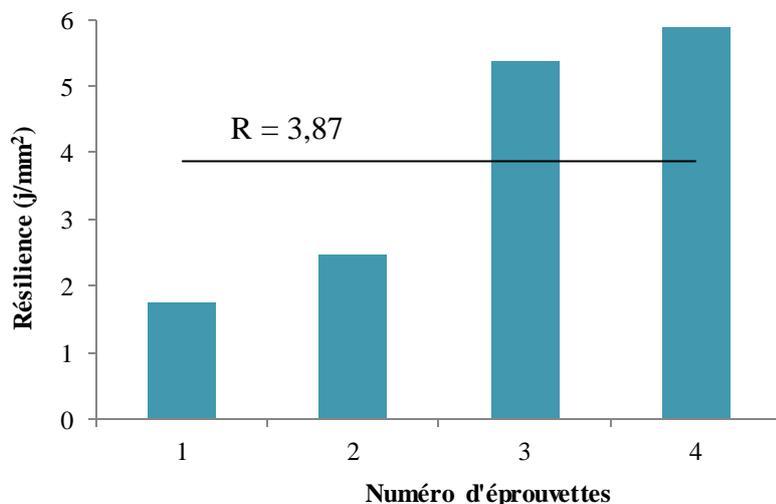


Figure 6.1. Courbe d'énergie de choc de mélange I.

Dans ce tableau on remarque une dispersion entre les données numériques qui est le résultat du nombre limité des éprouvettes réalisées et de l'effet de la taille de petites démentions des éprouvettes réalisés

Mélange II : Béton de résine optimal sans fibre (35% de résine polyester, 80% de sable fin, 20% sable moyen et un rapport de G/S = 0,5).

Les résultats de mesure de la résilience de micro-béton de résine sont rassemblés dans le tableau 6.2 et illustré dans la figure 6.2. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types des Résiliences.

Tableau 6.2. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange II.

Mélange II	Epaisseur B (mm)	Hauteur W (mm)	Energie de choc U (joule)	Résilience R (joule/m ²)	R moyenne joule/m ²
Eprouvette 1	11,11	19,93	0,81	3,65	
Eprouvette 2	15,98	20,43	0,91	2,80	
Eprouvette 3	15,73	19,94	0,90	2,87	
Eprouvette 4	16,01	20,08	1,49	4,63	4,29
Eprouvette 5	15,01	21,00	1,82	5,77	± (1,04)
Eprouvette 6	16,05	19,03	1,26	4,13	
Eprouvette 7	14,03	19,03	1,49	5,57	
Eprouvette 8	16,01	19,03	1,41	4,63	
Eprouvette 9	15,01	19,01	1,25	4,37	
Eprouvette 10	15,01	19,01	1,29	4,53	

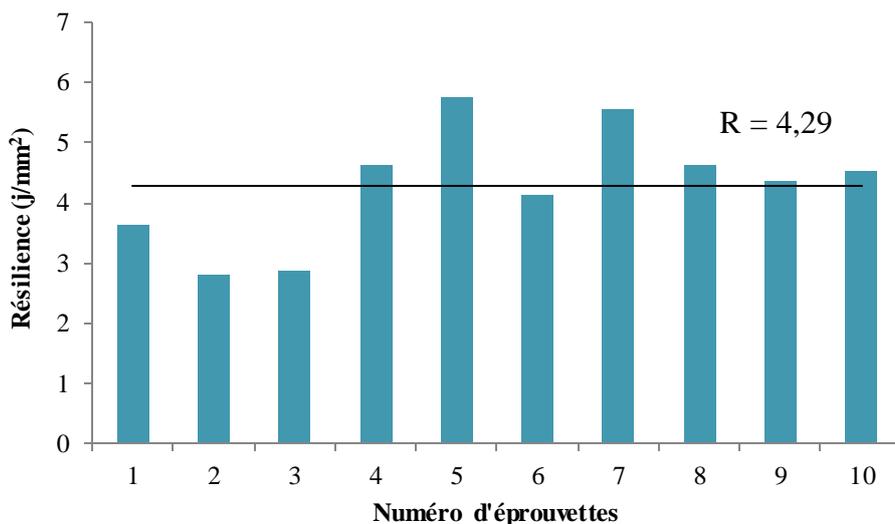


Figure 6.2. Courbe d'énergie de choc de mélange II.

Par l'analyse du tableau et du graphe on voit aussi une dispersion des résultats entre les éprouvettes essayées dans les mêmes conditions ce qui est normale dans notre cas a cause des difficultés de décoffrage.

Mélange III : Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 1% de fibre de verre).

Les résultats de mesure de la résilience de micro-béton de résine avec 1% de fibre de verre sont rassemblés dans le tableau 6.3 et illustré dans la figure 6.3. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types des Résiliences.

Tableau 6.3. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange III.

Mélange II	Epaisseur B (mm)	Hauteur W (mm)	Energie de choc U (joule)	Résilience R (joule/m ²)	R moyenne joule/m ²
Eprouvette 1	16,02	19,01	1,06	5,28	
Eprouvette 2	15,56	19,01	1,06	4,19	
Eprouvette 3	17,75	19,44	1,01	4,95	
Eprouvette 4	14,55	20,66	1,96	5,18	5,08
Eprouvette 5	15,3	18,58	1,90	4,82	± (0,48)
Eprouvette 6	16,3	19,01	1,02	4,77	
Eprouvette 7	16,24	19,08	1,24	5,99	
Eprouvette 8	16,66	19,44	1,15	5,54	
Eprouvette 9	17,55	20,07	1,40	4,96	
Eprouvette 10	17,65	20,76	1,69	5,21	

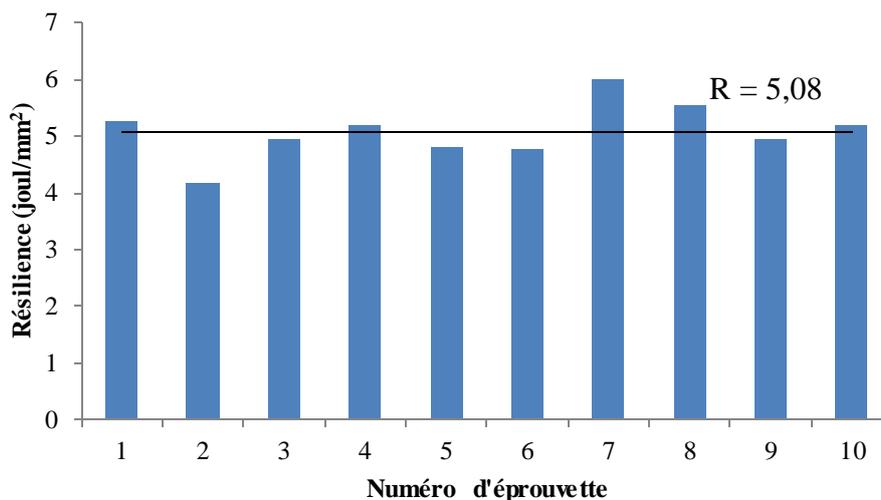


Figure 6.3. Courbe d'énergie de choc de mélange III.

L'observation de ce graphe avec le tableau nous permet de tirer une conclusion :

Les bonnes conditions de décoffrage et la bonne conservation des éprouvettes permet aussi de limiter les dispersions entre les résultats des différentes éprouvettes.

Mélange IV : Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 2% de fibre de verre).

Les résultats de mesure de la résilience de micro-béton de résine avec 2% de fibre de verre sont rassemblés dans le tableau 6.4 et présentés sur la figure 6.4. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types des Résiliences.

Tableau 6.4. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange IV.

Mélange II	Epaisseur B (mm)	Hauteur W (mm)	Energie de choc U (joule)	Résilience R (joule/m ²)	R moyenne joule/m ²
Eprouvette 1	16,55	19,01	2,10	6,67	
Eprouvette 2	15,44	19,08	1,64	5,58	
Eprouvette 3	17,05	19,97	2,98	8,77	
Eprouvette 4	16,54	20,01	2,05	6,19	6,27
Eprouvette 5	16,01	20,85	2,96	8,88	± (1,27)
Eprouvette 6	15,86	19,44	1,72	5,59	
Eprouvette 7	15,44	19,08	3,72	6,69	
Eprouvette 8	17,55	19,44	4,01	5,75	
Eprouvette 9	17,55	19,97	3,58	8,20	
Eprouvette 10	16,01	19,01	4,13	6,59	

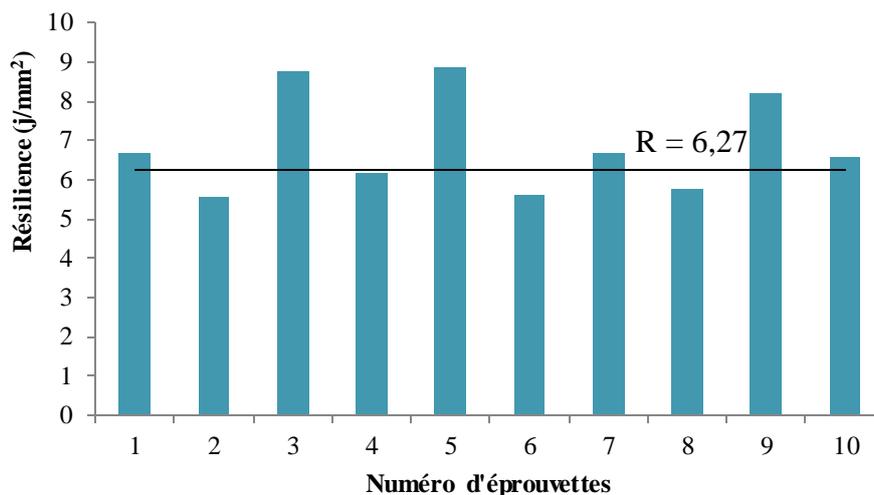


Figure 6.4. Courbe d'énergie de choc de mélange IV.

La dispersion qui apparait a pour cause plusieurs facteurs déjà discutés en plus des mauvaises conditions de malaxage et de mise en œuvre.

Mélange V : Béton de résine avec fibre de verre (béton de résine optimal + 3% de fibre de verre).

Les résultats de mesure de la résilience de micro-béton de résine avec 3% de fibre de verre sont rassemblés dans le tableau 6.5 et présentés sur la figure 6.5. Les chiffres entre parenthèses indiquent les écarts-types des Résiliences.

Tableau 6.5. Résultats géométrie et l'énergie de choc de mélange V.

Mélange II	Epaisseur B (mm)	Hauteur W (mm)	Energie de choc U(joule)	Résilience R (joule/m ²)	R moyenne joule/m ²
Eprouvette 1	15,44	18,44	1,52	7,33	
Eprouvette 2	14,54	19,45	2,02	7,13	
Eprouvette 3	16,11	19,12	1,58	6,13	
Eprouvette 4	15,12	20,01	1,31	7,32	7,72
Eprouvette 5	16,21	19,96	3,56	9,99	± (1,24)
Eprouvette 6	15,11	21,01	2,25	7,10	
Eprouvette 7	14,44	18,12	3,80	7,52	
Eprouvette 8	16,24	19,08	3,44	7,09	
Eprouvette 9	15,44	19,97	3,68	9,92	
Eprouvette 10	16,44	21,55	4,52	7,76	

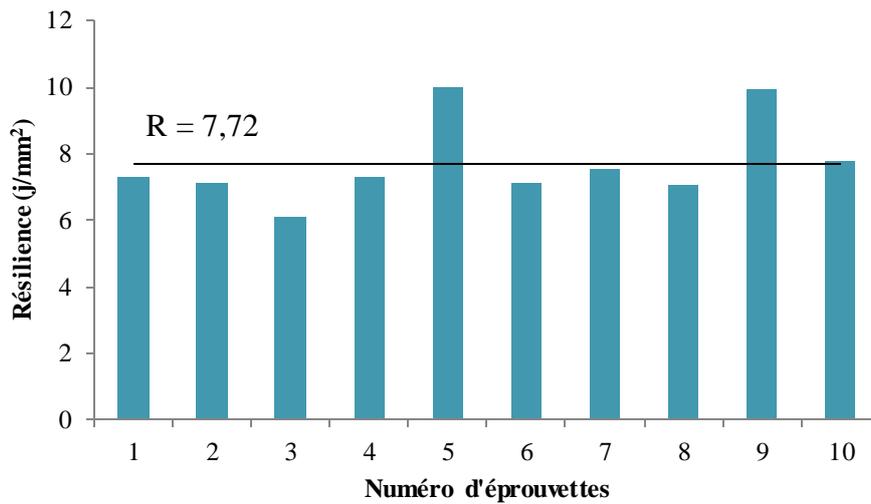


Figure 6.5. Courbe d'énergie de choc de mélange V.

Des dispersions qui apparaissent encore à cause des facteurs déjà discuté.

1.1.1. Effet du taux de renfort de verre sur la résilience

La figure 6.6 représente l'effet de taux des fibres sur la résilience du micro-béton de résine avec 3 pourcentages de fibre de verre E.

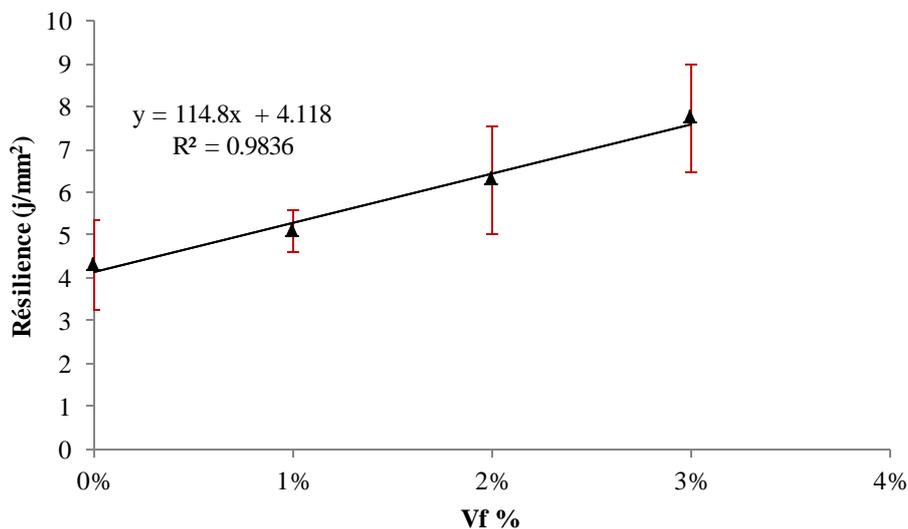


Figure 6.6. Effet de taux des fibres sur la résilience.

On remarque que l'augmentation de taux de fibre accroît la résilience, cette augmentation de la résilience est donnée par la modèle linéaire suivant :

$$R = 115 \cdot V_f + 4 \dots \dots \dots (42)$$

Avec un coefficient de corrélation $c_r = 0,991$

Ce coefficient est satisfaisant traduisent la bonne corrélation malgré l'importante dispersion des résultats de mesure de la résilience

1.2. Résultats des éprouvettes de béton de résine avec entaille

Ces essais ont été effectués uniquement sur un micro-béton à résine seule non fibrée.

Ont été testées des éprouvettes avec l'entaille (4 mm jusqu'à 10 mm). Quatre échantillons ont servi à la caractérisation à chaque entaille. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de williams sur des dimensions normalisées. Les résultats moyens pour le cas d'éprouvette de béton de résine avec entaille et avec une distance entre appuis $L = 70$ mm sont reportés sur le tableau 6.6.

Tableau 6.6. Résultats de l'essai de choc avec entaille de béton de résine.

Nr	1	2	3	4	5	6	7
Epaisseur d'éprouvette B (mm)	15,83	15,63	16,23	16,06	16,06	15,62	15,67
Largeur d'éprouvette W (mm)	20,46	20,16	20,16	20,21	20,67	20,64	19,80
Entaille A (mm)	4	5	6	7	8	9	10
a/w	0,20	0,24	0,30	0,34	0,38	0,44	0,50
R moy (joule/m2)	2,93	2,19	2,48	2,51	2,22	2,24	2,39
Facteur de calibration Φ	0,468	0,413	0,354	0,324	0,299	0,265	0,233
Energie de choc U (joule)	0,94	0,88	0,82	0,82	0,70	0,72	0,73
B W Φ (mm²)	151,58	130,14	115,83	101,95	99,26	85,44	72,29

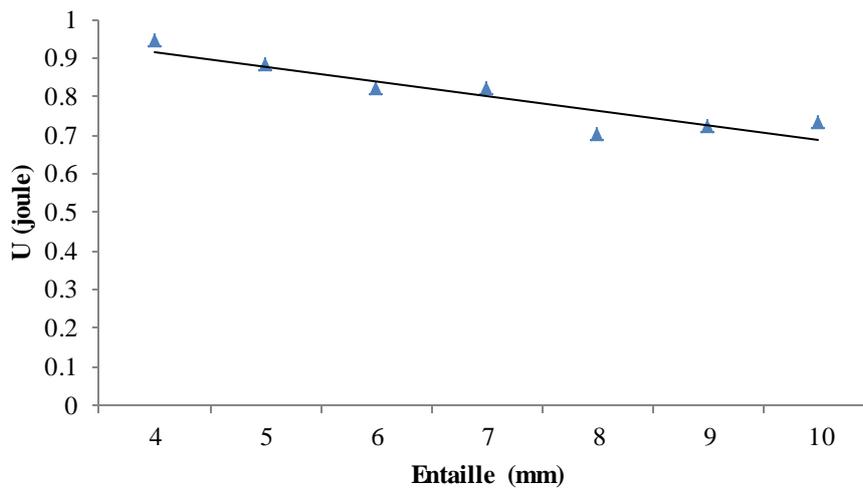


Figure 6.7. Énergie de choc en fonction des entailles.

Ce graphe montre que la variation de U en fonction de la longueur de l'entaille. Les points expérimentaux sont dispersés.

La représentation graphique des points de mesure de l'énergie de rupture totale perdue par le marteau U en fonction des surfaces rompues est représentée sur la figure 6.8.

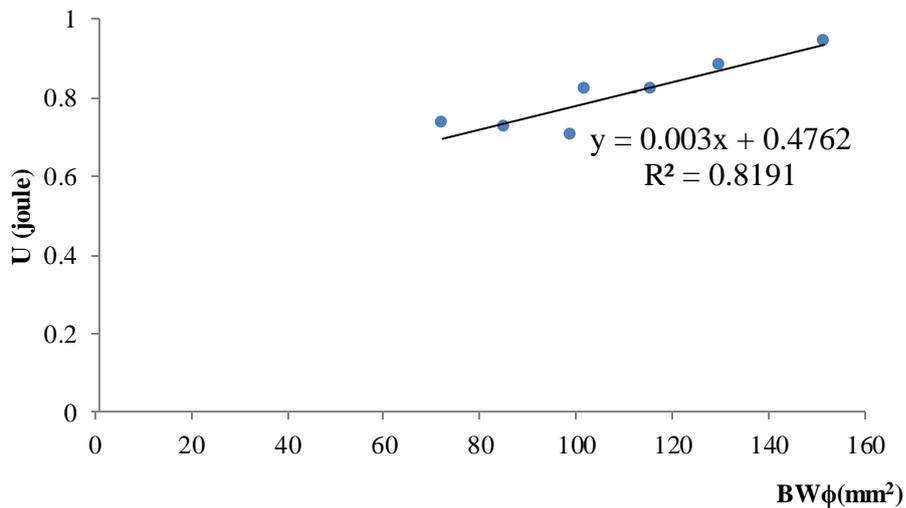


Figure 6.8. Énergie de rupture totale en fonction des surfaces rompues $BW\Phi$ de béton de résine.

Chapitre VI : Application de mécanisme de rupture aux essais de choc

Cette dispersion caractéristique aussi des matériaux composites est la conséquence surtout de l'hétérogénéité du matériau sur le chemin de la fissuration, du mode de fabrication des entailles ainsi que de la dispersion de l'essai mécanique lui même.

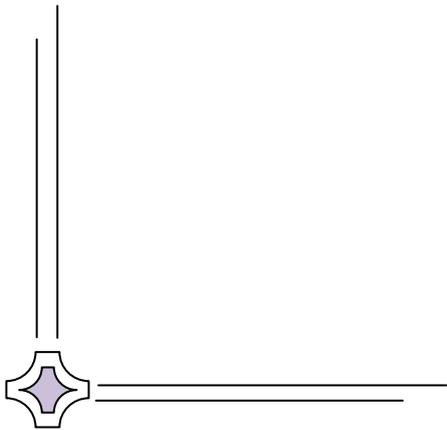
Chapitre VII :

Influence du mode de réparation des fissures par le mortier de résine, le TFC et le TFV sur les performances mécaniques des bétons traditionnels



Un nouveau matériau composite de construction à base de formulation empirique à matrice en résine de résistance 3 à 4 fois celle de béton traditionnel est utilisé pour la réparation des ouvrages fissurée.

Dans ce chapitre nous allons examiner le mortier de résine optimal dans la réparation des éprouvettes rompues lors des essais de flexion à des charges appliquées de 60%, 70%, 80% et 90 %, de la charge maximale de rupture de béton classique fibrée et de béton haute performance renforcée de fibre métallique.



Sommaire

1. Introduction	
Problématique	
2. Eprouvettes à réparer	
3. Quantification des ouvertures de fissures	
3.1. Objectif expérimental.....	181
3.2. Constatations expérimentales.....	182
3.3. Mode de rupture avant la réparation.....	183
4. Technique de réparation	
4.1. Réparation sans bandage.....	185
4.2. Réparation avec bandage.....	185
5. Expérimentation : Essai de traction par flexion 4 points	
5.1. Réparation avec le mortier de résine polyester sans bandage.....	187
5.2. Mode de rupture.....	188
5.3. Réparation avec le mortier de résine et le TFC et le TFV avec bandage.....	189
5.4. Mode de rupture.....	190
6. Les avantages de la réparation par les matériaux composites	
7. Synthèse	

Chapitre VII : Influence du mode de réparation des fissures par le mortier de résine, le TFC et le TFV sur les performances mécaniques des bétons traditionnels

1. Introduction

La plus grande partie des ouvrages de génie civil est conçue pour durer 100 ans en moyenne mais le béton est un matériau relativement fragile, puisque environ 30% des ouvrages nécessitent une réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile. Compte tenu du coût des structures, il est important de pouvoir les réparer afin d'augmenter leur durée de vie. Le principe du renforcement ou de la réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées.

Il existe de nombreuses méthodes de réparation des fissures. Certaines méthodes sont spécifiquement conçues pour réparer des fissures actives, tandis que d'autres sont mieux adaptées pour réparer des fissures stables. Certaines méthodes permettent de restaurer la capacité portante de l'élément et d'améliorer la résistance mécanique. Il est intéressant de pouvoir remplacer le renforcement traditionnel par des matériaux composites.

Les expériences menées jusqu'à présent utilisent des matériaux composites en fibres de verre, en fibres de carbone et le mortier de résine polyester optimal. C'est pour cette raison que nous avons utilisée ces deux types du tissu pour la réparation de nos éprouvette sur des bétons ordinaire fibré et non fibré, de haute performance et haute performance fibré rompues après des essais de traction par flexion 4 points et d'estimer leurs résistances mécaniques après la réparation en appliquant le même essai pour deux objectifs :

- Illustrer les étapes de réparation des éprouvettes rompues sous des actions mécaniques.
- Evaluer la contribution de mortier de résine polyester par rapport à la résistance en flexion des éprouvettes après les réparations.

Problématique

Comment éviter la fissuration instable et minimiser le risque de fissuration du béton classique et celui à haute performance due à l'action des charges extérieures avant et après les propagations des fissures ?

- Par ajout des fibres métalliques à l'intérieur du béton.

- Par réparation par les matériaux composites en utilisant le mortier de résine polyester d'étude.

2. Eprouvettes à réparer

La réparation a été appliquée sur des éprouvettes en béton ordinaire :

- Des éprouvettes de dimensions (7×7 ×28) cm (BO).
- Des éprouvettes de dimensions (10×10 ×50) cm (BO).
- Des éprouvette de dimensions (10×10 ×30) cm (BO).
- Des éprouvettes prismatiques (7×7 ×28) cm en béton fibré (BF).

La réparation a été appliquée sur des éprouvettes en béton à haute performance :

- Des éprouvettes prismatiques (7×7 ×28) cm en (BHP).
- Des éprouvettes prismatiques (7×7 ×28) cm en (BHPF).

3. Quantification des ouvertures de fissures

La fissuration du béton est un processus hasardeux, hautement aléatoire et influencé par plusieurs facteurs. A cause de la complexité du problème, les méthodes actuelles qui permettent de prédire l'ouverture maximale d'une fissure sont basées essentiellement sur des constats expérimentaux. La figure 7.1 montre la fissure d'une épreuve après le chargement.



Figure 7.1. Fissure d'éprouvette après le chargement.

3.1. Objectif expérimental

Notre objectif dans cette étude est d'appliquer des taux de 60%, 70%, 80% et 90 %, de la charge maximale sur chaque épreuve de béton classique fibrée et de béton haute performance renforcée de fibres métalliques. Pour observer des macro-fissures avant la rupture on mesure son ouverture à l'aide d'un fissuromètre (figure 7.2).



Figure 7.2. Mesure d'ouverture à l'aide d'un fissuromètre.

3.2. Constatations expérimentales

Les observations ont montré qu'en général, les fissures prennent naissance en tant que micro fissures puis se développent en fissures avec des ouvertures mesurables. Une fissure devient visible à l'œil nu à partir d'une ouverture de l'ordre de 0,1 mm. L'ouverture d'une fissure de flexion, par exemple figure 7.3 diminue d'un maximum à la face la plus tendue à zéro au niveau de l'axe neutre dans le cas des pièces fléchies. Les charges externes conduisent à des fissures de flexion, des fissures de traction diagonales ou des fissures d'adhérence.

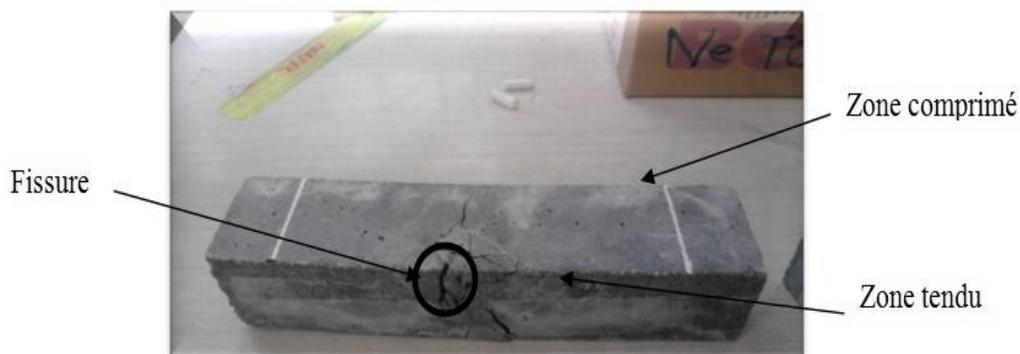


Figure 7.3. Éprouvette en BHPF après le chargement.

On applique respectivement 70, 80, 90,100% de la charge et on mesure l'ouverture à l'aide d'un fissuromètre sur quatre éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm de chaque mélange. Les résultats sont indiqués sur la figure 7.4.

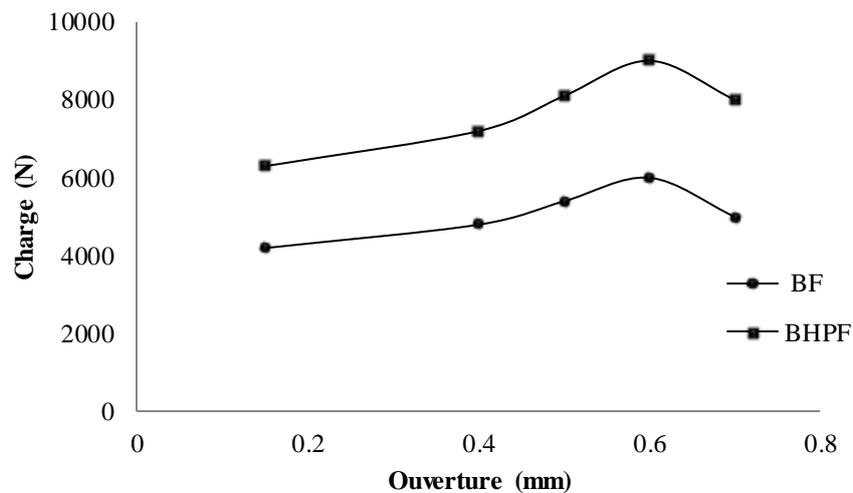


Figure 7.4. Courbe charge-ouverture de fissures de BOF et BHPF à l'aide d'une fissuromètre.

D'après les courbes on observe que avec l'augmentation de la charge l'ouverture va s'allonger jusqu' a la rupture.

Le béton fibré demande une charge plus importante que celle du béton classique pour se fissurer. Les essais ont montrés que l'ajout de fibres, même en faible quantité améliore le comportement du BOF et du BHPF vis-à-vis de la limite d'ouverture des fissures d'une manière appréciable. Dans ce sens, la formation des premières fissures est retardée dès son apparition.

3.3. Mode de rupture avant la réparation

Les fibres utilisées jouent un rôle primordial dans les améliorations obtenues. Les figures 7.5 et 7.6 montrent que les modes de rupture sont différent entre un BO et BOF, et entre un BHP sans fibres et un BHPF avec fibres. Dans le cas du BO et BHP sans fibres et sous des efforts excessifs de traction par flexion, la rupture se produit brutalement par élargissement rapide d'une fissure, sans avertissement puisque la déformation reste très faible. Par contre dans le cas des BOF et BHPF, la rupture, si elle est atteinte, n'est pas brutale et le béton devient moins fragile et plus ductile.



(a) : (10x10x50)

(b) : (10x10x30)

(c) : (7x7x28)

Figure 7.5. Éprouvettes rompues des différentes dimensions de béton sans fibre avant la réparation.

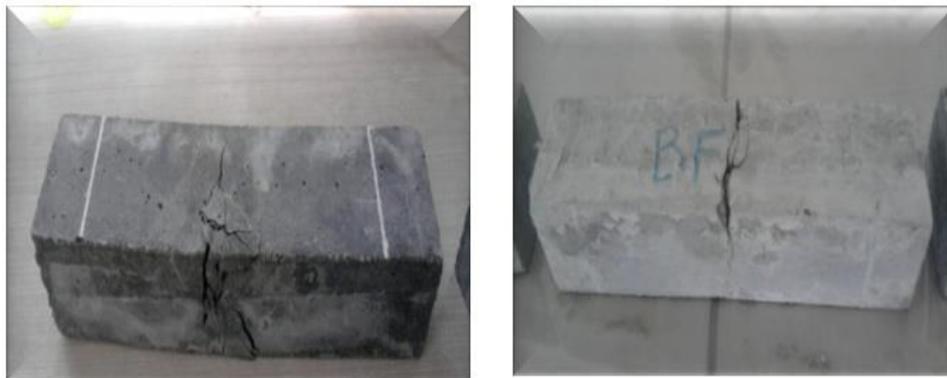


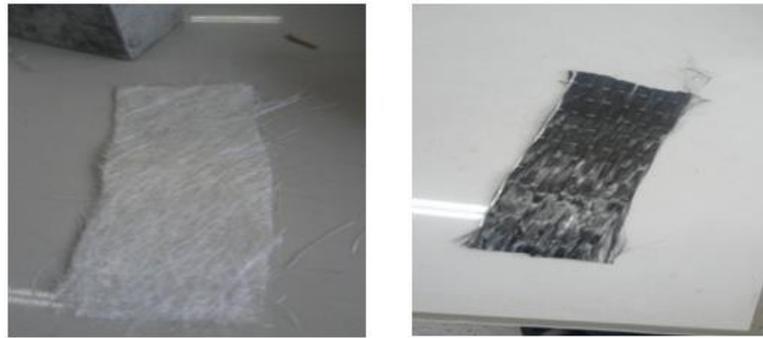
Figure 7.6. Éprouvettes rompues de béton avec fibre avant la réparation.

4. Technique de réparation

Cette partie traitera principalement une méthode de réparation par des matériaux composites même s'il existe de nombreuses autres techniques. Nous avons utilisée la résine seule et l'injection de mortier de résine avec bandage par le TFV et par le TFC pour la réparation des éprouvettes endommagées chargées en flexion (figure 7.7).

TFV : tissu de fibre de verre E.

TFC : tissu de fibre de carbone.



(a) : TFV

(b) : TFC

Figure 7.7. Tissu utilisé dans la réparation.

4.1. Réparation sans bandage

Les techniques et les étapes de réparation sans bandage adoptées sur les quatre types de béton formulés BO, BFM, BHP et BHPF (figure 7.8) se résument comme suit :

- On étale une couche mince de 1 à 2 mm de mortier de réparation sur la première demi-éprouvette obtenue après l'essai de flexion.
- On superpose les deux demi-éprouvettes en éliminant l'excès de mortier non adhérent résultant de la pression exercé pour assurer une bonne fixation et de façon à obtenir une rugosité suffisante.



Figure 7.8. Réparation avec le mortier de résine polyester (sans bandage).

4.2. Réparation avec bandage

Les techniques de réparation avec bandage sont illustrées sur les figures 7.9 et 7.10 et peuvent être résumées comme suit :

Etape A

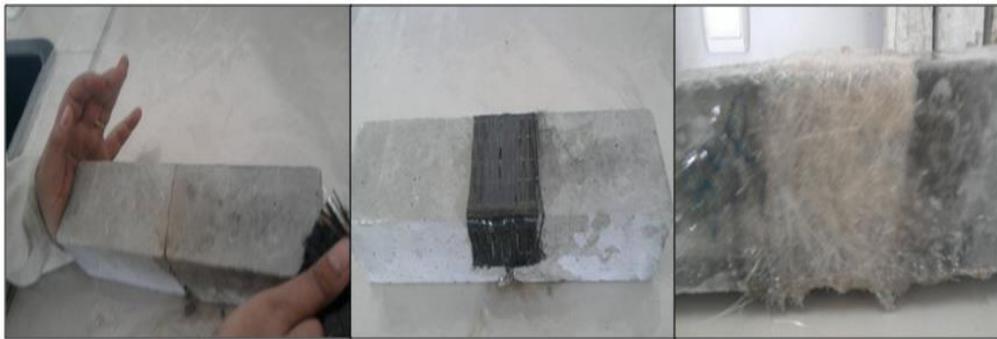
- injection de la résine seule dans la zone fissurée (dans notre cas rompue)

Chapitre VII : Influence du mode de réparation des fissures par le mortier de résine, le TFC et le TFV sur les performances mécaniques des bétons traditionnels

- après l'injection de la résine, une bande de fibre de carbone de forme U est placée et collée dans la zone tendue.
- la même procédure est réutilisée avec une bande de tissu de fibres de verre.

Etape B

- l'injection de la résine polyester seule est remplacée par l'injection de mortier de résine polyester.
- injection de mortier de résine polyester + bandage par TFV (tissu de fibre de verre).
- injection de mortier de résine polyester + bandage par TFC (tissu de fibre de carbone).



Etape A

Figure 7.9. Réparation avec la résine polyester seul (méthode de bandage).



Etape B

Figure 7.10. Réparation avec le mortier de résine polyester (méthode de bandage).

5. Expérimentation : Essai de traction par flexion 4 points

C'est l'essai le plus utilisé généralement dans la caractérisation des matériaux. Il permet de déterminer la résistance à la traction par flexion 4 points (figure 7.11). L'éprouvette est

placée sur l'appareil de chargement manuel de capacité 50 kN, la force appliquée doit croître régulièrement de manière continue et sans choc à une vitesse lente. On mesure alors la charge maximale atteinte avant la rupture par la lecture de la position de l'aiguille sur le cadran. Le calcul de la résistance à la traction par flexion est donné par la formule suivante :

$$R_{tf} = \frac{3 P L}{4 b h^2} \dots\dots\dots (43)$$

P : l'effort de rupture.

L : la distance entre les appuis.

b, h : dimensions de l'éprouvette (respectivement largeur et hauteur).



Figure 7.11. Dispositif d'essai de traction par flexion 4 points.

5.1. Réparation avec le mortier de résine polyester sans bandage

Lors de l'essai de traction par flexion 4 points sur les éprouvettes de béton ordinaire sans fibre réparées avec le mortier de résine sans bandage, on a observé une adhésion parfaite entre le mortier de réparation et le béton ordinaire juste avant le décollement, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rupture prématurée des éprouvettes dues au décollement de mortier de résine polyester violet.

Les résistances de traction par flexion enregistrées lors de l'essai sur les éprouvettes avant et après la réparation sont résumées dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1. Résistances mécaniques de traction par flexion des éprouvettes en bétons ordinaires avant et après la réparation sans bandage.

Dimensions d'éprouvettes	Résistance à la traction par flexion 4 points (MPa)	
	Avant réparation	Après réparation
A (7× 7 ×28)	3,3	3,07
B (10× 10 ×50)	3,28	3,37
C (10× 10 ×30)	3,38	3,00

Ces résultats sont illustrés sur la figure 7.12.

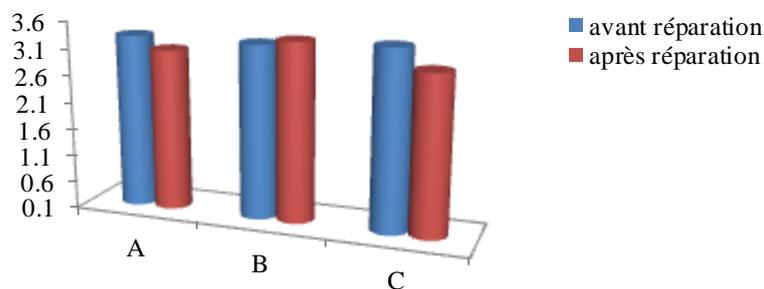


Figure 7.12. Comparaison des résistances mécaniques en flexion des bétons ordinaires avant et après la réparation sans bandage.

D'après le tableau 7.1 et la figure 7.12 on conclut que :

Il n'y a pas de différences significatives des résistances obtenues sur 3 géométries d'éprouvettes avant et après la réparation par le mortier de résine polyester. Une légère augmentation de la résistance mécanique des éprouvettes de dimension (10×10×50) cm est constatée après réparation.

Cette faible différence de la résistance est due au mécanisme de rupture.

La fonction principale de la résine est de transformer les efforts des éprouvettes aux mortiers de réparation. Le mortier ne contribue pas directement à la résistance des éprouvettes mais seulement à la distribution des efforts internes en augmentant leurs résistances.

5.2. Mode de rupture

La photo de la figure 7.13 montre des illustrations du mode de rupture des éprouvettes en flexion après la réparation.



Figure 7.13. Mode de rupture des éprouvettes en flexion après la réparation.

La détérioration d'une éprouvette de dimension (7×7×28) cm est produite par une nouvelle rupture espacée proportionnellement de l'ancienne. Ces fissures naissent à un des appuis en continuant vers le point central où la charge à été appliquée.

Pour les autres éprouvettes réparées, la rupture se produit au milieu et prend le même chemin que celui des fissurations anciennes. Les anciennes fissures n'évoluent pas si elles se trouvent dans la zone de flexion.

5.3. Réparation avec le mortier de résine polyester et (TFC, TFV) avec bandage

Durant les essais de traction par flexion en 4 points sur les éprouvettes réparées, il a été observé une adhésion parfaite entre le mortier de réparation et le béton juste avant le décollement c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rupture prématurée des éprouvettes due au décollement de mortier de résine polyester. Les valeurs des résistances mesurées sur les éprouvettes avant et après les étapes de réparation pour les différents bétons formulés sont résumées dans le Tableau 7.2.

Tableau 7.2. Résistances de traction par flexion enregistrées lors de l'essai sur les éprouvettes avant et après la réparation avec bandage.

Type des bétons	Avant la réparation	Après la réparation			
		TFC	TFV	M+TFC	M+TFV
BO	4,6	1,37	5,51	7,34	7,79
BF	5,5	2,29	5,96	5,51	6,96
BHP	6,9	3,70	3,21	7,80	7,80
BHPF	7,80	3,93	4,67	8,26	8,72

La figure 7.14 représente la résistance à la flexion avant et après la réparation avec bandage.

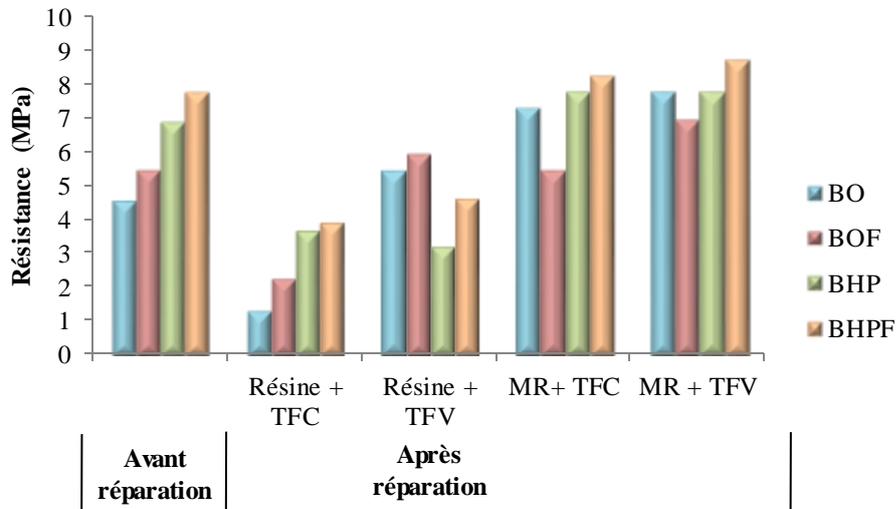


Figure 7.14. Résistance a la flexion avant et après la réparation avec bandage.

Il apparaît que la géométrie du TFC qui est unidirectionnelle et parallèle à la fissure n’a pas d’influence significative sur la résistance. Par contre, le TFV se distingue par une bonne adhérence avec le béton. Ce dernier engendre une augmentation de la résistance. Le TFV tissé sous forme bidirectionnelle en chaîne et trame aboutit ainsi à un processus de réparation efficace. Par ailleurs, la réparation par le mortier s’avère meilleure et plus efficace que celle par la résine toute seule.

5.4. Mode de rupture

L’image de la figure 7.15 montre un exemple d’illustration du mode de rupture des éprouvettes en flexion après la réparation. La détérioration des éprouvettes est produite par une nouvelle rupture espacée (2) proportionnellement à l’ancienne (1). Ces fissures naissent à un des appuis en continuant un chemin vers le point

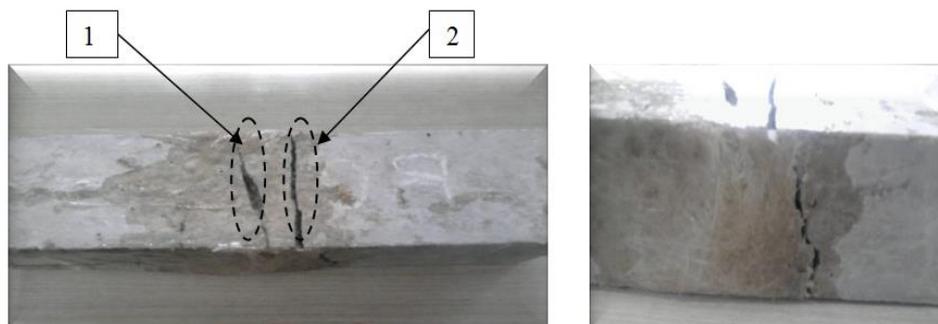


Figure 7.15. Mode de rupture des éprouvettes en flexion après la réparation.

6. Les avantages de la réparation par les matériaux composites

A travers cette investigation sur la réparation des éprouvettes endommagées par les matériaux composites on peut avancer les avantages de cette technique

- facilité de manipulations très rapide.
- bonnes propriétés mécaniques après réparation par rapport aux matériaux traditionnelles.
- Bonne rigidité dans la zone réparée.

7. Synthèse

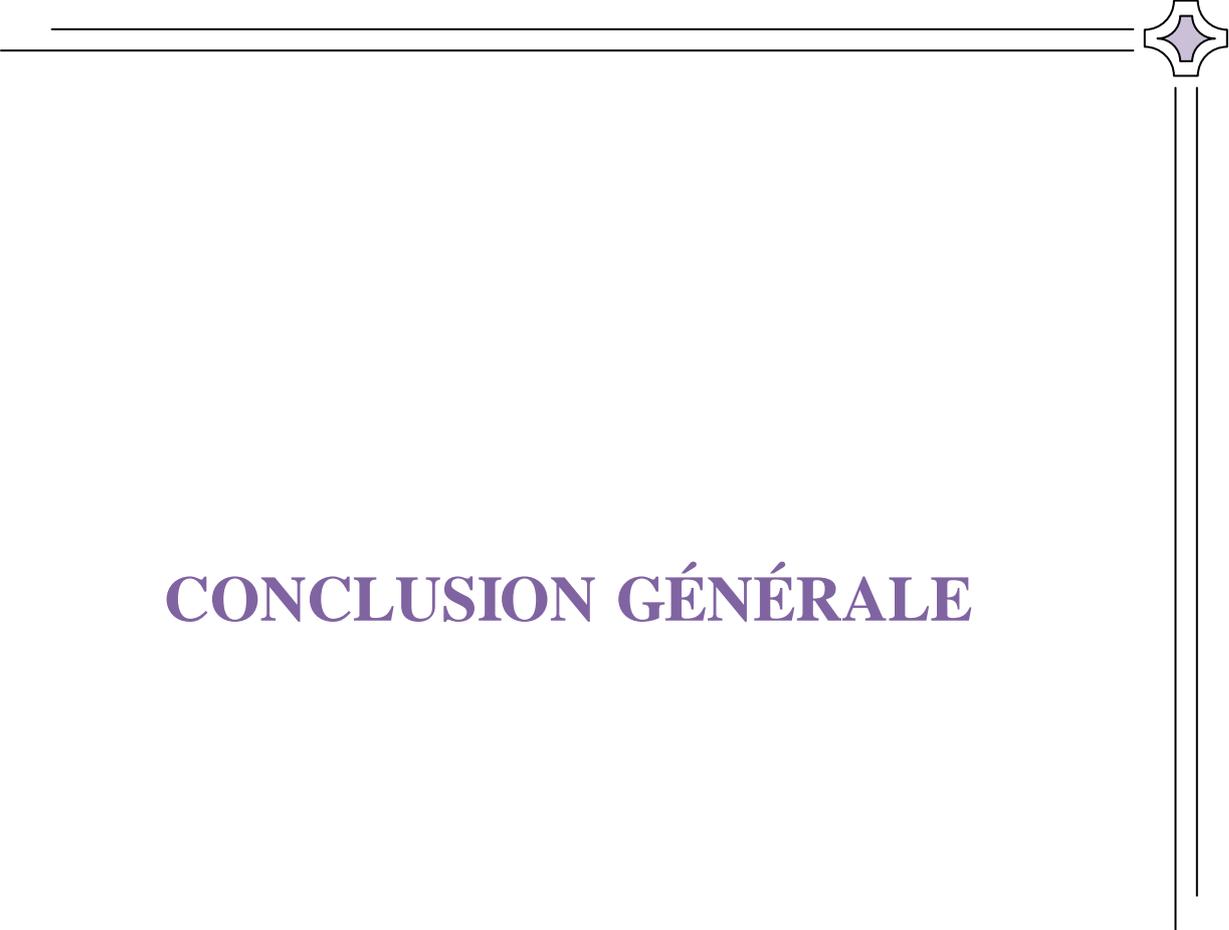
En Algérie comme ailleurs dans le monde, une grande partie du patrimoine national et des infrastructures de transport ont atteint la fin de leur durée de vie utile. Des études et expertises ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner aux structures telles que les anciens édifices, les capacités structurales nécessaires pour résister aux sollicitations auxquelles elles sont soumises. Parmi les techniques envisagées, l'utilisation des matériaux composites (TFC, TFV) et mortier de résine polyester est très prometteuse. L'une de ces méthodes consiste à restaurer ou à augmenter la capacité des BO, BOF, BHP et BHPF par la réparation ou le renforcement des structures existantes, leur adaptation à des contraintes d'exploitation évolutives sont autant d'aspects susceptibles de s'inscrire dans une démarche de développement durable. Ceci implique ainsi le développement des méthodes nouvelles et innovantes parmi lesquelles se situe la technique de renforcement des structures par ajout des résines de polyester renforcées de tissus de fibre de verre qui constitue une solution rapide, économique et durable. Cependant, les gains de résistance ou de rigidité obtenus par cette technique de renforcement utilisée dans cette étude s'accompagnent de l'apparition de nouveaux modes de rupture constatés. Ces modes de rupture doivent être pris en compte de manière particulièrement attentive lors du choix et de la justification du renforcement. Par ailleurs, cette étude montre que les tissus de verre sont plus performants en tant que matériaux de réparation que ceux des fibres de carbone utilisés.

Il apparaît que la géométrie du TFC qui est unidirectionnelle et parallèle à la direction de la fissure n'a pas d'influence significative sur la résistance mécanique en flexion. Par contre le TFV se distingue par une bonne adhérence avec le béton. Ce dernier engendre une augmentation de la résistance. Le TFV tissé sous forme multidirectionnelle aboutit ainsi à un processus de réparation efficace.

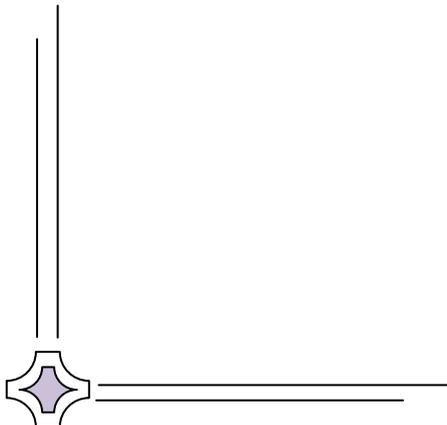
Chapitre VII : Influence du mode de réparation des fissures par le mortier de résine, le TFC et le TFV sur les performances mécaniques des bétons traditionnels

Les gains de résistance ou de rigidité obtenus par cette technique de renforcement s'accompagnent par l'apparition de nouveaux modes de rupture constatés.

Par ailleurs la réparation par le mortier de résine s'est avéré un produit de réparation meilleur que la résine seule. La présence du mortier de réparation augmente la raideur structurelle de l'éprouvette et limite l'ouverture de la propagation des fissures de flexion.



CONCLUSION GÉNÉRALE



CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le premier objectif de la présente thèse consiste à contribuer de façon expérimentale à l'obtention d'une formulation de micro-béton de résine économique répondant à des critères mécaniques maximaux en service tout en alliant résistance mécanique, durabilité et coût. Le polymère utilisé en tant que liant est un polyester réticulé par un durcisseur de type amine. Le squelette granulaire d'origine silico et de calcaire est constitué d'un sable de dune fin et sable de dune moyen et d'un gravier de classe granulométrique 3/8. L'optimisation de la formulation se fait sur deux étapes : optimisation de la matrice et optimisation du squelette granulaire. La première étape basée sur le principe de point de saturation avec la résine du mortier à confectionner nous a permis d'adopter un taux de 27% de la résine grenat et un taux de 35% de résine violet en fraction massique. On peut dire que la viscosité de la résine polyester influe sur la quantité nécessaire pour obtenir le point de saturation.

Une campagne d'essais physiques et mécaniques a été conduite sur différentes formulations de mortier de résine en faisant varier le dosage en liant. Pour cette étude la saturation est obtenue avec un taux de 27% de résine grenat et un mélange de 60% de sable fin et 40% de sable moyen dans le premier cas et un taux de 35% de résine violet et un mélange de 80% de sable fin et 20% de sable moyen dans un deuxième cas abouti à un béton de bonne compacité et de bonne résistance avec l'augmentation de pourcentage de sable fin.

Les différentes formulations des micro-bétons de résine ont ainsi consisté à fixer la formulation de mortier de résine et à faire varier le taux du rapport (G/S).

Des rapports G/S égaux à 0,5 – 1 – 1,5 et 2 ont été expérimentés.

Pour améliorer davantage les caractéristiques mécaniques (la résistance à la traction par flexion et la ductilité du béton de résine) nous avons ajouté des fibres de verre E selon deux formes. L'incorporation des fibres de verre dans la composition des micro-bétons de résine avec une variation du taux de fibres de 1% montre que le taux des fibres influe de façon positive sur les résistances mécaniques.

La relation entre l'augmentation de la résistance et le taux des fibres est une relation proportionnelle qui fera faire l'objet d'une modélisation linéaire.

Malgré que les éprouvettes testées (béton de résine optimal + fibre de verre) soient de la même mixture, on remarque une dispersion entre les résultats à la flexion et à la compression. Ceci peut être dû à la préparation des éprouvettes (fabrication manuelle) provoquant une distribution non uniforme des agrégats et des fibres, à l'hétérogénéité du matériau, et à des dispersions dans les dimensions. Pour cela une analyse statistique a été jugée nécessaire.

L'application du modèle à deux paramètres de Weibull au cas des micro-bétons de résine de cette étude montre la probabilité de rupture pour chaque niveau de contrainte de rupture atteint dans les essais de flexion en fonction de la contrainte ultime appliquée mesurée. Ces essais ont été effectués sur un lot de 31 éprouvettes d'une même gâchée, fabriquées, moulées et essayées dans les mêmes conditions correspondantes à un micro-béton résineux avec un rapport G/S = 0,5.

Une dispersion des résultats obtenus lors des essais de choc ainsi que l'obtention des lois de comportement de ce matériau composite par la méthode de Williams. Cette dispersion caractéristique aussi des matériaux composites est la conséquence surtout de l'hétérogénéité du matériau sur le chemin de la fissuration, du mode de fabrication des entailles ainsi que de la dispersion de l'essai mécanique lui même.

Pour éviter la fissuration instable et minimiser le risque de fissuration du béton classique et celui à haute performance due à l'action des charges extérieures avant et après les propagations des fissures :

- Par ajout des fibres métalliques à l'intérieur du béton.
- Par réparation par les matériaux composites en utilisant le mortier de résine polyester d'étude.

Nous avons utilisée deux méthodes de réparation, la résine seule et l'injection de mortier de résine avec bandage par le TFV et par le TFC pour la réparation des éprouvettes endommagées chargées en flexion. Lors de l'essai de flexion sur des éprouvettes de béton ordinaire sans fibre réparées avec le mortier de résine sans bandage, on 'a observé une adhésion parfaite entre le mortier de réparation et le béton ordinaire juste avant le décollement, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rupture prématurée des éprouvettes dues au décollement de mortier de résine polyester violet. Une légère augmentation de la résistance mécanique des éprouvettes est constatée après réparation. La fonction principale de la résine est de transformer les efforts des éprouvettes aux mortiers de réparation. Le mortier ne contribue pas directement à la résistance des éprouvettes mais seulement à la distribution des

efforts internes en augmentant leurs résistances. Le mortier de résine s'est avéré un produit de réparation meilleur que la résine seule.

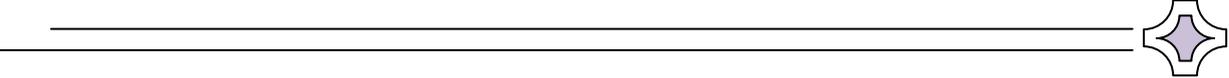
Les deux micro-bétons de résine polyester de cette étude apparaissent plus durables sous les différents environnements agressifs que ceux rapportés dans la littérature, ce qui répond à l'objectif visé.

Ainsi, le remplacement du ciment Portland par un polymère se justifie malgré le coût plus élevé du polymère ainsi que celui de la main-d'œuvre dans le cas où la structure se trouve dans un environnement très agressif.

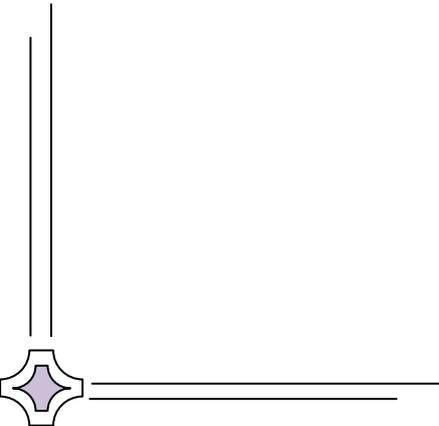
Perspectives

Les travaux qui ont été réalisés ont permis d'apporter quelques éléments de réponses aux préoccupations posées. Ils ont aussi soulevé quelques points intéressants à explorer à l'avenir.

- Une étude complémentaire sur le comportement à haute température de ce béton de résine.
- Durabilité des micro-bétons de résine polyester dans le cas où la structure se trouve dans un environnement d'une agressivité importante (environnement marin).
- Utilisation de ce nouveau matériau comme un produit de réparation.
- Application du modèle de Weibull à trois paramètres pour tenter de définir et d'identifier une contrainte seuil.
- Amélioration notamment de la fragilité de ce type de matériau composite appelé à avoir une place intéressante dans les matériaux de grande diffusion.



Références bibliographiques



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]: **ENQUETE DU SETRA.** « Ouvrages d'art réhabilitation, un diagnostic plus sévère que prévu », Le Moniteur, 26, 1995.

[2]: **J.A. Calgaro et R. Lacroix.** « Maintenance et réparation des ponts », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997.

[3] **C. Ross,** « Reinforcement of concrete beams with externally bonded composite laminated ». Using fibre reinforced ACI Structural journal, vol 96, pp.212-220.1999.

[4]: **Association mondiale de la Route** « Utilisation de matériaux innovants pour la construction et la réparation des ponts » Comité technique AIPCR des Ponts et autres Ouvrages routiers (C11) AIPCR.10. 11.09. B-2002

[5]: **J.P. Gorninski, D.C. Dal Molin, C.S. Kazmierczak,** « Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and Portland cement concrete », Cement and Concrete Research, 34, pp. 2091-2095.2004.

[6]: **H.G. Nguyen** « approche micromécanique pour la modélisation du comportement élastoplastique des composite : application aux mortiers de résine » thèse de Doctorat .Université de Cergy-Pontoise.2008.

[7]: **P. Nóvoa, M. Ribeiro, A. Ferreira et A. Marques,** « Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates ». Composites Science and Technology, 64: 2197–2205.2004.

[8]: **Y. Ohama,** « Recent progress in concrete-polymer composites ». Advanced Cement Based Material, 5(2): 31–40. 1997.

[9]: **J. Reis,** « Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete ». Construction and Building Materials, 20: 673–678.2006.

[10]: **D. Fowler**, «Polymers in concrete: a vision for the 21st century». Cement & Concrete Composites, 21: 449–452. 1999.

[11] **J. Charmet**, «Mécanique du solide et des matériaux, plasticité». Fluage. ESPCI.2002.

[12] **I. Doghri, A. Ouair**, «Homogenization of two-phase elasto-plastic composite materials and structures». Study of tangent operators, cyclic plasticity and numerical algorithms. International Journal of Solids and Structures, 40: 1681-1712.2003.

[13] **ACI committee** «548, 548, 6R-96 Polymer Concrete-Structural Applications, State-of-the-art report», American concrete institute, p, 1-23. 1996.

[14] **ACI committee** 548, « 548, 1R-97: Guide for the Use of Polymers in Concrete», American concrete institute, p, 1-29.1997.

[15] **K.V. Mikhailov, V.V. Patureev, R. Kreis**, «Polymer concretes and their structural uses», Russian Translation Series 91, A, A Balkema, pp 326.1992.

[16] **A. Blaga, J.J. Beaudoin**, «Le béton de résine», Canadian Building Digest, CBD-242-F, Institute for Research in Construction, 1986.

[7] **P. Nóvoa, M. Ribeiro, A. Ferreira, A. Marques**, «Mechanical characterization of light polymer mortar modified with cork granulates», Composites Science and Technology 64, p, 2197-2205.2004.

[17] **Y. Ohama**, «Concrete-polymer composites- the past, present and future», 13 th ICPIIC Portugal, p, 1-14. 2010.

[18] **ACI committee 548**, « 548, 3R-03: Polymer-Modified Concrete ». American concrete institute,p.1-40.2003.

[19] **M. Miller**, «Polymers in Cementitious Materials». Smithers Rapra Press, pp.192. 2008.

- [20] «Polymers in Concrete: TR39».The Concrete Society, pp. 32. 1994.
- [21] **A. Blaga, J. Beaudoin** «le béton modifié aux résines », Canadian Building Digest, CBD-241-F, Institute for Research in Construction, p.1-4. 1986.
- [22] **E. Kirlikovali**, «Polymer/concrete composites-A review». Polymer Engineering & Science, Volume 21, Issue 8, p.507–509.1981.
- [23] **L. Czarnecki**, «Concrete-polymer Composites: Trends Shaping the Future», International journal of the Society of Materials Engineering for Resources 15(1), p.1-5. 2007.
- [24] **S. Mindess, J. Young, D. Darwin**, «Concrete». Prentice-Hall, pp.644. 2003.
- [25] **M. Shetty, S. Chand** «Concrete Technology» & Company Ltd, New Delhi, pp.658. 2004.
- [26] **L. Kukacka**, «Polymer concrete materials for use in geothermal energy processes», Symposium on materials in geothermal energy systems, Austin, TX, USA , Brookhaven Nat. Lab-BNL 24214, pp. 261-284, 1978.
- [27] **ACI committee 548**, « 548.1R-09: Guide for the Use of Polymers in Concrete». American concrete institute, 1-29.2009.
- [28] **J. Reis**, «Fracture mechanics of polymer concrete». PhD. Thesis, Université de Porto, 2003.
- [29] **K. Mikhailov, V. Paturoev, P. Rao, P. Kreis**, « Polymer Concretes and Their Structural Uses». Russian Translations Series, A Balkema Publishers, pp. 326,1992.
- [30] **J. Pascault, H. Sautereau, J. Verdu, J. Williams**, «Thermosetting polymers». Collection Plastics Engineering, Marcel Dekker Inc, pp. 496, 2002.
- [31] **J. Illston, P. Domone**, «Construction Materials: Their nature and behaviour». Spon Press, pp.554, 2001.

[32] **T. Nguyen**, «Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre». Thèse de doctorat, Université de Bretagne-Sud, pp.168, 2010.

[33] **N. Bahlouli**, «cours : Matériaux Composites». DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle, Université de Strasbourg, Accessible sur le lien: <http://www.wipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm>.

[34] **X. Buch**, « Dégradation thermique et fluage d'un adhésif structural époxyde ». Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, pp.209 ,2000.

[35] **M .Sidky, C. Legrand, M. Barrioulet**, « Influence de la concentration en granulats et du temps de vibration sur la ségrégation interne dans le béton frais ». Matériaux et Constructions, Réf. ATILH n° 16314.1981.

[36] **M. Benzzeagh** « cours de MQ 13 », Université de technologie de Compiègne, France.

[37] **J. Beaudoin** «Béton renforcé de fibres », Juillet 1982.

[38] **Fiche technique CD3** constituant du béton ; fibre pour béton et mortier CIME béton (centre d'information sur les ciments et ses applications).

[39] **G. Dreux, J. Festa** « nouveau guide du béton et de ses constituants », Edition Eyrolles, Paris, p.409.

[40] **T. Kashiwagi, J. Gilman, M. Nyden**, «New Flame Retardant Additives». 6^{ème} Congrès Européen sur l'ignifugation des Matériaux Polymères, Lille, p. 4-8, 1997.

[41] **A. Mouritz, A. Gibson**, «Fire Properties of Polymer Composite Materials». Springer, pp. 404, 2007.

[42] **R. Noyes**, «Nuclear Waste Cleanup Technologies and Opportunities». Noyes Publications, pp.471.1996.

[43] **H. Abdel-Fattah, M. El-Hawary**, «Flexural behavior of polymer concrete », Construction and Building Materials 13, p. 253-262. 1999.

[44] **D. Feldman**, «Polymeric Building Materials», Elsevier Applied Science, Routledge, London, pp.575.1989.

[45] **D. Fowler**, «Polymers in concrete: a vision for the 21st century », Cement & Concrete Composites 21, p, 449-452.1999.

[46] **G. Akovali**, «Polymers in Construction», Smithers Rapra Technology, pp.528, 2005.

[47] **L. Snell, H. Gillespie, R. Nelson**, «Polymer Concrete and its Potential in the Construction Industry». Proceedings of the Oklahoma Academy of Science 52, pp. 160-162.1972.

[48] **B. Jo, S. Park, J. Park**, « Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates», Construction and Building Materials 22, p. 2281–2291. 2008.

[49] **C. Vipulanandan, O. Ghazzaly**, « Polymer concrete in hazardous waste management: Applications Original», Journal of Hazardous Materials 22, p. 261-262.1989.

[50] **M. Steinberg**, « Concrete-Polymer Composite Materials and Their Potential for Construction, Urban Waste Utilization, and Nuclear Waste Storage», Advances in Chemistry vol. 142, Copolymers, Polyblends, and Composites, chap.37, pp 431–441.1975.

[51] **L. Kukacka, J. Fontana, W. Horn, J. Amaro and T. Sugama**, « Alternate Materials of Construction for Geothermal Applications», Progress Report No. 11, BNL 50627, pp.25. 1976.

[52] **J. Fontana, A. Zeldin**, « Concrete Polymer Materials as Alternative Materials of Construction for Geothermal Applications-Field Test Evaluations», ASTM, Geothermal Scaling and Corrosion STP717, pp. 180-193.1980.

[53] **L. Kukacka, J. Fontana, A. Zeldin, J. Amaro and T. Sugama, W. Horn, N. Carciello, W. Reams**, «Alternate Materials of Construction for Geothermal Applications», Progress Report N°15, N°16, N°17 N°18, BNL 50834.1978.

[54] **L. Kukacka, J. Fontana, T. Sugama, W. Horn**, « Alternate Materials of Construction for Geothermal Applications», Progress Report N°12, BNL 50665.1977.

[55] **L. Kukacka, J. Fontana, W. Horn, J. Amaro**, « Alternate Materials of Construction for Geothermal Applications», Progress Report N°10, BNL 50294.1976.

[56] **Burns & Roe Industrial Services Corporation**, « Economic assessment of polymer concrete usage in geothermal power plants», BNL-50777, pp.47.1979.

[57] **M. Helal**, «Experimental study of mechanical properties and structural applications of polymer concrete». Thèse de doctorat, Rice University- Texas, pp.181.1978.

[58] **M. Barbuta, M. Harja**, «Experimental study on the characteristics of polymer concrete with epoxy resin» BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IASI Publicat de Universitatea Tehnica ‘Gheorghe Asachi’ din Iasi Tomul LIV (LVIII), Fasc. 1, 2008 Sectia CONSTRUCTII. ARHITECTURA.

[59] **J. Gorninski, D. Molin, C. Kazmierczak**, «Comparative assessment of isophthalic and orthophthalic polyester polymer concrete: different costs, similar mechanical properties and durability». Construction and Building Materials 21, pp. 546- 555.2007.

[60] **J. Gorninski**, «Estudo da influência das resinas poliéster isoftálica e ortoftálica e doteor de cinza volante nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto polímero». Universidade Federal do Rio Grande do Sul-Brazil, Thèse (Ph D Engineering), pp.167.2002.

[61] **C. Vipulanandan, N. Dharmarajan**, «Flexural Behavior of polyester polymer concrete». Concrete and cement research, Vol. 17, pp. 219-230.1987.

[62] **C. Vipulanandan. N. Dharmarajan. E. Ching**, « Mechanical behaviour of polymer concrete systems». Materials and Structures, Vol.21, p. 268-277.1988.

- [63] **S. Akçaözöğlü, C.D. Atış and K. Akçaözöğlü**, «An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete ». *Waste Management* 30, pp. 285–290.2010.
- [64] **A. Abdel-Azim**, «Unsaturated polyester resins from poly (ethylene terephthalate) waste for polymer concrete ». *Polymer Engineering & Science*, 36, pp. 2973–2977.1996.
- [65] **K. Rebeiz, J. Rosett, S. Nesbit and A. Craft**, «Tensile properties of polyester mortar using PET and fly ash wastes ». *Journal of Materials Science Letters* 15, pp.1273-1275.1996.
- [66] **K. Rebeiz**, «Time-Temperature Properties of Polymer Concrete Using Recycled PET ». *Cement and Concrete Composites* 17, pp.119-124.1995.
- [67] **K. Rebeiz**, « Strength and durability properties of polyester concrete using pet and fly ash wastes ». *Advanced Performance Materials Volume 3*, pp.205-214.1996.
- [68] **K. Rebeiz**, «Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste». *Construction and Building Materials* 10, pp.215-220.1996.
- [69] **J. Reis, R. Chianelli-Junior, J. Cardoso, F. Marinho**, « Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar ». *Construction and Building Materials* 25, pp. 2771-3002.2011.
- [70] **J. Reis**, « Effect of aging on the fracture mechanics of unsaturated polyester based on recycled PET polymer concrete». *Materials Science and Engineering* 528, pp.3007-3009.2011.
- [71] **M. Tawfik, S. Eskander**, « Polymer concrete from marble wastes and recycled poly (ethylene terephthalate) ». *Journal of Elastomers and Plastics* 38, pp. 65–79.2006.
- [72] **A. Abdel-Azim, I. Attia**, « Making Polymer Concrete and Polymer Mortar Using Synthesized Unsaturated Polyester Resins from Poly (ethylene terephthalate) Waste». *Polymers for Advanced Technologies* 6, pp. 688-692.1995.

[73] **J. Reis**, «Effect of Textile Waste on the Mechanical Properties of Polymer Concrete». *Materials Research* 12, pp. 63-67.2009.

[74] **M. Haidar**, «Optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde». Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, pp 282.2011.

[75] **R. Maksimov, L. Jirgens, J. Jansons, and E. Plume**, «Mechanical properties of polyester-polymer concrete». *Mechanics of Composite Materials* 35, pp.99-110.1999.

[76] **A. Alzaydi, S. Shihata, T. Alp**, «The compressive strength of a new ureaformaldehyde-based polymer concrete». *Journal of Materials Science* 25, pp.2851- 2856.1990.

[77] **O. Sezan**, «Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin». *Cement and Concrete Research* 30, pp.171–174.2000.

[78] **F. Cortés, G. Castillo**, «Comparison between the dynamical properties of polymer concrete and grey cast iron for machine tool applications». *Materials and Design* 28, pp.1461–1466.2007.

[79] **M. El-Hawary, H. Abdel-FATTAH**, «Temperature effect of mechanical behavior of resin concrete». *Construction & building materials* 14, pp.317-323.2000.

[80] **Y. Ohama, T. Nishimura**, «Properties of steel fiber reinforced polyester resin concrete», in *Proceedings of 22nd Congress on Material Research (Society of Material Sciences, Kyoto, Japan)* pp. 364-367.1979.

[81] **K. Varughese, B. Chaturvedi**, «Fly Ash as Fine Aggregate in Polyester Based Polymer Concrete». *Cement & Concrete Composites* 18, pp.10.5-10.1996.

[82] **Y. Soh, Y. Jo and H. Park**, «Effect of fillers on the mechanical properties of unsaturated polyester resin mortar». *Polymers in concrete*, E & FN Spon, pp.67-74.1997.

[83] **M. Harja, M. Barbuta, L. Rusu**, «Obtaining and Characterization of the Polymer Concrete with Fly Ash». Journal of Applied Sciences 9, pp.88-96.2009.

[84] **M. Barbuta and D. Lepadatu**, «Mechanical Characteristics Investigation of Polymer Concrete Using Mixture. Design of Experiments and Response Surface Method». Journal of Applied Sciences 12, pp.2242-2249.2008.

[85] **A. Ergun**, «Optimization of Compression Strength by Granulometry and Change of Binder Rates in Epoxy and Polyester Resin». Concrete Journal of Reinforced Plastics and Composites 28, pp.235-246.2009.

[86] **Y. Dimitrienko**, «Thermomechanical behaviour of composite materials and structures under high temperatures: 1. Materials». Composites 17, pp.453-461.1997.

[87] **C. Vipulanandan, N. Dharmarajan**, «Effect of temperature on the fracture properties of epoxy polymer concrete». Cement & Concrete Research 18, pp. 265-276, 1988.

[88] **S. Abdeldjalil** « comportement au choc des stratifiés composite renforcées par des fibres naturelles » Université Kasdi Marbah Ouargla de génie mécanique maintenance industrielle.2013.

[89] **P. Béguelin** « Approche expérimentale du comportement mécanique des polymères en sollicitation rapide » Ecole Polytechnique Fédérale N°1572.1996.

[90] **M. Benamira** «Caractérisation à la rupture du matériau composite utilisé par l'ONAAPH». Mémoire de Magister, Université Annaba.2002.

[91] «Distribution de Weibull» Wikipédia, l'encyclopédie libre États-Unis. https://fr.wikipedia.org/wiki/Paramètre_de_forme

[92] **V. Calard**, « approches statistiques - probabilistes du comportement mécanique des composites à matrice céramique » Ecole Centrale Paris.1998.

[93] **B. Redjel**, F.X. DE CHARENTENAY, «Utilisation des statistiques de Weibull dans la caractérisation mécanique des résines phénoliques et des matériaux composites SMC» *Materiaux et Techniques*, 1987.

[94] **M. Miner**, «Cumulative damage in fatigue». *Journal of Applied Mechanics*, vol-67, pp.159-164.1945.

[95] **J. Wang**, «Stress distribution of an inclined semi-infinite crack terminating at interface between dissimilar materials». 8th International Conference on Fracture, Kiev, pp. 102-109.1994.

[96] **K. Raithby, A. Sterling**, «Some effects of loading history on the fatigue performance of rolled asphalt». TRRL Report L.R., Royaume uni, 496p.1972.

[97] **S. Said**, «Fatigue characteristics of asphalt concrete mixtures». Rapport de Recherche. Suède: Statens Väg-Och Trafikinstitut, 67 p.1991.

[98] **A. Alliche, D. Francois**, «Damage of concrete in fatigue». *Journal Eng Mech*, vol.118 (11), pp. 2176–2190.1992.

[99] **A. Alliche**, «Damage model for fatigue loading of concrete». *International Journal of Fatigue*, vol. 26 (9), pp. 915-921.2004.

[100] **W. Suaris, C. Ouyang, V. Fernando**, «Damage model for cyclic loading of concrete». *Journal of engineering mechanics*, vol. 116 (5), p. 1020-1035.1990.

[101] **A. Backelandt**, «Etude des mécanismes d'adhésion a l'interface Résine/Ciment en vue de la réparation des ouvrages de génie civil». Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon.2005.

[102] **T. Croston**, «Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 point réparée par matériaux composites, approche probabiliste». Ecole Nationale Supérieure d'Arts Et Métiers Centre De Bordeaux.2006.

[103] LA LETTRE D'INFORMATION LAFARGE DUCTAL® n°12 -2012.

[104] **T. Hinguyen**, «Durabilité des réparations a base cimentaire : Analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation». L'universite de Toulouse iii - Paul Sabatier.2010.

[105] **W. Bai, J. Zhang, P. Yan, and X. Wang**, «Study on vibration alleviating properties of glass fiber reinforced polymer concrete through orthogonal tests». *Materials & Design*, vol. 30, no. 4, pp.1417–1421.2009.

[106] **K. Sett, C. Vipulanandan**, «Properties of polyester polymer concrete with glass and carbon fibers». *ACI Materials Journal*, vol. 101, no. 1, pp. 30–41.2004.

[107] **R. Berbaoui, A. El Mahi, R. El Guerjouna** « Analyse par émission acoustique de l'endommagement et de la rupture du béton polymère en fluage » publié dans "JNC 16, Toulouse : France hal-00388845, version 1 -2009.

[108] **T. Mays**, «A new classification of pore sizes». *Studies in Surface Science and Catalysis* 160, pp.57-62.2007.

[109] **C. Lemaignan**, «La rupture des matériaux». EDP Sciences, pp.150.2003.

[110] **J. Lynch**, «Physico-Chemical Analysis of Industrial Catalysts». Editions Technip, pp.256.2003.

[111] **O. ELALAOU** «Optimisation de La formulation et de la tenue aux hautes températures d'un béton a base d'époxyde». Thèse de Doctorat Université De Tunis El Manar, Université De Cergy-Pontoise (France) Ecole Nationale d'Ingénieurs De Tunis (Tunisie).2012.

[112] **F. Chellali, B. Redjel**, Algér – Equip., *Rev. Tech. de l'ENTP* 41-16.2006.

[113] **M. Haidar, E. Ghorbel**, 26^{ème} Rencontre Universitaire de Génie Civil Nancy France 4-6.2008.

- [114] **G. Guo**, «Etude micromécanique du comportement de structures composites à renforts discontinues». Thèse de l'ENSA, Paris.1997.
- [115] **H. Oucief**, « Formulation et comportement mécaniques d'un béton à base de fibres métalliques » Thèse de Magister Institut de Génie Civil Université de Annaba .Algérie.1992.
- [116] **N. Harouche**, Thèse de doctorat Université Paris VI. France.1989.
- [117] **P. Casanova**, Thèse de doctorat Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Paris France .1995.
- [118] **H. Rehailia**, « Application de la mécanique linéaire élastique de la rupture aux bétons à fibres ». Thèse de Magister Institut de Génie Civil Université de Annaba Algérie.1992.
- [119] **R. Swamy, P. Mangat**, Cem. and Concr. Resear. 451.1974.
- [120] **R. Swamy**, Matér.et Constr.45-235.Mai-Juin.1975.
- [121] **J. Berthelot**, Editions TEC & DOC Lavoisier 4^{ème} édition, ISBN : 2-7430-0771-0, Paris France.2005.
- [122] **M. Pigott**, Prog. Sci. Eng. Comp. Ed. T. Hayashi, K. Kawata, S.Umekawa, ICCM-IV Tokyo-1982.
- [123] **P. Rossi**, « Bétons de fibres métalliques ». Editions T.I., 2013.
- [124] **S. Achouri, B. Redjel**, «Etude expérimentale et analyse probabiliste du comportement à la rupture en traction de matériaux composites verre-perlon-acrylique à usage orthopédique » Synthèse, Revue des Sciences et de la Technologie, édité par l'Université de Annaba, N° 29, pp. 59-76.2014.
- [125] **J. Lamon, N. Godin**, «Approche statistique probabiliste de l'endommagement et de la rupture des composites à matrice céramique» Revue des Composites et des Matériaux Avancées, Vol. 8, 23-50.1998.
- [126] **G. Fantozzi**, «Coordonateur, Rupture des matériaux» 1^{ère} et 2^{ème} parties, recueil, Département Génie physique des Matériaux et Génie Mécanique Développement, 5^{ème} année, INSA Lyon, France, 447p.1990.

[127] **C. Arvieu, E. Lacoste, D. Spataro, J. Quenisset** «Détermination à l'aide d'un essai de flexion de la résistance à la rupture en tension de renforts filamenteux fragiles » Comptes Rendus des JNC 16, Toulouse France.2009.

[128] **K. Trustum, A. Jayatilaka**, «On estimating the Weibull modulus for a brittle material». J. Mater. Sci., n°14, n, pp.1080-1084.1979.

[129] **J. Margetson, B. Brokenbrow**, «Brittle tensile failure characteristics of propellants derived from flexural tests». Propellants and explosives, Vol. 5, 151-157.1980.

[130] **L. Broutman, R. Krock**, «Modern composite materials». Addison-Wesley Publishing Co, Menlo Park, California, p.52.1967

[131] **C. Zweben**, «The effect of stress non uniformity and size on the strength of composite materials». Composite Technology Review, Vol. 3, 23-26.1981.

[132] **R. Wetherhold**, «Statistical distribution of strength of fiber reinforced composite materials». Polymer Composites, Vol. 7 (2) 116-123.1986.

NORMES

Chapitre 2

[NF P 18-560] : 1990. Granulats. Analyse granulométrique par tamisage.

[NF EN 1097-3] : (1998) Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire.

[XP P18-540] : (1997) Granulats : Définitions, conformité, spécifications

[P 18-597] : (1990) Granulats Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines

[NF EN ISO-178] : 2010 spécifie une méthode pour la détermination des propriétés en flexion des plastiques rigides et semi-rigides dans des propriétés en flexion des plastiques rigides et semi-rigides dans des conditions définies.

[NF P 18- 406] : Cet essai permet de déterminer la résistance à la compression du béton de l'éprouvette principe de l'essai.

[EN 10045-2]: (1993) Metallic materials-Charpy impact test-Part 2: Verification of the testing machine.

[ISO 442]: Verification of pendulum impact testing machines for testing steels

[ASTM D 256]: (2010) Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.

Chapitre 6

[NF EN ISO 179-1] : (2010) spécifie une méthode de détermination de la résistance au choc Charpy - Partie 1 : essai de choc non instrumenté.