

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2019

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

Influence des additions minérales sur le comportement mécanique d'un micro-béton à base de résine polyester.

Domaine : Sciences et Technique

Spécialité :

GENIE CIVIL

OPTION

MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Par

IDDER Abdelkader

LEBKIRI Seif Eddine

DIRECTEUR DU MEMOIRE : PR, Bachir REDJEL, GENIE CIVIL, UBM-ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : PR. Redjem BELOUETTAR

EXAMINATEURS : DR. BOUMAAZA FATIHA

PR, Bachir REDJEL

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH tout-puissant de nous avoir donné le courage, la force, la volonté, la patience les capacités nécessaires dans ma vie et lors de la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Pr. Bachir REDJEL d'avoir accepté de diriger ce travail. Aussi, pour la confiance, la liberté qu'il m'a accordée tout au long de mon parcours, ses remarques, ses conseils pour améliorer notre travail.

Je remercie M.MIROUZI Ghania pour le courage et le soutien moral qu'elle nous a donné à partir de début de notre travail, et pour son aide lors de notre recherche scientifique.

Je tiens remercie les membres de jury qui m'ont fait l'honneur pour avoir accepté de juger notre travail.

Je remercie tous mes enseignants de l'université Badji Mokhtar et de différents parcours scolaires.

Je remercie aussi, le personnel technique de laboratoires de notre département de GC.

Un grand remerciement pour mes chers parents qui se sont donnés beaucoup dans la vie pour la réussite de leurs enfants, qu'Allah les protège.

Je remercie toute ma famille, mes frères, ma sœur, ma grande mère, mes oncles, mes cousins, et toute la famille.

Je remercie aussi tous mes amis et mes contacts, et toutes les personnes ayant contribué de près ou loin à la réalisation de ce travail.

IDDER Abdelkader

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH tout-puissant de nous avoir donné le courage, la force, la volonté, la patience les capacités nécessaires dans ma vie et lors de la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Je voudrais dans premier temps remercier, mon directeur de mémoire Mr. Bachir REDJEL, professeur à l'université Badji Mokhtar d'Annaba, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie madame M.MIROUZI Ghania pour le courage et le soutien moral qu'elle nous a donné à partir de début de notre travail. Elle a partagé ses connaissances et expériences dans ce milieu.

Je tiens remercier les membres de jury qui m'ont fait l'honneur pour avoir accepté de juger notre travail.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université Badji Mokhtar, surtout nos enseignants et le personnel technique de laboratoires de notre département de GC.

Je remercie chaleureusement mes chers parents qui ont pris soin de mon éducation dans la vie, ils sont donnés beaucoup pour la réussite de leurs enfants, qu'Allah les protège.

Je remercie toute ma famille, mes frères, mes sœurs, et surtout mon petit frère Youssef.

Je remercie aussi tous mes amis, mes camarades, et mes contacts qui sont m'encourager lors de mon travail.

LEBKIRI Seif Eddine

Résumé

Les matériaux composites sont préférés aux matériaux traditionnels parce qu'ils justifient par des meilleures propriétés spécifiques: grandes résistance à la fatigue, faible vieillissement sous l'action de l'humidité, insensibilité aux produits chimique...

Dans ce travail nous avons élaboré des micro-bétons résineux à base d'une résine polyester et deux types de sable selon une nouvelle formulation basée sur une méthode empirique. Pour cette étude le pourcentage de liant optimal est de 20% résine et un mélange de 52% de sable de dune et 48% de sable de carrière.

Pour mieux étudier les caractéristiques et le comportement mécanique de ces nouveaux matériaux, notre étude a investigué cinq taux (de 2 à 10%) de différents additions minérales (poudre de verre, poudre de brique, poudre de marbre). notre objectif c'est la réduction de la quantité du liant et la formulation d'un micro-béton de résine économique répondant à des critères mécaniques au maximum et à le rapport cout/résistance.

Des essais destructifs de flexion trois points et de compression ont été mis en place et utilisés pour la caractérisation des propriétés mécaniques de ces composites.

Mots clés :

matériaux composites, micro-béton résineux, formulation, polyester, comportement, essais, propriétés.

Abstract

Composite materials are preferred over traditional materials because they have better specific properties: high resistance to fatigue, low aging due to moisture, insensitivity to chemicals ...

In this work we have developed resinous micro-concretes based on a polyester resin and two types of sand according to a new formulation based on an empirical method. For this study the percentage of optimal binder is 20% resin and a mixture of 52% dune sand and 48% quarry sand.

To better study the characteristics and the mechanical behavior of these new materials, our study investigated five rates (from 2 to 10%) of different mineral additions (glass powder, brick powder, marble powder). Our goal is to reduce the amount of binder and to formulate an economical micro-concrete resin that meets maximum mechanical criteria and cost / strength ratio.

Three-point flexural and compression tests have been implemented and used to characterize the mechanical properties of these composites.

Keywords:

Composite materials, resinous micro-concretes, formulate, polyester, behavior, tests, properties.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Table des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des notations.....	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	2

Chapitre I : Etude bibliographique

1. Introduction	6
2. Définition	6
3. Historique du béton de résine	7
4. Classification du béton de résine	8
4.1.Le béton additionné de résine.....	9
4.2.Le béton imprégné de résine.....	9
4.3.Le béton de résine.....	9
5. Composition et formulation du béton de résine	12
5.1.La composition principale d'un béton polymère.....	13
5.2.La formulation du micro béton de résine.....	15
6. Applications des bétons de résine dans le domaine de génie civil	18
7. Définition des additions minérales	23
7.1. La poudre de verre.....	23
7.2. La poudre de brique.....	24
7.3. La poudre de marbre.....	25
8. Effet des additions minérales sur les bétons	26
9. Caractéristique mécaniques des bétons de résine	27
9.1. Comportement mécanique à température ambiante et à hautes températures.....	27
9.2. Théorie de choc.....	27
9.3.Comportement en fatigue.....	28
10. conclusion	29

Chapitre II: Caractérisation des matériaux et formulation du micro-béton de résine

1. Introduction	32
2. Matériaux utilisés	32
2.1. Sables	32
2.2. Gravier.....	32
2.3. Liant (la résine polyester)	33
2.4. Le durcisseur	34
2.5. Les additions minérales	34
3. Caractéristiques physiques et mécaniques	35
3.1. La masse volumique apparente (ρ_{app}).....	36
3.2. La masse volumique absolue (ρ_{abs})	37
3.3. La porosité	37
3.4. L'analyse granulométrique	38
3.5. Le module de finesse du sable.....	41
3.6. L'équivalent de sable	42
3.7.L'essai Los Anglos et Micro-Deval.....	43
4. Fabrication du micro-béton de résine	47
4.1. Optimisation de la formulation	47
4.2. Préparation du micro-béton de résine.....	49
5. Conclusion	51

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Introduction	54
2. Influence des additions minérales sur la masse volumique du micro-béton de résine	54
3. Influence des additions minérales sur la capacité d'absorption d'eau	55
4. Dispositifs expérimentaux	56
4.1. Essai de traction par flexion 3 points.....	56
4.2. Essai de compression	57
5. Courbe contrainte-déformation (σ/ε)	58
6. Influence des additions minérales sur le comportement mécanique du micro-béton de résine	60
6.1. Comportement mécanique du micro-béton de résine témoin.....	60
6.2. Comportement mécanique du micro- béton de résine avec la poudre de marbre....	61
6.3. Comportement mécanique du micro-béton de résine avec la Poudre de brique	62
6.4. Comportement mécanique du béton de résine avec la Poudre de verre.....	62
7. Comparaison d'effet des additions sur les résistances du micro-béton de résine	63
8. Mode de rupture	65
8.1. Cas de flexion	66
8.2. Cas de compression	66
9. Conclusion	67
Conclusion générale	69

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 Classification des composites béton-résine	9
Figure I.2. Matériau composite.....	12
Figure I.3. Composition du béton polymère.....	15
Figure I.4. Résistances en Fonction de la quantité de polymère.....	17
Figure I.5. Façades et marches d'escalier en béton polymère pour bâtiment.....	19
Figure I.6. Le pont mythique (New York Mania).....	20
Figure I.7. Exemples d'utilisation des bétons de résine dans les planchers.....	20
Figure I.8. Exemples d'utilisation des bétons de résine pour les bacs de plants.....	21
Figure I.9. Exemples d'utilisation des bétons de résine dans le domaine hydrauliques.....	22
Figure I.10. Poudre de verre.....	24
Figure I.11. Transformation des déchets de verre en poudre de verre.....	24
Figure I.12. Poudre de brique rouge.....	25
Figure I.13. Poudre de marbre.....	26
Figure I.14. Principe d'utilisation du mouton Charpy.....	28
Figure I.15. Evolution du module d'élasticité et distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue.....	28

Chapitre II

Figure II.1. Sable de dune.....	32
Figure II.2. Gravier (3/8).....	32
Figure II.3. Résine polyester.....	33
Figure II.4. Durcisseur.....	34
Figure II.5. Poudre de brique.....	34

Figure II.6. Poudre de marbre.....	35
Figure II.7. Poudre de verre.....	35
Figure II.8. Préparation des matériaux.....	36
Figure II.9. Masse volumique apparente du sable de dune.....	36
Figure II.10. Masse volumique absolue.....	37
Figure II.11. Série des tamis.....	38
Figure II.12. Courbe granulométrique.....	40
Figure II.13. Courbe granulométrique avec sable corrigé.....	42
Figure II.14. Equivalent de sable.....	43
Figure II.15. Essai Los Anglos.....	44
Figure II.16. Essai Micro-Deval.....	45
Figure II.17. Organigramme de la démarche expérimentale.....	48
Figure II.18. Processus de la fabrication des micro-bétons résineux.....	50

Chapitre III

Figure III.1. Histogramme des masses volumiques des micro-bétons résineux.....	54
Figure III.2. Capacité d'absorption d'eau des éprouvettes.....	55
Figure III.3. La machine universelle (Zwick/Roell) Z20.....	56
Figure III.4. Dispositif de flexion 3 points.....	57
Figure III.5. Dispositif de compression.....	58
Figure III.6. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation pour le micro-béton de résine avec la poudre de brique.....	58
Figure III.7. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation pour le micro-béton de résine avec la poudre de marbre.....	59
Figure III.8. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation pour le micro-béton de résine avec la poudre de verre.....	59
Figure III.9. Résistance en flexion 3 points et en compression de micro-béton de résine témoin.....	60
Figure III.10. Influence de pourcentage de la poudre de marbre sur le comportement mécanique des micro-bétons résineux.....	61

Figure III.11. Influence de pourcentage de la poudre de brique sur le comportement mécanique des micro-bétons résineux.....	62
Figure III.12. Influence de pourcentage de la poudre de verre sur le comportement mécanique des micro-bétons résineux.....	63
Figure III.13. Histogramme des résistances mécaniques en flexion 3 points des micro-bétons résineux.....	64
Figure III.14. Histogramme des résistances mécaniques en compression des micro-bétons résineux.....	64
Figure III.15. Mode de rupture des éprouvettes en flexion.....	66
Figure III.16. Mode de rupture des éprouvettes en compression.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1. Propriété types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland.....	7
Tableau I.2 Tableau comparatif de béton de polymère et béton traditionnel.....	10
Tableau I.3. Propriété types des bétons.....	11
Tableau I.4. Différences principales entre matrice TP et TD.....	14
Tableau I.5. Composition chimique du verre.....	23
Tableau I.6. Composition chimique du tesson céramique (brique rouge).....	25
Tableau I.7. Caractéristiques techniques de la poudre de marbre.....	25

Chapitre II

Tableau II.1. Caractéristiques de la résine polyester.....	33
Tableau II.2. Caractéristiques de durcisseur.....	34
Tableau II.3. Masses volumiques apparentes des matériaux.....	36
Tableau II.4. Masses volumiques absolues des matériaux.....	37
Tableau II.5. Valeurs de la porosité des matériaux.....	38
Tableau II.6. Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	39
Tableau II.7. Analyse granulométrique du sable de dune.....	39
Tableau II.8. Analyse granulométrique du sable de carrière.....	40
Tableau II.9. Analyse granulométrique du sable corrigé.....	42
Tableau II.10. Valeurs d'équivalents des sables.....	43
Tableau II.11. Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux.....	45

Chapitre III

Tableau III.1. Masses volumiques des différents bétons de résine.....	54
Tableau III.2. Valeurs des CAE de différentes éprouvettes du micro-béton polymère.....	55
Tableau III.3. Contraintes de flexion 3 points et de compression pour le micro-béton de résine témoin.....	60
Tableau III.4. Contraintes de flexion 3 points et de compression dans le cas de la poudre de marbre.....	61
Tableau III.5. Contraintes de flexion 3 point et de compression dans le cas de la poudre de brique.....	62
Tableau III.6. Contraintes de flexion 3 points dans le cas de la poudre de verre.....	62

LISTE DES NOTATIONS

PC: Polymer Concrete.

BMO: Béton à Matrice Organique.

MMA: Méthacrylate de Méthyle.

BR: Béton Résineux.

MR: Mortier Résineux.

MAP: Mortier Additionné par des Polymères.

BAP: Béton Additionné par des Polymères.

MIP: Mortier Imprégné par des Polymères.

BIP: Béton Imprégné par des Polymères.

PCC: Polymer-Cement Concrete.

PLC: Polymer-Latex Concrete.

PIC: Polymer-Impregnated Concrete.

TP: Thermoplastique.

TD: Thermodurcissable.

PET: Polyéthylène Téréphtalate.

CV: Cendre Volante.

LGC: Laboratoire de Génie Civil.

ρ_{app} : Masse volumique apparente.

ρ_{abs} : Masse volumique absolue.

P: Porosité.

M_f : Module de finesse du sable.

ES: Equivalent de sable.

LA: Coefficient Los-Anglos.

C_{MD}: Coefficient Micro-Deval.

M_v: Masse volumique.

BRT: Béton de Résine Témoin.

PB: Poudre de Brique.

PM: Poudre de Marbre.

PV: Poudre de Verre.

CAE: Capacité d’Absorption d’Eau.

$\sigma_{t,f}$: Contrainte à la Traction par Flexion.

σ_c : Contrainte à la Compression.

ε : Déformation.

Introduction général

Présentation général du thème.

Introduction générale

Le béton a connu ces dernières années des développements considérables. Il a profité en particulier des évolutions de la chimie minérale et organique et de l'amélioration des outils de production. Au-delà des progrès constants du matériau, (sur son ouvrabilité, ses performances mécaniques et sa durabilité), les recherches sur les nouveaux bétons se sont considérablement accélérées et ont abouti aujourd'hui aux solutions le plus innovant tant en termes de conception que de mise en œuvre et d'esthétisme. Les bétons sont devenus les matériaux de la modernité et de l'innovation. L'étendue de leurs performances physiques, mécaniques et esthétiques s'élargit sans cesse [1].

La durabilité des matériaux employés en génie civil est remise en question par le vieillissement physico-chimique de ces matériaux, vieillissement provoqué par des contraintes climatiques, par la pollution, Les dégradations les plus significatives encourues par les structures du génie civil en béton hydraulique peuvent être à l'origine de fissurations, de délaminage, de désagrégation, d'écaillage ou d'érosion de surface, de corrosion des armatures, Afin d'améliorer la tenue des bétons et mortiers aux agressions environnementales, la matrice cimentaire peut être remplacée, dans certains cas, par une matrice organique : " un polymère ". Le béton qui en résulte est connu sous la dénomination anglo-saxonne " Polymer Concrete, PC ", on le désignera par béton à matrice organique " BMO " également connu sous l'appellation de Béton de Résine ou Béton Résineux" [2].

Le béton polymère qui est un matériau composite dont le liant est constitué entièrement d'un polymère organique commence à prendre place dans le marché des matériaux de construction de grande diffusion [3]. Ce type de béton est obtenu en mélangeant à la charge, un polymère, un durcisseur (agent de réticulation) et un catalyseur, On utilise une grande variété de monomères et de prépolymères pour fabriquer le béton de résine. Les polymères les plus employés sont basés sur quatre types de monomères ou systèmes de prépolymères, à savoir le méthacrylate de méthyle (MMA), le prépolymère de polyester styrène, le prépolymère époxyde durcisseur et l'alcool fiarfulorique [4]. Différents produits peuvent aussi être ajoutés à la résine pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et physiques, faciliter sa mise en œuvre ou simplement pour en diminuer le coût. Des agents de pontage à base de silane sont parfois utilisés pour augmenter la cohésion entre la matrice de polymère et la charge [3].

Comparativement au béton de ciment Portland, les bétons de résine possèdent une plus grande résistance mécanique, adhèrent bien aux autres matériaux, résistent mieux aux produits chimiques et aux agents corrosifs, absorbent moins d'eau et présentent une plus grande stabilité aux cycles gel-dégel [5].

Comme ils ont une plus grande résistance mécanique que le béton de ciment Portland, ils peuvent faire économiser jusqu'à 50% de matériaux concurrençant ainsi le béton conventionnel pour certaines applications spéciales [6]. La résistance aux agents chimiques et les caractéristiques mécaniques dépendent plus de la nature du polymère utilisé que du type et de la quantité des charges, Les propriétés finales du béton résineux dépendent fortement de la nature chimique de la matrice polymérique, des conditions de conservation temps (âge), température et hydrothermie et des conditions environnementales aux quelles les structures sont exposées [2], en raison de ces propriétés, le béton polymère représente un matériau durable qui améliore la tenue des structures du génie civil face aux agressions environnementales.

Pour la coté économique, Le remplacement du ciment Portland par un polymère entraîne par comparaison au béton à matrice cimentaire une augmentation sensible du coût du béton du fait du coût plus élevé du polymère ainsi que de celui de la main-d'œuvre généralement plus qualifiée. Il importe, donc, qu'architectes et ingénieurs aient une idée des possibilités et des limitations des bétons résineux pour être en mesure de choisir le béton le plus approprié et le plus économique pour une utilisation donnée [2].

L'objectif de notre travail consiste à l'étude des additions minérales sur les comportements mécaniques d'un micro-béton à base de résine polyester, les additions qu'on a utilisés sont : la poudre de brique, la poudre de marbre, et la poudre de verre. Ce travail est composé de trois chapitres ; le premier est une étude bibliographique sur le béton de résine (définition, historique, composition.....etc), et aussi sur les additions minérales utilisées. Le deuxième consiste sur les essais qu'on a faits pour la caractérisation physico-mécanique des matériaux utilisés dans la fabrication de notre béton, ainsi que la description de la démarche expérimentale utilisé lors la formulation. Le troisième est un chapitre d'analyses, on donne les résultats trouvés, et on fait une discussion pour comparer les résultats des différentes formulations.

Chapitre I : Etude bibliographique

Ce chapitre consiste généralement à définir le béton de résine, ainsi que ses applications potentielles dans le domaine du génie civil.

Sommaire

Chapitre I : Etude bibliographique

1. Introduction	6
2. Définition	6
3. Historique du béton de résine	7
4. Classification du béton de résine	8
4.1.Le béton additionné de résine.....	9
4.2.Le béton imprégné de résine.....	9
4.3.Le béton de résine.....	9
5. Composition et formulation du béton de résine	12
5.1.La composition principale d'un béton polymère.....	13
a. <i>Le liant (la résine)</i>	13
b. <i>Les agrégats</i>	14
5.2.La formulation du micro béton de résine.....	15
6. Applications des bétons de résine dans le domaine de génie civil	18
6.1.Utilisation des bétons de résine dans les bâtiments.....	18
6.2.Utilisation des bétons de résine dans l'industrie.....	19
6.3.Utilisation des bétons de résine pour le revêtement des chaussés et planchers...	19
6.4.Utilisation des bétons de résine dans l'horticulture.....	21
6.5.Utilisation des bétons de résine dans les travaux de drainage et hydrauliques...	21
6.6.Utilisation des bétons de résine comme isolant phonique.....	22
6.7.Utilisation des bétons de résine dans le site d'enfouissement des déchets toxiques et radioactifs.....	22
6.8. Utilisation des bétons de résine en géothermie.....	23
7. Définition des additions minérales	23
7.1. La poudre de verre.....	23
7.2. La poudre de brique.....	24
7.3. La poudre de marbre.....	25
8. Effet des additions minérales sur les bétons	26
8.1. Effet filler ou effet de remplissage.....	26
8.2. Effet chimique ou pouzzolanique.....	26
8.3. Effet physique ou de surface.....	27
9. Caractéristique mécaniques des bétons de résine	27
9.1. Comportement mécanique à température ambiante et à hautes températures.....	27
9.2. Théorie de choc.....	27
9.3.Comportement en fatigue.....	28
10. conclusion	29

1. Introduction

Le béton a toujours été considéré comme le matériau de construction le plus utilisé dans les ouvrages de génie civil, il a mérité sa place par sa simplicité de fabrication, sa facilité de mise en place et ses performances mécaniques [7].

Par le développement de génie civil, il existe maintenant plusieurs types des bétons; parmi les bétons spéciaux; on a le béton de résine.

2. Définition

Le béton de résine est un matériau composé de différents types d'agrégats. Ces derniers sont liés par des résines de polyester pour assurer la solidité de chaque réalisation. Cette combinaison se complète, pour les bétons préfabriqués, d'agrégats de silice, de quartz et de résines de polyester stable [8]. L'obtention du béton de résine nécessite le remplacement total ou partiel du ciment par un polymère.

Le béton polymère n'est pas un béton traditionnel, bien que certains matériaux aient en commun. Il est utilisé pour des projets de construction tels que le traditionnel, mais les composants polymères de nous donner plusieurs caractéristiques qui le rendent plus sûr et plus durable que le béton ordinaire. Le polymère a tendance à être plus cher que d'habitude est mesurée et plus précisément en termes de densité et de retrait.

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 [9], une bonne adhésion aux granulats, par des résistances mécaniques notamment à la traction plus élevées que les bétons hydrauliques [10] et beaucoup d'autres avantages. (*Tableau I.1*)

Tableau I.1 Propriété types des bétons de résine courants et du béton de ciment Portland.

[11]

Type de liant	Masse volumique (g/cm 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

3. Historique du béton de résine

La recherche et le développement des bétons et mortiers modifiés par des polymères ont connu un grand essor dans différents pays occidentaux depuis les années 1980 [8]. Ces matériaux se caractérisent par une résistance remarquable à la carbonatation [12], à la pénétration d'ions de chlorure et à la diffusion d'oxygène [13].

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 [14]. 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 [16].

4. Classification du béton de résine

Les bétons de résine sont classés généralement en trois catégories selon le processus technologique de fabrication

- ✓ Béton ou Mortier Résineux « BR ou MR »
- ✓ Béton ou Mortier Additionné par des Polymères « MAP ou BAP »
- ✓ Béton ou Mortier Imprégné par des Polymères « MIP ou BIP » [17]

La (*Figure I.1*) montre la classification de la composition de Béton résineux. Cette classification a été publiée pour la première fois par Blaga [18] 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.

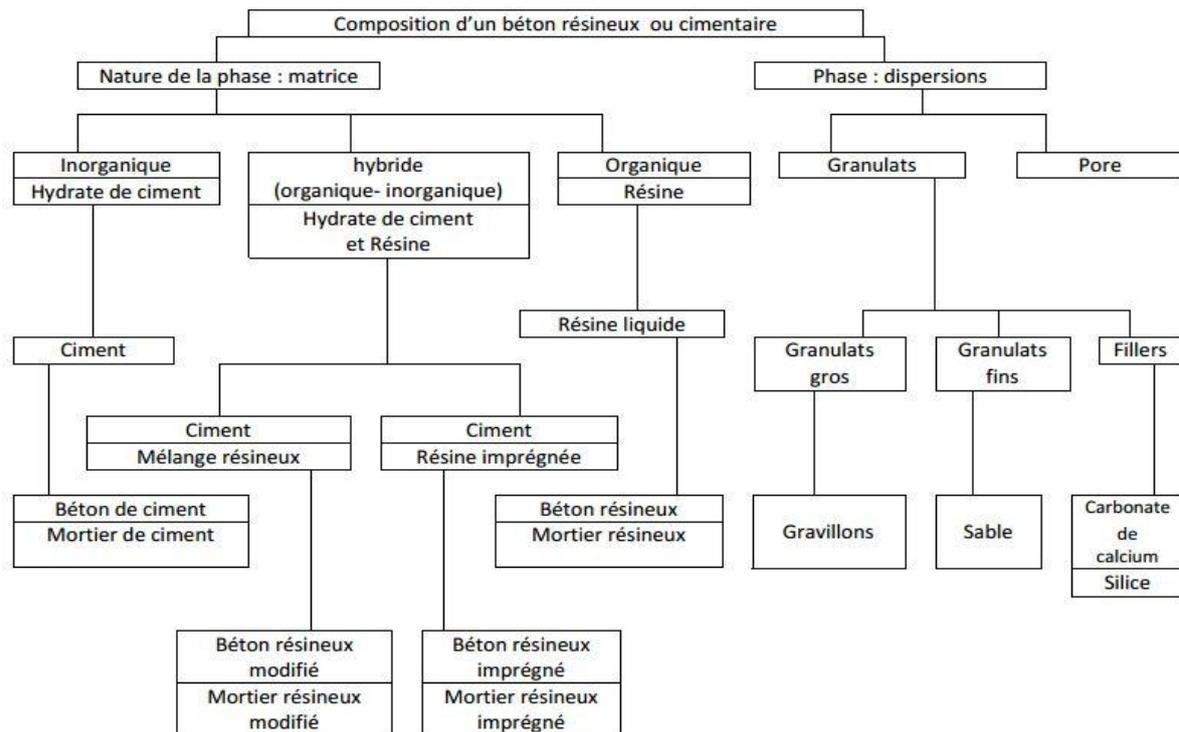


Figure I.1 Classification des composites béton-résine [17]

4.1. 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, 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 [19].

4.2. 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 [20].

4.3. Le béton de résine

C'est un béton dont tout ou partie du liant est une résine de synthèse. Par rapport à un béton courant, il est caractérisé par une meilleure résistance mécanique, un durcissement

plus rapide, un état de surface plus élaboré, une meilleure résistance à certains agents agressifs, la possibilité de réaliser des éléments minces performants mais un coût beaucoup plus élevé [21]. Le tableau qui se suit (*Tableau I.2*) résume l'ensemble des différences entre le béton classique et le béton polymère.

Tableau I.2. Tableau comparatif de béton de polymère et béton traditionnel [22].

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 moyens	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

Le béton de résine 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 [23]. 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 :

- Une bonne résistance aux agents chimiques et aux agents corrosifs.
- Un faible coefficient de dilatation thermique, une plus faible perméabilité à l'eau et une bonne résistance aux cycles de gel-dégel
- Un faible coefficient de dilatation thermique.
- Une bonne adhésion aux granulats et aux bétons anciens.
- Des résistances mécaniques meilleures que celles des bétons hydrauliques surtout en tension, et une bonne résistance à l'abrasion.
- Un durcissement rapide, et une excellente durabilité avec un coût raisonnable [22].

La différence entre les bétons qu'on a classifiés c'est au tableau suivant (*Tableau I.3*):

Tableau I.3. Propriété types des bétons [24].

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	1.7	24.8	34.5	7.6	2.30	7.2

Comme le remplacement du ciment Portland par un polymère entraîne une augmentation sensible du coût du béton, il ne faudrait le faire que si l'on recherche des caractéristiques supérieures, si le coût de la main-d'œuvre est moins élevé ou si les besoins en énergie lors de la fabrication et de la mise en œuvre sont moindres. Il importe donc qu'architectes et ingénieurs aient une idée des possibilités et des limitations des bétons de résine pour être en mesure de choisir le plus approprié et le plus économique pour une utilisation donnée. Le digest précédent portait sur les bétons modifiés aux résines, c'est-à-dire le béton imprégné de résine et le béton additionné de résine [25].

5. Composition et formulation du béton de résine

Un matériau composite est obtenu par la combinaison d'au moins deux matériaux différents à l'échelle macroscopique ou plusieurs matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion), l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible (*Figure I.2*). La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes [26].

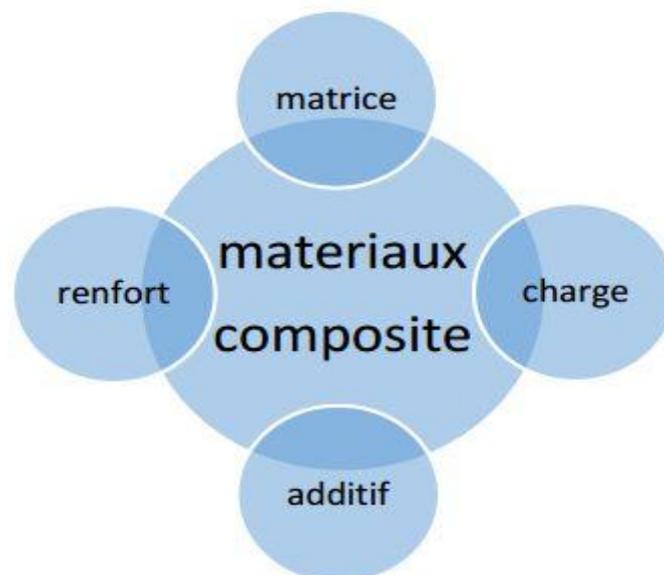


Figure I.2. Matériau composite

Ces matériaux disposent d'atouts important par rapport aux matériaux traditionnels, ils apportent de nombreux avantages fonctionnels :

- ✓ La légèreté.
- ✓ Grande résistance à la fatigue.
- ✓ Liberté de forme.
- ✓ Une bonne isolation électrique.
- ✓ Faible vieillissement sous l'action de l'humidité de la chaleur et de la corrosion [7].

5.1. La composition principale d'un béton polymère

Le béton de résine (polymère) est formé par un squelette granulaire (les agrégats) et un liant polymère (résine) parfois thermoplastique mais dans la plupart des cas thermodurcissable [27]

a. Le liant (la résine)

Les polymères sont des structures ayant une architecture le plus souvent linéaire ou tridimensionnelle constituée par l'enchaînement covalent de plusieurs unités chimiques de répétitions ou motifs unitaires appelées monomères possédant une ou plusieurs fonctions chimiques potentiellement réactives. Le nombre et la nature de ces fonctions permet de déterminer ce que l'on appelle la fonctionnalité du monomère, c'est-à-dire le nombre de liaisons qu'un monomère peut établir avec d'autres monomères lors de la réaction chimique appelée polymérisation. La différence entre un polymère et une grosse molécule quelconque provient de cette Répétition de molécules identiques ou similaires constituant une chaîne ou une portion de chaîne. Les polymères peuvent être fabriqués à partir d'un seul type de monomère (on parle alors d'homo polymère, comme par exemple le polystyrène), ou bien à partir de plusieurs types [27].

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques en deux grandes familles à savoir les thermoplastiques (TP) et les thermodurcissables (TD). Dans les thermoplastiques Polychlorure de vinyle, Polystyrène, Polycarbonate, Polyméthacrylate de méthyle, Polypropylène et le polyéthylène..., 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. À hautes températures le thermoplastique devient visqueux et il se solidifie si on le laisse refroidir [22].

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. Dans les polymères thermodurcissables, dont les plus utilisés sont les époxydes, polyesters, phénoliques, furanes, 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; donc ils ne se ramollissent pas [22]. Les différences principales entre les (TP) et (TD) sont résumés dans le (*Tableau I.4*) :

Tableau I.4. Différences principales entre matrice TP et TD [28]. [22]

	Thermoplastiques (TP)	Thermodurcissables (TD)
Etat de base	Solide (prêt a l'emploi : polymérisé)	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit (précautions à prendre)
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage refroidissement	Chauffage continue
Cycle	Court	Long (polymérisation)
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite sauf nouveaux TP thermostables	Bonne
Chutes et déchets	Recyclables	Perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	bonnes + Propreté	Emanation pour méthode humide (allergie possible)

b. Les agrégats

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 (*Figure I.3*).

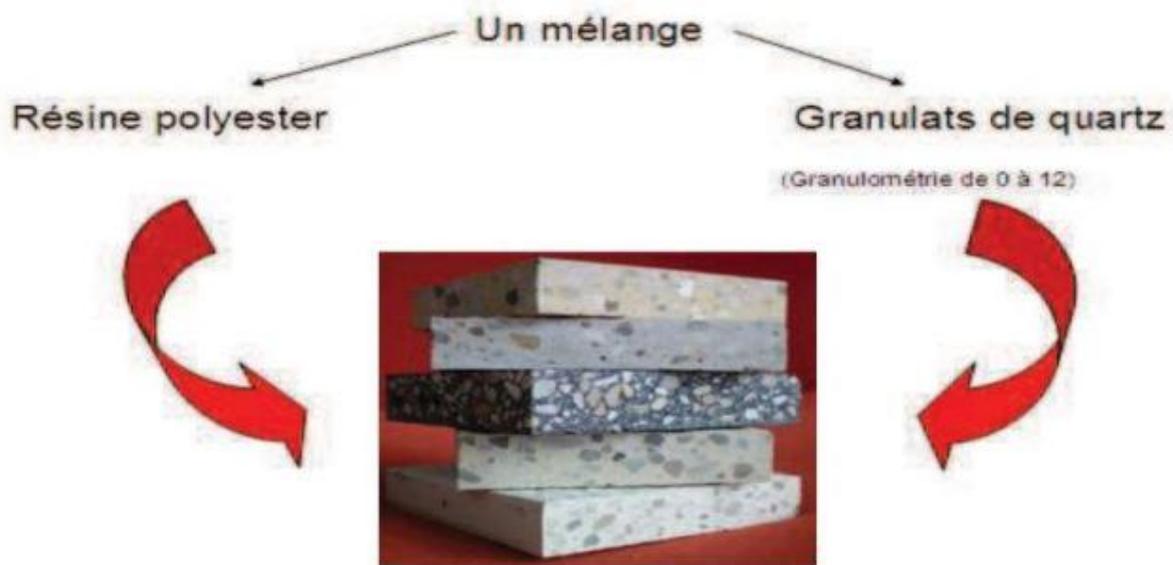


Figure I.3. Composition du béton polymère [3]

En principe, n'importe quel granulats utilisables 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 [22].

5.2. La formulation du micro béton de résine

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 : [22]

Andries cité par (*M. Helal*) montre dans une étude que la combinaison optimale entre le furfural, le furfural-acétone et des sables fins est donnée pour des proportions 1,6 ($\approx 16\%$) de monomère-sable et 1,7 de furfural-acétone. 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 M. Harja,*) 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.

(*B. Jo, S Park et J Park.*) 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,*) 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 bénéfique/coût est défini.

(*C. Vipulanandran et N. Dharmarajan. E. Ching*) 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. 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 1.4*).

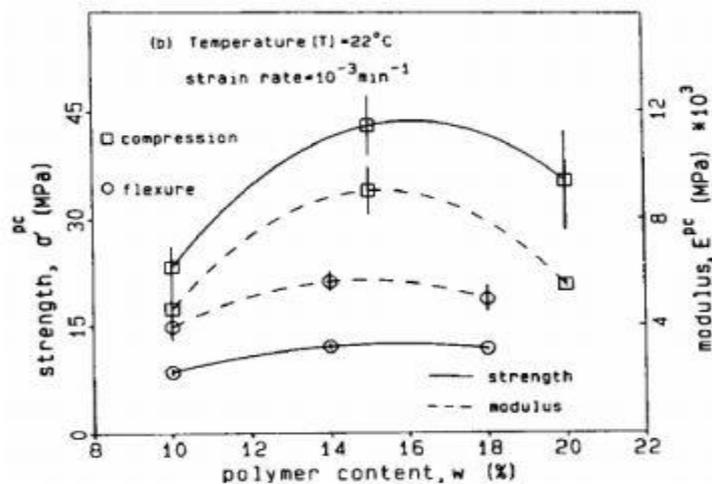


Figure I.4. Résistances en Fonction de la quantité de polymère

(K. Rebeiz), 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. 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) a formulé un béton optimal à 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.

(m.Ghania.M) a optimisé la formulation de béton de résine en 2 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 LGC de l'Université de Badji Mokhtar à 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.

Avant de procéder à la fabrication 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 par l'huile afin d'assurer un parfait démoulage.

6. Applications des bétons de résine dans le domaine de génie civil

Le béton résineux est utilisé pour de nombreux types de projets de construction spécialisés. Comme d'autres types de béton, il peut être utilisé pour assembler deux composants différents ou de fournir une structure ou une base. Le matériau est utilisé dans la construction électrique ou industrielle où le béton doit durer longtemps et être résistant à de nombreux types de corrosion [27].

6.1. Utilisation des bétons de résine dans les bâtiments

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 [22]. L'industrie de façades, s'est enrichie avec l'utilisation du béton polymère comme matériau de revêtement avec des différentes formes de ces dernières de plus en plus complexes de point de vue architecturale et les exigences économiques et techniques plus stricts [27]. (*Figure 1.5*)



Figure 1.5. Façades et marches d'escalier en béton polymère pour bâtiment [3]

6.2. Utilisation des bétons de résine dans l'industrie

Le béton polymère est fortement recommandé dans la construction des usines chimiques et dans la fabrication des équipements minière (électrolytiques, réservoirs, puits) [3], 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]

6.3. Utilisation des bétons de résine pour le revêtement des chaussés et planchers

Les planchers qui sont réalisées par le béton résineux dans les établissements industriels sont constamment exposés à des actions mécaniques permanentes exercées par les engins de transport, les vibrations, les impacts, l'abrasion, l'action des agents chimiques. De même pour les chaussés, le mouvement intensifs des véhicules lourdes essentiellement réduit énormément le freinage à temps et cause l'usure de la surface du béton [27]. 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 [22] (*Figure 1.6*).



Figure I.6. Le pont mythique (New York Mania). [3]

Les investigations basées sur des essais en laboratoires et in-situ pour une période de 10 ans ont démontré l'efficacité de cette technique si la résine est bien choisie [27], Les bétons de résine sont également utilisés comme matériaux décoratifs en leur ajoutant des charges colorées [22] (Figure I.7).

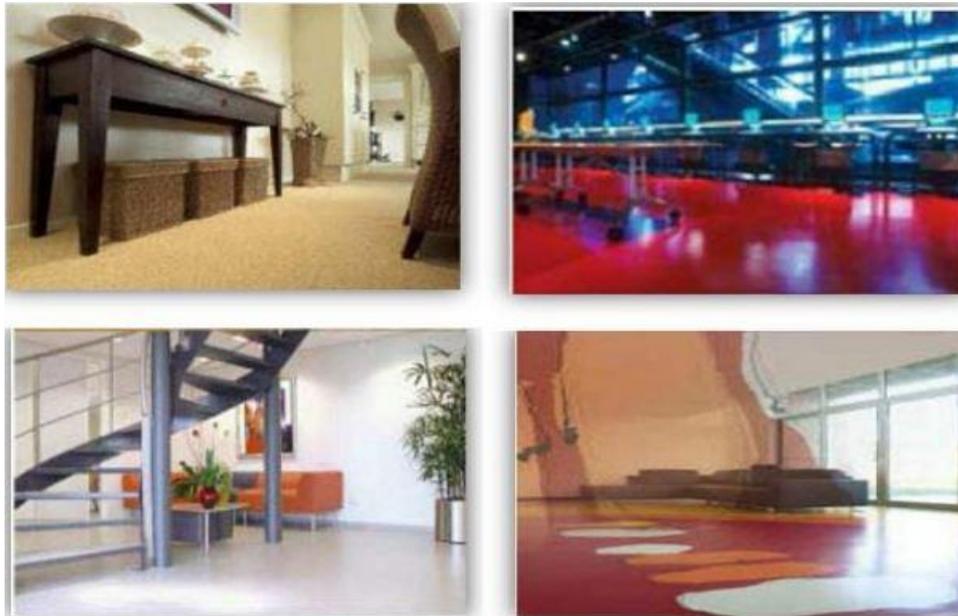


Figure I.7. Exemples d'utilisation des bétons de résine dans les planchers [22]

6.4. Utilisation des bétons de résine dans l'horticulture

Le béton polymère est utilisé pour fabriquer des petites formes et des bacs pour les plants (*Figure. I.8*). Ces conteneurs sont à déplacer selon les conditions météorologiques et c'est ici que réside l'avantage de profiter de béton polymère plus léger et robuste [27].



Figure. I.8. Exemples d'utilisation des bétons de résine pour les bacs de plants [30]

6.5. 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 (*Figure. I.9*) 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].



Cunettes Avenue Jean Jaurès –
Chantier de Paris



Chambre à vannes – Chantier de
Strasbourg



Regard pour tuyaux PRV –
Chantier de Sète

Figure. I.9. Exemples d'utilisation des bétons de résine dans le domaine hydrauliques [22].

6.6. 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 [22].

6.7. 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) et à la corrosive et aux agents chimiques rend l'utilisation d'un tel matériau favorable pour l'usage dans la gestion de déchets dangereux, et les applications récentes ont montré des résultats prometteurs. Le béton de résine peut assurer longévité et résistance désirés [22].

6.8. 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. Comme conséquence de cette économie quant aux frais des usines, le prix du courant électrique fourni est réduit de 9,7% [22].

7. Définition des additions minérales

Une addition minérale est une poudre d'une finesse supérieure à celle du ciment. Elle peut être ajoutée et/ou substituée au béton lors de sa fabrication ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions : les additions inertes et les additions réactives [31].

7.1. La poudre de verre

La poudre de verre (*Figure I.10*) est obtenue en broyant à une certaine finesse le verre obtenu par la récupération de bouteilles en verre. La poudre de verre est obtenue en sélectionnant uniquement les bouteilles de couleurs verte et blanche. Celles-ci sont nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier, séchées, concassées et finement broyées (*Figure. I.11*). La composition chimique du verre est présentée au tableau suivant (*Tableau I.5*) : [32]

Tableau I.5. Composition chimique du verre [32]

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	Na ₂ O	SO ₃	Perte au feu
%	70,50	1,42	0,10	8,43	4,01	15,28	0,25	0,22



Figure I.10. Poudre de verre

Figure. I.11. Transformation des déchets de verre en poudre de verre [32]

Le verre est un matériau à plusieurs vies et peut être recyclé plusieurs fois. Cependant, il est nécessaire que le verre provenant de la collecte sélective soit préalablement séparé en fonction de la couleur pour être transformé en calcin pour de nouveau être utilisé dans la fabrication d'emballages en verre. La plupart du temps, le verre récolté est un produit mixte et sa réutilisation peut devenir difficile. Dans ce cas-ci, il est employé pour d'autres applications (abrasif routier, laine de verre, filtrations municipales...) ou stocké en décharge [33].

7.2. La poudre de brique

La poudre de brique (*Figure I.12*) est obtenue par le broyage des déchets de briques. Les briques sont obtenues par cuisson de certaines argiles à une température d'environ 1000 C°. Par combinaison chimique à partir de 700 C°, l'argile en perdant son eau, se transforme en terre cuite qui se présente sous forme de tesson céramique et se présente sous forme de blocs de différentes dimensions, utilisé pour la construction et les revêtements.

Les déchets de briques se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes où cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions [34].

Le tesson céramique est une formation de silicates, composé essentiellement de silice, d'alumine, de chaux et d'autres oxydes dans des proportions très variables, le (Tableau I.6) est donné la limite de la composition chimique du tesson céramique. [35]

Tableau I.6. Composition chimique du tesson céramique (brique rouge) [35]

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	F ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃
%	35 – 85	9 – 25	0 – 25	0 – 5	1 – 5	1 – 5	3 – 9	0,3 – 2	0 – 3



Figure I.12. Poudre de brique rouge.

7.3. La poudre de marbre

La poudre de marbre ou farine de marbre est une charge minérale issue du broyage des blocs de marbre [36]. La poudre de marbre est obtenue du calcaire ou carbonate de calcium très dur. Sa couleur est d'un blanc pur avec des brillances. Elle est utilisée comme charge dans les peintures et les enduits traditionnels, suivant sa granulométrie, dans les enduits fins et les stucs ainsi que le tadélakt. Les caractéristiques techniques de la poudre de marbre sont présentées sur le (Tableau I.7).

Tableau I.7. Caractéristiques techniques de la poudre de marbre [37]

CaCO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Densité de la roche	Blancheur
> 98 %	< 1 %	< 0.05 %	< 0.01 %	2.7	87.5 < Ry < 91 0.3 < b < 1.2

Deux granulométries sont disponibles dans notre région :

- Poudre de marbre blanche fine de 2 microns de granulométrie moyenne.
- Poudre de marbre blanche moyenne de 0 à 350 microns obtenue à partir d'une calcite Pyrénéenne d'une grande pureté chimique. Elle est broyée entre 0 et 350 microns puis tamisée [38].

La poudre de marbre (*Figure I.13*) est recherchée à cause de ses utilisations en peinture pour donner de la matière aux badigeons et aux enduits, en papeterie pour donner de la densité et de la brillance, en additif de PH neutre pour les plastiques, les cosmétiques, la pharmaceutique et la nourriture animal (ajout de calcium).



Figure I.13. Poudre de marbre.

8. Effet des additions minérales sur les bétons

8.1. Effet filler ou effet de remplissage

L'incorporation d'additions au sein d'un matériau cimentaire améliore son squelette granulaire. Ces fines particules s'intercalent entre les interstices des grains de ciment remplissant ainsi une partie du volume des vides. Le résultat de ce remplissage se traduit par une meilleure maniabilité du mélange et un accroissement des résistances pour un même rapport E/C et des propriétés de transfert [31].

8.2. Effet chimique ou pouzzolanique

L'effet chimique concerne la capacité des additions, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance

mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment, mais aussi à l'amélioration de la durabilité [31].

8.3. Effet physique ou de surface

L'incorporation d'addition inerte ou réactive au sein d'une matrice cimentaire contribue au développement des résistances à court terme. Il n'est plus à démontrer que les additions jouent le rôle de sites de nucléation préférentiels au cours des réactions d'hydratation du ciment. L'effet de surface consiste à la création de sites préférentiels d'hydratation constitués par les surfaces procurées par l'addition minérale [31].

9. Caractéristique mécaniques des bétons de résine

9.1. 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. 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 [39].

9.2. 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 I.14*). 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 [40].

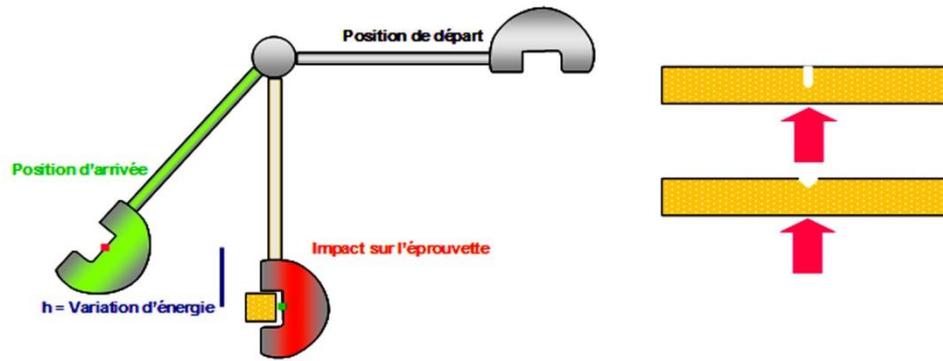


Figure I.14. Principe d'utilisation du mouton Charpy [41]

9.3. Comportement en 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 sur la prévision de la rupture sous sollicitation de niveau variable.

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 I.15*) :

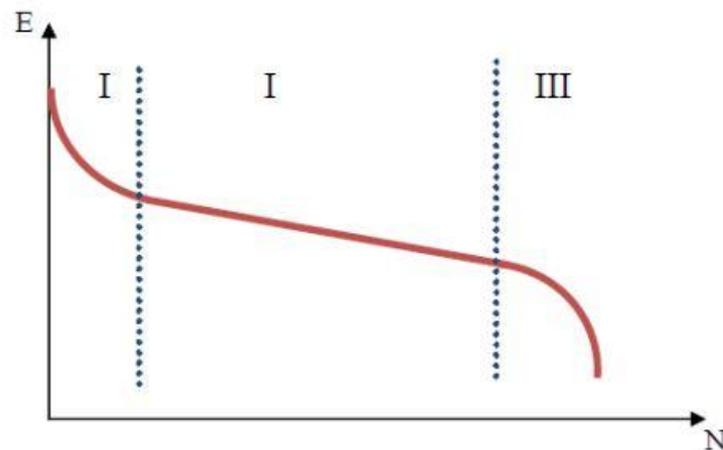


Figure I.15. Evolution du module d'élasticité et distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue [42].

- 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 [42].

10. Conclusion

A partir de cette recherche bibliographique, nous avons rassemblés des informations sur le béton de résine : sa définition, sa composition principale, ainsi que ces caractéristiques mécaniques et ces domaines d'application, et on a parlé aussi d'une façon générale sur les additions minérales.

Le béton de résine est composé principalement d'une matrice organique (la résine) qui joue le rôle du liant entre les agrégats (sable et gravier), donc il présente une microstructure hétérogène par la présence des plusieurs constituants ainsi que les pores et les microfissures.

Les bétons de résine résistent bien à l'action des produits chimiques et autres agents corrosifs, absorbent très peu l'eau, résistent bien à l'abrasion et possèdent une grande stabilité aux cycles gel-dégel. L'utilisation de ce type de béton est de plus en plus croissante dans de nombreuses applications du génie civil.

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et formulation du micro-béton de résine.

Ce chapitre consiste en première partie à caractériser les différents constituants du micro-béton de résine, et en deuxième partie à optimiser la formulation de ce dernier avant de décrire les techniques d'élaborations utilisées lors de sa fabrication.

Sommaire

Chapitre II: Caractérisation des matériaux et formulation du micro-béton de résine

1. Introduction	32
2. Matériaux utilisés	32
2.1. Sables	32
2.2. Gravier.....	32
2.3. Liant (la résine polyester)	33
2.4. Le durcisseur	34
2.5. Les additions minérales	34
a. <i>Poudre de brique</i>	34
b. <i>Poudre de marbre</i>	35
c. <i>Poudre de verre</i>	35
3. Caractéristiques physiques et mécaniques	35
3.1. La masse volumique apparente (ρ_{app}).....	36
3.2. La masse volumique absolue (ρ_{abs})	37
3.3. La porosité	37
3.4. L'analyse granulométrique	38
3.5. Le module de finesse du sable.....	41
3.6. L'équivalent de sable	42
3.7.L'essai Los Anglos et Micro-Deval.....	43
a. <i>Los Anglos</i>	43
b. <i>Micro-Deval</i>	44
4. Fabrication du micro-béton de résine	47
4.1. Optimisation de la formulation	47
4.2. Préparation du micro-béton de résine.....	49
5. Conclusion	51

1. Introduction

Ce chapitre est titré par la caractérisation des matériaux et formulation du béton de résine, dans cette partie on étudiera en première lieu les différentes caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux qu'ils contiennent le micro-béton de résine, ces caractéristiques sont déterminées par des méthodes et des techniques expérimentales normalisées ; ensuite on décrira les techniques d'élaboration utilisées pour la réalisation de ce nouveau béton de résine ainsi que les conditions expérimentales d'exposition des formulations adoptées.

2. Matériaux utilisés :

2.1. Sables : On a utilisé deux types des sables (de dune roulé et de carrière) qui provient de la localité Région d'Annaba. Ces types sont utilisés afin d'obtenir une bonne distribution granululaire des grains (*Figure II.1*).



a) Sable de carrière

b) sable de dune

Figure II.1. Sable de dune.

2.2. Gravier : Le gravier utilisé est de fraction (3/8) mm, de la région d'Ain Abid (*Figure II.2*).



Figure II.2. Gravier (3/8).

2.3. Liant (la résine polyester) :

La résine utilisé en tant que liant est à base d'un polyester sous forme de liquide, de couleur violet, sa viscosité est de 20 dPa.s et avec une masse volumique de 1.11 g/cm^3 (Figure II.3). Cette résine est insoluble dans l'eau comme toutes les résines. Les caractéristiques physico-mécaniques de cette résine polyester sont présentées dans le (Tableau II.1).

Tableau II.1. Caractéristiques de la résine polyester.

Caractéristiques	Unité	Résultats
Masse volumique	g/cm^3	1.11
Viscosité	dPa.S	20
Couleur	-	Violet
Etat	-	Liquide
Dangereux	-	Inflammable
Temps de gel 23°C	Min	25
Résistance à la traction	MPa	45
Résistance à la compression	MPa	50-150
σ_{rupt} en traction	MPa	50-80
A_{rupt}	%	2.5
Température max	°C	200
E	GPa	2.5-3.5
G	GPa	1.4
ρ	Kg.m^{-3}	1300



Figure II.3. Résine polyester.

2.4. Le durcisseur : C'est un agent de réticulation, les additifs que sont un accélérateur et un durcisseur (amine) ont été fournis sous forme de liquide dans des flacons hermétiques (*Figure II.4*). Le (*Tableau II.2*) rassemble les caractéristiques du durcisseur utilisé.



Figure II.4. Durcisseur.

Tableau II.2. Caractéristiques de durcisseur.

Caractéristiques	Résultats
Etat	Liquide
Couleur	Incolore
Dangereux	Inflammable

2.5. Les additions minérales : Nous avons utilisés trois types des additions : la poudre de brique, la poudre de marbre et la poudre de verre.

- a. **Poudre de brique :** On l'obtient à partir de laboratoire de l'université Badji-Mokhtar-Annaba, sa finesse est de diamètre inférieur à 0.08 pour éliminer les déchets non fins (*Figure II.5*).



Figure II.5. Poudre de brique.

- b. Poudre de marbre :** On l'obtient à partir de la société de transformation de marbre et de granite (Boukhadra-Annaba), c'est un sous-produit de la fabrication de marbre (*Figure II.6*).



Figure II.6. Poudre de marbre.

- c. Poudre de verre :** Elle est disponible au niveau de laboratoire de l'Université, sa finesse est de diamètre inférieur à 0.08 (*Figure II.7*).



Figure II.7. Poudre de verre.

3. Caractéristiques physiques et mécaniques

La caractérisation des matériaux doit être faite par les essais suivants :

- La masse volumique apparente et absolue.
- La porosité des matériaux.
- L'analyse granulométrique des sables et du gravier.
- Le module de finesse des sables.
- L'équivalent de sable pour les sables.
- L'essai de Los-Anglos et Micro-Deval pour le gravier.

Avant de faire ces essais ; on passe tous les matériaux pendant 24h dans un étuve réglé à 110 °C (*Figure II.8*).



Figure II.8. Préparation des matériaux.

3.1. La masse volumique apparente (ρ_{app})

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 (Figure II.9). On calcule la valeur de la masse volumique par le rapport:

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

Les résultats sont au (Tableau II.3) :

Tableau II.3. Masses volumiques apparentes des matériaux.

Matériaux	Gravier 3/8	Sable de carrière	Sable de dune	Poudre de brique	Poudre de marbre	Poudre de verre
ρ_{app} (g/cm ³)	1.2552	1.4136	1.4458	0.8907	0.8213	0.6227



Figure II.9. Masse volumique apparente du sable de dune.

3.2. La masse volumique absolue (ρ_{abs})

Cet essai est réalisé selon la norme (NF EN 1097-3). Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains, en versant une masse 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 (Figure II.10). Cet essai est répété trois fois pour chaque matériau, la moyenne des essais constitue la masse volumique absolue qui a été calculer par la formule suivante:

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \text{ g/cm}^3$$

M : la masse d'échantillon.

V_1 : le volume de liquide.

V_2 : le volume de liquide avec l'échantillon

Les résultats après l'essai sont au (Tableau II.4) :

Tableau II.4. Masses volumiques absolues des matériaux.

Matériaux	Gravier 3/8	Sable de carrière	Sable de dune	Poudre de brique	Poudre de marbre	Poudre de verre
ρ_{abs} (g/cm ³)	2.3775	2.501	2.5033	2.738	2.36	2.583



a) Poudre de verre b) sable de dune

Figure II.10. Masse volumique absolue.

3.3. La porosité

A partir des masses volumiques absolue et apparente on déduit la porosité qui a été défini par la formule suivante :

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

Les résultats trouvés sont montrés dans le tableau si dessous (*Tableau II.5*) :

Tableau II.5. Valeurs de la porosité des matériaux.

Matériaux	Gravier 3/8	Sable de carrière	Sable de dune	Poudre de brique	Poudre de marbre	Poudre de verre
P (%)	47.22	43.46	42.23	67.46	65.21	75.88

3.4. L'analyse granulométrique

Cet essai se fait par voie sèche selon la norme NF P 18-560, elle consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboites les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas (*Figure II.11*). Pour les sables, on a utilisés les tamis suivants: 5, 3.15, 2.5, 2, 1.25, 1, 0.63, 0.5, 0.315, 0.2, 0.16, 0.125, 0.08 mm, et pour le gravier : 8, 6.3, 5, 4, 3.15mm, avec un fond au dessous. Cette analyse est utilisée pour les grains plus gros que 0.08 mm. A partir des refus cumulés sur les différents tamis on trace les tableaux d'analyse granulométrique (*Tableau II.6, II.7 et II.8*) qui nous a permet de tracer la courbe granulométrique (*Figure II.12*).



Figure II.11. Série des tamis.

La quantité des granulats qu'on doit passer dans la série des tamis est calculée par la formule suivante :

$$m = 0.2 \times D_{max}$$

m : La quantité des granulats en Kg.

D_{max} : La dimension maximale des granulats en mm.

Gravier 3/8 :

$$0.2 * D_{max} = 0.2 * 8 = 1.6 \text{kg}$$

Tableau II.6. Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis	Mi(g)	ai(%)	Ai(%)	Ti(%)
8	10.1	0.632	0.632	99.368
6.3	223.3	13.973	14.605	85.395
5	410.8	25.707	40.312	59.688
4	514.5	32.196	72.508	27.492
3.15	362.7	22.697	95.205	4.795
fond	76.6	4.793	99.998	0.002

Sable de dune:

$$0.2 * D_{max} = 0.2 * 5 = 1 \text{kg}$$

Tableau II.7. Analyse granulométrique du sable de dune.

Tamis	Mi(g)	ai(%)	Ai(%)	Ti(%)
5	0	0	0	100
3.15	2.8	0.28	0.28	99.72
2.5	3.8	0.38	0.66	99.34
1.25	25.9	2.59	3.25	96.75
1	13.6	1.36	4.61	95.39
0.63	175.8	17.6	22.21	77.79
0.5	515.2	51.6	73.81	26.19
0.315	125.1	12.53	86.34	13.66
0.2	103.2	10.33	96.67	3.33
0.16	11	1.1	97.11	2.89
0.125	13.8	1.38	99.15	0.85
0.08	6.5	0.65	99.8	0.2
Fond	1.7	0.17	99.97	0.03

Sable de carrière :

$$0.2 * D_{\max} = 0.2 * 5 = 1\text{kg}$$

Tableau II.8. Analyse granulométrique du sable de carrière.

Tamis	Mi(g)	ai(%)	Ai(%)	Ti(%)
5	0	0	0	100
4	4.1	0.41	0.41	99.59
3.15	68.1	6.82	7.23	92.77
2.5	127.8	12.8	20.03	79.97
2	73	7.313	27.343	72.657
1.25	180	18.03	45.373	54.627
1	45.9	4.598	49.971	50.029
0.63	111.9	11.21	61.181	38.819
0.5	62.4	6.251	67.432	32.568
0.315	73.4	7.353	74.785	25.215
0.2	125.2	12.54	87.325	12.675
0.16	44.4	4.448	91.773	8.227
0.125	35.1	3.516	95.289	4.711
0.08	14.1	1.412	96.701	3.299
Fond	32.8	3.285	99.986	0.014

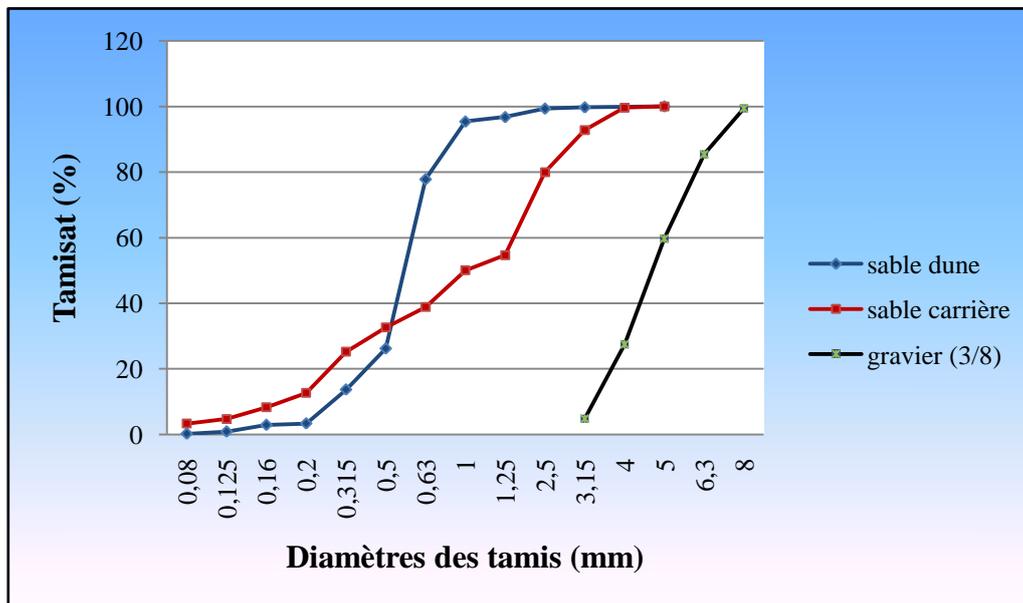


Figure II.12. Courbe granulométrique.

3.5. Le module de finesse du sable

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.

Le module de finesse doit calculer par l'équation suivante :

$$M_f = \frac{\sum A_i}{100}$$

A_i : Les refus cumulés des tamis normalisés (5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.16) mm.

Le sable de dune : $M_f = 2.1 < 2.2$ donc le sable est fin

Le sable de carrière : $M_f = 2.93 > 2.8$ donc le sable est gros

Dans notre formulation, nous avons besoin d'un sable corrigé pour une meilleure granulométrie, donc nous avons utilisé la méthode d'Abrams afin d'obtenir les pourcentages nécessaires pour former le sable corrigé, la procédure utilisée est la suivante :

Sable1: sable de dune $M_f = 2.1$

Sable2 : sable de carrière $M_f = 2.93$

Méthode d'Abrams :

$$\%S_1 = \frac{M_{f2} - M_f}{M_{f2} - M_{f1}} \times 100$$

$$\%S_2 = \frac{M_f - M_{f1}}{M_{f2} - M_{f1}} \times 100$$

On fixe $M_f = 2.5$

$$\%S_1 = \frac{M_{f2} - M_f}{M_{f2} - M_{f1}} \times 100 = \frac{2.93 - 2.5}{2.93 - 2.1} \times 100 = 51.81\% \approx 52\%$$

$$\%S_2 = \frac{M_f - M_{f1}}{M_{f2} - M_{f1}} \times 100 = \frac{2.5 - 2.1}{2.93 - 2.1} \times 100 = 48.19\% \approx 48\%$$

Alors on a refait l'analyse granulométrique de notre nouveau sable corrigé avec 52% du sable de dune et 48% du sable de carrière. Les résultats trouvés sont présentés dans le (Tableau II.9) et la (Figure II.13).

Tableau II.9. Analyse granulométrique du sable corrigé.

Tamis	Mi(g)	ai(%)	Ai(%)	Ti(%)
5	0	0	0	100
4	3.6	0.36	0.36	99.64
3.15	36.5	3.65	4.01	95.99
2.5	60	6.01	10.02	89.98
2	43.7	4.38	14.4	85.6
1.25	95.2	9.54	23.94	76.06
0.63	118.8	11.9	35.84	64.16
0.315	302.4	30.29	66.13	33.87
0.16	278.1	27.85	93.98	6.02
0.125	32.2	3.23	97.21	2.79
0.08	14.5	1.45	98.66	1.34
fond	13.4	1.34	100	0

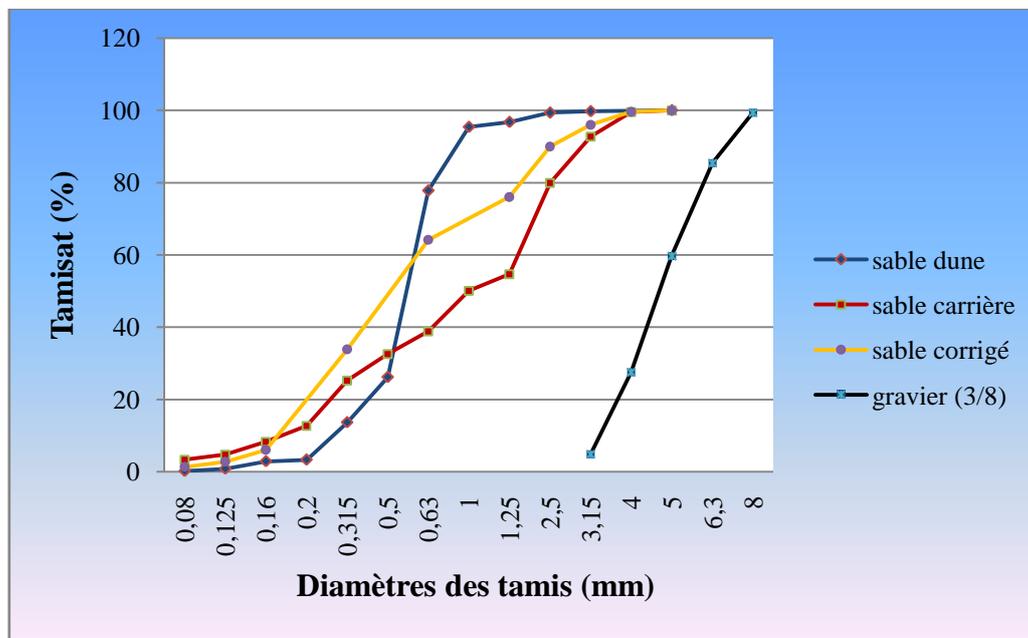


Figure II.13. Courbe granulométrique avec sable corrigé.

3.6. L'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 (Figure II.14). Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

Hauteur h_1 : sable propre seulement.

Hauteur h_2 : sable propre + éléments fins.

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

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

Cet essai est répété trois fois. La moyenne des essais constitue la valeur d'équivalent de sable (*Tableau II.10*).

Tableau II.10. Valeurs d'équivalents des sables.

Type de sable	Coefficient ES (%)	Commentaire
Sable de dune	90.83	> 85%, donc sable très propre
Sable de carrière	89.91	> 85%, donc sable très propre



Figure II.14. Equivalent de sable

3.7. L'essai Los Anglos et Micro-Deval

a. Los Anglos

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat. Dans notre étude, on a utilisé un seul gravier de la fraction 3/8 ; donc pour effectuer l'essai de Los-Anglos selon la norme [P18-573] on prend un échantillon de fraction 4/6.3 mm de masse sèche (M_0) égale à $5000 \pm 2g$ et on la placée dans un tambour contenant 7 boulets d'acier; au cours de l'essai le tambour effectue 500 tours à une vitesse de rotation comprise entre 31 et 33 tours/min.

La friction des granulats entre eux et les granulats entre les boulets et les parois du tambour provoque leurs dégradations plus au moins accrue (*Figure II.15*).

Le coefficient Los-Anglos (LA) est un pourcentage en masse du rapport des éléments passant au tamis de 1.6 mm (tamisât) séchés après lavage, (M_1) est la masse sèche initiale des granulats intacts.

$$LA = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$$

$$LA = \frac{5000 - 3668}{5000} \times 100 = 26.64 \%$$



Figure II.15. Essai Los Anglos.

b. Micro-Deval

L'essai Micro-Deval a pour but la détermination la résistance à l'usure par le frottement réciproque des éléments d'un granulat. La norme [P18-572] permet de déterminer le coefficient de micro-Deval (*Figure II.16*).

Le gravier évolue pendant l'essai par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive). La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires (4 - 6.3 mm pour notre cas). Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm, une charge abrasive est utilisée (2000 ±5 g pour la classe 4-6.3 mm).

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm

produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval qui s'écrit :

$$C_{MD} = \frac{m}{M} \times 100$$

$$C_{MD} = \frac{82.8}{500} \times 100 = 16.56 \%$$



Figure II.16. Essai Micro-Deval.

Le (Tableau II.11) rassemble les principales caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés :

Tableau II.11. Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux.

caractéristiques	Unités	Sable de dune	Sable de carrière	Gravier 3/8	Poudre de verre	Poudre de brique	Poudre de marbre
ρ_{app}	g/cm^3	1.44	1.41	1.25	0.62	0.89	0.82
ρ_{abs}	g/cm^3	2.503	2.501	2.37	2.58	2.73	2.36
P	%	42.23	43.46	47.22	75.88	67.46	65.21
M_f	/	2.1	2.93	/	/	/	/
ES	%	90.83	89.91	/	/	/	/
LA	%	/	/	26.64	/	/	/
C_{MD}	%	/	/	16.56	/	/	/

D'après l'ensemble des résultats obtenus on peut faire les remarques suivantes :

- Les masses volumiques apparentes et absolues du sable de carrière sont inférieurs à celles du sable de dune, et les masses volumiques du gravier sont inférieurs aussi à celles des deux sables.
- Pour les additions minérales ; la poudre de brique a les plus grandes valeurs de la masse volumique apparente et absolue.
- La masse volumique apparente de la poudre de verre est inférieure à celle de la poudre marbre.
- La masse volumique absolue de la poudre de marbre est inférieure à celle de la poudre de verre.
- A partir de la masse volumique apparente et absolue on déduit la porosité définie par la formule :

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

- Parmi les granulats ; le gravier est le matériau le plus poreux ; et la poudre de verre pour les poudres.
- Le module de finesse de sable de carrière est plus grand que celui du sable de dune.
- La valeur du module de finesse de sable corrigé qu'on a préparé est entre celles du sable de dune et de carrière, elle montre que ce nouveau sable est un sable moyen qui possède une meilleure granulométrie
- A partir des valeurs moyennes des ES, on observe que les sables utilisées sont très propres ($ES > 80$).

4. Fabrication du micro-béton de résine

4.1. Optimisation de la formulation

L'étude expérimentale est entièrement réalisée au Laboratoire de Génie Civil de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, Algérie. Dans notre travail, nous sommes intéressés à aboutir une formulation d'un micro-béton de résine polyester plus compacts, durables et plus résistants. . Cette recherche vise à améliorer les performances mécaniques et dépend de la nature de la matrice et des remplissages (sable, gravier et agrégats) et de la qualité des composants d'adhésion.

Formulation expérimental

Pour poursuivre le travail de l'auteur [G.MIROUZI] a été choisi pour le béton de résine polyester un ajustement parfait de 52% de sable de dune et 48% du sable Carrière et G/S = 0,5 composé du gravier de classe granulaire 3/8. Sur la base du facteur de résistance/coût et la quantité de résine 20 %. Pour éviter la cohésion entre les petits murs de micro-béton et de moule, l'huile de décoffrage a été utilisée.

Cette optimisation a pour objectif de minimiser la fraction massique de liant et d'améliorer les performances mécaniques en ajoutant des additions minérales (la poudre de brique, la poudre de verre et la poudre de marbre), Pour chaque poudre, nous avons préparé cinq mélanges. Ces mélanges se différencient par la fraction massique de la poudre utilisé qui varie entre 2% et 10%.

L'organigramme que c'est présenté dans la (*Figure II.17*) montre la démarche expérimentale utilisée pour la fabrication du micro-béton de résine polyester avec les additions minérales :

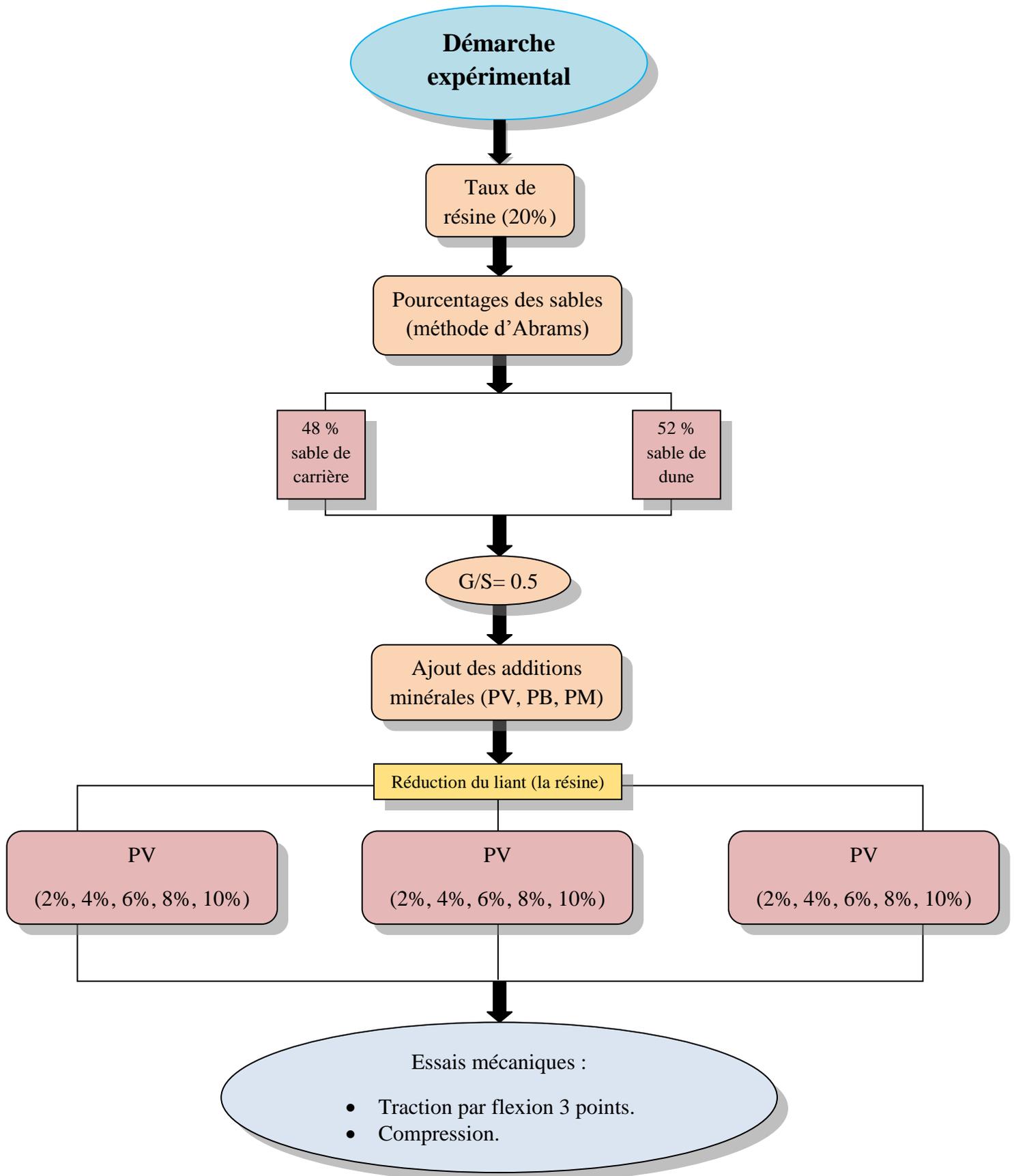


Figure II.17. Organigramme de la démarche expérimentale.

4.2. Préparation du micro-béton de résine

- Avant de procéder la fabrication de micro-béton, on fait le nettoyage des moules et on revête les parois de ces derniers par une couche séparatrice de l'huile afin d'assurer un démoulage facile.
- Premièrement on pèse les constituants qu'on doit utiliser dans la fabrication de notre micro-béton en respectant le dosage des constituants étudié.
- Après, on mélange les constituants à l'état sec dans un récipient, pour obtenir un mélange cohérent afin d'assurer l'homogénéisation.
- Ensuite, on fait le malaxage de la résine polyester avec le durcisseur par une tige métallique, en respectant les proportions massiques étudiées.
- On ajoute la résine modifiée (résine + durcisseur) dans le mélange déjà préparé, l'ajout cette dernier se fait par l'introduction partielle sur le mélange au cours du malaxage, afin d'obtenir la polymérisation totale du mélange.
- On remplir les moules par le béton frais, le remplissage se fait dans trois couches, chaque couche on compacte avec une barre métallique pour éviter le risque de ségrégation, et aussi pour obtenir une bonne compacité. Cette phase s'achemine par l'arasement de la surface supérieure des éprouvettes avec une règlette selon mouvement de scie.
- Après 24h depuis le coulage, on démoule les éprouvettes.

Les photos présentées dans la (*Figure II.1*) montrent les processus nécessaire de la préparation du micro-béton de résine :



Figure II.18. Processus de la fabrication des micro-bétons résineux.

5. Conclusion

La caractérisation complète des constituants utilisés dans la fabrication des micro-bétons de résine ainsi des matériaux élaborés et une mise en place de procédures expérimentales s'est avérée nécessaire. Cette caractérisation des matériaux s'est faite à la base des normes française. Nous avons noté une bonne qualité des matériaux utilisés dans cette recherche expérimentale.

Dans notre recherche, nous sommes intéressés à optimiser la formulation des micro-bétons de résine polyester à partir de deux types de sable : sable de dune et sable de carrière.

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 mécanique.

20% de résine est le pourcentage massique le plus économique et qui donne des bons résultats en termes des résistances mécaniques. Nous avons choisi ce pourcentage comme référence d'élaboration des micro-bétons de résine d'après les résultats de la formulation de G.Mirouzi (22). L'élaboration de nos micro-bétons consiste à faire varier le pourcentage des additions minérales par rapport au poids du liant.

Chapitre III : Résultats et discussion.

Ce dernier chapitre consiste à montrer les résultats des essais mécaniques afin d'avoir l'effet des additions minérales sur le comportement mécanique du micro-béton de résine.

Sommaire

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Introduction	54
2. Influence des additions minérales sur la masse volumique du micro-béton de résine	54
3. Influence des additions minérales sur la capacité d'absorption d'eau	55
4. Dispositifs expérimentaux	56
4.1. Essai de traction par flexion 3 points	56
4.2. Essai de compression	57
5. Courbe contrainte-déformation (σ/ε)	58
6. Influence des additions minérales sur le comportement mécanique du micro-béton de résine	60
6.1. Comportement mécanique du micro-béton de résine témoin	60
6.2. Comportement mécanique du micro- béton de résine avec la poudre de marbre....	61
6.3. Comportement mécanique du micro-béton de résine avec la Poudre de brique	62
6.4. Comportement mécanique du béton de résine avec la Poudre de verre	62
7. Comparaison d'effet des additions sur les résistances du micro-béton de résine	63
8. Mode de rupture	65
8.1. Cas de flexion	66
8.2. Cas de compression	66
9. Conclusion	67

1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous allons présenter premièrement les résultats des essais qu'on a fait pour avoir l'effet des additions minérales sur le comportement mécanique du micro-béton de résine. On a étudié les résistances mécaniques en traction par flexion trois points et en compression.

2. Influence des additions minérales sur la masse volumique du micro-béton de résine

Notre étude est basée principalement sur les additions minérales, alors on a vérifié l'influence de ces additions sur les masses volumiques des micro-bétons résineux.

Pour faire cette expérience, on a choisi pour chaque type d'addition le mélange qui contient le pourcentage maximum (10%) de la poudre utilisée lors de la formulation. Les résultats obtenus sont comparé au béton résineux témoin (sans addition), le (*Tableau III.1*) et la (*Figure. III.1*) résume ces résultats :

Tableau III.1. Masses volumiques des différents bétons de résine.

Eprouvettes	BRT	BR. 10% PB	BR. 10% PV	BR. 10% PM
$M_v (g/cm^3)$	2.0929	2.1675	2.1113	2.1945

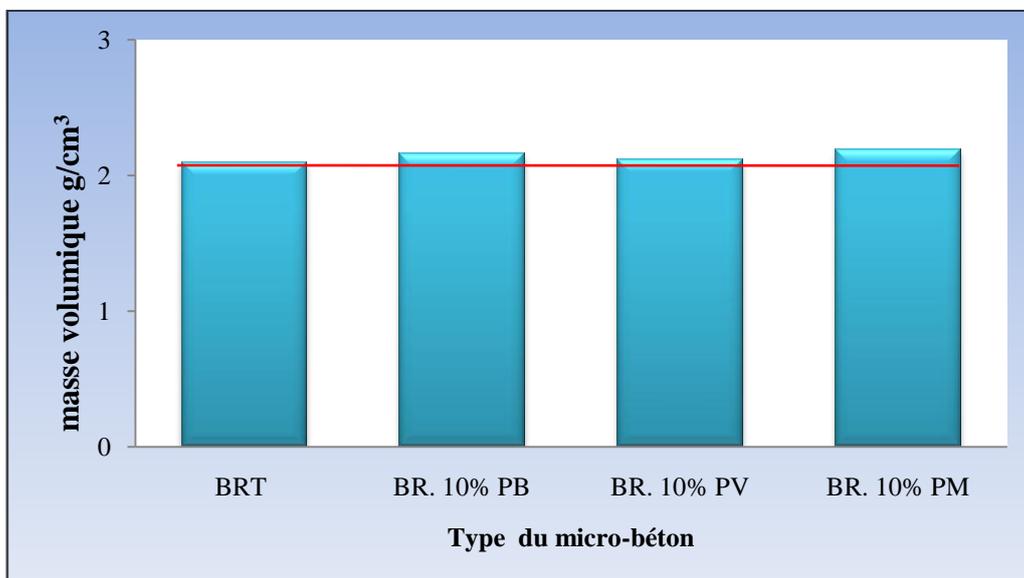


Figure III.1. Histogramme des masses volumiques des micro-bétons résineux.

D'après les résultats présentés ci-dessus (*Figure III.1*), on observe que l'ajout des additions minérales dans la composition du micro-béton résineux montre clairement une légère augmentation des masses volumiques.

3. Influence des additions minérales sur la capacité d'absorption d'eau

Le béton résineux est connu par sa compacité élevée à cause de la matrice organique (la résine). Cette propriété est classée comme avantage du béton de résine donc on peut dire que ce type de béton a une faible capacité d'absorption d'eau.

À cause qu'on a modifié sa composition par l'ajout des additions minérales, on été obligé de vérifier l'influence de ces derniers sur la capacité d'absorption d'eau, alors comme l'expérience précédente on a choisi pour chaque type d'addition le mélange qu'il contient le pourcentage maximum (10%), les valeurs de la capacité d'absorption d'eau doit être calculés par la formule suivante :

$$CAE = (M_h - M_s) / M_s \times 100$$

CAE : la capacité d'absorption d'eau (%).

M_h : masse sèche de l'éprouvette (g).

M_s : masse humide de l'éprouvette (g).

Les valeurs trouvés sont présentés au (*Tableau III.2*) et (*Figure III.2*) :

Tableau III.2. Valeurs des CAE des différentes éprouvettes du micro-béton polymère.

Eprouvettes	La masse sèche (g)	La masse humide (g)	CAE(%)
BR. 10% PB	554.9	555.9	0.18
BR. 10% PM	561.8	562.7	0.16
BR. 10% PV	540.5	541.4	0.17

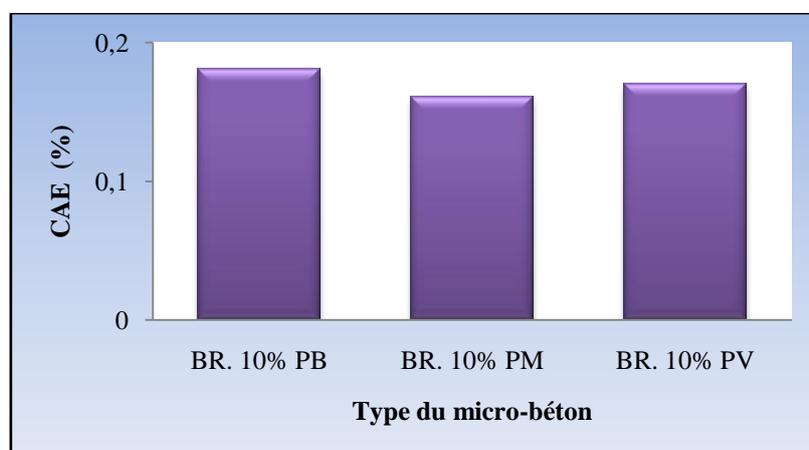


Figure III.2. Capacité d'absorption d'eau des éprouvettes.

D'après les résultats trouvés, on n'observe aucune influence des additions minérales sur la capacité d'absorption d'eau du micro-béton résineux.

4. Dispositifs expérimentaux

Afin d'étudier l'influence des additions minérales sur les comportements mécaniques du micro-béton de résine, nous avons fait une caractérisation mécanique expérimentale, cette caractérisation se fait à travers des essais effectués sur des machines spécialisés.

Nous avons deux types des essais :

- L'essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes prismatiques de dimension $(4 \times 4 \times 16)$.
- L'essai de compression sur les demi-éprouvettes obtenues après l'essai de flexion.

4.1. Essai de traction par flexion 3 points

L'essai de traction par flexion 3 points est un essai mécanique qui permet de déterminer la résistance des éprouvettes prismatique $(4*4*16 \text{ mm})$ jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge concentrée. Les 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 III.3*).

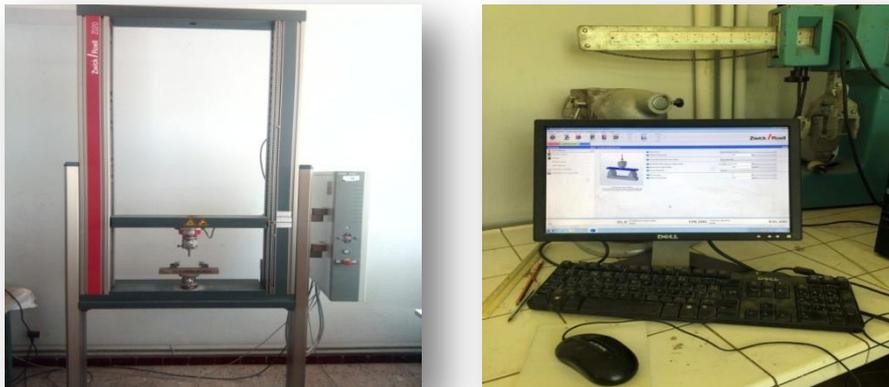


Figure III.3. La machine universelle (Zwick/Roell) Z20

Les éprouvettes sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs selon les dimensions des échantillons conformément aux normes considérées (*Figure III.4*). Les essais sont réalisés à température ambiante et la charge maximale est enregistrée au cours de l'essai ainsi que la courbe charge-déplacement.



Figure III.4. Dispositif de flexion 3 points.

La résistance à la flexion est calculée par la formule suivante :

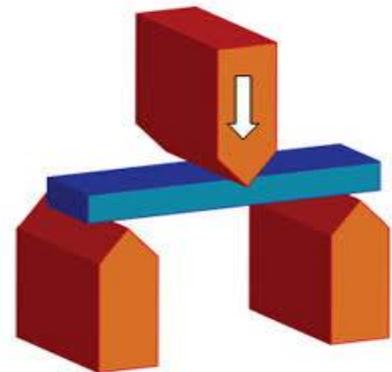
$$\sigma_{t.f} = \frac{3pl}{2bh^2}$$

p : La force enregistrée au moment de la rupture

l : La distance entre les appuis prise égale à 100 mm

b : La largeur de l'éprouvette.

h : La hauteur de l'éprouvette.



4.2. Essai de compression

Les essais ont été menés sur une presse de compression de capacité de 2000 KN. Il s'agit de déterminer la contrainte de compression conduisant à l'écrasement d'une demie-éprouvette de micro-béton de résine, des plaques d'acier standard à (4x4) cm² permettent de régler les surfaces d'écrasement en contact avec les plateaux de la machine (*Figure III.5*).

La résistance à la compression est calculée par la formule suivante:

$$\sigma_c = \frac{p}{s}$$

p : L'effort de rupture.

s : La section de l'éprouvette.



Figure III.5. Dispositif de compression.

5. Courbe contrainte-déformation (σ/ε)

Les essais ont été effectués sur les éprouvettes de micro-béton résineux avec des additions minérales (PV, PB, PM). Le pourcentage massique de résine est fixé par 20 %, avec la variation des pourcentages massiques des additions : 2%, 4%, 6%, 8% et 10%. Les caractéristiques mécaniques ont été mesurées sur une machine universelle (Zwick/Roell) de 20 KN de capacité. Les figures (III.6, III.7 et III.8) montrent un exemple de courbe contrainte-déformation obtenus sur les éprouvettes en micro-béton de résine pour différents pourcentages des additions minérales.

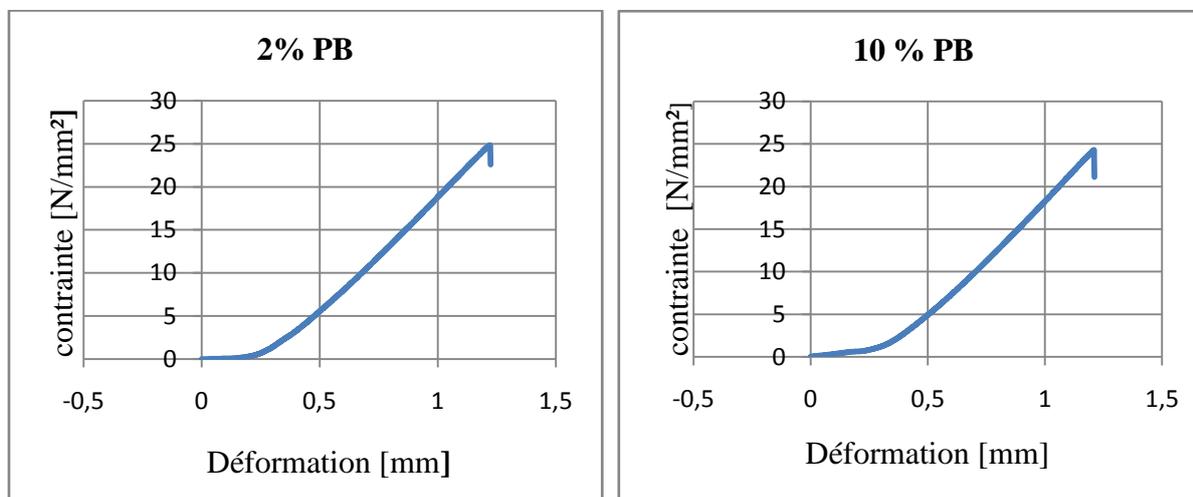


Figure III.6. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation pour le micro-béton de résine avec la poudre de brique.

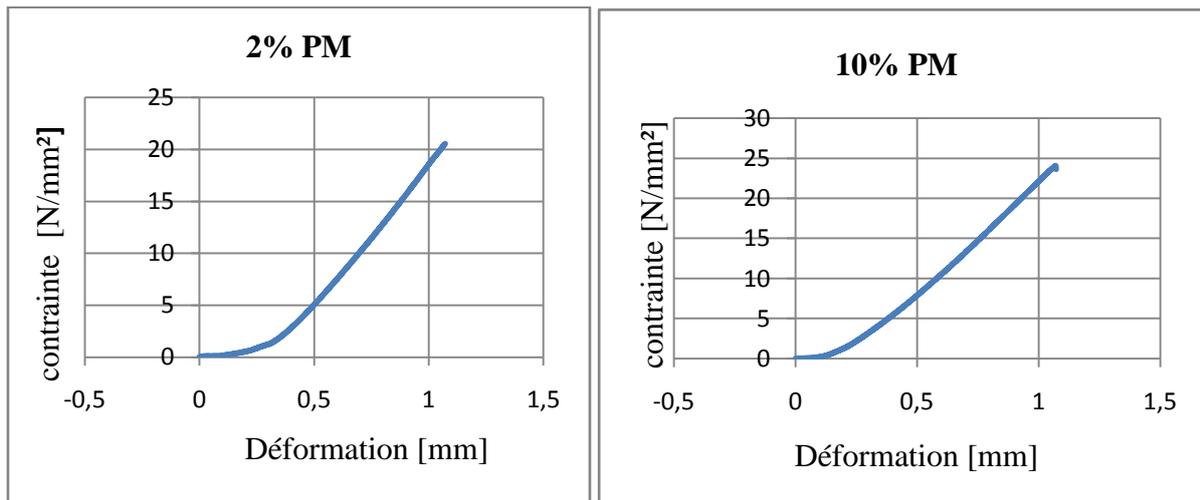


Figure III.7. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation pour le micro-béton de résine avec la poudre de marbre.

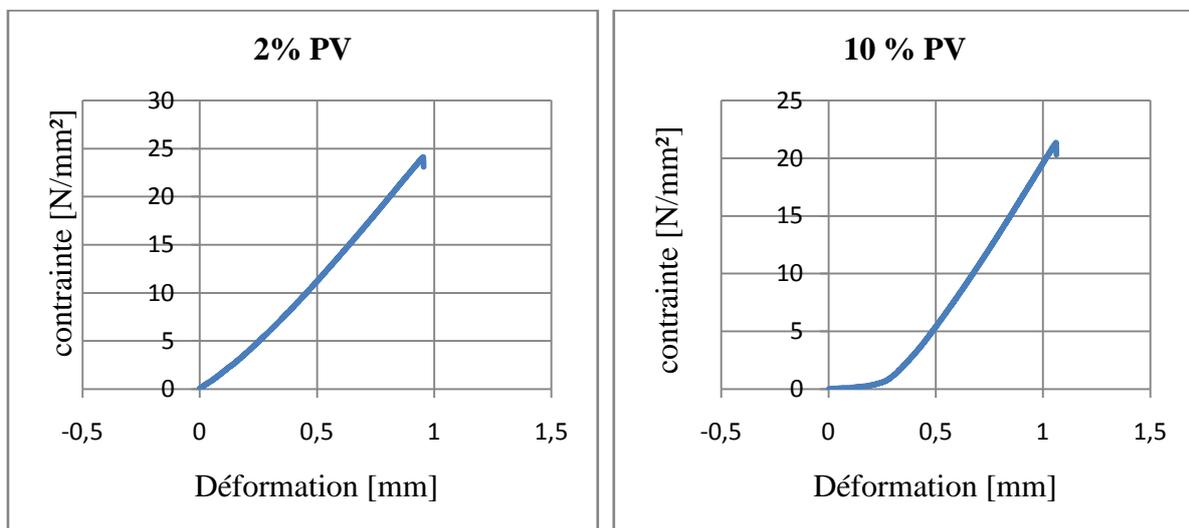


Figure III.8. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation pour le micro-béton de résine avec la poudre de verre.

Les figures précédentes représentent les courbes d'évolution de la contrainte en fonction de la déformation sur les éprouvettes de micro-béton de résine lors de l'essai flexion 3 points, d'après ces courbes on déduit que :

- L'évolution de la contrainte se produit d'une façon linéaire traduisant le comportement élastique du matériau.
- La chute brutale de la courbe traduit la rupture de l'éprouvette après qu'elle devient au ça comportement maximal.
- La rupture de ces matériaux est soudaine, franchement accompagnée d'un bruit montrant la fragilité du béton de résine.

6. Influence des additions minérales sur le comportement mécanique du micro-béton de résine

Pour connaître l'influence des additions minérales sur le comportement mécanique du micro-béton résineux, on doit analyser les résultats qu'on a trouvés d'après les essais mécaniques, ces résultats sont montrés sur les tableaux (III.3, III.4, III.5 et III.6,) et les figures (III.9, III.10, III.11 et III.12,) ci-dessous :

6.1. Comportement mécanique du micro-béton de résine témoin

Tableau III.3. Contraintes de flexion 3 points et de compression pour le micro-béton de résine témoin.

	Traction par flexion	Compression
	σ (N/mm ²)	σ (N/mm ²)
BRT	25	93,5

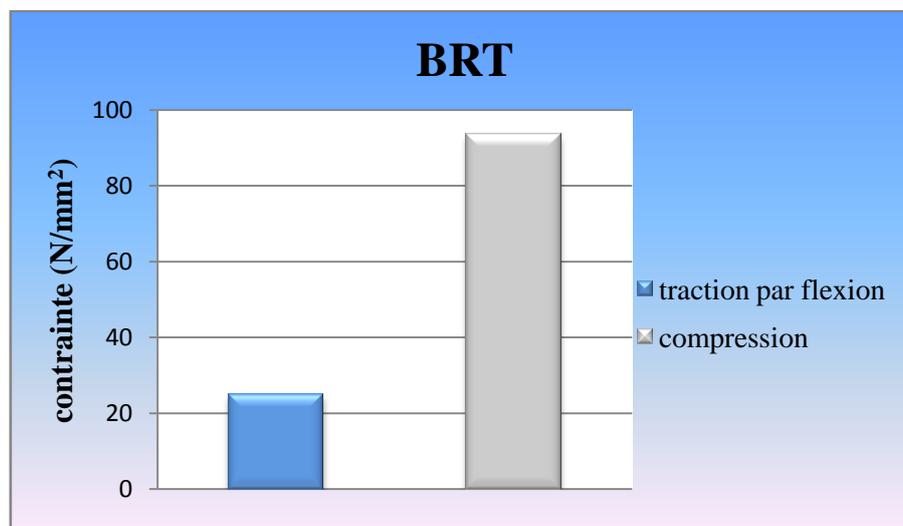


Figure III.9. Résistance en flexion 3 points et en compression de micro-béton de résine témoin.

D'après les résultats présentés ; on observe que notre micro-béton de résine témoin nous donne des résistances élevés soit en compression ou en traction par flexion trois points par rapport au béton traditionnel. Cette augmentation de résistance est due à ce pourcentage optimum du liant (20%) qui nous donne une quantité de résine suffisante pour obtenir une pâte maniable, facile à mouler.

6.2. Comportement mécanique du micro-béton de résine à base de poudre de marbre

Tableau III.4. Contraintes de flexion 3 points et de compression dans le cas de la poudre de marbre.

Pourcentage de la poudre	2% PM	4% PM	6% PM	8% PM	10% PM
$\sigma_{t,f}$ (MPa)	20	21,5	22	22	23
σ_c (MPa)	64,5	67	68	70	71,5

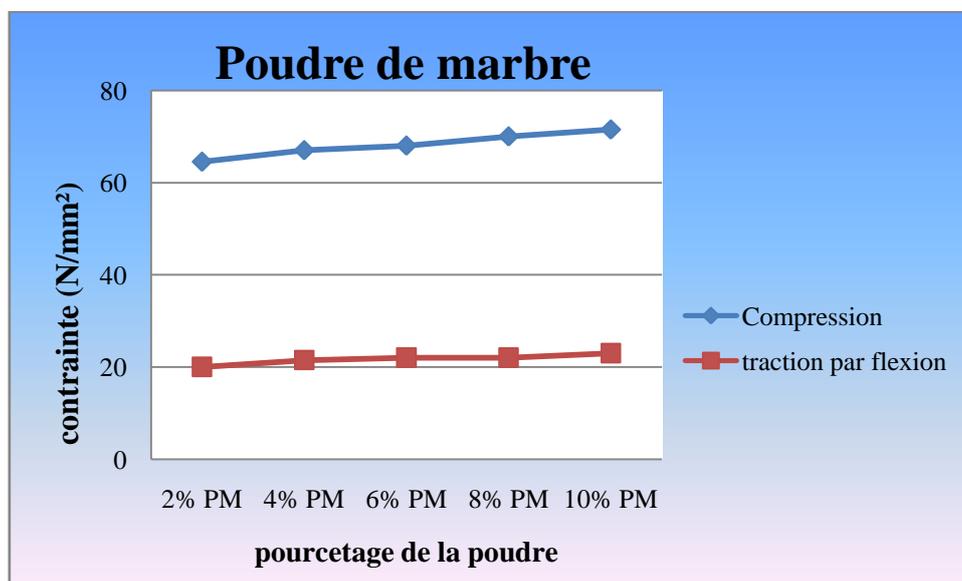


Figure III.10. Influence de pourcentage de la poudre de marbre sur le comportement mécanique des micro-bétons résineux.

D'après la (figure III.10), on observe que l'augmentation du pourcentage de la poudre de marbre dans le micro-béton de résine provoque une augmentation sur son comportement mécanique, avec une lente augmentation de la résistance à la traction par flexion par rapport à l'augmentation rapide de la résistance à la compression.

6.3. Comportement mécanique du micro-béton de résine à base de Poudre de brique

Tableau III.5. Contraintes de flexion 3 point et de compression dans le cas de la poudre de brique.

Pourcentage de la poudre	2% PB	4% PB	6% PB	8% PB	10% PB
$\sigma_{t,f}$ (MPa)	19	20,5	21,5	22	22,5
σ_c (MPa)	65	66,5	69	70,5	75

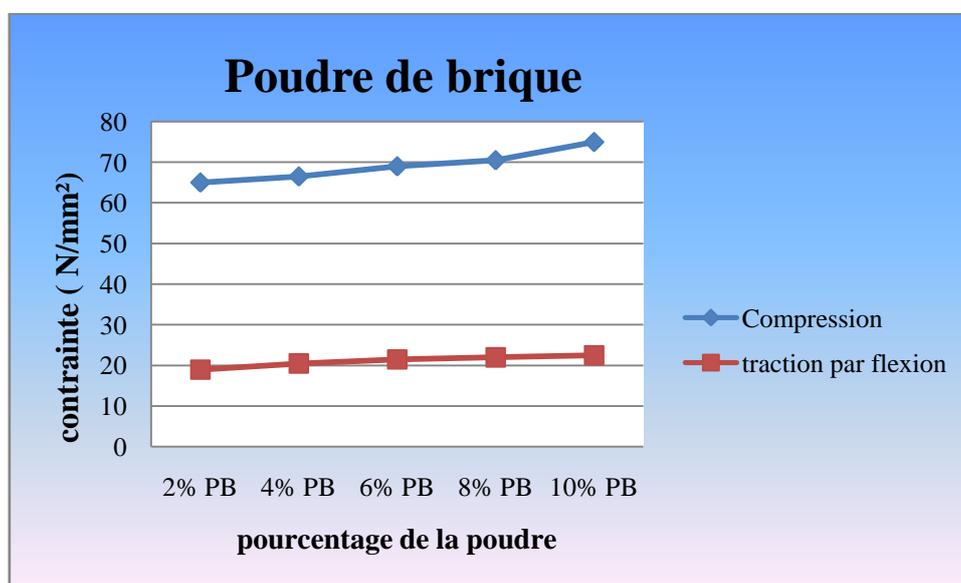


Figure III.11. Influence de pourcentage de la poudre de brique sur le comportement mécanique des micro-bétons résineux.

La (figure III.11) montre clairement que plus le pourcentage de la poudre de brique augmente plus les résistances en flexion et en compression des micro-bétons de résine augmentent aussi.

6.4. Comportement mécanique du béton de résine à base de Poudre de verre

Tableau III.6. Contraintes de flexion 3 points dans le cas de la poudre de verre.

Pourcentage de la poudre	2% PV	4% PV	6% PV	8% PV	10% PV
$\sigma_{t,f}$ (MPa)	20	21	21,5	21	21,5
σ_c (MPa)	77	75,5	72,5	71	71,5

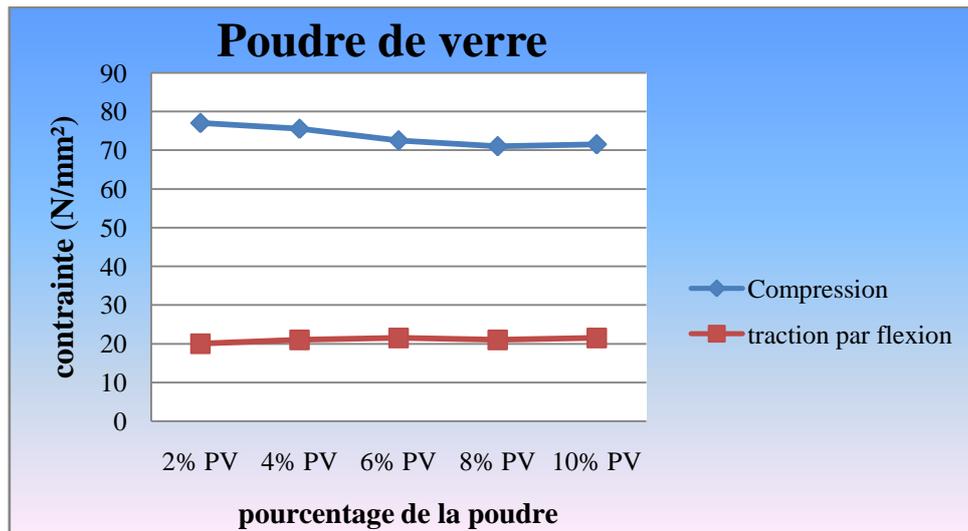


Figure III.12. Influence de pourcentage de la poudre de verre sur le comportement mécanique des micro-bétons résineux.

D'après la (Figure III.12), l'augmentation de la poudre de verre dans la formulation du micro-béton résineux diminue la résistance à la compression de ce dernier, et augmente légèrement la résistance en flexion de l'ordre de 1,5 MPa, donc elle n'a pas une influence significative sur la résistance à la flexion.

7. Comparaison d'effet des additions sur les résistances du micro-béton de résine

Les figures (III.13, III.14) nous permet de faire une comparaison des résistances mécanique du micro-béton résine témoin avec celles des autres mélanges qu'ils contiennent des différents pourcentages des additions minérales :

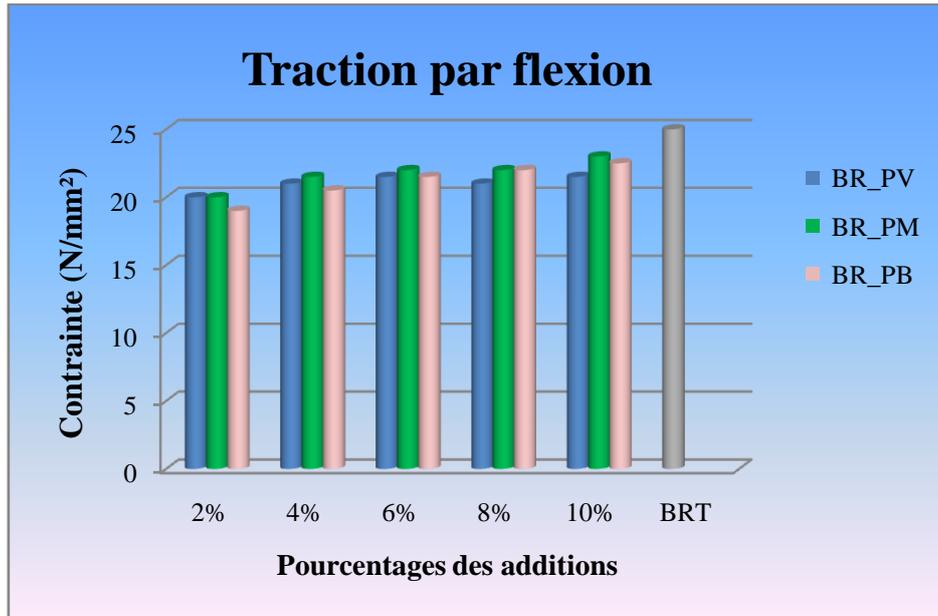


Figure III.13. Histogramme des résistances mécaniques en flexion 3 points des micro-bétons résineux.

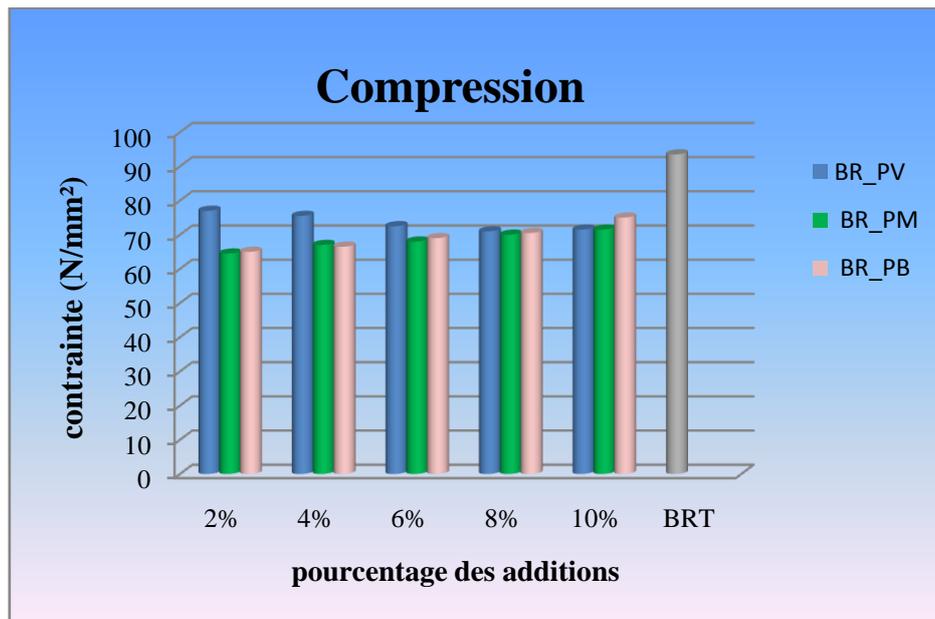


Figure III.14. Histogramme des résistances mécaniques en compression des micro-bétons résineux.

D'après les figures précédents on peut observe que :

- La meilleure résistance soit en compression ou en traction par flexion c'est celle de béton résine témoin, ceci est à cause d'utiliser 20% de la résine pure comme un liant

dans la formulation et grâce à la bonne distribution granulaire entre le sable de dune fin et le sable de carrière moyen.

- L'utilisation des poudres comme additions dans la fabrication de micro-béton de résine nécessite la réduction du liant (la résine), donc il provoque une diminution progressive de la résistance à la flexion (2 MPa), avec une diminution très importante à la compression d'une valeur de (18,5 MPa).
- L'augmentation des pourcentages de la poudre de brique et de marbre s'accompagne par une augmentation de la résistance en traction par flexion, par contre pour la poudre de verre l'augmentation est lente, et elle devenue constante à partir de 6% (*Figure III.13*).
- On observe aussi que plus le pourcentage de la poudre de brique ou de marbre augmente plus les résistances en compression des micro-bétons de résine augmentent, cela est montrée clairement dans le cas de la poudre de brique qui nous a donné une bonne résistance de l'ordre de 75 MPa pour 10%. (*Figure III.14*)
- La résistance en compression des micro-bétons de résine diminue proportionnellement au l'augmentation de pourcentage de la poudre de verre.
- L'augmentation du dosage en addition provoque une action négative sur la maniabilité de micro-béton de résine.

8. Mode de rupture

La rupture comme état la séparation d'une structure en deux ou plusieurs morceaux, elle est la conséquence de la propagation des microfissures qui sont soit existantes soit produites par les contrainte au cours du chargement. Les photos des figures (*III.15*, *III.16*) montrent des illustrations du mode de rupture des éprouvettes en traction par flexion 3 points et en compression :

8.1. Cas de flexion



Figure III.15. Mode de rupture des éprouvettes en flexion.

Pour les différents micro-bétons de résine élaborés, on a remarqué que la propagation de la fissuration se fait au niveau de l'appui central avec une rupture soudaine.

8.2. Cas de compression



Figure III.16. 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 micro-bétons de résine fabriqués et il est différent des fissurations longitudinales généralement observées dans les bétons traditionnels et dans les mortiers cimentaires.

9. Conclusion

A partir de ce dernier chapitre, nous avons étudié plusieurs paramètres des micro-bétons résineux additionnés par les poudres (de brique, de marbre et de verre). Premièrement nous avons étudié l'influence d'utilisation de ces poudres sur la masse volumique et la capacité d'absorption d'eau de micro-béton de résine. Nous avons noté que ces poudres n'influent pas sur ces paramètres, donc notre micro-béton conserve ces deux propriétés même après l'utilisation des additions avec la réduction de la fraction massique du liant.

Ensuite on a étudié le comportement de nos micro-bétons, les courbe contrainte-déformation qu'on a obtenus à partir de la machine (Zwick/Roell Z20) montrent un comportement linéaire traduisant le caractère fragile de ces matériaux.

Enfin on a étudié l'Influence des additions minérales sur la résistance mécanique en traction par flexion trois points et en compression du micro-béton de résine.

Les résultats obtenus ont permis de tracer l'évolution de la résistance mécanique en fonction de la nature et le dosage des additions, on observe une légère augmentation de la résistance à la traction par flexion trois points de micro-béton à base de poudre de verre par rapport à l'augmentation de la résistance de micro-béton à base de la poudre de brique et de marbre. Dans le cas de la compression la poudre de verre influe de façon négative par rapport à les autres types des poudres.

La meilleure résistance soit en compression soit en traction par flexion c'est celle de béton résine témoin, ceci est à cause d'utiliser 20% de la résine pure comme un liant dans la formulation.

L'utilisation des poudres comme additions dans la fabrication de micro-béton de résine nécessite la réduction du liant (la résine), Cependant une action négative sur la maniabilité pendant le malaxage a été observée lors de la fabrication des micro-bétons de résine par rapport au béton témoin.

Conclusion générale.

Résumé général de la recherche.

Conclusion générale

Le béton de résine est un matériau composite dont le liant est constitué entièrement d'un polymère organique synthétique. L'objectif principal de notre étude est de connaître l'influence des additions minérale sur le comportement mécanique de micro-béton résineux. Pour atteindre les résultats recherchés, nous avons effectué trois étapes :

Premièrement, nous avons fait une recherche bibliographique sur le béton de résine par différents références, à partir de cette recherche nous avons rassemblés des informations sur ce nouveau type de béton : sa composition principale, ainsi que ces caractéristiques mécaniques et ces domaines d'application, et on a parlé aussi d'une façon générale sur l'ajout des additions minérales dans les bétons. Nous avons trouvés que l'utilisation de ce type de béton est de plus en plus croissante dans de nombreuses applications du génie civil grâce à sa résistance élevée à l'action des produits chimiques et autre agents corrosifs, il est imperméable et résiste bien à l'abrasion et il possède une grande stabilité aux cycles gel-dégel.

Dans la deuxième partie de recherche, on a étudié en première lieu les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux utilisés lors de la formulation des micro-bétons de résine, cette caractérisation s'est faite par des essais expérimentaux à base des normes françaises, nous avons noté une bonne qualité des matériaux utilisés dans cette recherche expérimentale. Les sables utilisés (sable de dune et sable de carrière) sont très propres, le gravier 3/8 nous a donné une bonne distribution granulaire et des bonnes résistances à la fragmentation, les poudres ont une bonne finesse de mouture, La résine polyester est de bonne qualité 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. En deuxième lieu nous sommes intéressés à optimiser la formulation des micro-bétons de résine polyester additionnés par les poudres de verre, de brique et de marbre. On a utilisé de deux types de sable avec le gravier 3/8, le pourcentage de 20% de résine est le pourcentage massique le plus économique et qui donne des bons résultats en termes des résistances mécaniques.

Finalement, nous avons étudié les paramètres des micro-bétons résineux qu'on a préparés. Nous n'avons trouvés aucune influence d'utiliser des poudres minérale sur la masse volumique et la capacité d'absorption d'eau des micro-bétons résineux. Ensuite nous avons notés la fragilité de nos micro- bétons à partir des courbes contrainte-déformation. Enfin on a étudié l'Influence des additions minérales sur la résistance mécanique en traction par flexion trois points et en compression du micro-béton de résine.

La meilleure résistance soit en compression soit en traction par flexion c'est celle de béton résine témoin, ceci est à cause d'utiliser 20% de la résine pure comme un liant dans la formulation. Dans le cas d'utiliser les poudres, les résultats obtenus montrent une légère augmentation de la résistance à la traction par flexion trois points de micro-béton à base de poudre de verre par rapport à l'augmentation de la résistance de micro-béton à base de la poudre de brique et de marbre. Dans le cas de la compression la poudre de verre influe de façon négative par rapport à les autres types des poudres.

L'utilisation des poudres comme additions dans la fabrication de micro-béton de résine nécessite la réduction du liant (la résine), cela provoque une action négative sur la maniabilité pendant le malaxage lors de la fabrication des micro-bétons de résine par rapport au béton témoin.

Références bibliographiques

Les références utilisées lors de la recherche bibliographique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Pr. ARABI.N**, « cour bétons légers », Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2012.
- [2] **Haidar Murhaf**, ‘‘Optimisation et durabilité des micro-bétons à base d’époxyde’’, thèse Présentée pour obtenir le grade de Docteur de l’Université de Cergy-Pontoise
- [3] **LATELLI H**, ‘‘Etude du comportement mécanique du béton polymère renforcé par des fibres végétales et déchets minéraux’’ mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA, juin 2017.
- [4] **A. Blaga et J.J. Beaudoin**, « Le béton de résine » CBD-242-F- Digests de la construction Canada /Publication de l’IRC-CNRC, 1986.
- [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] **G. Mirouzi, B. Redjel , R. Jauberthieb**, «Formulation et comportement mécanique de micro-bétons à matrice de résine polyester », Article de doctorat , 2012.
- [7] **Lakhdari.L-Mamouri.G**, « Optimisation numérique des paramètres de confinement des cylindres en béton par des bandes composites », mémoire de Master 2, Département Génie Civil, Université Bédjaya, 2018.
- [8] **Site d’internet:** www.eti-construction.fr/le-béton-polymère-a-la-fois-leger-etresistant-5014/)
- [9] **ACI committee**, «548, 548, 6R-96 Polymer Concrete-Structural Applications, Stateofthe-art report», American concrete institute, p, 1-23. 1996.
- [10] **ACI committee 548**, « 548, 1R-97: Guide for the Use of Polymers in Concrete», American concrete institute, p, 1-29.1997.
- [11] **A. Blaga, J.J. Beaudoin**, «Le béton de résine», Canadian Building Digest, CBD-242-F, Institute for Research in Construction, 1986.
- [12] **OHAM, 1995.**
- [13] **OHAM, 1991.**
- [14] **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.

- [15] **K.V. Mikhailov, V.V. Patureov, R. Kreis**, «Polymer concretes and their structural uses», Russian Translation Series 91, A, A Balkema, pp 326.1992.
- [16] **Y, Ohama**, «Concrete-polymer composites- the past, present and future», 13 th ICPIIC Portugal, p, 1-14. 2010.
- [17] **OHAM, 1997.**
- [18] **BLAG, 1986.**
- [19] **ACI committee 548**, « 548, 3R-03: Polymer-Modified Concrete », American concrete institute,p.1-40.2003.
- [20] **S. Mindess, J. Young, D. Darwin**, «Concrete», Prentice-Hall, pp.644. 2003.
- [21] **site d'internet: <https://www.editions-eyrolles.com/DicBTP/definition.html?id=1160>**
- [22] **G. Mirouzi**, « CONTRIBUTION A L'ETUDE DE FORMULATION, DE CARACTERISATION..... », mémoire de doctorat, Matériaux, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2017.
- [23] **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.
- [24] **E. Kirlikovali**, «Polymer/concrete composites-A review», Polymer Engineering & Science, Volume 21, Issue 8, p.507–509.1981.
- [25] **A. Blaga et J.J. Beaudoin**, «Le béton modifié aux résines», Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches Canada, Digest de la construction au Canada 241F. Ottawa, 1986.
- [26] **S. Benferdi**, « Caractérisation du comportement micromécanique d'un matériau composite par différents approches mathématiques », mémoire magister, Université MENTOURI Constantine 2010.
- [27] **Oussama Elalaoui**, «Optimisation de la formulation et de tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde », thèse de doctorat, université de Tunis EL Manar,février 2012.
- [28] **NGUY, 2008.**
- [29] **K. Mikhailov, V. Patureov, P. Rao, P. Kreis**, « Polymer Concretes and Their Structural Uses», Russian Translations Series, A Balkema Publishers, pp. 326,1992.
- [30] **Site d'internet: <https://www.gammvert.fr/2-5049-mobilier-jeux-barbecues/2-827-pots-bacs-et-jardinieres/3-3453-pots-et-jardinieres-en-resine-plastique/p-45394-bac-en-resine-l39-h39-millennium-deroma-argile>**

[31] **T.Ali.Boucetta**, « contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances», mémoire de doctorat, Matériaux, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2014.

[32] **B.Arab1,***, **R.Mehaddene**, **Y.Bouchnab**, « Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances »

[33] **ZOUBIRI AMINA**, « Comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures Effet de l'âge», mémoire master, université de M'sila, 2016.

[34] **Nigri. G.** «Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique. », Thèse de doctorat. Université 08 Mai 45. Guelma.Algérie. 2018.

[35] **COURS EN LIGNE:** "Matériaux de Construction Chapitre7 Briques, blocs de béton et béton' préfabriqué".[www.la.refer.org /matériaux](http://www.la.refer.org/matériaux).

[36] **site d'internet:** <https://www.les-3-matons.com/details-poudre+de+marbre+000+0+0+5mm-503.html>

[37] **Site d'internet:** <https://www.domus-materiaux.fr/poudre-de-marbre-houillere-de-cruejouis-fine-sacs-de-25-kg.html>

[38] **Site d'internet:** <https://www.ocres-de-france.com/fr/charges/969-poudre-de-marbre-0-350-3700403408270.html>

[39] **Y. Dimitrienko**, «Thermomechanical behaviour of composite materials and structures under high temperatures: 1. Materials», Composites 17, pp.453-461.1997.

[40] **S. Abdeldjalil**, « comportement au choc des stratifiés composite renforcées par des fibres naturelles », Université Kasdi Marbah Ouargla de génie mécanique maintenance industrielle, 2013.

[41] **Site d'internet:** Campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap4/site/html/7.html

[42] **S. Said**, «Fatigue characteristics of asphalt concrete mixtures», Rapport de Recherche. Suède: Statens Väg-Och Trafikinstitut, 67 p.1991.