

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL



FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX

N° :

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par :

LOUKRIZ Seddik

Intitulé

**CARACTERISATION D'UN COMPOSITE PREPARE A BASE
DE PLATRE**

Soutenu devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------|----------------------|------------|
| Mr. LAHMADI Azzeddine | Université de M'sila | Président |
| Dr. MEDDAH Abdelaziz | Université de M'sila | Rapporteur |
| Dr. BOUALLAEG Saida | Université de M'sila | Examineur |

Année universitaire : 2020 /2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- ✚ A mon cher père et ma chère mère.*
- ✚ A mes très chers sœurs et frères (Dr Larbi ; Dr Mohamed et Dr Rachid) et a toute ma famille **LOUKRIZ** surtout mon neveu Djamel et Othaimine.*
- ✚ A ma prochaine femme.*
- ✚ A ma chère sœur Dr.CHELLALI Fatiha.*
- ✚ A toutes mes amis surtout Walid HAOUCHE et Abdelhafid BOUADI.*
- ✚ A mon cousin Spaliksiyou.*
- ✚ A toute la promotion Génie Civil 2020/2021 université de M'sila Surtout Smail BENZAQUI*
- ✚ A tous les membres du club scientifique « IBEN KHALDOUNE ».*
- ✚ tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*
- ✚ Tous ceux qui font l'espoir et le bonheur*

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon Dieu qui m'a donné le courage de faire ce travail.

Au terme de ce modeste travail, je remercie mon encadreur Dr. MEDDAH Abdelaziz pour son aide appréciable, sa disponibilité et ses conseils précieux. Je remercie également Mr. LABIAD Yacine pour son aide appréciable dans l'élaboration de ce travail.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la préparation de ce travail.

.

Je remercie ma famille et tous mes amis

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I

Généralité sur le béton léger

| | |
|---|----|
| I.1. INTRODUCTION..... | 3 |
| I.2. BETONS LEGERS..... | 3 |
| I.3. CLASSIFICATION DU BETON LEGER..... | 4 |
| I.4. DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS LEGERS..... | 6 |
| I.5. PROPRIETES PHYSIQUE ET MECANIQUES DES BETONS LEGERS..... | 8 |
| I.6. COMPORTEMENT ET PERFORMANCES MECANIQUES..... | 9 |
| I.7. AUTRES PROPRIETES..... | 13 |

Chapitre II

Béton de plâtre

| | |
|--------------------------------------|----|
| II.1. GENERALITES SUR LE PLATRE..... | 15 |
| II.2. MORTIER DE PLATRE..... | 20 |
| II.3. BETON DE PLATRE | 23 |

Chapitre III

Valorisation des déchets pneumatiques

| | |
|---|----|
| III.1. INTRODUCTION..... | 30 |
| III.2. DEFINITION DU CAOUTCHOUC..... | 30 |
| III.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES DECHETS PNEUMATIQUES | 31 |
| III.4. VALORISATION DES PNEU USAGES EN GENIE CIVIL..... | 33 |
| III.5. FILIERES DE VALORISATION..... | 34 |
| III.6. DECHETS PNEUMATIQUES BROYES | 35 |
| III.7. UTILISATIONS DES PNEUS USAGES EN ALGERIE | 36 |
| III.8. VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES DANS LES BETONS ET LES MORTIERS..... | 37 |
| III.9. Conclusion..... | 38 |

Chapitre IV

Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales

| | |
|--|----|
| IV.1. Introduction..... | 39 |
| IV.2. Plâtre..... | 39 |
| IV.3. Sable..... | 41 |
| IV.4. Granulats de déchets de caoutchouc..... | 43 |
| IV.5. Caractérisation de l'eau de gâchage..... | 45 |
| IV.6. Méthodes expérimentales | 45 |
| IV.7. Caractéristiques thermiques..... | 51 |
| IV.8. Conclusion..... | 53 |

Chapitre V

Comportement thermomécanique des bétons de Plâtre légers à base des Déchets caoutchouc

| | |
|---|----|
| V.1. Introduction..... | 54 |
| V.2. Formulation des bétons de plâtre légers..... | 54 |
| V.3. Caractérisation du béton durci..... | 55 |
| V.4. Résultats des caractéristiques thermiques..... | 61 |
| V.5. Conclusion..... | 64 |
| V.6. Conclusion Générale..... | 65 |

Liste des figures

Chapitre I Généralité sur le béton léger

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger | 4 |
| Figure I.2 : Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats | 6 |
| Figure I.3 : Différents granulats légers naturels | 7 |
| Figure I-4: Différents granulats légers artificiels | 8 |
| Figure I.5 : Trois types de porosité présente dans les matériaux | 10 |
| Figure I.6 : Conductivité thermique λ en fonction de la Masse volumique sèche du béton cellulaire | 12 |

Chapitre II Béton de plâtre

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Etapes de fabrication du plâtre | 16 |
| Figure II.2 : Famille des liants et produits à base de plâtre | 17 |
| Figure II.3 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la densité sèche du plâtre | 18 |
| Figure II.4 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la résistance mécanique du plâtre..... | 18 |
| Figure II.5 : Solubilité des différentes phases Du sulfate de calcium en fonction de La température | 19 |
| Figure II.6 : Fontis ayant atteint la surface | 19 |
| Figure II.7 : Organigramme de Propriétés physiques et mécaniques du plâtre..... | 20 |
| Figure II.8 : Fuseau granulométrique des sables..... | 21 |
| Figure II.9 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques Du mortier | 21 |
| Figure II.10 : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton | 27 |
| Figure II.11 Variation de la résistance à la compression des BPL (8/15) En fonction du rapport Liège/Plâtre..... | 28 |
| Figure II.12 : Variation de la résistance à la compression des BPL (3/8) en fonction du rapport Liège/Plâtre..... | 28 |
| Figure II.13 : Variation de la conductivité thermique en fonction du rapport Liège/Plâtre..... | 29 |

Chapitre III Valorisation des déchets pneumatiques

| | |
|--|----|
| Figure III.1- Fumée toxique qui se dégage en brûlant des pneus | 31 |
| Figure III.2. Aspect des déchets de caoutchouc | 35 |
| Figure III.3. -Copeaux de pneus déchiquetés | 36 |
| Figure III.4. Chantier expérimental Pneusol à Bou-SmaïL | 36 |
| Figure III.5. Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression | 37 |
| Figure III.6. Effet du caoutchouc sur la résistance à la flexion | 38 |
| Figure III.7. Effet du caoutchouc sur la densité | 38 |

Chapitre IV Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales

| | |
|--|----|
| Figure IV.1 : Plâtre utilisé..... | 43 |
| Figure IV.2 : Dispositif pour l'essai de récipient et entonnoir à trépied..... | 44 |
| Figure IV.3: Récipient standard..... | 44 |
| Figure IV.4 : Courbes granulométriques de sable..... | 46 |
| Figure IV.5. Déchets de caoutchouc..... | 47 |
| Figure IV.6 : la courbe granulométrique de caoutchouc..... | 48 |
| Figure IV.7 : Malaxeur normalisé pour pâte utilisé..... | 50 |
| Figure IV.8 : Dimensions d'un malaxeur..... | 50 |
| Figure IV.9 : Moules utilisés pour l'essai mécanique..... | 51 |
| Figure IV. 10 montre le dispositif de flexion | 52 |
| Figure IV.11 : Dispositif de l'écrasement par compression..... | 53 |
| Figure IV.12.: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire..... | 54 |
| Figure IV. 13 : Schéma de la sonde TPS..... | 55 |
| Figure IV. 14 : Dispositif de serrage, sonde, éprouvette..... | 55 |
| Figure IV. 15 : Vue d'une sonde Hot disc..... | 57 |

Chapitre V

Comportement thermomécanique des bétons de Plâtre légers à base des Déchets caoutchouc

| | |
|--|----|
| Figure V .1 : Variation de la masse volumique de BPDC..... | 59 |
| Figure. V. 2 : Variation de la densité des composites étudiés en fonction de la teneur en granulats de caoutchouc..... | 60 |
| Figure V .3 Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour BPDC..... | 61 |
| Figure V .4 : Variation de la résistance à la flexion des BPDC, en MPa en fonction de leurs âges..... | 62 |
| Figure V .5 : Variation de la résistance à la flexion de BPDC en MPa en fonction de pourcentage des granulats..... | 63 |
| Figure V .6 : Variation de la résistance à la compression de BPDC en MPa en fonction de leurs âges..... | 63 |
| Figure V .7 : Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jours en MPa en fonction de pourcentage des granulats..... | 64 |
| Figure V .8 : Variation de la résistance à la compression de BPDC En fonction de la masse volumique..... | 65 |
| Figure V .9. Variation de la conductivité thermique en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc..... | 66 |
| Figure V. 10 : Variation de conductivité thermique λ en fonction de densité ρ | 67 |

Liste des Tableaux

Chapitre I

Généralité sur le béton léger

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 : Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87 | 5 |
| Tableau I.2 : Classification des bétons légers selon Kass J.L. et Compbell D (1972) | 5 |
| Tableau I.3 : Différentes classes de la porosité | 9 |
| Tableau I.4 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux..... | 12 |

Chapitre II

Béton de plâtre

| | |
|---|----|
| Tableau II .1 : Valeurs des contraintes des essais mécaniques sur éprouvettes en mortier de plâtre 4 x 4x 16 cm.3..... | 22 |
| Tableau II.2 : Les éléments préfabriqués en plâtre et leurs utilisations..... | 26 |

Chapitre III

Valorisation des déchets pneumatiques

| | |
|---|----|
| Tableau III.1: Substances contenues dans les pneus usagés (de voiture dans cet exemple)..... | 32 |
| Tableau III.2. : Composition chimique des pneus usagés..... | 33 |

Chapitre IV

Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales

| | |
|--|----|
| Tableau IV.1 : Fiche technique de plâtre TAOUB MOOL..... | 39 |
| Tableau IV.2 : Masse volumique apparente du plâtre..... | 41 |
| Tableau .IV. 3. : Composition granulométrique du sable préparé..... | 42 |
| tableau-IV.4 . Caractéristiques physiques du sable de dune..... | 43 |
| Tableau .IV. 5. Composition granulométrique du déchet de caoutchouc..... | 44 |
| Tableau IV-6 Caractéristiques physiques des granulats de déchets de caoutchouc..... | 45 |
| Tableau IV.7 : vitesses de fonctionnement du malaxeur..... | 46 |

Chapitre V

Comportement thermomécanique des bétons de Plâtre légers à base des Déchets caoutchouc

| | |
|---|----|
| Tableau V .1 : Compositions pondérales de BPDC..... | 55 |
| Tableau V.2 : Variation de la masse volumique de BPDC..... | 56 |
| Tableau V .3 : Variation de la résistance à la flexion des BPDC en fonction de l'âge..... | 58 |
| Tableau V .4 : Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jours en MPa en fonction de pourcentage des granulats..... | 60 |
| Tableau V .5 : Résultat de l'essai thermique du BPDC..... | 62 |

Abstract

In this study, producing of insulating material based on plaster concrete designed for civil engineering structures and contained rubber wastes, has been experimentally investigated. The basic idea of this work consists to incorporate wastes, rubber particles. These additions were introduced in various percentages: 5, 15, 25, 35, 45 and 55%. The experimental approach consists in studying the effect of these additions on the physical, mechanical and thermal properties of the material.

In addition to the environmental advantages of the approach proposed in this study, creating a new application for valorizing of rubber wastes, the obtained results show that the inclusion of rubber into plaster concrete allowed reducing the thermal conductivity and permeability of the final product, which leads to its use as insulator in structures.

Résumé

Dans ce projet on va étudier la potentialité de production d'un matériau isolant à base du béton de plâtre destiné aux constructions et contenant des déchets caoutchouc, a été expérimentalement étudié. L'idée de base de ce travail consiste à incorporer de déchets, des particules caoutchouteuses. Ces ajouts ont été ajoutés en différents pourcentages : 5, 15, 25, 35,45 et 55% par rapport au volume total des constituants. La démarche expérimentale entreprise consiste à étudier l'effet de cet ajout sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du matériau élaboré.

En plus de l'avantage environnemental de l'approche proposée dans cette étude, la création d'une nouvelle application qui permette d'absorber certaine quantité de déchets caoutchouc, les résultats obtenus montrent que l'inclusion du caoutchouc dans le béton de plâtre a permis de réduire la conductivité thermique et la perméabilité du produit final, ce qui mène à leur utilisation comme isolant dans les bâtiments.

المخلص

في هذه الدراسة تمت دراسة إمكانية إنتاج المواد العازلة المصنوعة من الخرسانة الجبسية التي تحتوي على النفايات المطاطية تجريبيا للمباني والهياكل. والفكرة الأساسية لهذا العمل تتكون من دمج نوع من النفايات، وهي الجسيمات المطاطية. وتم ادخال هاته الإضافة بنسب مختلفة : 45,35,25,15,5 و 55 % بالنسبة للحجم الإجمالي للمكونات ويتكون المنهج التجريبي من دراسة تأثير هذه الإضافات على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للمادة .

وبالإضافة الى فوائد بيئية من النهج المقترح في هذه الدراسة وإنشاء تطبيق جديد يسمح لتثمين النفايات المطاطية، فقد بينت أن إدراج المطاط في الخرسانة الجبسية أدا الى خفض الموصلية الحرارية ونفاذية المنتج النهائي، مما يؤدي إلى استخدامه كعزل في الهياكل والمباني.

Introduction générale

En raison des impacts environnementaux qu'il génère, le secteur du bâtiment se trouve aujourd'hui dans l'obligation de proposer de nouvelles solutions de conception et de réhabilitation des bâtiments. Dans le domaine de matériaux de construction, le choix doit se faire en fonction de l'usage visé, des sollicitations subies et des propriétés recherchées, tout en prenant en compte les contraintes d'impacts environnemental et sanitaire. Le béton, même s'il reste incontournable pour un certain nombre d'applications, le brique ou les isolants d'origine pétrolière pourraient être, dans les années à venir, concurrencés par des produits à faible coût environnemental, notamment dans le secteur de la maison individuelle. Toutefois, la crise liée au manque de matières premières ainsi que l'augmentation de la facture de la consommation de l'énergie, ont provoqué un regain d'intérêt pour l'utilisation des matériaux locaux.

Par ailleurs, les grandes quantités de déchets résultant quotidiennement de différents travaux industriels constituent une gêne environnementale et soulèvent des problèmes difficiles à résoudre. Or la réutilisation de ces déchets dans la construction peut résoudre un triple problème : d'un part les problèmes environnementaux et d'autre part les problèmes économiques et techniques rencontrés dans le domaine de construction. De plus, il est bien connu que l'Algérie est un pays à climat chaud en été, en particulier dans les régions du sud, d'où la nécessité de concevoir des constructions thermiquement isolantes. A cet égard un programme ambitieux, nommé HPE (Haute performance énergétique), est mise en place en collaboration entre le ministère de l'habitat et le ministère de l'environnement.

En Algérie et malgré l'existence d'énormes gisements du gypse, matière première pour produire le plâtre, l'utilisation de ce matériau reste limitée aux enduits intérieurs, aux carreaux de plâtre et des éléments décoratifs.

Afin d'atteindre des propriétés d'usage compatibles avec les applications visées (plaques de parement et blocs autoporteurs) tout en maintenant un coût convenable, il a été nécessaire d'incorporer des constituants complémentaires à cette matrice (sable, chaux, billes de polystyrène, déchets de caoutchouc comme déchet domestique et industriel).

Avec le choix de ces matériaux, on peut satisfaire les deux exigences actuelles de l'heure. Sur le plan socioéconomique, on note la contribution de l'université au développement de nouveaux matériaux de construction économiques et compatibles avec les conditions climatiques locales. Sur le plan-technico-économique, on note l'utilisation des éléments en béton de plâtre léger dans la construction, ce qui conduit non seulement à la réduction de la consommation d'énergie

Introduction générale

des maisons en raison de leur pouvoir thermiquement isolant, mais aussi à la diminution des charges propres transmises à la structure. Sur le plan environnemental la transformation des déchets industriels en granulats pour béton, contribue à la protection de l'environnement.

Ce travail a été divisé en quatre chapitres

Chapitre I

Généralités sur le béton léger

I.1. INTRODUCTION

Le béton est un matériau artificiel, composé d'agrégats (le plus souvent du sable et les gravillons), de l'eau et du ciment. En y ajoutant l'adjectif « léger », on fait généralement référence aux différents types de béton caractérisés par un faible poids spécifique. On obtient une densité réduite en ajoutant au mélange des ingrédients spécifiques, ou à l'aide de techniques spéciales de production qui permettent d'obtenir une diminution de masse volumique. Ce chapitre présente une revue générale sur les bétons légers.

I.2. BETONS LEGERS

Le béton léger est obtenu en majorité par remplacement des matériaux classiques tels que les granulats par d'autres matériaux de faible densité tels que les billes de polystyrène et le caoutchouc, le bois et l'argile, à titre d'exemple. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux développés par des ingénieurs. Ses caractéristiques spécifiques suggèrent de nouvelles applications architecturales. Ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m³, tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1850kg/m³. La technologie de ces nouveaux bétons peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement [1]. Son faible poids, sa résistance et ses autres propriétés le rendent pertinent à utiliser dans des conditions de mise en chantier plus spécifique. De plus, l'utilisation d'un béton de masse volumique faible peut permettre de construire sur un sol de faible capacité portante [2].

Le « A.C.I » (American Concrete Institute) [3] limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 Kg/m³ après séchage à l'air pendant 28 jours. La norme DIN 1024, 1972 en Allemagne limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 kg /m³.

En faisant varier la densité des granulats, on peut arriver à fabriquer différents types de béton qui sont appelés bétons spéciaux qui traitent les différents types de béton susceptible d'être utilisés lorsque l'on désire obtenir certaines propriétés particulières [4].

On note trois dénominations pour ces bétons, soient (Fig.1):

- 1- **Béton cellulaire**, lorsque l'air est incorporé dans la pâte d'un liant.
- 2- **Béton caverneux**, ou béton sans fines lorsqu'il vient remplacer les granulats fins entre les gros granulats.
- 3- **Béton à granulats légers**, lorsque les granulats sont allégés dont l'air se trouve dans les granulats eux-mêmes [5].

La figure I.1, nous montre les trois types du béton léger

Figure I.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger [6].



I.3. CLASSIFICATION DU BETON LEGER

I.3.1. Bétons légers de structure

Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Ils sont utilisés pour la fabrication d'éléments porteurs, sont généralement fabriqués avec des granulats légers manufacturés (argile, schistes et laitiers expansés ou cendres volantes frittées). La résistance à la compression minimale recommandée par l'ACI est alors de 17 MPa à 28 jours [7].

I.3.2. Bétons de résistance modérée

Ils peuvent être fabriqués avec des granulats concassés naturels, comme la pierre ponce, les tufs et autres roches d'origine volcanique, ou avec un mortier aéré.

I.3.3. Bétons légers de faible densité

Ils sont fabriqués avec des granulats ultra légers et très poreux (vermiculite exfoliée, perlite expansée, liège expansé) ou avec une matrice cellulaire. Dans ce dernier cas, l'incorporation de bulles d'air peut être faite par génération de gaz dans le matériau à l'état plastique ou par entrainement d'air au cours du malaxage. Ces bétons sont de très bons isolants

thermiques, mais ils doivent bien souvent être traités à l'autoclave pour atteindre une résistance suffisante. D'autres granulats non absorbants et plus résistants sont aussi disponibles (verre et polystyrène expansés) [7].

Le guide ACI 213R-87 [7] distingue alors trois catégories de béton léger, classées selon la masse volumique du matériau durci (tableau I.1).

Tableau I.1 : Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87 [7].

| Classification | ρ (kg/m ³) | Rc (MPa) |
|-----------------------------------|-----------------------------|----------|
| Béton léger de structure | 1350-1900 | > 17 |
| Béton léger de résistance modérée | 800-1350 | 7-17 |
| Béton de faible résistance | 300-800 | < 7 |

Une classification fonctionnelle est recommandée par la RILEM [8], basée sur les travaux de Kass J.L. et Compbell D(1972) [8] qui ont dressé une classification selon l'utilisation des bétons légers d'après leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques (tableau I.2).

Tableau I.2 : Classification des bétons légers selon Kass J.L. et Compbell D(1972) [14]

| Classe | I | II | III |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------|
| Type de béton léger | De construction | De construction et d'isolation | D'isolation |
| Masse volumique (kg/m ³) | < 1800 | Non précise | Non précisée |
| Résistance à la compression (MPa) | > 15 | > 3.5 | > 0.5 |
| Conductivité thermique (W/m/K) | – | < 0.75 | < 0.30 |

La figure I.2 présente une classification proposée par Lafarge Béton Granulats :

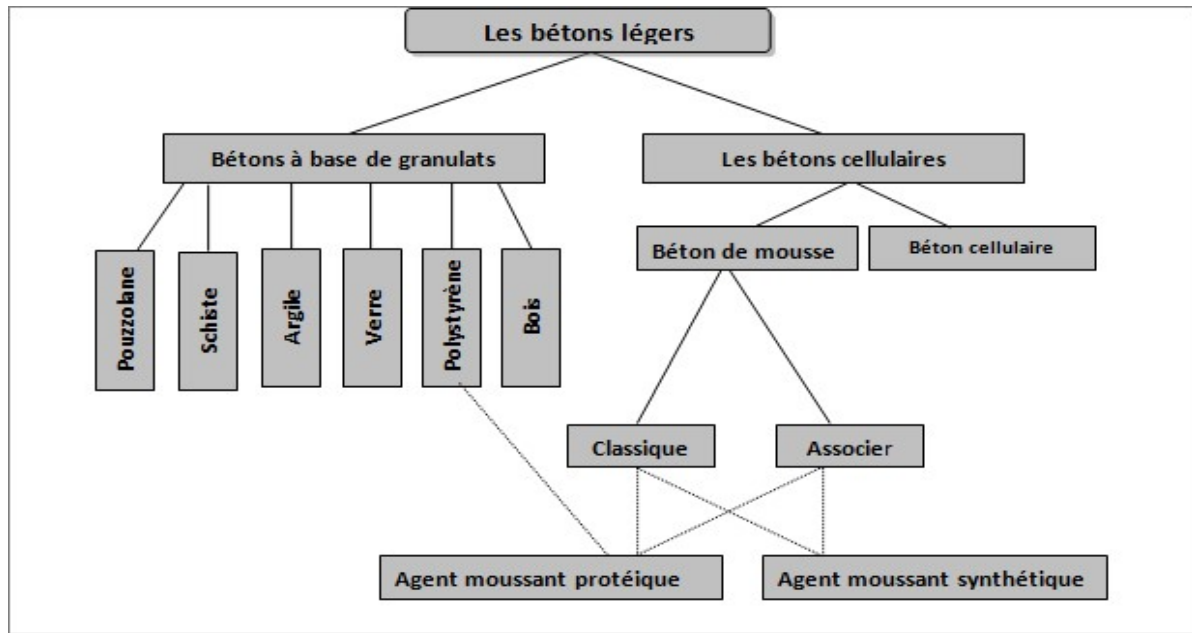


Figure I.2 : Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [9].

I.4. DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS LEGERS

Les granulats légers se différencient des autres granulats par leur faible masse volumique, celles-ci est inférieure à 1200 kg/m³ selon Rilem [8], tandis que celle de la pierre naturelle est de 2700 kg/m³. L'écart de la masse volumique s'explique par la porosité élevée du granulat, ce qui se traduit par une faible densité apparente [3], c'est-à-dire une importante proportion volumique de vides d'air contenus dans le granulat. Nous pouvons distinguer les granulats légers selon leur origine naturelle ou artificielle :

I.4.1. Matériaux naturels

Les principaux granulats de cette catégorie sont les diatomées, la pierre ponce, les scories, les cendres volcaniques et le tuf. A l'exception des diatomées, tous sont d'origine volcanique [7]; en les concassant, on obtient donc des granulats légers [8]. Les granulats légers naturels ne sont pas très utilisés même si leur emploi permet de confectionner des bétons de résistance moyenne [7]. La figure I.3 présente quelques exemples de granulats naturels : OPS (Oil Palm Shell), la diatomite et le laitier volcanique.

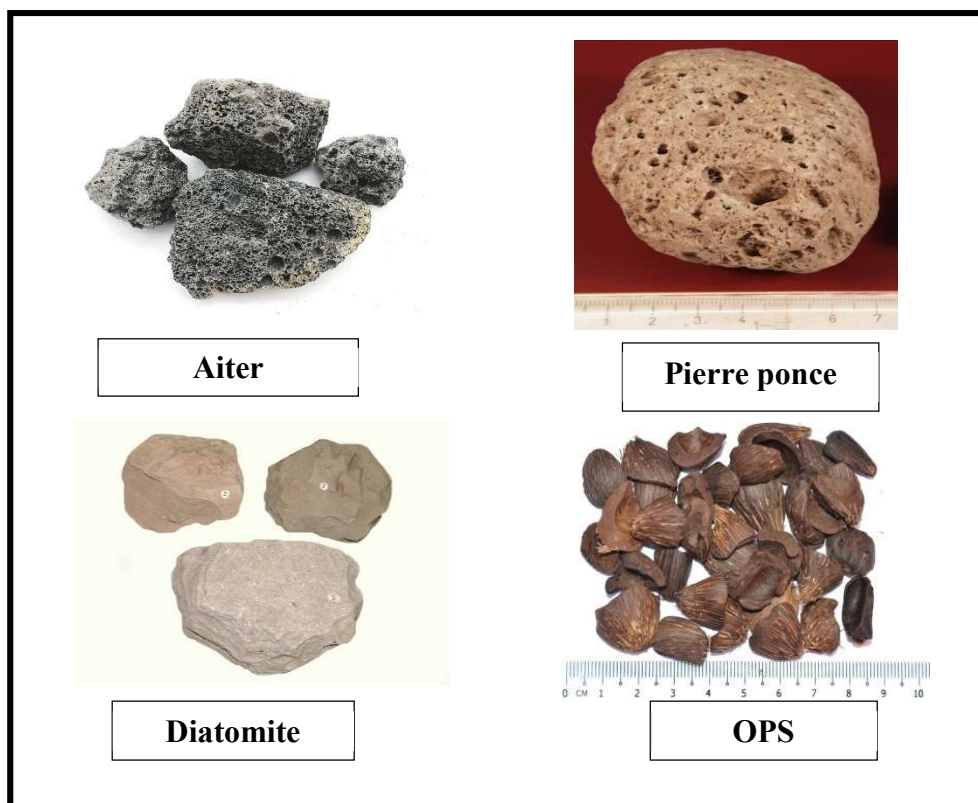


Figure I.3 : Différents granulats légers naturels [5].

I.4.2. Matériaux artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certaines régions, comme la vase à Taiwan et NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en Italie ; soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'PSE (Polystyrène Expandé) [5], soit végétal (copeaux de bois) et fibre cellulosique (cas de l'Alfa). Ces granulats sont souvent désignés par une variété de noms commerciaux, mais sont mieux classés en fonction des matières premières utilisées et du procédé de fabrication conduisant à l'expansion et, par conséquent, à une diminution de la densité apparente. On distingue [10] :

- Matériaux naturels ayant subi un traitement thermique : comme l'argile, le schiste et l'ardoise expansées ou frittées, la perlite expansée et la vermiculite exfoliée.
- Matériaux artificiels ne subissant pas de traitement thermique : comme le Mâchefer.

- Matériaux artificiels obtenus par divers traitements spéciaux : comme le laitier expansé et les cendres volantes frittées

I.4.3. Matériaux organiques

Produits organiques, naturels ou artificiels, tels que liège, copeaux de bois, balle de riz, polystyrène expansé, matériaux dont l'utilisation rentre dans le cadre de valorisation des déchets qui a un effet positif sur l'aspect environnemental et l'apport économique de ce type de granulats. La figure I.4 Présente quelques exemples de granulats artificiels.

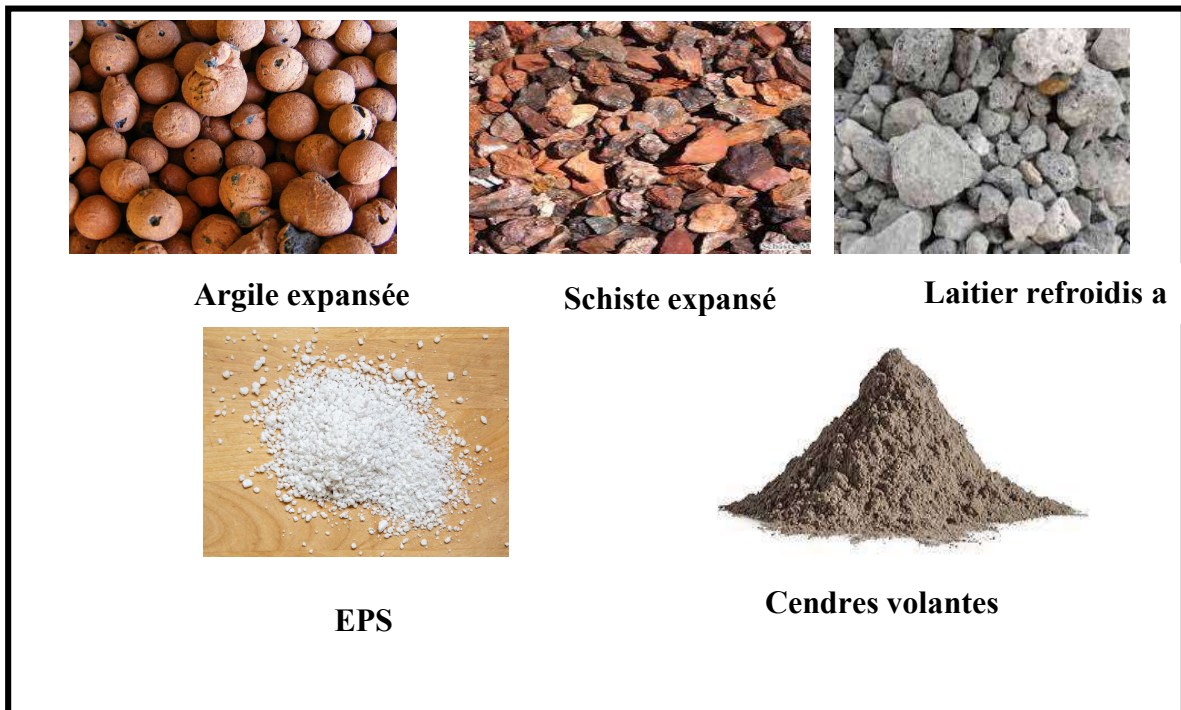


Figure I-4: Différents granulats légers artificiels [11.12.13.14.15].

Avec les types de granulats légers naturels ou artificiels cités ci-dessus on peut confectionner des bétons légers dont les caractéristiques sont dans le tableau I.3.

I.5. Propriétés physique et mécanique des bétons légers

I.5.1. Légèreté

L'emploi des bétons Légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30

% de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300kg/m³ alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m³ pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900kg/m³ pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m³ pour un béton cellulaire. L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction.

I.5.2. Porosité

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités. Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée, due à la présence de l'air intra-particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique. La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air infra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant.

Selon la taille moyenne des pores et selon l'état physique de l'eau contenue dans le milieu poreux, la Porosité peut être classée comme le montre le tableau I.4 [16].

Tableau I.3 : Différentes classes de la porosité [16].

| Rayon des pores | Classe | Etat de l'eau |
|-----------------|---------------------|----------------------------------|
| < 0.0001mm | Microporosité | Eau de rétention exclusivement |
| 0.0001 à 2.5 mm | Porosité capillaire | Eau capillaire et eau gravitaire |
| >2.5mm | Macroporosité | eau gravitaire dominante |

I.6. COMPORTEMENT ET PERFORMANCES MECANIQUES

Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulat léger est poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons légers sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides [17].

Les niveaux de performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats diminue.

I.6.1. Sensibilité à l'eau

Les granulats, poreux et perméables, permettent les transferts hydriques sous forme liquide et sous forme vapeur. Dans le cas d'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas d'eau vapeur, on parle de sorption-désorption. La perméabilité représente la faculté qu'a un matériau de laisser un fluide s'écouler en son sein, sous l'effet d'un gradient de pression. Cette propriété de perméabilité n'existe donc que si le matériau possède une porosité non négligeable et que celle-ci est connectée. En revanche, un matériau peut être très poreux (i.e. le béton cellulaire) et peu perméable car les pores, non reliés entre eux ne constituent pas des chemins continus, dans lesquels le fluide peut s'écouler. Porosité et perméabilité sont donc liées mais le premier n'implique pas forcément le deuxième.

I.6.2. Absorption

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. L'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée (les vides sont inter communicants). Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus (porosité close ou porosité vacuolaire dénommée aussi porosité résiduelle). Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption (Figure I.8).



Figure I.5 : Trois types de porosité présente dans les matériaux [17].

I.6.3. Propriétés thermiques

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique λ . Cette dernière est définie comme le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Plus le matériau est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. On considère que généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau [17].

Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats Légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau (i.e porosité), en ajoutant l'air intraparticule (i.e porosité).

A titre comparatif, un béton hydraulique ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $2,0 \text{ W/(m.K)}$ tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $0,60 \text{ W/(m.K)}$ [17]. Cependant, cette relation entre porosité et faible conductivité thermique doit être nuancée en tenant compte d'un autre mode de transfert de la chaleur, la convection. Cette dernière traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement.

Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection peuvent devenir significatifs. En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire ($\Phi 80 \%$) ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible (Figure I.9).

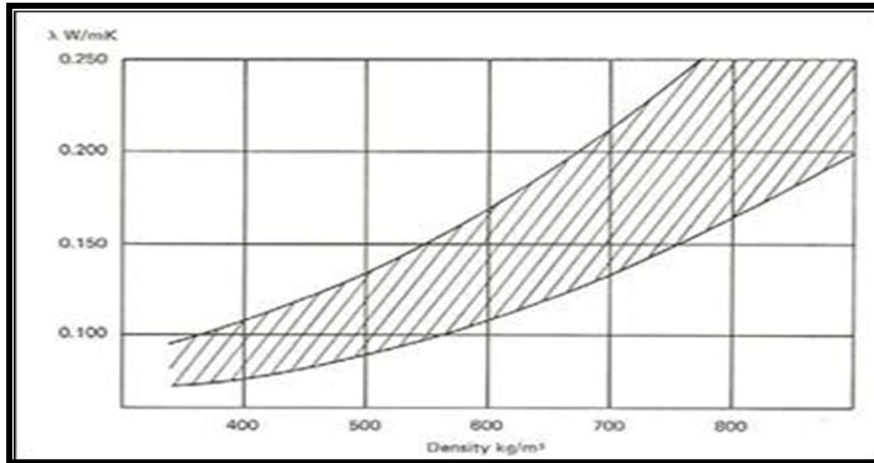


Figure I.6 : Conductivité thermique λ en fonction de la Masse volumique sèche du béton cellulaire [18].

Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en $J/(kg.K)$. Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de $1^\circ C$. Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure [19].

Le tableau suivant permet de comparer des caractéristiques thermiques de quelques matériaux.

Tableau I.4 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [19].

| | ρ (kg/m³) | Porosité ϵ (%) | C (J/kg/K) | λ (W/m/K) |
|----------------------|----------------|-------------------------|--------------|-------------------|
| Air | 1.2 | - | 1000 | 0.026 |
| Eau liquide | 998 | - | 4180 | 0.602 |
| Béton hydraulique | 2330 | 8 | 1050 | 1.80 à 2.00 |
| Béton argile expansé | 1600 | 36 | 900 | 0.46 |
| Béton cellulaire | 350 à 650 | 75 à 82 | 880 | 0.16 à 0.33 |
| Béton de bois | 600 à 900 | 52 | 1200 | 0.09 à 0.30 |
| Brique | 1800 | - | 860 | 1.15 |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| | | | | |
|--|--|--|--|--|

II. AUTRES PROPRIETES

- La résistance au gel : Elle est très bonne, malgré la teneur en eau absorbée, car de nombreux pores non saturés subsistent, qui permettent l'expansion de la glace. Il faut noter en outre une bonne aptitude au bétonnage par temps froid, car la faible conductivité thermique permet au béton de conserver la chaleur de prise du ciment.
- La résistance au feu Elle se mesure par la durée de tenue d'un élément, à une température déterminée, est meilleure que celle du béton traditionnel, en raison des valeurs peu élevées de la conductivité thermique et du coefficient de dilatation. Ainsi, par exemple la durée de résistance d'une dalle de 12 cm d'épaisseur est d'environ 2h avec un béton normal, et 4h avec un béton léger ; de même, les pertes de résistances mesurées à 650° sont respectivement de l'ordre de 40 à 50 dans le premier cas, et de 15% seulement dans le second.
- Aspect acoustique : L'isolation acoustique obtenue par des parois homogènes en béton léger, est avant tout, une question de poids et d'imperméabilité à l'air ; il est dû à l'existence de nombreuses cellules fermées dans les agrégats. Certaines parois en bétons pleins de granulats légers, complétées par des enduits étanches, peuvent avoir des performances acoustiques supérieures à celle prévues par la « loi de masse ». Cette amélioration se manifeste pour des épaisseurs supérieures à 15 cm [19].

II.1. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES BETONS LEGERS**II.1.1. Avantages**

- Un matériau plus légers : ces bétons permettent ainsi une plus grande souplesse quant à la conception des ouvrages et induisent plusieurs économies. En effet, la réduction de la charge morte sur les structures permet entre autres d'utiliser des portées plus longues ou de diminuer les sections des éléments porteurs, de réduire la quantité d'acier d'armature et même les dimensions des fondations.
- Meilleure isolation thermique, qualité appréciable du point de vue de la consommation d'énergie dans le bâtiment.
- Meilleure tenue aux conditions extrêmes de température : gel et feu.
- Large choix de masses volumiques.

- Mise en œuvre simple et traditionnelle, sans vibration.
- Amélioration des conditions de manutentions dans le cas de la préfabrication.
- Utilisés en préfabrication, les bétons légers permettent aussi de diminuer les coûts de transport et d'installation.
- Capables de jouer un rôle en tant qu'isolant thermique et acoustique compte tenu du volume d'air qu'ils contiennent, tout en conservant des niveaux de performances suffisants.
- Le choix des performances selon l'utilisation dans la construction simultanément sur deux aspects : mécanique/thermique, mécanique/acoustique ou à la fois les aspects mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau de construction (matériau multi-usage).
- Prise de conscience environnementale permettant de réaliser des économies d'énergie substantielle.
- Possibilité d'utilisation dans les zones sismiques à cause du gain de poids.

II.1.2. Inconvénients

- Le faible module élastique des granulats légers augmente les déformations instantanées du béton mais également les déformations différées. (Déformabilités instantanée et différée plus grandes).
- Les bétons légers sont néanmoins des matériaux fragiles et peu résistants à la traction. L'utilisation de fibres métalliques demeure une solution efficace pour en augmenter la résistance à la fissuration.
- Résistance mécanique plus faible en général, dans le domaine des valeurs élevées.
- Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes.
- Un dosage en ciment plus élevé, ce qui explique un surcoût.
- Bien que dans certains cas les bétons légers puissent revenir plus cher par mètre cube qu'un béton ordinaire, la construction peut être moins onéreuse vu la réduction du poids mort.
- Une juste comparaison ne doit pas se limiter uniquement au prix.
- L'économie réside alors dans une recherche d'équilibre entre le prix du mètre cube du béton, sa densité et ses qualités mécaniques.

Chapitre II

Béton de plâtre

II.1 GENERALITES SUR LE PLATRE**II.1.3. Origine**

Le plâtre s'obtient par cuisson et broyage de La pierre à plâtre qui se trouve dans la nature sous deux formes :

- Anhydrite Sulfate de calcium anhydre c'est assez rare, qui correspond à la formule chimique suivante : CaSO_4 .
- Gypse Sulfate de calcium di-hydrate à deux molécules d'eau, très abondant, qui répond à la formule chimique : $\text{CaSO}_4, \text{H}_2\text{O}$, ce qui correspond à 79.07% de Sulfate de calcium (CaSO_4) associé à 20.93% d'eau (H_2O).

II.1.4. Etapes de fabrication

Fabrication du plâtre nécessite plusieurs étapes :

- Extraction du gypse : à l'aide d'explosifs et d'engins, quand il s'agit de gisement à ciel ouvert (des carrières).
- Concassage : Après l'acheminement depuis la carrière à l'aide de camions le gypse subit un concassage, afin de réduire la dimension de ses grains.
- Criblage : Le gypse est transporté à l'aide d'un tapis vers le criblage. Cette opération consiste à ne sélectionner que les grains de diamètre inférieur à 40 mm.
- Stockage du gypse : Le gypse ainsi sélectionné est stocké dans des sillons
- Broyage : le gypse est conduit dans un four où il sera placé dans un moulin où, à l'aide d'une vis sans fin, il est broyé et écrasé.
- Cuisson : Il sera cuit à 150 °C. Ce four permet de faire remonter le gypse cuit par le haut du four, tandis que les impuretés plus lourdes, restent au fond. Après refroidissement à 60 °C il devient du semi-hydrate. D'autres types de four existent (fours culée, fours droits, fours marmite, sur- cuiseur, autoclaves, ...qui donnent différentes qualités.

Mélange avec différents ajouts : Le plâtre est ensuite mélangé dans un malaxeur avec différents ajouts (souvent quelques parties pour mille) :

- Amidon, pour améliorer l'adhésion entre le plâtre et le carton (plaque de plâtre).
- Adjuvants.
- Retardateurs pour modifier les temps de prise du plâtre...

Stockage et livraison : Le plâtre est stocké dans des sillons ensuite il est livré en sac de 40 kg ou bien en vrac selon la demande du client [20].

La Figure II.6 résume les étapes de fabrication du plâtre :

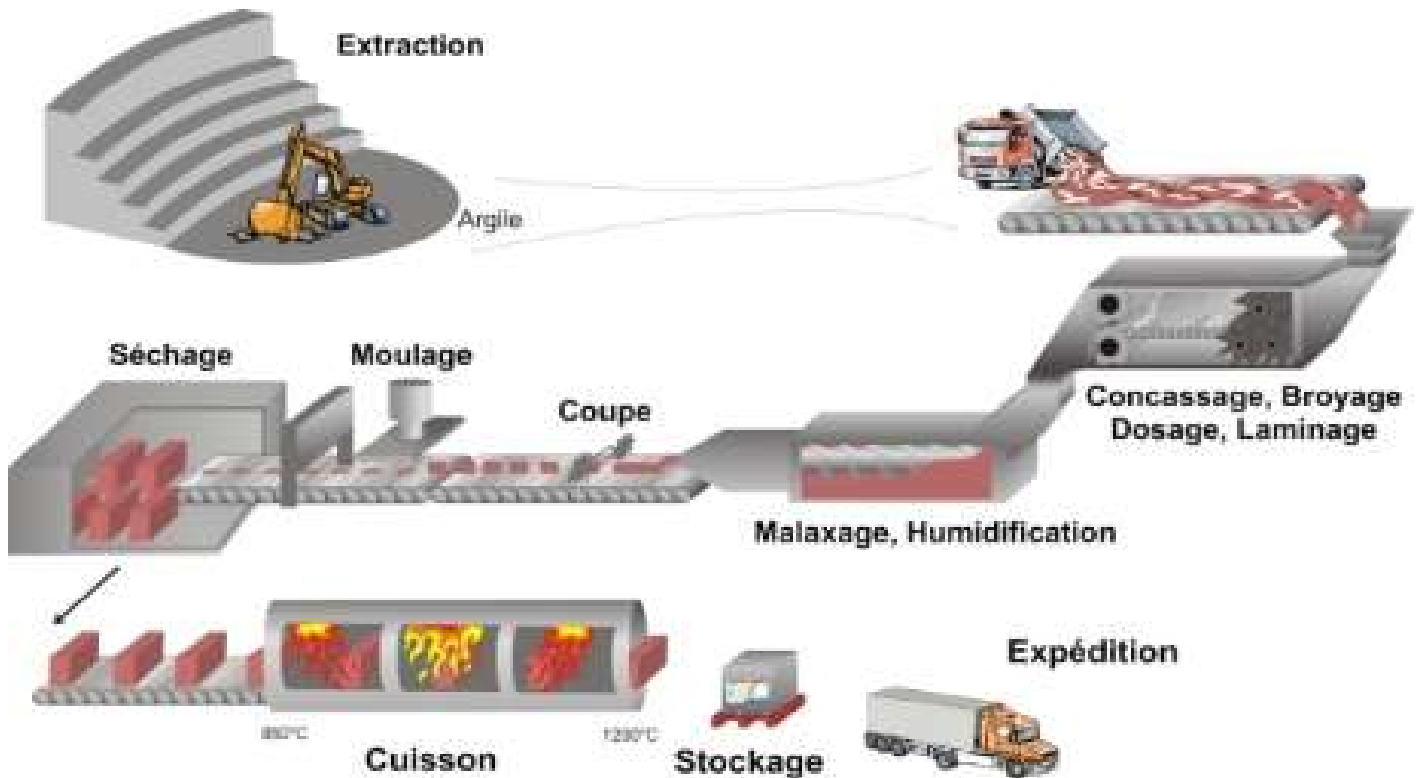


Figure II.1 : Etapes de fabrication du plâtre [20].

II.1.5. Différents types de plâtres

Il existe plusieurs variétés de plâtre de qualités très différentes est leur classification se faite selon les facteurs suivants :

- Granularité (plâtre gros ou fin).
- Durée de prise (courte, allongé ou longue).
- Dureté (normale ou très haute dureté THD).
- Mode de mise en œuvre (manuelle ou par projection mécanique).
- Domaine d'application (construction, emplois spéciaux, préfabrication, à mouler pour les arts et l'industrie) [21, 22].

La Figure II.2 présente la famille des liants et produits à base de plâtre :

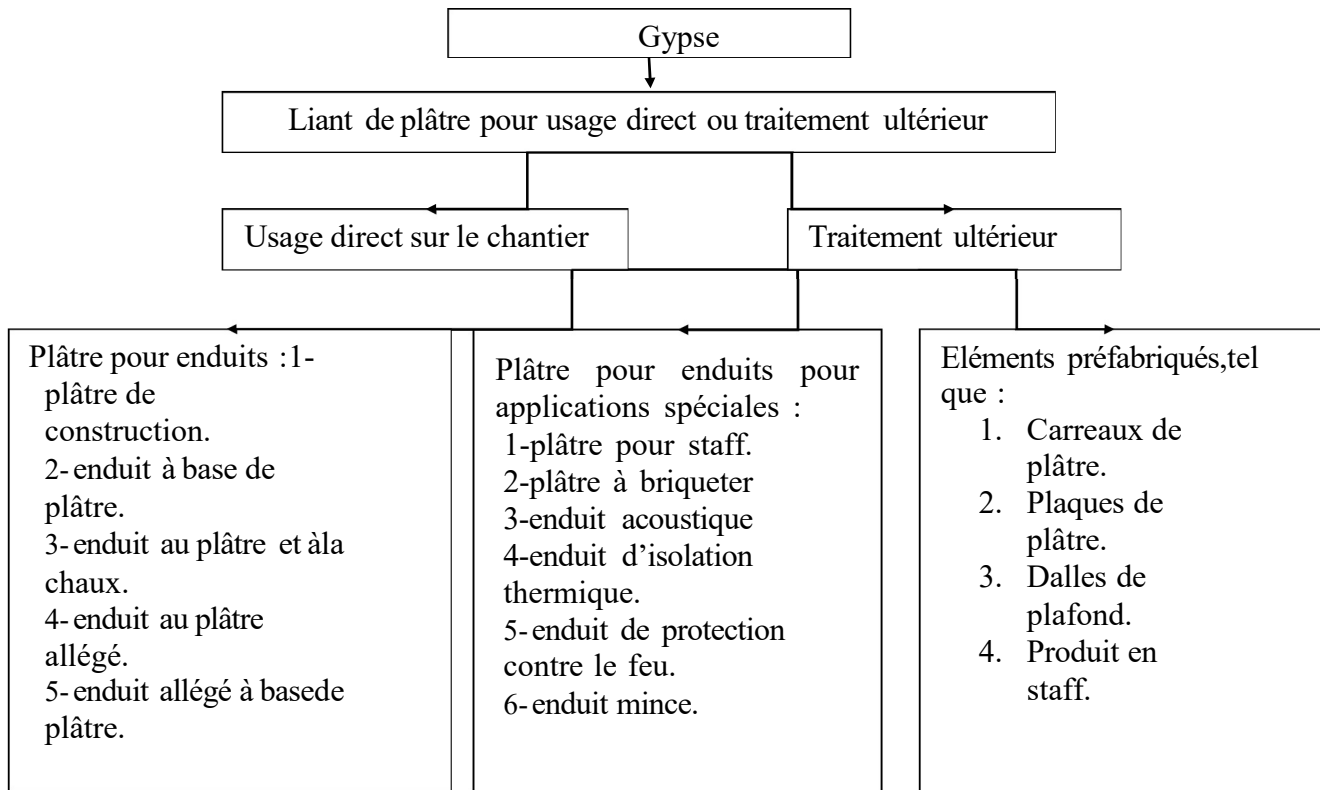


Figure II.2 : Famille des liants et produits à base de plâtre [23].

II.1.6. Propriétés physiques et mécaniques

- **Prise du plâtre**

Le plâtre est caractérisé par un temps de prise court et un durcissement rapide accompagné d'une forte élévation de température [23].

- **Expansion**

Le plâtre augmente de volume surtout à premières heures pour atteindre 18% au début de la prise puis 19% après un jour, enfin il se produit un léger retrait après

Le durcissement du plâtre qui fait diminuer cette augmentation à 17% [23].

- **Densité**

Elle varie en fonction de la granulométrie du plâtre et du rapport E/P où elle diminue lorsque le rapport E/P augmente, comme il est montré dans la figure ci-dessous :

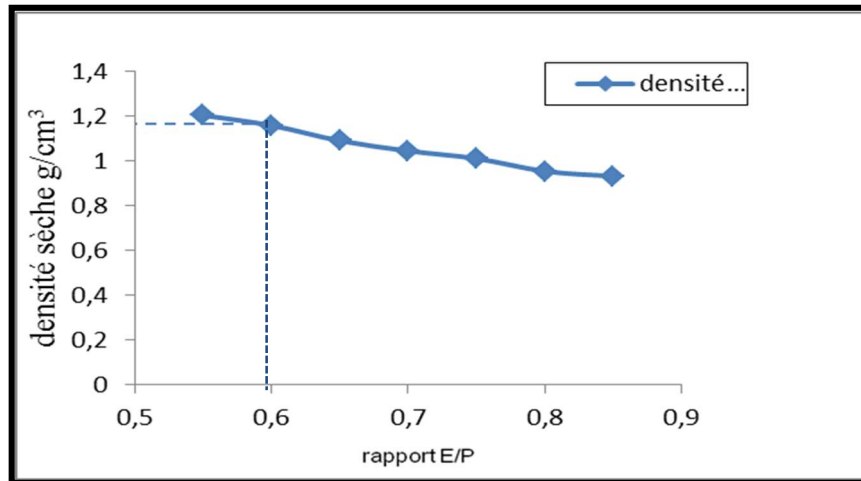


Figure II.3 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la densité sèche du plâtre [22].

Le plâtre permet de plus en association avec des matériaux isolants minéraux ou de synthèse ayant des conductivités thermiques très faibles (0,03 à 0,04 W/mK), qui sont des matériaux spécifiques de l'isolation mais qui ne constituent pas comme lui des matériaux de construction de réaliser des systèmes d'isolation efficaces [21].

c- Résistance mécanique :

d- Elle est beaucoup variée avec la nature et la finesse du plâtre, les facteurs qui influent sur la résistance sont les suivants :

1- Rapport E/P : Elle varie en fonction du rapport E/P où elle diminue lorsque le rapport E/P augmente comme il est montré dans la figure ci-dessous :

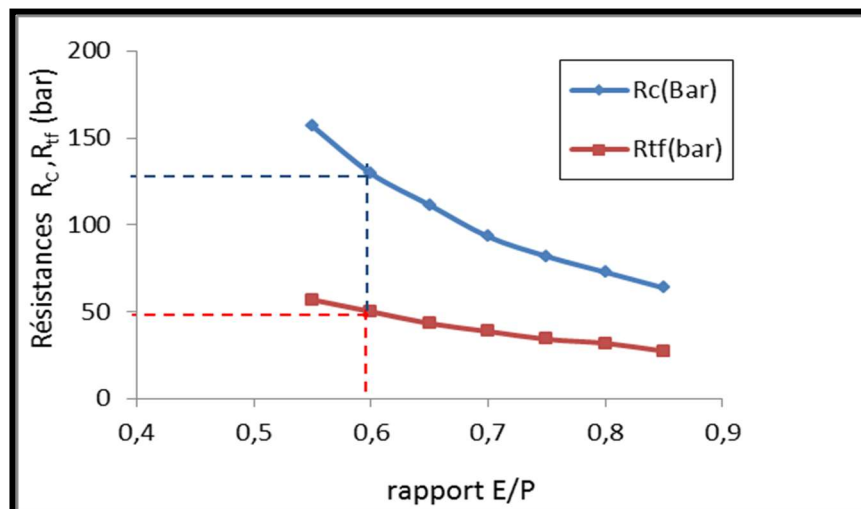


Figure II.4 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la résistance mécanique du plâtre [22].

2-Temps (âge de plâtre).

3-Milieu de conservation (sec ou humide) :Le plâtre doit se conserver dans un endroit sec ou alors il devient inutilisable.

4-adjuvants :

Les adjuvants améliorent la résistance et augmente la durée de prise du plâtre comme la chaux éteinte avec un faible teneur de 6% à 10% [24, 22].

• Solubilité du gypse

Le gypse a la propriété d'être légèrement soluble dans l'eau environ 2g/l, comme on voit dans la Figure II. 23.

Lorsque des eaux souterraines circulent dans un terrain gypseux, elles deviennent agressives (eaux séléniteuses) et elles provoquent la formation de cavités connus sous le nom de poche (fontis) de dissolution de gypse peuvent atteindre des volumes impressionnants.

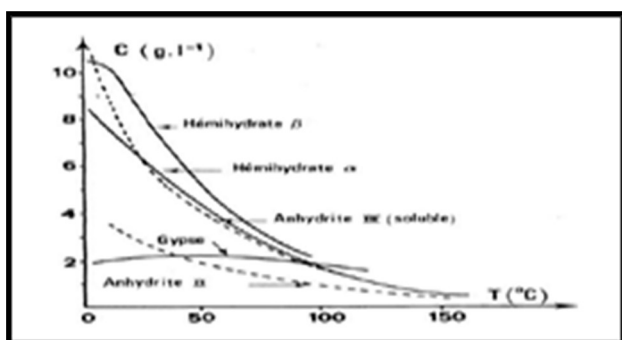


Figure II.5 : Solubilité des différentes phases
Du sulfate de calcium en fonction de
La température [25].



Figure II.6 : Fontis ayant
atteint la surface [23].

Pour construire dans des zones de dissolution de gypse on pourra :

- Soit fonder le bâtiment au-dessous de la zone des cavités, au moyen de fondations profondes.
- Soit rigidifier la structure de façon que celle-ci puisse supporter sans dommage des affaissements localisés.

La remontée capillaire des eaux séléniteuses au niveau des soubassements ou fondations réalisées avec de ciment portland provoquent la formation de sel de Candlot expansif qui va détruire les soubassements après 7 à 8 mois. Pour éviter la formation de sel de Candlot dans le béton : on utilise un ciment de laitier au clinker, CLK.

La Figure II.7 résumé les propriétés de confort :

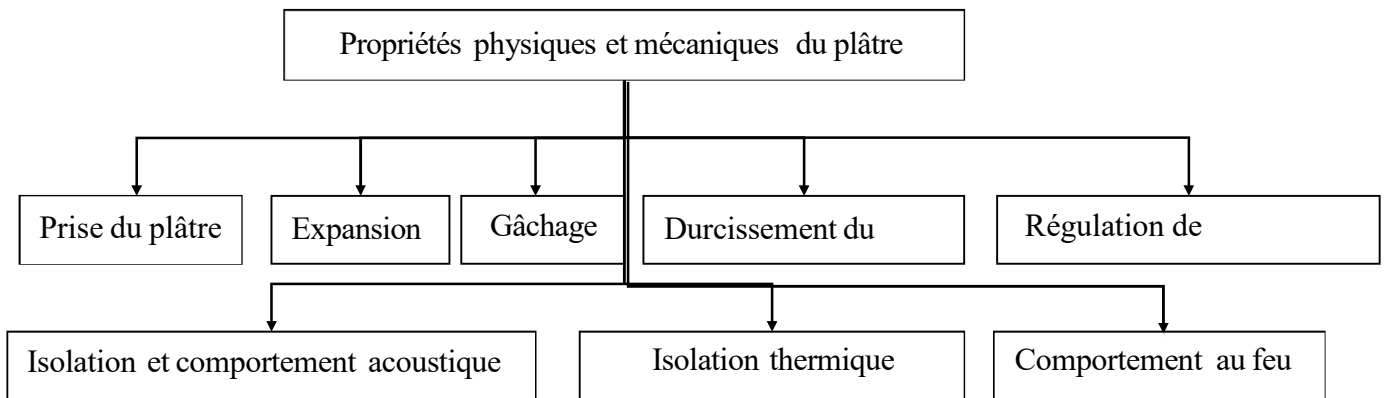


Figure II.7 : Organigramme de Propriétés physiques et mécaniques du plâtre.

II.2 MORTIER DE PLATRE

Le mortier de plâtre résulte d'un mélange bien homogénéisé de plâtre, de sable et d'eau.

Les études [28] imposent les limites des caractéristiques que doit avoir le sable utilisé aussi bien dans le mortier que dans le béton de plâtre.

Les sables utilisés doivent être propres et exempts de toutes matières gypseuses et de matières organiques.

Le sable siliceux doit être préféré au sable calcaire en raison de sa moindre capacité d'absorption d'eau. Il doit être à granulométrie régulière et continue, et contenir un faible pourcentage de fines.

Le C.N.E.R.I.B [28] montre que les résistances mécaniques en compression les plus satisfaisantes ont été obtenues pour les sables intégrés dans le fuseau granulométrique donné dans la Fig. II.14 et utilisé avec un rapport S/P = 0,5 en poids équivalent à S/P=0,4 en volume.

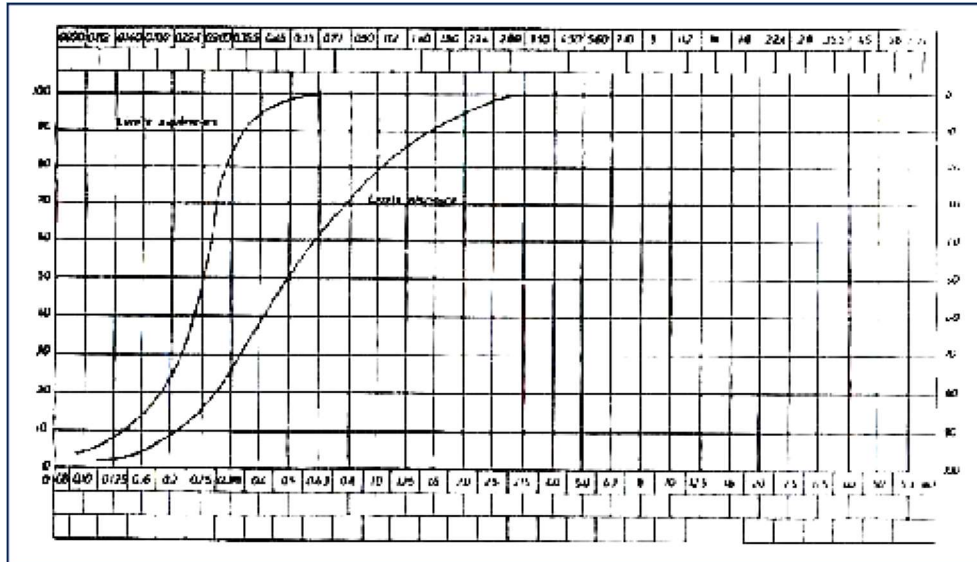


Figure II.8 : Fuseau granulométrique des sables. Analyse granulométrique NF P 18 – 804[28].

II-2-1- Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier

La courbe ci-dessous montre la variation de la résistance à la compression, à 28 jours, Des mortiers en plâtre (sable de dune + plâtre) en fonction du rapport E/P et avec un rapport S/P = 0,5.

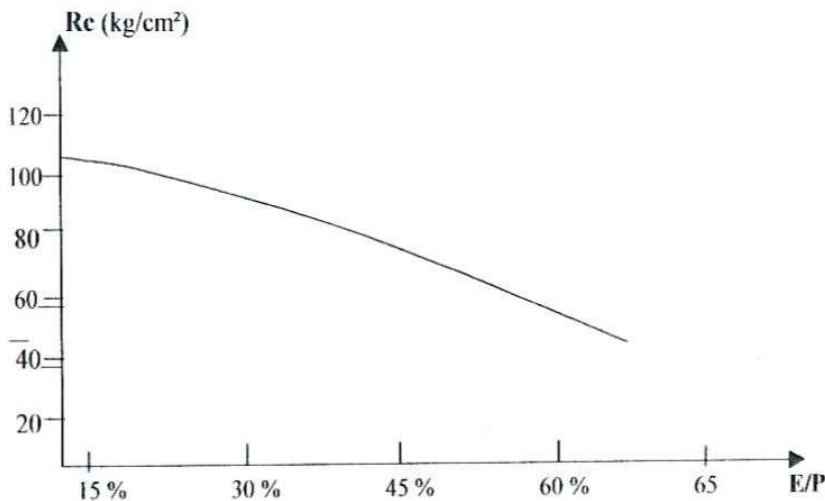


Figure II.9 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques Du mortier [26].

II-2-2-Influence du rapport S/P sur les propriétés thermo-physiques du mortier

Abdelmoune [29], constate que la conductivité thermique λ du mortier de plâtre augmente avec la proportion de sable ajoutée.

Les études [29] ont déduit que la diffusivité thermique du plâtre de Hassi khe important. Concernant le plâtre d'Ouled Djel al, qui renferme très peu de silice (2% environ), l'ajout de sable influera considérablement sur la masse volumique du mélange plâtre-sable et donc sur sa chaleur spécifique, il s'ensuit une augmentation de la diffusivité thermique.

II-2-3- Méthode de composition du mortier de plâtre

Le C.N.E.R.I.B [28] donne la méthode de composition du mortier de plâtre comme suit :

- Il faut ajouter le taux de mouillage du sable au taux de gâchage E/P relatif au plâtre pour obtenir un mortier maniable.
- Détermination de la quantité d'eau de gâchage du mortier (eau nécessaire à la saturation augmentée de l'eau de mouillage du sable).

Pour la confection du mortier de plâtre, Il recommande le mode opératoire suivant :

- Mélanger à sec le plâtre et le sable ;
- Eteindre complètement la chaux aérienne dans l'eau de gâchage ;
- Ajouter progressivement cette eau aux matériaux avec malaxage ;

Pour développer la technique de construction du mortier de plâtre banché, des essais

[23] de rupture par compression et traction par flexion ont été effectués sur des séries de 06éprouvettes 4 x 4 x 16 cm³ en mortier de plâtre.

| Tableau II .1 : Valeurs des contraintes des essais mécaniques sur éprouvettes en mortier de plâtre 4 x 4x 16 cm³ | | | | | | | |
|--|----------|---------|--------|---------|--------|----------|--------|
| Durée | 2 Heures | 3 Jours | | 7 Jours | | 28 Jours | |
| Mode | Mode 2 | Mode 1 | Mode 2 | Mode 1 | Mode 2 | Mode 1 | Mode 2 |
| Rc (bars) | 48,03 | 115,34 | 105,57 | 124,49 | 108,51 | 132,09 | 118,93 |
| Rf (bars) | 13,88 | 36,68 | 32,63 | 40,70 | 35,28 | 43,13 | 37,90 |

Tableau II .1: Valeurs des contraintes des essais mécaniques sur éprouvettes en mortier

Rc : Résistance à la compression ;

Rf : Résistance à la flexion.

Mode 1 : Conservation des éprouvettes à l'air ambiant et 24 h à l'étuve avant écrasement.

Mode 2 : Conservation des éprouvettes à l'air ambiant.

D'après le tableau I.4, les résistances mécaniques évoluent avec la durée de conservation. et dépendent aussi du mode de conservation.

Les résultats des résistances enregistrées pour le mode (1) de conservation sont supérieurs à celles obtenus pour le mode (2). D'où l'effet de la température sur l'accélération du durcissement.

II-3-Béton de plâtre :

Il est possible d'obtenir un matériau d'excellentes qualités en incorporant à un mortier de plâtre des agrégats ayant une granulométrie étudiée. La résistance d'un tel conglomerat dépasse habituellement la résistance du mortier de plâtre seul. Pour obtenir un béton de plâtre, il faut tout d'abord disposer d'un bon mortier de plâtre, c'est à dire d'un mortier ayant un facteur E/P réduit. Par ailleurs, la mise en œuvre du béton de plâtre par vibration permet d'améliorer les propriétés du béton en épaississant sa pâte.

II-3-1-Méthode de composition du béton de plâtre :

La composition des bétons a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (liant, sable, gravier, eau) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possèdent après durcissement les meilleures caractéristiques (étanchéité, résistances mécaniques).

Les méthodes de composition du béton de ciment ne trouvent pas leur validité dans le cas du béton de plâtre. Pour cette raison, une combinaison des méthodes de Vallette et de Faurry a été proposée par le **C.N.E.R.I.B [28]**.

a-Définition de la méthode de Vallette :

C'est une méthode expérimentale [30], elle est à granulométrie discontinue et consiste à réaliser d'abord un mortier aussi plein que possible puis avec les gravillons un béton plein qui présente un minimum de sable.

b-Définition de la méthode de Faurry :

Faurry [25], propose, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulométrie du type « continu ».

La loi de granulation est une fonction de $5d$, alors nous nous inspirons de cette méthode pour établir une courbe granulaire de référence qui est composé de deux droites. Si on l'opère sur un graphique gradué, en abscisse en $5d$, l'abscisse du point de rencontre de ces droites est fixé à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Le paramètre A est choisi en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage.

B : varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

R : est le rayon moyen du moule.

c- Combinaison de la méthode de Faurry et de Vallette pour la composition des bétons de plâtre :

- ❖ On détermine par la méthode de Faurry la courbe de référence du béton de plâtre, d'où on déduit le pourcentage en volume absolu de gravier sec.
- ❖ On détermine les quantités d'eau de mouillage de chacun des constituants : gravier, sable et plâtre par la méthode de Vallette.
- ❖ Pour le plâtre, on prend le taux de gâchage à saturation.
- ❖ Connaissant le volume absolu du plâtre mouillé et de gravier mouillé, on calcule le poids de sable mouillé nécessaire pour remplir les vides.

II-3-2-Choix des granulats :

Dans le cas de l'utilisation d'un bon mortier et pour une bonne mise en œuvre, la résistance du béton de plâtre dépendra essentiellement de l'adhérence du mortier au granulat.

Cet accrochage est particulièrement important pour les plâtres, parce qu'ils durcissent avec augmentation de volume et créent ainsi des tensions à l'intérieur de la masse du béton, ce qui affecte la soudabilité du mortier à l'agrégat.

La granulométrie de l'agrégat doit dès lors être étudiée afin de permettre ce bon accrochage qui joue un rôle décisif non seulement dans le durcissement du béton mais aussi dans le développement de sa résistance.

Pour la sélection des granulats, différents bétons de plâtre, avec plusieurs types d'agrégats confectionnés à partir des plâtres produits dans le Sahara Algérien, ont été testés afin de déterminer les proportions optimales des mélanges et les propriétés mécaniques des bétons de plâtre durcis. La première analyse confirme que les résistances à la compression et à la traction évoluent avec la diminution du rapport S/P et E/P.

Par ailleurs le gypse concassé donne les meilleurs résultats que les grès tendres, et les bétons d'agrégats roulés ont des résistances légèrement supérieures aux bétons de sable et du gypse.

La deuxième analyse montre que pour les agrégats roulés, la granulométrie 3/8 offre les meilleures performances que la granulométrie 5/15.

Pour des granulats voisins, le matériau concassé est nettement supérieur au matériau roulé.

Après le choix et la sélection des granulats concassés, et en se basant sur un système constructif déjà réalisé et testé sur des opérations expérimentales (prototype, essai en labo), le **C.N.E.R.I.B [28]** donne à titre indicatif la composition du béton de plâtre suivante :

- 01 sac de plâtre : 40 kg ;
- Gravier 5/15 : 60 – 80 kg ;
- Chaux éteinte : 01 à 1,5 kg ;
- Eau : 16 à 24 l.

II-3-3-Mode opératoire :

Après la détermination de la composition du béton de plâtre, on procède comme suit :

- Mélanger mécaniquement à sec le plâtre, le gravier et le sable ;
- Faire éteindre complètement la chaux ;
- Mélanger la chaux éteinte au reste de l'eau de gâchage ;
- Ajouter progressivement ce mélange (eau + chaux) aux constituants (plâtre + gravier + Sable) ;
- éviter un long malaxage, pour ne pas accélérer la prise.

II-3-4-Eléments préfabriqués :

Les éléments à base de plâtre couramment utilisés pour la construction des murs et planchers sont regroupés dans le tableau ci-après :

| Tableau II.2 : Les éléments préfabriqués en plâtre et leurs utilisations. | | | |
|--|--|--|---|
| Eléments | Dimensions (cm) | Matériaux de constructions | Utilisation |
| Blocs pleins | 15 x 20 x 40 10 x 20 x 40 | - Mortier ou béton plâtre - Mortier de plâtre - Plâtre pur | - Mur porteur - Double paroi de mur porteur et Cloison |
| Blocs creux | 20 x 20 x 40 15 x 20 x 40 | - En mortier de plâtre - En mortier de plâtre - Plâtre pur | - Mur porteur - Double paroi - Cloison |
| Carreau de Plâtre | 5 x 66 x 50 7 x 66 x 50 10 x 66 x 50 | - Plâtre pur | - Uniquement en doublage - Double paroi - Cloison |
| Voûtains | 16 x 54 x 40 | - Plâtre pur ou mortier | - Elément de plancher |

Djoudi [24] montre que la maniabilité croît avec l'augmentation du rapport S/G et que la composition granulaire optimale pour le béton de plâtre témoin (qui donne une maniabilité maximale) correspond à un rapport S/G = 0,29

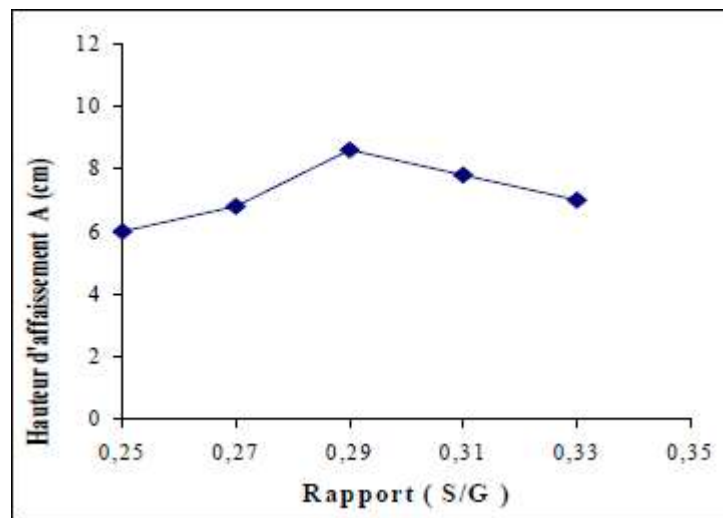


Figure II.10 : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton [24].

II-3-5-Influence du rapport S/P sur les propriétés mécaniques du béton de plâtre :

Pour chaque type de béton, il apparaît un dosage en sable pour lequel les résistances à la compression R_c et la résistance à la flexion R_f sont maximales. Ce dosage optimum semble être compris dans une fourchette de 60 à 70 % du poids de sable exprimé en rapport du poids du plâtre, pour le plâtre d'Ouled Djalal et un taux de l'ordre de 0,5 pour le plâtre de Hassi khelifa [29].

II-3-6-Influence du rapport S/P sur les propriétés thermo-physiques du béton de plâtre :

En étudiant la variation de la conductivité thermique λ et la diffusivité a des bétons de plâtre d'Ouled Djalal en fonction de la proportion de sable ajoutée, les études [31] montrent la présence d'un maximum de conductivité et de la diffusivité pour des teneurs en sable voisines de 0,9. Vraisemblablement ceci est dû à la quantité totale qui conduirait à une matrice en plâtre plus poreuse, pour des valeurs S et P élevées.

a- Influence des granulats de liège sur les propriétés mécaniques du béton de plâtre

Zitani [32] a montré que Les variations de la résistance à la compression chute d'une valeur de 12,23MPa pour le béton témoin (sans liège) jusqu'à une valeur de 5,92 MPa pour le dosage

le plus faible de granulats de liège, cette chute s'accroît au fur et mesure que le dosage en granulats augmente. Fig. II.11

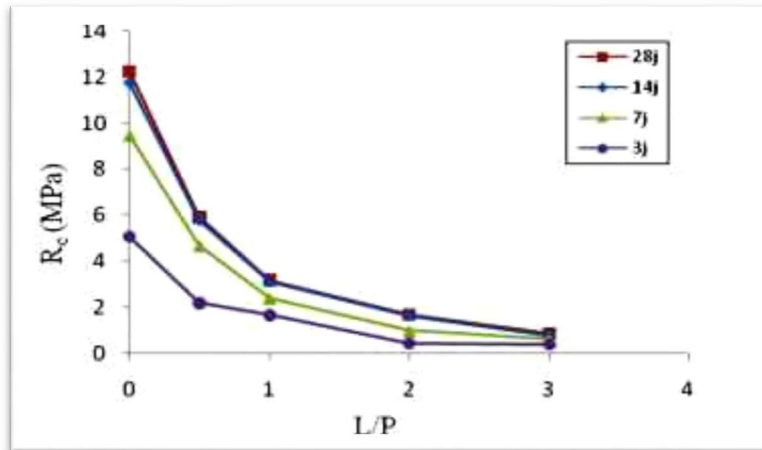


Figure II.11 Variation de la résistance à la compression des BPL (8/15) En fonction du rapport Liège/Plâtre.

Les mêmes études [32] montrent que la résistance à la flexion chute d'une valeur de 4.23 MPa pour le béton de plâtre témoin jusqu'à une valeur de 1.45 MPa pour le dosage le plus faible de liège avec un taux de 65%, cette chute s'accroît au fur et mesure que le dosage en granulats augmente. Fig. II.18.

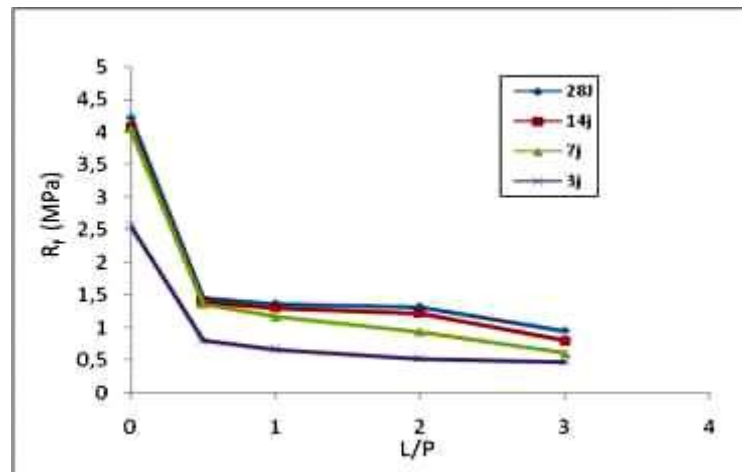


Figure II.12 : Variation de la résistance à la flexion des BPL (3/8) en fonction du rapport Liège/Plâtre

Les études [16] et d'après la figure ci-dessus montrent que la conductivité thermique décroît en fonction du dosage en liège. Les échantillons allégés donnent des valeurs entre 0.18 et 0.47 W/m.C°. En termes de taux d'isolation, le liège permet l'augmentation du pouvoir d'isolation de 75%

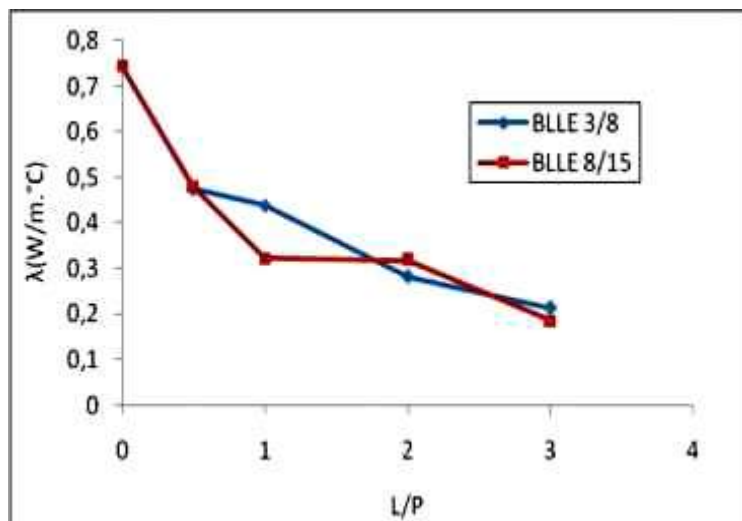


Figure II.13 : Variation de la conductivité thermique en fonction du rapport Liège/Plâtre [32].

Chapitre III

Valorisation des déchets pneumatiques

III.1. INTRODUCTION

Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine du génie civil. [33]

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations graves pour l'environnement à travers le monde. Des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés dans les États-Unis et de nombreux autres pays à travers le monde, chaque année.

Depuis 2004, chaque année, l'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur. Sachant que chaque pneu neuf vendu génère un pneu usagé, et tenant compte de la perte de masse due à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec environ 45,65 milliers de tonnes de pneus usagés, chaque année.

Les filières classiques de valorisation des pneus usagés qui nécessitent souvent une technologie avancée, sont généralement concentrées dans les pays riches. Le développement de nouvelles filières de valorisation des pneus usagés, reste cependant toujours en grande demande partout dans le monde. [34]

Il y a un Quatre origines de déchets pneumatiques peuvent être signalées : [35]

- les déchets de caoutchouc industriel.
- les déchets de fabrication de pneumatique.
- les pneumatiques usagés.
- les déchets de rechapage.

III.2. DEFINITION DU CAOUTCHOUC

Les élastomères, comme les matières plastiques, font partie de la famille des polymères. Le terme « élastomère » est utilisé aujourd'hui pour désigner d'une façon générale tous les caoutchoucs, c'est-à-dire les substances macromoléculaires, naturelles ou synthétiques, possédant l'élasticité caoutchouteuse.

Le terme « caoutchouc » vient du mot indien cahutçu (« bois qui pleure ») et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères d'aujourd'hui. Le caoutchouc à l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes

à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'Hévéa brasiliensis, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre.

Les caoutchoucs synthétiques sont obtenus par polymérisation (création de macromolécules à partir de molécules de base) et par transformations physiques en présence de catalyseurs.

Les caoutchoucs possèdent de très nombreuses propriétés. Ils sont notamment élastiques, étanches et antivibratoires. La combinaison de ces trois propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large. [36]

III.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES DECHETS PNEUMATIQUES

La priorité de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de l'effet de serre est un engagement important pour les générations futures puisque il est considéré comme une source importante d'alimentation des différents aspects de pollution.

Malgré tous les inconvénients que les pneumatiques usagés possèdent, ils ne sont pas catégorisés comme déchets toxiques ou dangereux, car ils ne sont pas biodégradables, mais sont nuisibles pour l'environnement et la santé en cas d'incendie.

Ces derniers une fois brûler ; dégagent des fumées hautement dangereuses, par sa teneur en gaz toxique sont composés par des hydrocarbures chlorés et des polyromatiques, et des dioxines, causant ainsi chaque année des maladies et des allergies ; tel que l'allergie cutanée. Ils produisent aussi une vapeur toxique (possédant des composants de silice et de carbone). Les épaisses fumées se répandant dans l'atmosphère en cas d'incendie peuvent causer beaucoup de maladie respiratoire (figure1). [33]



Figure III.1- Fumée toxique qui se dégage en brûlant des pneus [33]

3. Composition des pneus a usage

Les pneus usagés se composent essentiellement de caoutchouc synthétique ou naturel, de noir de carbone et d'oxyde de silicium, ainsi que d'acier et de tissu (tableau 2). Les additifs qu'ils recèlent, tels que zinc, plomb ou soufre (tableau 3), revêtent une importance cruciale lorsqu'il s'agit d'apprécier l'impact d'une filière de valorisation sur l'environnement. Selon l'usage qui en est fait, les produits recyclés ou le mode de traitement risquent d'être incompatibles avec l'environnement, du fait de ces polluants. Il est donc opportun que les fabricants de pneus minimisent à titre préventif la teneur des additifs polluants dans leurs produits. On évite ainsi que la valorisation ultérieure des pneus usagés provoque des atteintes indésirables à l'environnement. [35]

Tableau III.1: Substances contenues dans les pneus usagés (de voiture dans cet exemple)[35]

| Substance | Proportion pondérale [%] |
|---|--------------------------|
| Hydrocarbures polymérisés (caoutchouc synthétique et/ou naturel) | 47,0 |
| Noir de carbone | 21,5 |
| Acier | 16,5 |
| Tissu | 5,5 |
| Oxyde de zinc | 1,0 |
| Soufre | 1,0 |
| Autres | 7,5 |
| Total | 100 |

Tableau III.2. Composition chimique des pneus usagés [35]

| Elément | Teneur |
|---------------------|--------------|
| Carbone | Environ 70 % |
| Fer | 16 % |
| Hydrogène | 7 % |
| Oxygène | 4 % |
| Oxyde de zinc | 1 % |
| Soufre | 1 % |
| Azote | 0.5 % |
| Acidestéarique | 0.3 % |
| Halogènes | 0.1 % |
| Liaisons cuprifères | 200 mg/kg |
| Cadmium | 10 mg/kg |
| Chrome | 90 mg/kg |
| Nickel | 80 mg/kg |
| Plomb | 50 mg/kg |

III.4. VALORISATION DES PNEU USAGES EN GENIE CIVIL

a/ Le tapis de pneus anti vibration

Le tapis de pneus, composé de deux lits croisés de bandes de roulement de pneumatiques, est intercale entre le ballast et la couche de forme (ou pose sur les tabliers des ponts ferroviaires) pour atténuer les vibrations provoquées par diverses machines, les trains, les tramways, les rames du métro, etc.

b/ La construction de récifs artificiels

Immergés à des profondeurs de dix ou vingt mètres, assemblés et lestés à l'aide de blocs de ciment, les pneus peuvent former des récifs artificiels constituant des zones de calme pour la faune marine. Le Japon et les Etats-Unis ont développé une véritable industrie du récif artificiel ; par exemple, en Caroline du Nord, plus de 500.000 pneumatiques ont été immergés entre 1974 et 1977. En France, cinq récifs artificiels ont été construits à Palavas-les-Flots, à Langrune-sur-Mer, à Arcachon-sur-Mer, à Golfe-Juan et à Port-la-Nouvelle.

c/ Mur antibruit ACIAL (1992)

L'ingénieur R.Beyler a proposé un mur antibruit dont la structure absorbante est réalisée avec des pneus usagés entiers dans un caisson métallique dont une face est perforée de trous. Les essais effectués en 1992 selon les normes AFNOR S 31089 ont donné des résultats supérieurs aux valeurs maximales fixées dans la norme, ce qui classe ce mur antibruit parmi l'un des plus intéressants.

d/ Le Pneu sol (1974)

Classé comme une valorisation originale, le Pneusol est un matériau inventé au Laboratoire central des Ponts et Chaussées et constitué de pneus entiers ou d'éléments et sols naturels ou artificiels ou de déchets. Depuis 1974, plus de deux cent cinquante ouvrages en Pneusol ont été construits (en France).

III.5. FILIERES DE VALORISATION

Le cheminement des pneus usagés est organisé comme suit : Après le démontage des pneus usagés, ils sont stockés par les garagistes puis collectés par les collecteurs qui trient les pneus pour sélectionner les pneus pouvant être réutilisés ou faire l'objet d'un rechapage. Les pneus usagés non réutilisables sont, soit stockés entiers ou déchiquetés ou broyés, afin de les livrer aux valorisateurs. La valorisation des pneus usagés, peut se présenter sous l'une des formes suivantes; [34]

5.1 Le rechapage

Permettant d'allonger considérablement la vie du pneu, le rechapage est la première solution de recyclage. Cette technique consiste à changer les bandes de roulement des pneus usagés, en les remplaçant par des bandes de roulement neuves. Cette technique a pour cible les pneumatiques usagés dont les carcasses ont gardé intacte l'ensemble de leurs qualités intrinsèques et notamment leurs durées. Cette activité génère à son tour des déchets, dont la poudre de caoutchouc.

5.2 La valorisation énergétique

Le pneumatique, de par son origine polymérique, a un excellent pouvoir calorifique (3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel).

5.3 La valorisation sous forme de matières premières

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux pour diverses applications

III.6. DECHETS PNEUMATIQUES BROYES

6.1 Poudrettes

Il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2mm (Figure 2). Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines (caddie, poubelles, tondeuses, brouettes...), la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface)...etc.



Figure III.2. Aspect des déchets de caoutchouc [37]

6.2 Granulés

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes (figure 3). Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques. Comme exemple d'utilisation, on a les aires de jeux, les pavés anti-dérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...)

D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possibles, telle que la mécanique et thermiques), ou la Pyrolyse – Thermolyse.

Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone...etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre.



Figure III.3. -Copeaux de pneus déchiquetés [38]

III.7. UTILISATIONS DES PNEUS USAGES EN ALGERIE

Le gisement Algérien de pneumatiques usagés est important ; il est de l'ordre pour les véhicules poids lourds de 200000 tonnes/an (19.millions de pneus). Mais les quantités valorisées sont très limitées, nous notons quelque types d'utilisation : [35]

- Utilisées en agriculteur pour renforcer les petits barrages et comme Siège dans les jardins traditionnelles.
- Applications de résidus de copeaux de pneus en structure sous chaussée
- Pour la Stabilité d'un talus
- Rechapage pneus usagés à El Eulma.
- Utilisées pour couvrir les conducteurs électriques.
- Pneusol, déjà utilisé dernièrement à Alger par une société Italienne. (figure 4)
- Stabilité d'un glissement de terrain



Figure III.4. Chantier expérimental Pneusol à Bou-SmaiL [34]

III.8. VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES DANS LES BETONS ET LES MORTIERS

La possibilité de valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons sous d'agrégats a été l'objet de nombreuses recherches expérimentales. Ces recherches ont avaié pour finalité que l'incorporation des déchets pneumatiques dans les bétons affectent leurs propriétés physico-mécaniques aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Les principales conclusions tirées à partir de ces études c'est que l'incorporation des particules de caoutchoucs diminue la densité et les paramètres de résistance du béton et augmenter la ductilité de ces matériaux (Figures III. 5-7).

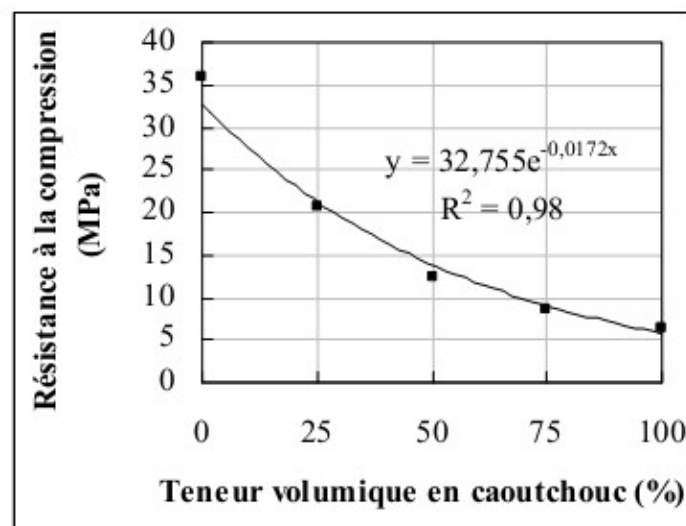


Figure III.5. Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression [37]

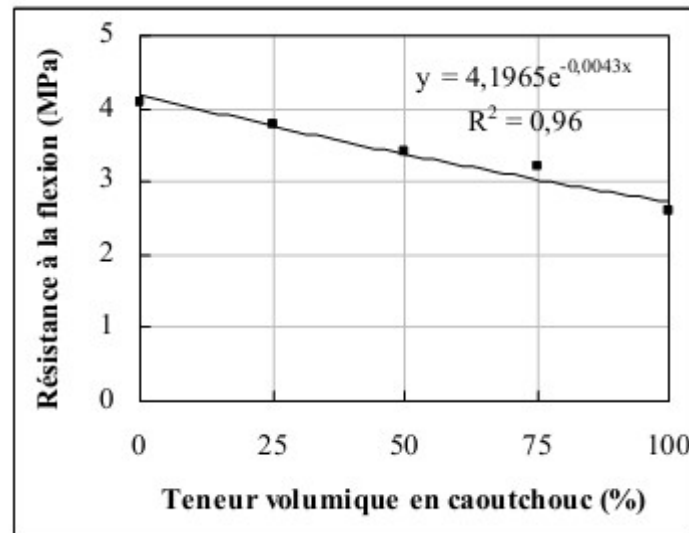


Figure III.6. Effet du caoutchouc sur la résistance à la flexion [37]

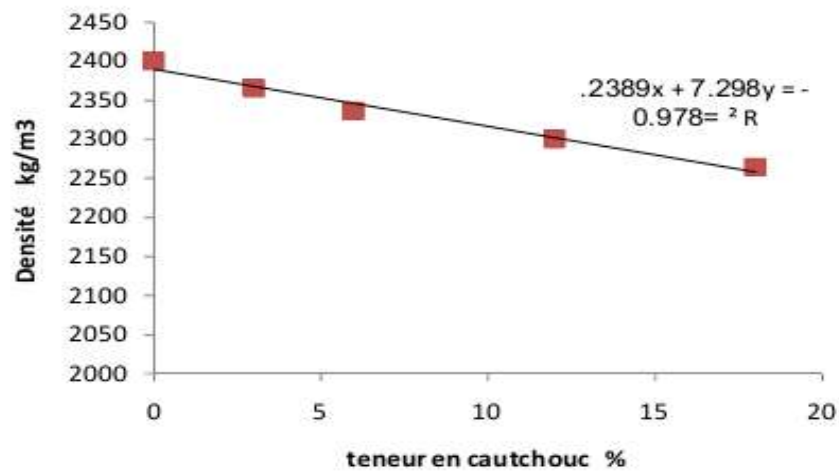


Figure III.7. Effet du caoutchouc sur la densité [39]

III.9. Conclusion

L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement une priorité très motivante sur le plan environnemental qu'économique. En effet le pneu usagé est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utiles, en conséquence le génie civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des pneumatiques usagés, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

Chapitre IV

Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

IV.1 Introduction

Dans le but de valoriser les matériaux en établissant une formulation adéquate afin d'obtenir un matériau rentable, nous avons utilisé dans cette étude des matériaux localement produits.

Les composants essentiels de notre béton sont le plâtre, les déchets de caoutchouc et le sable ainsi que l'eau de gâchage.

Les matériaux élaborés dans cette étude sont des bétons de plâtre à base de déchets de caoutchouc. Ils sont destinés à être utilisés comme des matériaux de construction isolant ou isolant-porteurs, dont la tenue mécanique est assurée par la matrice constituée de plâtre seul ou mortier de plâtre

IV.2 Plâtre

Le plâtre utilisé provenant de l'usine TAOUAB BOUSSADA –M'sila. Une analyse minéralogique et chimique nous a été transmise par l'usine.

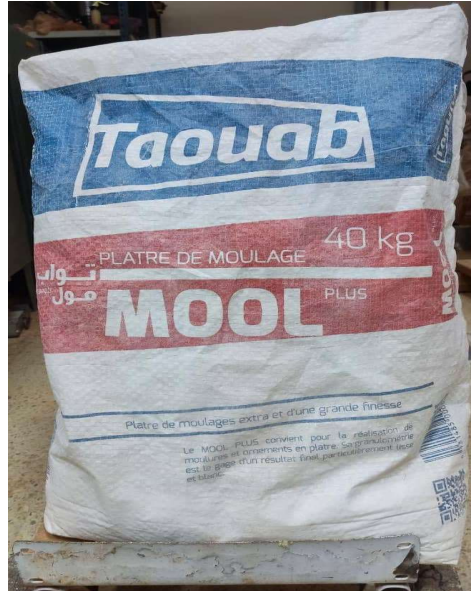


Figure IV.1 : Plâtre utilisé

IV -2-1 Caractéristiques techniques :

Tableau IV.1 : Fiche technique de plâtre TAOUB MOOL.

| Rapport de gâchage | Début de prise | Fin de prise | Densité apparente | Dureté superficielle | La finesse Tamis 100µm | Tamis 200µm |
|--------------------|----------------|--------------|-------------------|----------------------|------------------------|-------------|
| (0.75-0.85%) | (4-6 min) | (8-14 min) | 0.65-0.75kg/l | ≥ 55 shore C | ≤20% | ≤ 10% |

IV-2-2-Masse volumique apparente NFP 18-555

C'est la masse de l'unité de volume (y compris les vides), elle est notée ρ_{app} et donnée

Par :
$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \dots\dots\dots (IV.2).$$

Où M : masse du plâtre.

V : volume total de l'échantillon.

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard (de

Il s'agit de remplir un volume de 1l (1dm³) et on pèse la masse totale M_T, la masse de l'échantillon M sera :

$$M = M_T - M_R \quad (M_R \text{ est la masse du récipient}).$$



Figure IV.2 : Dispositif pour l'essai de récipient et entonnoir à trépied.



Figure IV.3: Récipient standard.

Les résultats de la masse volumique apparente sont représentés sur le tableau IV.2

Tableau IV.2 : Masse volumique apparente du plâtre.

| N ^o d'expériences | masse de récipient m_1 (g) | masse totale m_2 (g) | masse de l'échantillon m_2-m_1 (g) | volume de récipient (cm^3) | masse volumique apparente $\rho_{\text{app}}(\text{g}/\text{cm}^3)$ |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------|--|---|--|
| 1 | 116.4 | 741.2 | 624.8 | 900 | 0.694 |
| 2 | 116.4 | 727.3 | 610.9 | 900 | 0.678 |
| 3 | 116.4 | 726.3 | 610 | 900 | 0.677 |
| | | | | Moyenne | 0.684 |

Alors la masse volumique apparente du plâtre de construction est **684 Kg/m³**.

IV.3. Sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable provenant de la région sud de la ville Oued souf.

IV.3.1. Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique sont représentés sur la figure IV.4 et le tableau IV.3

D'après les tableaux A1, on a tracé la courbe granulométrique représenté sur la figure IV.13.

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Tableau .IV. 3. Composition granulométrique du sable préparé.

| <i>Dimensions des mailles carrées (mm)</i> | <i>Refus partiels Ri en g</i> | <i>Refus cumulés Rn en g</i> | <i>Refus cumulés en %(réf. M1)</i> | <i>Tamises cumulées %</i> |
|--|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 5 | 1 | 1 | 0.05 | 99.95 |
| 2.5 | 43 | 44 | 2.2 | 97.8 |
| 1.25 | 178 | 222 | 11.1 | 88.9 |
| 0.63 | 559 | 781 | 39.05 | 60.95 |
| 0.315 | 903 | 1684 | 84.2 | 15.8 |
| 0.16 | 255 | 1939 | 96.95 | 3.05 |
| 0.08 | 53 | 1992 | 99.6 | 0.4 |
| Fond | 8 | 2000 | 100 | 0 |

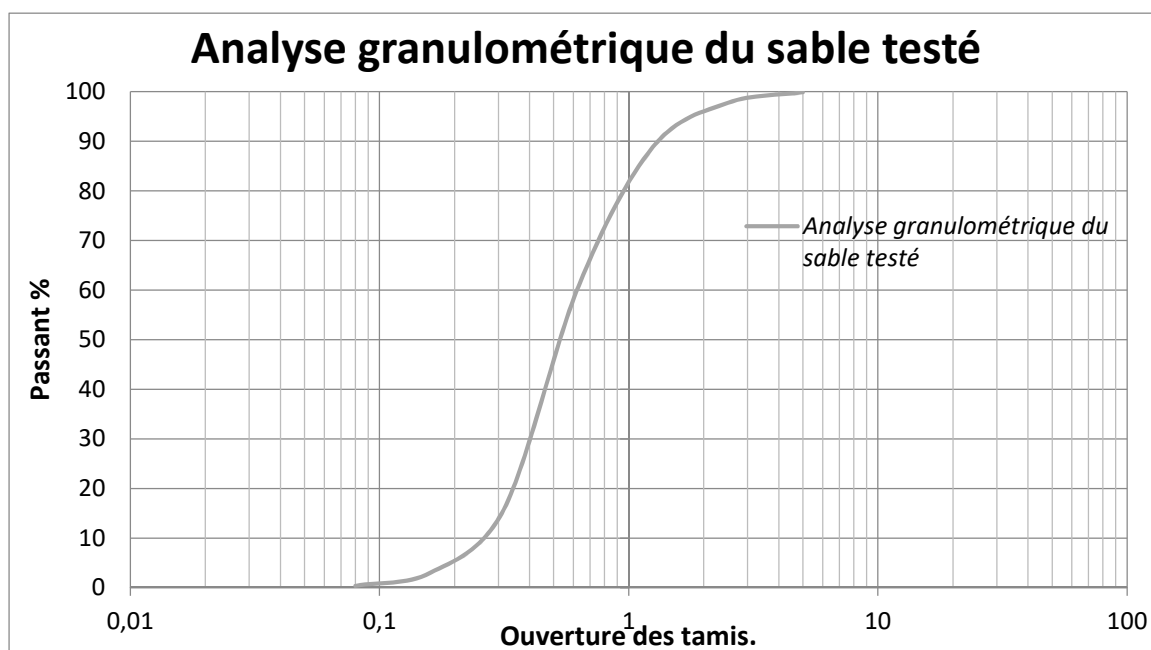


Figure IV.4 : Courbes granulométriques de sable.

D’après le résultat obtenu de l’équivalent de sable on peut constater que le sable utilisé est très propre [48].

IV.3.2 Caractéristiques physique du sable utilisé

Les caractéristiques physiques de sable dans de tableau-IV.4

| tableau-IV.4 .Caractéristiques physiques du sable de dune | |
|---|------|
| Masse volumique apparente (kg/m ³) | 1602 |
| Masse volumique absolue (kg/m ³) | 2500 |
| Compacité (%) | 64 |
| Porosité (%) | 36 |
| Module de finesse | 3.83 |
| Equivalent de sable (%) | 91 |

IV.4. Granulats de déchets de caoutchouc

Les déchets de caoutchouc utilisés ont été ramenés de la société Algérienne de recyclage, (une entreprise spécialisée dans le recyclage des pneus.).

Les granulats en caoutchouc proviennent du recyclage de pneus,

IV.4.1 Analyse granulométrique par tamisage :

D'après les tableaux A3, on a tracé la courbe granulométrique des granulats de déchets de caoutchouc représenté sur Figure IV.16.



Figure IV.5. Déchets de caoutchouc

| Dimensions des mailles carres (mm) | Refus partiels Ri en g | Refus cumulés Rn en g | Refus cumulés en %(réf. M1) | Tamisas cumulées % |
|------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 5 | 2 | 2 | 0.2 | 99.8 |
| 2.5 | 824 | 826 | 82.6 | 17.4 |
| 1.25 | 97 | 923 | 92.3 | 7.7 |
| 0.63 | 62 | 985 | 98.5 | 1.5 |
| 0.315 | 4 | 989 | 98.9 | 1.1 |
| 0.16 | 3 | 992 | 99.2 | 0.8 |
| 0.08 | 6.5 | 998.5 | 99.85 | 0.15 |
| Fond | 1 | 999.5 | 99.95 | 0.05 |

Tableau .IV. 5. Composition granulométrique du déchet de caoutchouc.

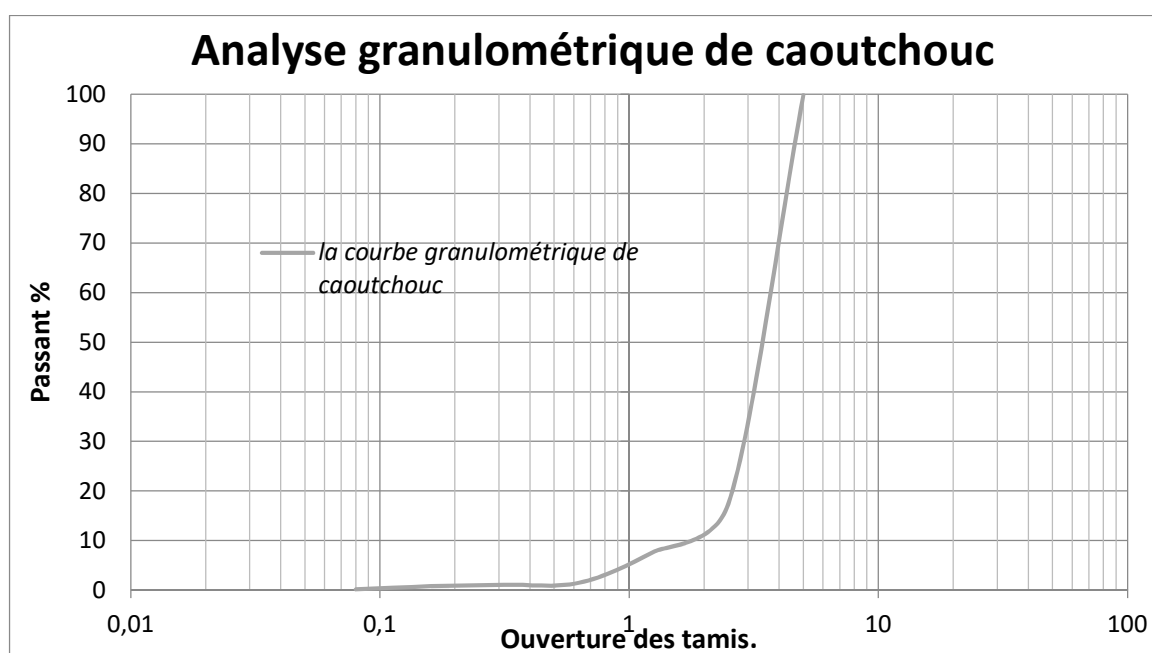


Figure IV.6 : la courbe granulométrique de caoutchouc

| | |
|--|-------|
| Masse volumique apparente (kg/m ³) | 1111 |
| Densité spécifique (kg/m ³) | 491 |
| Compacité (%) | 44.19 |
| Porosité (%) | 55.8 |

IV.5. Caractérisation de l'eau de gâchage

Nous avons utilisé pour la totalité de nos essais une eau potable du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire.

IV.6. Méthodes expérimentales :

IV.6.1. Mise en œuvre

a) Le malaxeur

Nous avons adoptées pour les bétons légers, un malaxage normalisé selon la norme européenne **EN 196-1** et nous avons fait en sorte qu'avec ce malaxage, le mélange soit le plus homogène possible.

Le mélange est effectué au moyen d'un malaxeur de 5 litres de capacité (figure IV.1), il comporte une palette permettant un mouvement planétaire susceptible de fonctionner à deux vitesses (dites lente et rapide) :140 et 285 tr/mn.

Il comporte essentiellement :

- un récipient en acier inoxydable d'une capacité de 5 l environ, de forme et de dimension générale indiquées à la figure IV.1, et équipé de manière à pouvoir être fixé fermement au bâti du malaxeur pendant le malaxage.
- un batteur en acier inoxydable ayant la forme, les dimensions et les tolérances générales indiquées sur la figure IV.2, entraîné par moteur électrique à vitesses contrôlées, en un mouvement de rotation sur lui-même, accompagné d'un mouvement planétaire autour de l'axe du récipient



Figure IV.7 : Malaxeur normalisé pour pâte utilisé.

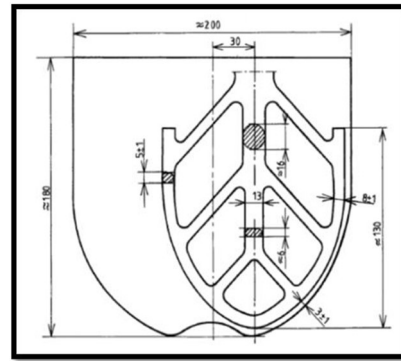


Figure IV.8 : Dimensions d'un malaxeur.

Le malaxeur est fonctionné aux vitesses données au tableau suivant :

Tableau IV.7 : vitesses de fonctionnement du malaxeur.

| | Rotation (tour/min) | Mouvement planétaire (tour/min) |
|----------------|------------------------|---------------------------------|
| Petite vitesse | 140 | 62 |
| Grande vitesse | 285 | 125 |

b) Mode de malaxage

Afin d'éviter le problème de ségrégation en raison de la légèreté des granulats l'ordre d'introduction des différents constituants du béton dans le malaxeur était le suivant :

- Introduction de la moitié de l'eau.
- Introduction du plâtre, déchets de caoutchouc et sable pendant 30 s.
- Compléter l'eau restante.
- Malaxer l'ensemble à vitesse rapide pendant 30s.
- Arrêter le malaxeur et enlever au moyen d'une raclette tout le plâtre adhérent aux parois et au fond du récipient on le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxeur jusqu'à ce qu'il devienne homogène et le temps ne dépasse pas 2 min.

c) Préparation et conditionnement des éprouvettes

Le choix des dimensions du moule est fixé par la norme NFP 18-400 [09]. Il doit satisfaire le critère de l'échelle et de volume supérieure à la dimension des plus gros granulats, de plus les dimensions permettent de réaliser les essais de caractérisation recherchés. Pour la caractérisation

physicomécanique des bétons élaborés dans ce travail, on a choisi le moule de 4x4x16 cm³.

La mise en moule est faite sans vibration à raison de 3 couches piquées à la truelle chacune pour éviter tout problème de ségrégation affectant l'homogénéisation des échantillons. Après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées à l'air libre du laboratoire en les couvrant d'une toile en plastique. Au bout de 24 heures.

Les moules utilisés pour les essais mécaniques et les essais absorptions et la conductivité thermique sont représentés sur les figures ci-dessus :

Figure IV.9 : Moules utilisés pour l'essai mécanique



IV.6.2. Caractéristiques mécaniques des BPLDC.

1) Résistances mécaniques

Les résistances des bétons dépendent de nombreux facteurs :

- Nature et dosage du plâtre.
- Rapport E/P.
- Granulométrie et nature du granulat.
- Énergie de malaxage et mise en œuvre.
- Milieu de conservation.

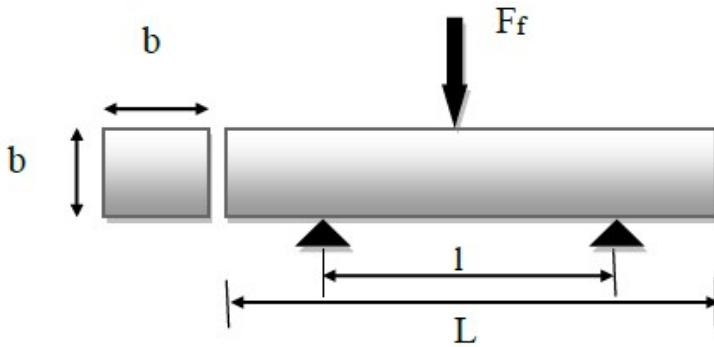
2) Essais mécaniques

Il s'agit de l'essai de compression, qui est réalisé selon la norme EN 196-1[60], sur les échantillons réalisés. La valeur de la charge de rupture est lue directement sur le fichier résultat.

a- Essais de résistance à la flexion

L'essai de flexion à 3 points est effectué sur des prismes 4x4x16cm³ avec une vitesse de mise en charge de 1 N/s. Le résultat pris est la moyenne de trois essais.

La figure IV. 10 montre le dispositif de flexion :



La résistance à la rupture par flexion est donnée au moyen de la formule suivante :

$$R_F = 1.5 ((F_f * L) / b^3) \dots \dots \dots (\text{MPa}) \text{ (IV.3)}$$

L : Distance entraxe des rouleaux d'appuis de l'éprouvette 40x40x160 mm³ (L= 100 mm)

R_f : Résistance à la flexion en MPa.

F_f : Charge à la rupture en N.

b : Largeur de la section carrée du prisme en mm (b = 40 mm).

b- Essais de résistance à la compression :

L'essai consiste à comprimer jusqu'à écrasement un échantillon ou du matériau étudié. Les six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uni axiale sur le bâti de compression de la même presse avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s ± 200 N/s, l'augmentation de la charge d'écrasement se fait automatiquement et la force de rupture est affichée sur l'écran de l'appareil où l'on effectue la lecture en KN.

La résistance à la compression est donnée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ En (MPa)} \dots\dots\dots \text{(IV.4).}$$

Avec : R_c : Résistance à la compression en MPa.

F_c ; Charge à la rupture en N.

A: l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires en mm² (1600 mm²).

La figure IV.22 montre le dispositif de l'écrasement par compression :

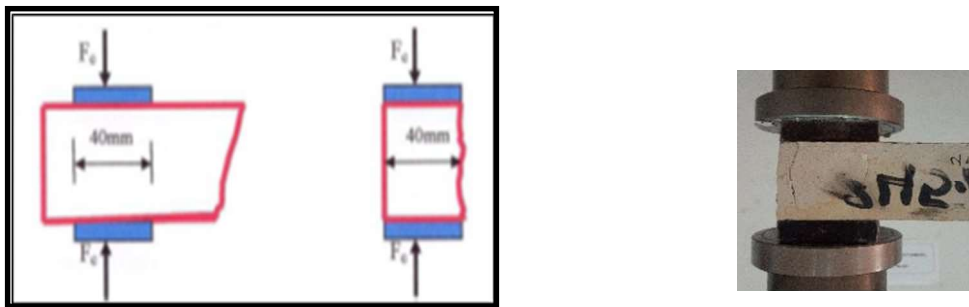


Figure IV.11 : Dispositif de l'écrasement par compression.

3) Essai d'absorption d'eau

IV.4.1 Essai de l'absorption capillaire

Les essais d'absorptivité déterminent le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette de béton posée sur de petits supports de telle manière que seuls les 2 à 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps.

Il existe une relation de la forme :

$$i = S t^{0.5} \dots \dots \dots (IV.11).$$

Où :

i : l'augmentation de la masse en g/mm^2 ;

t : temps écoulé (en minute) au moment où la masse est mesurée en s ;

S : absorptivité en $mm/min^{0.5}$;

La base de l'éprouvette cylindrique (10×20) cm^2 est mise en contact avec une nappe d'eau. On suit l'évolution de la masse de cette éprouvette au cours du temps.

La nappe d'eau est maintenue à niveau constant par un trop-plein. Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique qui force l'eau à adopter un cheminement uni axial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des échantillons. La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à l'aide d'un papier absorbant.

Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ C$ et $HR = 45 \pm 10 \%$).

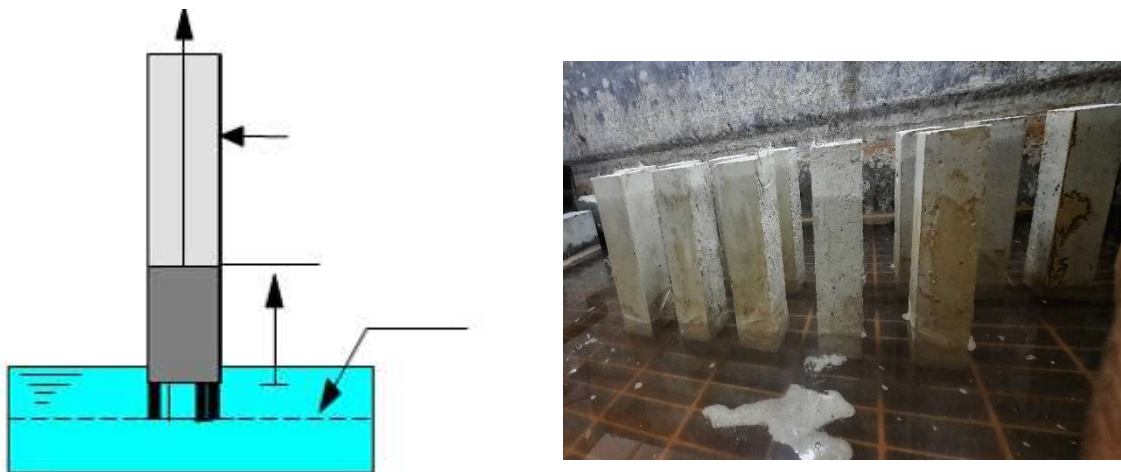


Figure IV.12.: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

IV.7. Caractéristiques thermiques

Cette partie n'a pas été prévue au début de notre travail, néanmoins et à titre d'information nous avons voulu avoir une idée sur les caractéristiques thermiques de nos bétons, puisque la propriété la plus importante est leur pouvoir isolant qui est lié directement aux paramètres thermiques. Toutefois, une étude détaillée du comportement thermique des bétons élaborés pourra faire l'objet d'une étude ultérieure.

➤ La conductivité thermique

La conductivité thermique λ exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Parmi les facteurs qui influent sur la conductivité thermique des matériaux de construction, citons : la porosité et la teneur en eau.

IV.7.1. Méthodes de mesure des paramètres thermiques :

De nombreuses méthodes de mesure de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermiques des matériaux, s'appuient donc sur la détermination d'un champ de température dans des échantillons de géométrie connue, en imposant des conditions aux limites constantes ou variables avec le temps. Parmi ces méthodes, citons deux méthodes les plus utilisées, il s'agit de la technique de la sonde monotige à faible inertie thermique [22], et la méthode de la sonde plane TPS (Transient Plane Source) [22].

Pour nos mesures on a utilisé la technique de la sonde plane TPS, en raison de sa capacité de détermination de la conductivité et la capacité thermique des matériaux contrairement à la méthode de la sonde monotige qui ne permet de déterminer que la conductivité thermique, de plus les erreurs liées à la résistance de contact sont minimales dans la TPS que dans la sonde monotige.

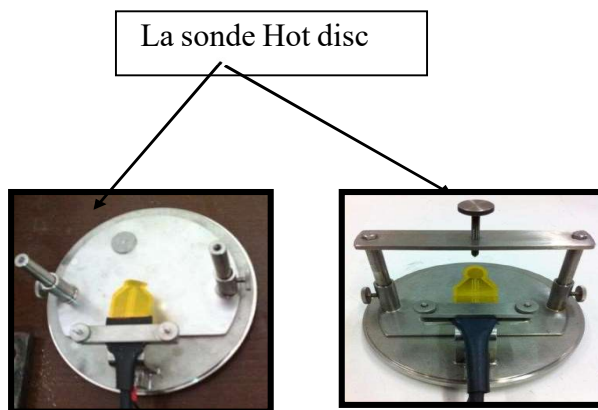


Figure IV. 13 : Schéma de la sonde TPS.



Figure IV. 14 : Dispositif de serrage, sonde, éprouvette.

IV.7.2. Avantages de la méthode TPS

Les principaux avantages de la technique TPS [(Transigent Plane Source ou Hot Disk) sont :

- Elle ne demande pas un matériel sophistiqué.
- Elle peut faire la mesure de plusieurs paramètres thermiques à la fois.
- Elle peut être utilisée pour la mesure d'une large gamme de propriétés et dans différentes conditions (liquides, hautes et basses températures, plaques...).
- L'utilisation de capteurs avec une grande surface permet de couvrir une grande surface à l'échelle du volume élémentaire représentatif.
- La différence entre l'évolution de la température entre la couche d'isolation et le milieu étudié, permet d'étudier des matériaux avec des conductivités thermiques différentes (couches minces).
- Les mesures peuvent être faites sur des échantillons de diverses formes et de différentes tailles, à condition de posséder au moins une surface plane.
- Elle est utilisable pour la mesure des propriétés thermo physiques des matériaux anisotropes
- Estimation extrêmement précise des paramètres : 3 à 5% sur la conductivité thermique.
- Appareil polyvalent et modulable : champ d'application très vaste mesures sur solides, liquides, poudres et pâtes.
- Diversité des environnements de mesure : des températures cryogéniques (-200°C) aux hautes températures (+1000°C).
- Différents modules et options : facilite la réalisation de vos mesures.

IV.7.3. Conception de l'élément TPS

L'élément TPS qui doit être utilisé dans cette méthode doit être constitué d'un élément résistif jouant, à la fois, le rôle de résistance chauffante et de capteur de température. Il peut, en principe, avoir plusieurs formes (rectangulaire, disque, etc.) et plusieurs tailles suivant la configuration géométrique de l'échantillon on, le type de matériau utilisé. Pour des raisons de commodité tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, deux configurations ont été retenues pour le modèle résistif TPS [40], la forme rectangulaire et la forme disque (figure IV.3). Cependant il existe plusieurs tailles du capteur afin de pouvoir effectuer des mesures sur des échantillons de différentes dimensions.

Dans ce travail, l'élément TPS utilisé est en forme de disque, dont le capteur TPS est constitué d'une feuille de métal en Nickel en forme de spirales bifilaires insérées entre deux couches isolantes en Kapton, Teflon ou Mica pour des températures inférieures à 200°C. Les épaisseurs de la feuille et de la couche de Kapton sont respectivement de 10 et 25 µm. Les diamètres effectifs des spirales bifilaires sont de 20 et 30 mm et ceux de la couche de Kapton de 25 et 40 mm, Déclinable en plusieurs disques de rayon de 0.5 à 30 mm.

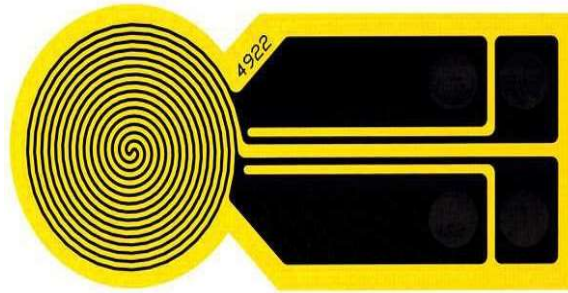


Figure IV. 15 : Vue d'une sonde Hot disc.

IV.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des essais de caractérisation des matériaux étudiés et du matériel associé.

L'étude de caractérisation des matériaux utilisés sa teneur montre que :

- Le sable est un sable très propre.

L'étude de la composition du béton de plâtre et déchets de caoutchouc et les résultats des essais physico-mécaniques des bétons de plâtre élaborés, sont étudiés au chapitre suivant.

Chapitre V

**Comportement thermomécanique des bétons
de Plâtre légers à base des Déchets caoutchouc**

V.1. Introduction

L'incorporation des déchets de caoutchouc est réalisée afin d'améliorer son pouvoir isolant, compte tenu de l'effet de paramètre liés aux billes qu'est le dosage des granulats légers sur le comportement physico-mécanique des bétons de plâtre, on va examiner dans ce chapitre, l'influence du pourcentage des granulats de déchets de caoutchouc sur les propriétés physique telle que : la masse volumique et la absorption et mécaniques : la résistance à la compression et à la flexion, traction et thermiques : la conductivité .

V.2. Formulation des bétons de plâtre légers

L'absence d'une méthode universelle pour la formulation des bétons de plâtre, nous a conduits à sure les recommandations pour la construction en plâtre donnée par CNERIB [22].

-Tout d'abord on fixe le rapport $E/P = 0.60$ égal aux taux de gâchage à saturation.

-Pour la sable, on prend un rapport $S/P = 0.50$ en poids recommandé par le CNERIB, car un excès de sable diminue les propriétés mécaniques des matériaux à base de plâtre selon le guide [22].

-Concernent les granulats légers, on a essayé d'incorporer les granulats de déchets de caoutchouc dans la matrice : mortier de plâtre (plâtre + sable), le pourcentage de granulats utilises et de 0, 5% à 55 % avec un pas de 10 % par substitution volumique du sable.

Les éprouvettes sont de forme prismatique selon les diamètres maximaux des granulats ; on travaille avec :

BPDC : Béton Plâtre Déchets de Caoutchouc

- $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$.

Les résultats de la formulation des bétons de plâtre légers à base des granulats de déchets de caoutchouc est illustré sur les tableaux ci-dessous :

Tableau V.1 : Compositions pondérales de BPDC

| Pourcentage de déchets de (%) caoutchouc | Masse de sable (g) | volume (cm ³) | Masse de déchets de caoutchouc | Masse de sable (g) | Masse de plâtre (g) | Masse de l'eau (g) |
|--|--------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 0 | 1000 | 400 | 256 | 1000 | 2000 | 1200 |
| 5% | 50 | 20 | 12.8 | 950 | 2000 | 1200 |
| 15% | 150 | 60 | 38.4 | 850 | 2000 | 1200 |
| 25% | 250 | 100 | 64 | 750 | 2000 | 1200 |
| 35% | 350 | 140 | 89.6 | 650 | 2000 | 1200 |
| 45% | 450 | 180 | 115.2 | 550 | 2000 | 1200 |
| 55% | 550 | 220 | 140.8 | 450 | 2000 | 1200 |

V.3. Caractérisation du béton durci

V.3.1 Caractéristiques physiques des Bétons de plâtre

a. Masse volumique apparente des bétons

Les éprouvettes 40×40×160 mm³ sont pesées régulièrement au cours du temps et cela à l'aide d'une balance avec précision de 0.1g. Les masses en fonction en jours jusqu'à 28 jours sont mesurées lors de cette étude.

Les résultats de la variation de masse volumique du **BPDC** sont illustrés sur la figure V.2 et le tableau A4 (voir l'annexe).

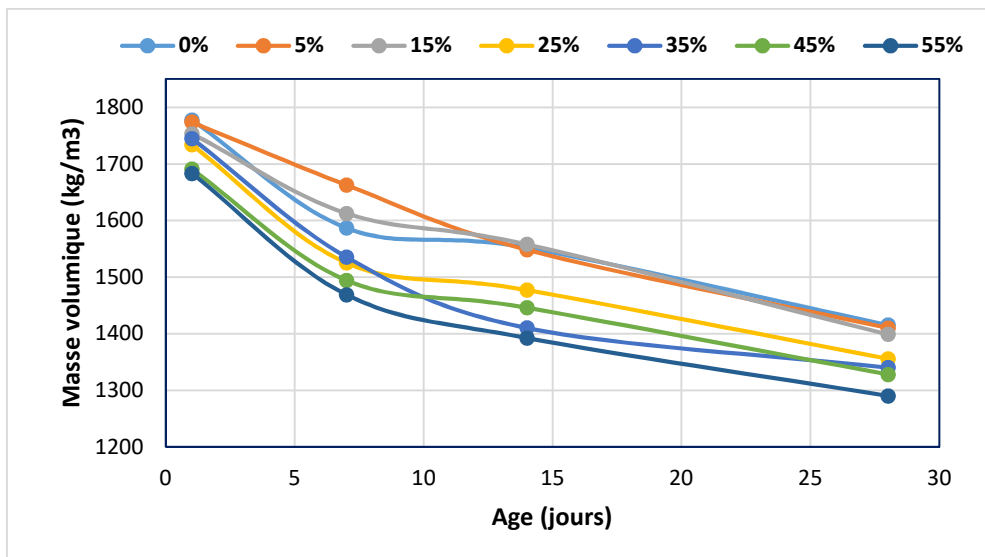


Figure V.1 : Variation de la masse volumique de BPDC

Les valeurs de la masse volumique mesurées à 28 jours sont illustrées par la Figure V.2.

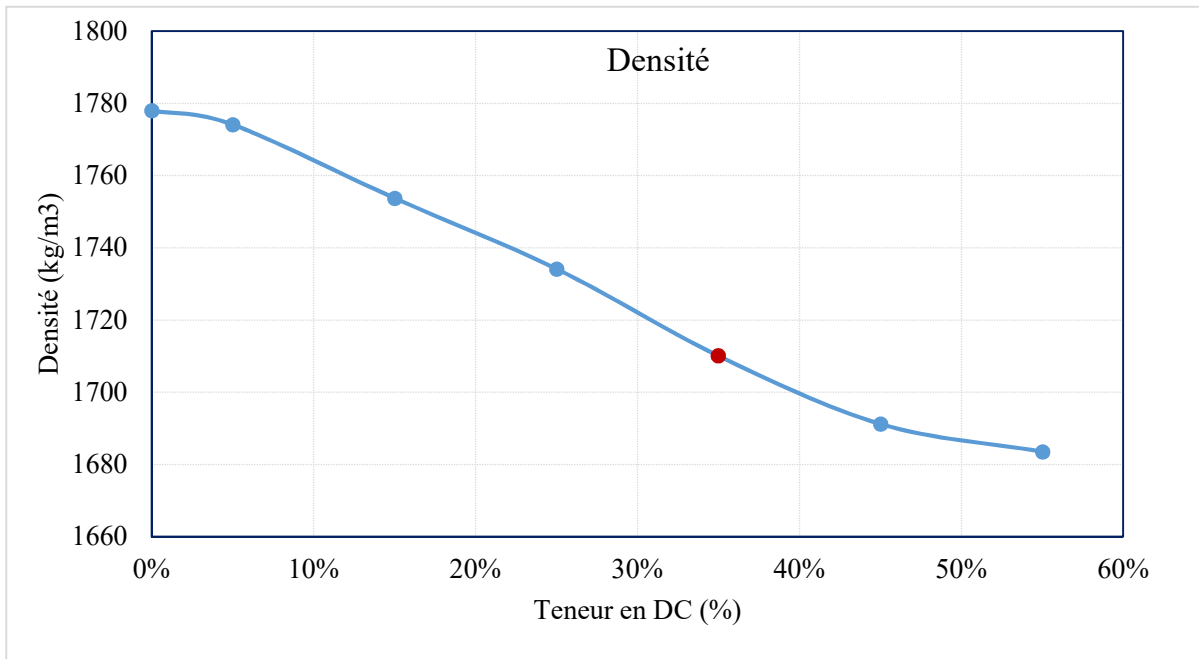


Figure. V. 2 : Variation de la densité des composites étudiés en fonction de la teneur en granules de caoutchouc.

Tableau V.2 : Variation de la masse volumique de BPDC

| | 1 jour | 7 jours | 14 jours | 28 jours |
|------------|--------|---------|----------|----------|
| 0% | 1778.1 | 1587.1 | 1552.3 | 1415.6 |
| 5% | 1774.2 | 1662.9 | 1548.4 | 1410.2 |
| 15% | 1753.8 | 1612.9 | 1558.2 | 1399.2 |
| 25% | 1734.2 | 1525.4 | 1477.3 | 1355.9 |
| 35% | 1710.1 | 1535.9 | 1410.5 | 1387.5 |
| 45% | 1691.2 | 1494.5 | 1446.1 | 1328.1 |
| 55% | 1683.5 | 1469.1 | 1392.6 | 1290.2 |

D'après les figures V .1, V .2, la masse volumique apparente des bétons élaborés (BPDC) diminue rapidement aux 7 premiers jours due à l'évaporation de l'eau, puis elle commence à se stabiliser à partir de l'âge de 14 jours. En augmentant le dosage en granules déchet de caoutchouc la masse volumique décroît.

On a enregistré une diminution de la masse volumique apparente de l'ordre de 9 % pour

le BPDC, et cela par rapport au béton témoin (0%).

Cette diminution de la masse volumique du matériau peut être due à la faible masse volumique des granulats de déchets de caoutchouc introduites, nos résultats sont en accord avec les études des matrices cimentaire et études des matrices plâtre léger avec granulats de liège [32].

b- Absorption d'eau par capillarité des bétons légers de BPDC

L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué sur des éprouvettes (40×40) mm².

La **figure (V .3)** montre l'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps.

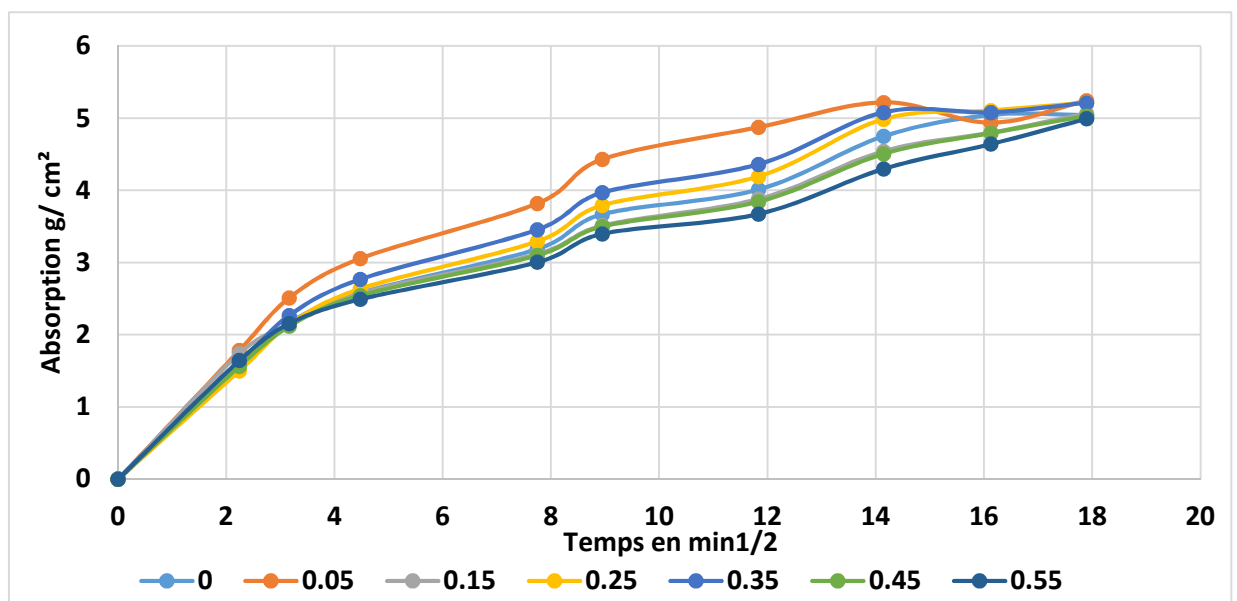


Figure V .3 Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour BPDC

D'après les résultats obtenus on remarque que :

- L'augmentation des dosages des granulats, pour chaque type des granulats, entraîne une diminution d'absorption d'eau,
- la diminution moyen pour le BPDC est 53.89 %.

V.3.2 Caractéristiques mécaniques

c- Variation de la résistance à la flexion

Les résultats de la variation de résistance à la flexion des **BPDC** est illustré sur tableau V.3 et la **figure V.4**.

Tableau V .3 : Variation de la résistance à la flexion des BPDC en fonction de l'âge

| | Rf 7 (MPa) | Rf 14 (MPa) | Rf 28 (MPa) |
|-----|------------|-------------|-------------|
| 0% | 4.4 | 4.7 | 5 |
| 5% | 4.05 | 4.6 | 4.65 |
| 15% | 3.15 | 4.3 | 4.4 |
| 25% | 3.05 | 3.25 | 4.3 |
| 35% | 2.7 | 3.6 | 3.8 |
| 45% | 2.1 | 3 | 3.3 |
| 55% | 2 | 2.5 | 3 |

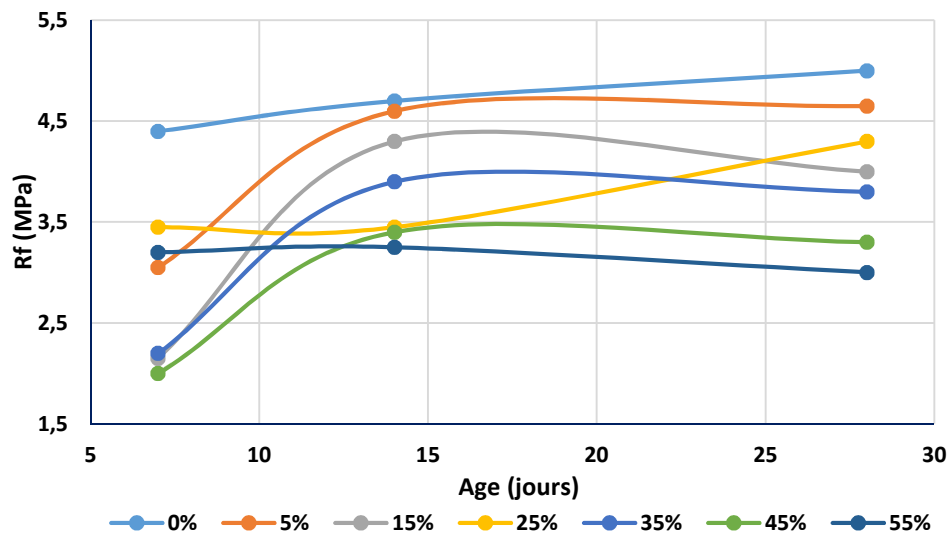


Figure V .4 : Variation de la résistance à la flexion des BPDC, en MPa en fonction de leurs âges.

Les résultats de la variation de résistance à la flexion à 28 jours en fonction de pourcentage des granulats du BPDC est illustré sur la figure V .5.

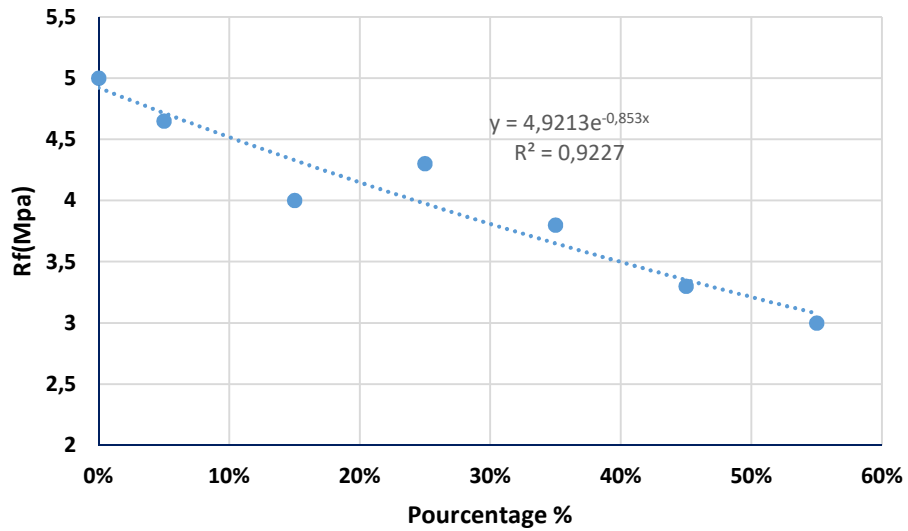


Figure V .5 ÷ Variation de la résistance à la flexion de BPDC en MPa en fonction de pourcentage des granulats

b. Variation de la résistance à la compression des BPDC, en fonction de leurs âges

Les résultats de la variation de résistance à la compression des BPDC est illustré par le tableau V.4 et la figure V.6.

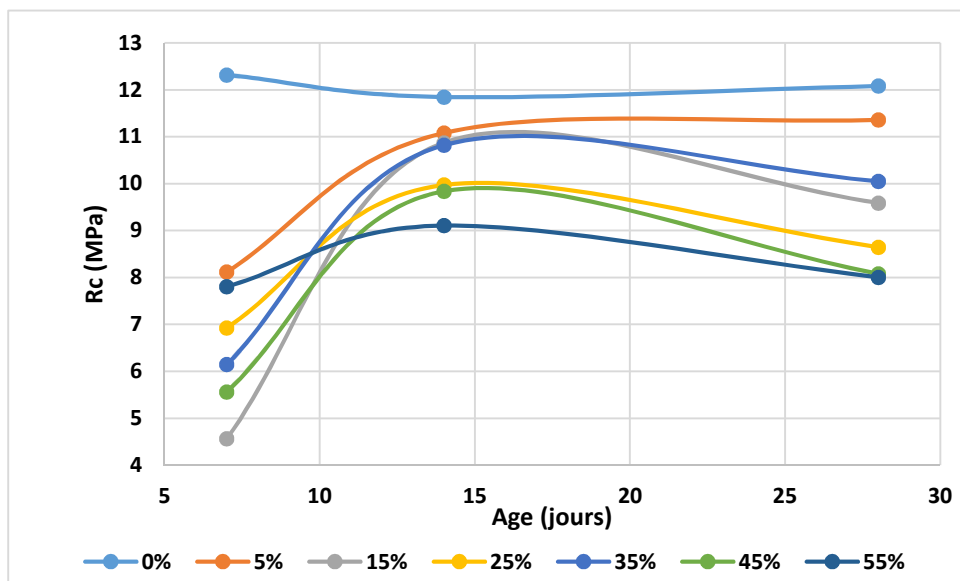


Figure V .6 : Variation de la résistance à la compression de BPDC en MPa en fonction de leurs âges

Variation de la résistance à la compression a 28 jours des bétons de plâtres en fonction de pourcentage des granulats est illustré sur la figure V .7

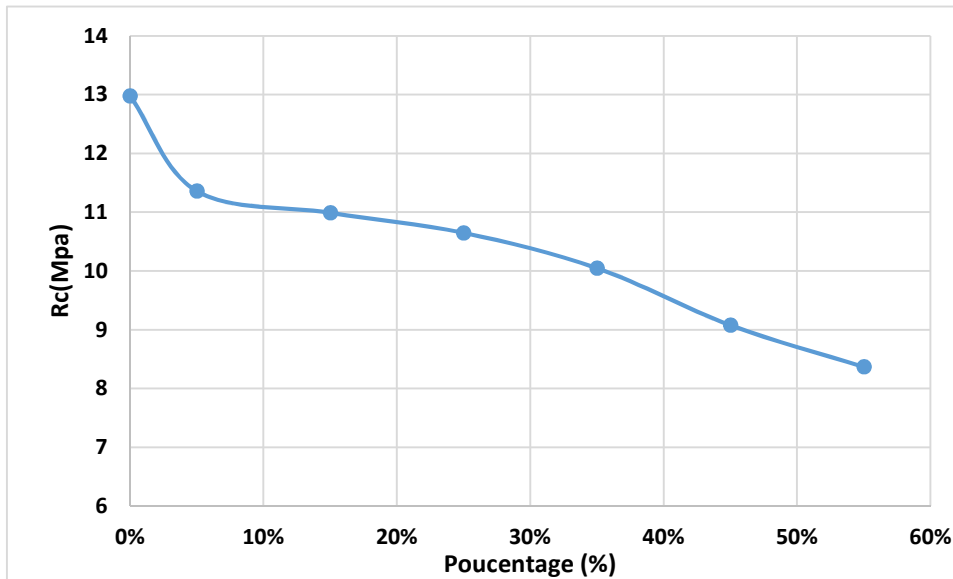


Figure V .7 : Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28jours en MPa en fonction de pourcentage des granulats.

Tableau V .4 : Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jours en MPa en fonction de pourcentage des granulats.

| | Rc 7 (MPa) | RC 14 (MPa) | RC 28 (MPa) |
|-----|------------|-------------|-------------|
| 0% | 12.32 | 12.85 | 12.98 |
| 5% | 8.12 | 11.08 | 11.36 |
| 15% | 8.57 | 10.88 | 10.99 |
| 25% | 6.93 | 9.98 | 10.65 |
| 35% | 6.15 | 9.83 | 10.05 |
| 45% | 5.57 | 9.48 | 9.08 |
| 55% | 4.81 | 8.11 | 8.37 |

D'après les résultats des essais mécaniques effectués de (BPDC) on remarque que ce soit la résistance de compression ou la résistance de flexion, diminue avec l'augmentation de la teneur des DC.

Les figures V .4, V .5 montrent une décroissance dans la résistance de flexion en fonction du dosage des granulats de DC. Le taux de décroissance est de l'ordre de 40 % (de 5 à 3 MPa) pour le BPDC

Les figures V .6, V .7 - Montrent une décroissance dans la résistance à la compression en

fonction du dosage en granulats de DC. Le taux de décroissance est de l'ordre de 35.52 % (de 12.98 à 8.37 MPa) pour le BPPDC

Les gammes de masse volumique dans lesquelles varient ces résistances sont 1415.63 à 1290.23 kg/m³ pour le BPDC.

V.3.3. Variation des caractéristiques physiques en fonction de résistance à la compression

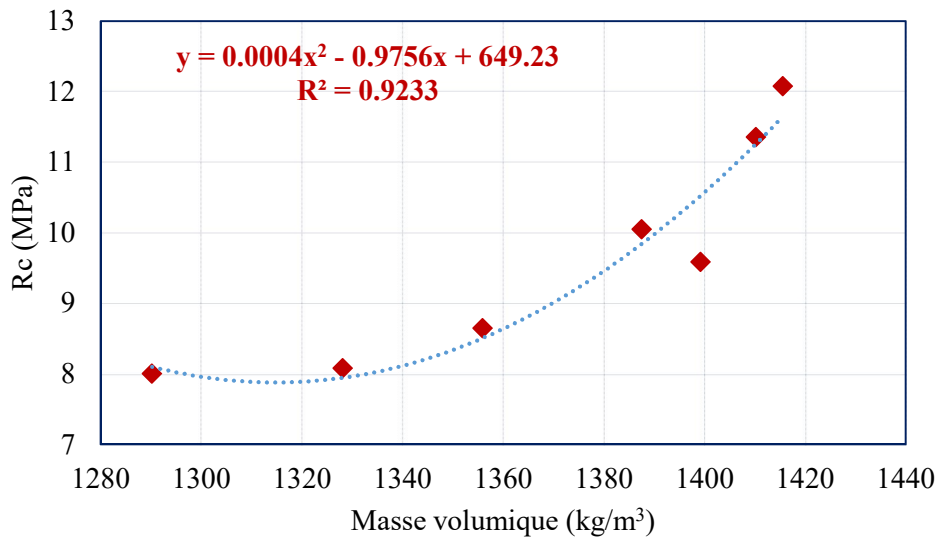


Figure V.8 : Variation de la résistance à la compression de BPDC En fonction de la masse volumique

La figure V.8 représente variation de la résistance à la compression de BPDC, en fonction de la masse volumique, Nous pouvons remarquer que la masse volumique s'accroît dans le même sens que la résistance à la compression.

La Figure V.8 montre une forte corrélation avec un coefficient de corrélation proche de 1 suivant une équation polynomiale

V.4 Résultats des caractéristiques thermiques

Le tableau V.5 présente les résultats de la caractéristique thermique mesurée (BPDC) pour différents pourcentages de DC.

Tableau V .5 : Résultat de l'essai thermique du BPDC

| | Conductivité thermique λ (W. m ⁻¹ .K ⁻¹) | Densité ρ (Kg/m ³) |
|-----|--|--|
| 0% | 0.678 | 1415.625 |
| 5% | 0.646 | 1410.156 |
| 15% | 0.674 | 1399.218 |
| 25% | 0.613 | 1355.859 |
| 35% | 0.593 | 1340.5 |
| 45% | 0.546 | 1328.125 |
| 55% | 0.548 | 1290.234 |

1. Variation de la conductivité thermique λ en fonction de pourcentage des granulats %

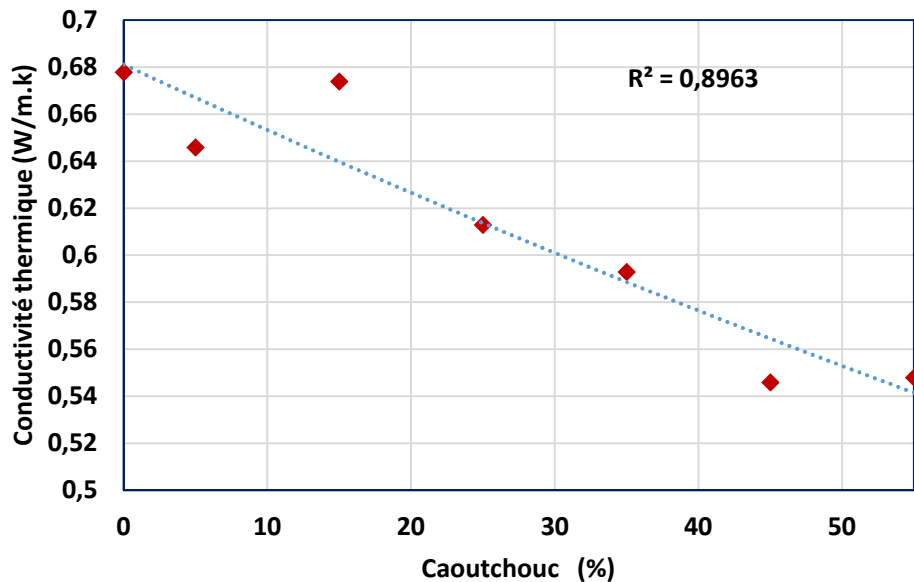


Figure V .9. Variation de la conductivité thermique en fonction de pourcentage de granulats de caoutchouc

D'après la figure V .9 on constate que la conductivité thermique décroît avec l'augmentation du pourcentage de granulats de déchet de caoutchouc et cela pour les compositions élaborées est en accord avec la littérature [32,40].

- la conductivité thermique obtenue est de l'ordre de 0.548 W/ (m.k) pour un pourcentage de DC 55% et on a enregistré une diminution de 19.17 % par rapport au béton témoin, elle est d'environ 78.9 % moins que celle d'un béton ordinaire.

- La conductivité thermique a nettement diminué par ajouts granulats de DC, nos résultats sont en accord avec les études des matrices cimentaire et granulats légers.

- Variation de la conductivité thermique λ en fonction de masse volumique

La figure V .14 représenté la variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.

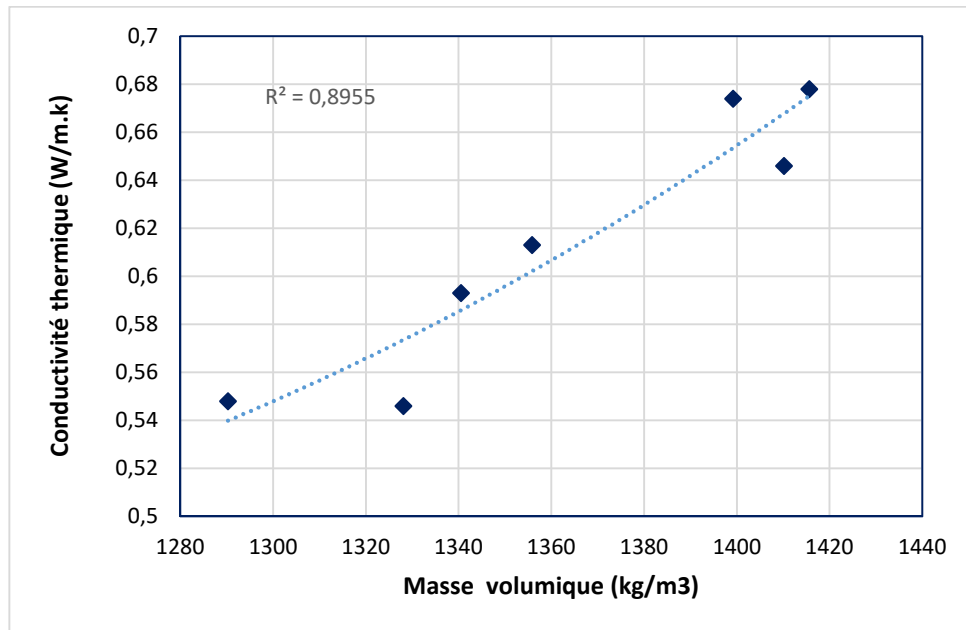


Figure V. 10 : Variation de conductivité thermique λ
En fonction de densité ρ .

D'après la figure V. 9 la conductivité thermique augmente lorsque la masse volumique augmente, car on diminue la proportion de vides, dans le matériau ; en effet l'ajout de granulats de DC à la matrice conduit à une variation de la densité. Plus la teneur en DC est importante, plus la masse volumique n'est faible. On en déduit donc que la contribution de l'augmentation de la porosité du fait de l'ajout de type de granulats joue un rôle important dans l'allègement et dans la diminution de λ du matériau.

Cependant il n'est pas évident que ces valeurs assez faibles des conductivités thermiques leur procurent la qualité d'isolant. Par conséquent une analyse complémentaire des autres paramètres s'avère indispensable

V.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des essais physico-mécaniques du béton de plâtre caoutchouteux. Malgré la chute de résistance envisagée sous l'effet de l'introduction du caoutchouc, des résultats encourageants sont obtenus sur la performance thermique du matériau élaboré, car le caoutchouc a permis de réduire la conductivité thermique et par conséquent améliorer son aspect isolant.

Conclusion Générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des déchets de caoutchouc. Il avait pour but d'élaborer un nouveau matériau isolant. La procédure envisagée présente un aspect économique important, d'une part, et participe à la protection de l'environnement, d'autre part. Pour atteindre ce but une étude du comportement mécanique et thermique a été menée dans laquelle une partie des agrégats minéraux sont remplacés par le caoutchouc. Sur la base des résultats obtenus, les principales conclusions peuvent se résumer comme suit :

- L'étude bibliographique a montré la possibilité d'utilisation du béton léger dans plusieurs domaines malgré de sa résistance mécanique relativement faible (en comparaison avec le béton conventionnel), il présente d'autres propriétés intéressantes telles que la légèreté, la bonne capacité d'isolation phonique et thermique, ce qui permet de l'employer dans plusieurs applications de Génie Civil.
- Suite à l'introduction de caoutchouc la densité varie de 1415.63 à 1290.23 kg/m³. Ce comportement résulte par le fait que la densité du caoutchouc est plus faible par rapport au granulats naturels substitués.
- L'absorption d'eau par capillarité diminue avec l'augmentation du dosage de caoutchouc dans le mélange.
- La résistance en compression diminue de 12.98 à 8.37 MPa lorsque le caoutchouc est ajouté avec un taux de 55%. Les résultats obtenus confirment une relation tout à fait évidente entre la densité et la résistance mécanique. Plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est élevée. De même analogie la résistance en flexion diminue de 5 à 3 MPa
- La résistance obtenue reste bien dans les normes exigées pour un béton de structure et isolation et béton d'isolation (classe II, classe III) conformément au classement fonctionnel de la RILEM. D'autre part, la résistance satisfait les exigences du guide ACI 213R-87 (béton léger de faible).
- La conductivité thermique pour le composite contenant 55% du caoutchouc est de l'ordre de 0.548 W/m.k. En comparaison avec le mélange de référence (sans caoutchouc), elle diminue par 19.17 %.

Toutefois, les résultats obtenus sont encourageants puisque le caoutchouc contribue à la réduction de la capacité du transfert de température à travers le matériau. Le composite élaboré satisfait les exigences techniques en vigueur liées à la résistance minimale requise et le potentiel d'isolation pour un matériau destiné à l'isolation thermique dans les bâtiments.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Chusid, M. (1998)**. The alchemy of a new material (Autoclaved aerated concrete imbues a common building material with a number of architectural virtues). *Architectural Record*, 186(1), 123-126.
- [2] **Carmichael, J. (1986)**. Pumice concrete panels. *Concrete International*, 8(11), 31-32.
- [3] **American Concrete Institute, (1970.)**, Guide pour le béton de structure à base de granulats légers, Traduction du CATED, SDT BTP.
- [4] **ADAM. NEVILLE, (2000)** : propriétés des bétons, traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris,,p 470
- [5] **Yang.k (2008)** ;caractérisation mécanique des bétons de granulats légers ,expérience et modélisation ,thèse de doctorat de l'université de Cergy –pontoise
- [6] **Short, A., & Kinniburgh, W.** Lightweight Concrete, 1978.
- [7] **ACI, B. (1999)**. 213R-87, guide for structural lightweight aggregate concrete. *American Concrete Institute International*
- [8] **RILEM (1970)**: Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13.PP 60-69.
- [9] **Bentchikou, M. (2008)**. Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique: Cas de béton de fibres de papiers recyclés
- [10] **BENNACER S,CHEBABHI M, (2017)** : Elaboration d'un béton de plâtre allégé par des déchets industriels en vue de leur utilisation dans l'isolation des bâtiments : mémoire master Académique , Université Mohamed Boudiaf – M'sila
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile_expans%C3%A9e argile expansé
- [12] <https://www.thespruce.com/perlite-definition-and-types-1902787> EPS (expanded Perlite soil)
- [13] <https://www.flexicon.fr/Materiaux-geres/Cendres-volantes.html> Cendres volante
- [14] [ECOBIOTEX%20-%20Schiste%20Expansé%20\(2\).pdf](#) Schiste Expansé
- [15] <http://www.nobatek.inef4.com/wp-content/uploads/2017/10/LS-101.pdf> laitier refroidis a l'air
- [16] **BEDERINA M, (2007)** : Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons de sable à base de déchets de bois -Thèse de doctorat ENP Alger.
- [17] **CEREZO, V. (2005)**. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustique d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. 2005. 243 f.

INSA Lyon.

- [18] AAC EURO-INTERNATIONAL COMMITTEE FOR CONCRETE 1978. Autoclaved aerated concrete: CEB manual of design and technology. Construction Press,
- [19] STEOPOE A. (1970):: "La durabilité du béton", Eyrolles, Paris.
- [20] Lafarge [.www. Lafarge.fr](http://www.Lafarge.fr)
- [21] JEAN. FESTA." Le plâtre et ses applications traditionnelles et modernes". Edition Eyrolles, 1996.
- [22] Papadakis M, (1970) : Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre, édition Dunod
- [23] Costes.J (1981) *Le plâtre et ses applications traditionnelles et modernes*". Edition Eyrolle
- [24] Djoudi .A (2001) caractérisation structurale et rhéologique du béton de plâtre et leurs renforcements par les fibres de palmiers dattier, mémoire de Magister de l'université de Laghouat.
- [25] Hamouda JAFFEL. Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. PhD thèses, Ecole Polytechnique, 2006.
- [26] www.ruedeslumieres.morkiltu.org
- [27] Vimrova A., Keppert M., Svoboda L., Cerny R., Light weight gypsum : Design strategies for multifonctionnory. Journal of cement concrete composite 33, 2011, pp.84-89.
- [28] C.N.E.R.I.B., Recommandations pour la construction en plâtre. Ministère de l'habitat, Centre national d'études et de recherches intégrées au bâtiment, 1993.
- [29] Abdelmoumen Chaker A., Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien. Thèse de doctorat. Université de Constantine. 1999.
- [30] www.jeanduppe.rex.ch/site/gypse.html
- [31] G.Ddreux, Nouveau guide du béton, édition Eyrolles, paris, 1995.
- [32] Zitani.I, (2011) caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre à base de granulats de lièges : mémoire d'ingénieur LUAT DE Laghouat.
- [33] F. BELABDELOUAHAB, Z. DJIDJELI RECHERCHE -VALORISATION DES PNEUMATIQUES-USAGES DANS LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT
- [34] Habib Trouzine et al « Problématique des pneumatiques usagés en Algérie »
- [38] Philippe Gotteland et al « Réponse au défi de la valorisation des déchets de pneus; comportement mécanique et modélisation numérique de mélanges de copeaux de pneus – sol »
- [35] MOUSSAI BOUBAKER, SEGHIRI MOHAMED MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Béton compacté avec des ajouts granulats caoutchoucs. Juin 2009

[36] Etude d'un Projet Industriel de Fabrication d'articles en Caoutchouc pour Automobiles

[37] Amar Benazzouk, Omar Douzane, « Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment »

[39] Meddah A. et al.

Beddar, M., Meddah, A. and Belagraa, L. (2017) 'Feasibility of using fibrous waste in cement-based material', *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*, 246. doi: 10.1088/1757-899X/246/1/012034.

Belmiloud, M. and Zidani, S. (2013) *Etude de la porosité et de la perméabilité d'un béton compacté routier contenant des copeaux de caoutchouc*. Université de BBA.

BENNECER, S. (2018) *Elaboration d'un béton de plâtre allégé par des déchets industriels en vue de leur utilisation dans l'isolation des bâtiments*. Université de M'sila. Available at: <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/2342>.

Bensaci, H. and Yacine, M. (2014) *Amélioration de la performance d'un béton compacté au rouleau contenant des particules en caoutchouc*. Université BBA.

Djoudi, A. (2015) *Etude de la durabilité et du comportement thermo-phonique des bétons de plâtre renforcés par des fibres végétales du palmier dattier*. ENP d'Alger.

Meddah, A. (2015) *Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques*. ENP d'Alger.

Meddah, A. et al. (2017) 'Study of the effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the performance of rubberized roller-compacted concrete pavement', *Innovative Infrastructure Solutions*. doi: 10.1007/s41062-017-0068-5.

Meddah, A., Bali, A. and Beddar, M. (2015) 'Valorization of rubber waste in concrete pavement', in *Journées d'étude de Génie Civil JEGC 2015*. M'sila University, Algeria, pp. 47–53.

Meddah, A., Beddar, M. and Bali, A. (2014) 'Experimental study of compaction quality for roller compacted concrete pavement containing rubber tire wastes', in *Sustainability, Eco-Efficiency and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management - Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Infrastructure, ICTI 2014*.

Meddah, Abdelaziz, Beddar, M. and Bali, A. (2014) 'Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement', *Journal of Cleaner Production*, 72, pp. 187–192. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.02.052.

Meddah, A., Laoubi, H. and Bederina, M. (2020) 'Effectiveness of using rubber waste as

aggregates for improving thermal performance of plaster-based composites’, *Innovative Infrastructure Solutions*, pp. 1–9. doi: 10.1007/s41062-020-00311-0.

Meddah, A. and Merzoug, K. (2017) ‘Feasibility of using rubber waste fibers as reinforcements for sandy soils’, *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), p. 5. doi: 10.1007/s41062-017-0053-z.

Moussa, H. and Belmegherbi, D. (2013) *Etude de l’effet de l’ajout de la poudrette de polymère sur les caractéristiques de résistance et de déformabilité d’un béton routier*. Université de BBA.

Annexe

Tableau A1 : Analyse granulométrique du sable .

| <i>Dimensions des mailles carres (mm)</i> | <i>Refus partiels Ri en g</i> | <i>Refus cumulés Rn en g</i> | <i>Refus cumulés en %(réf. M1)</i> | <i>Tamisâts cumulés %</i> |
|---|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| <i>5</i> | <i>1</i> | <i>1</i> | <i>0.05</i> | <i>99.95</i> |
| <i>2.5</i> | <i>43</i> | <i>44</i> | <i>2.2</i> | <i>97.8</i> |
| <i>1.25</i> | <i>178</i> | <i>222</i> | <i>11.1</i> | <i>88.9</i> |
| <i>0.63</i> | <i>559</i> | <i>781</i> | <i>39.05</i> | <i>60.95</i> |
| <i>0.315</i> | <i>903</i> | <i>1684</i> | <i>84.2</i> | <i>15.8</i> |
| <i>0.16</i> | <i>255</i> | <i>1939</i> | <i>96.95</i> | <i>3.05</i> |
| <i>0.08</i> | <i>53</i> | <i>1992</i> | <i>99.6</i> | <i>0.4</i> |
| <i>Fond</i> | <i>8</i> | <i>2000</i> | <i>100</i> | <i>0</i> |

Tableau A4 : Variation de la masse volumique de BPDC

| % | 1 jour | 7 jours | 14 jours | 28 jours |
|-----|--------|------------|------------|------------|
| 0% | 1778.1 | 1587.10938 | 1552.34375 | 1415.625 |
| 5% | 1774.2 | 1662.89063 | 1548.4375 | 1410.15625 |
| 15% | 1753.8 | 1612.89063 | 1558.20313 | 1399.21875 |
| 25% | 1734.2 | 1525.39063 | 1477.34375 | 1355.85938 |
| 35% | 1745.1 | 1535.9375 | 1410.54688 | 1387.5 |
| 45% | 1691.2 | 1494.53125 | 1446.09375 | 1328.125 |
| 55% | 1683.5 | 1469.14063 | 1392.57813 | 1290.23438 |

Tableau A6 : Les résultats de l'essai absorption.de BPDC

| racine de t | 0 | 2.24 | 3.16 | 4.47 | 7.75 | 8.94 | 11.83 | 14.14 | 16.12 | 17.89 |
|-------------|---|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 0.05 | 0 | 1.56 | 2.17 | 2.58 | 3.19 | 3.67 | 4.01 | 4.75 | 5.04 | 5.04 |
| 0.1 | 0 | 1.78 | 2.51 | 3.06 | 3.82 | 4.43 | 4.88 | 5.22 | 4.94 | 5.24 |
| 0.15 | 0 | 2.74 | 2.14 | 2.58 | 3.12 | 3.51 | 3.88 | 4.54 | 4.80 | 3.06 |
| 0.25 | 0 | 1.50 | 2.14 | 2.64 | 3.29 | 3.79 | 4.19 | 4.99 | 5.11 | 5.21 |
| 0.35 | 0 | 1.61 | 2.27 | 2.77 | 3.46 | 3.97 | 4.36 | 5.08 | 5.08 | 5.21 |
| 0.45 | 0 | 1.56 | 2.12 | 2.54 | 3.10 | 3.50 | 3.84 | 4.51 | 4.79 | 5.03 |
| 0.55 | 0 | 1.64 | 2.16 | 2.49 | 3.01 | 3.40 | 3.68 | 4.30 | 4.64 | 4.99 |

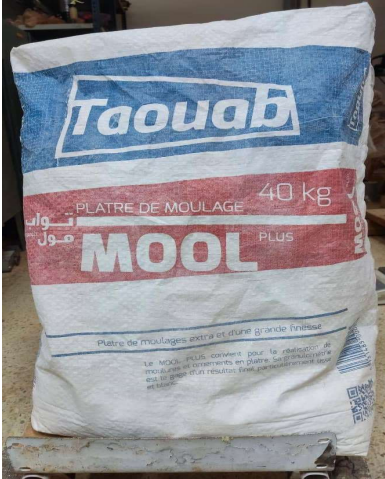
Tableau A8 : Variation de la résistance à la flexion de BPDC en MPa.

| % | Rf 7 (MPa) | Rf 14 (MPa) | Rf 28 (MPa) |
|------------|------------|-------------|-------------|
| 0% | 4.4 | 4.7 | 5 |
| 5% | 3.05 | 4.6 | 4.65 |
| 15% | 2.15 | 4.3 | 4 |
| 25% | 3.45 | 3.45 | 4.3 |
| 35% | 2.2 | 3.9 | 3.8 |
| 45% | 2 | 3.4 | 3.3 |
| 55% | 3.2 | 3.25 | 3 |

Tableau A11: Variation de la résistance à la compression des BPDC mm en MPa.

| % | Rc 7 (MPa) | RC 14 (MPa) | RC 28 (MPa) |
|------------|------------|-------------|-------------|
| 0% | 12.32 | 11.85 | 12.084375 |
| 5% | 8.12 | 11.08 | 11.3625 |
| 15% | 4.57 | 10.88 | 9.590625 |
| 25% | 6.93 | 9.98 | 8.65 |
| 35% | 6.15 | 10.83 | 10.053125 |
| 45% | 5.57 | 9.84 | 8.084375 |
| 55% | 7.81 | 9.11 | 8.00625 |

***Figure A1 : Matériaux utilisés.**



Plâtre



Sable



Déchets de caoutchouc



Malaxeur utilisés

