

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



DOMAINE : SCIENCE TECHNOLOGIE
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX

N° :

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

Par : BENNACER Salih

CHEBABHI Mohamed

Intitulé

**Elaboration d'un béton de plâtre allégé par des
déchets industriels en vue de leur utilisation
dans l'isolation des bâtiments.**

Soutenu devant le jury composé de :

BENCHEIKH Mohamed	Université de M'sila	Président
MEDDAH Abdelaziz	Université de M'sila	Rapporteur
BELOUADAH Massaouda	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je dédie ce travail,

À ma famille : ma mère et mon père, frères et mes sœurs

À mes amis et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

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 **MR: MEDDAH Abdelaziz***

*Et **MR: LAOUBI Hamza***

Pour leur aide appréciable, leur disponibilité, et leurs conseils

Fructueux qui me facilité la réalisation de ce travail.

*Je tiens également à remercier **Université Amar Telidji de Laghouat** pour les moyens qu'elle a mis à notre disposition afin de mener à bien notre partie expérimentale.*

Je remercie ma famille et tous mes amis

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

Béton léger

I- les Bétons légers.....	3
I-1. Classification du béton léger.....	4
I-2. Propriétés physique et mécaniques des bétons légers.....	10
I-3. Autres propriétés du béton léger.....	17
I-4. Avantages et inconvénients des bétons légers.....	18
I. Conclusion.....	19

Chapitre II

Recherches bibliographiques

II-1-Généralité sur plâtre.....	20
II-2-Plâtre avec ajouts.....	34
II-3-Mortier de plâtre.....	34
II-4-Béton de plâtre.....	37
II-5-Règlementations du plâtre en Algérie.....	44
II. Conclusion.....	44

Chapitre III

Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales

III.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques.....	45
III-2- Sable de dune.....	53
III-3-Granulats des billes de polystyrène classe 3/8.....	55
III-4-Granulats de déchets de caoutchouc	57
III-5-Méthodes expérimentales.....	59
III-6-Caractéristiques thermiques.....	64
III. Conclusion	68

Chapitre IV

Comportement thermo-mécanique des bétons de plâtre légers à base des déchets industriels

IV-1-Formulation des bétons de plâtre légers.....	70
IV-2-Caractérisation du béton durci.....	71
IV-3-Résultats des caractéristiques thermiques.....	78
IV-4-Variation des caractéristiques thermiques en fonction de résistance à la compression	84
IV. Conclusion.....	85
Conclusion générale.....	87

Liste des tableaux

Chapitre I *Béton léger*

Tableau I.1 : Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87.....	7
Tableau I.2 : Classification des bétons légers selon Kass J.L. et Compbell D (1972).....	5
Tableau I.3 : Les principales caractéristiques des bétons légers.....	8
Tableau I.4 : Différentes classes de la porosité.....	11
Tableau I.5 : Caractéristiques de quelques bétons légers.....	13
Tableau I.6 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux.....	16
Tableau I.7 : Caractéristiques physique et mécanique de béton plâtre liège.....	17

Chapitre II *Recherches bibliographiques*

Tableau II.1 : Phases de déshydratation du gypse.....	24
Tableau II.2 : Production du gypse naturel, en 2009.....	25
Tableau II.3 : Quelques exploitations de gypse en Algérie.....	26
Tableau II.4 : Valeurs des contraintes des essais mécaniques sur éprouvettes en mortier.....	36
Tableau II.5 : Les éléments préfabriqués en plâtre et leurs utilisations.....	40
Tableau II.6 : Normes Algériennes sur les plâtres.....	43

Chapitre III *Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales*

Tableau III.1 : Analyse chimique du plâtre utilisé.....	46
Tableau III.2 : Masse volumique apparente du plâtre.....	50
Tableau III.3 : Finesse des plâtres de construction.....	51
Tableau III.4 : Finesse de mouture du plâtre.....	51
Tableau III.5 : Temps du début de prise et de la fin de prise de plâtre.....	52
Tableau III.6 : Analyse chimique du sable de dune.....	53
tableau-III.7 .Caractéristiques physiques du sable de dune.....	55

Tableau III-8 : Caractéristiques physiques des billes de polystyrène.....	56
Tableau III-9 Caractéristiques physiques des granulats de déchets de caoutchouc.....	58
Tableau III.10: Composition chimique de l'eau de.....	59
Tableau III.11: vitesses de fonctionnement du malaxeur	60

Chapitre IV

Comportement thermo-mécanique des bétons de plâtre légers à base des déchets industriels

Tableau IV.1 : Compositions pondérales de BPLPE polystyrène expansé.....	70
Tableau IV.2: Compositions pondérales de BPDC.....	71
Tableau IV.3 : Résultat de l'essai thermique du BPPSE.....	79
Tableau IV.4 : Résultat de l'essai thermique du BPDC.....	79
Tableau IV-5 : classification fonctionnelle des bétons légers est recommandée par la RILEM...	84

Liste des figures

Chapitre I *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.....	5
Figure I.3 : Différents granulats légers naturels.....	6
Figure I-4: Différents granulats légers artificiels.....	8
Figure I.5 : Porosité du béton.....	11
Figure I.6 : La résistance sur prisme en compression à 28j (MPa) en fonction de la masse volumique.	12
Figure I.7 : Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores	13
Figure I.8 : Trois types de porosité présente dans les matériaux.....	15
Figure I.9 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire	16

Chapitre II *Recherches bibliographiques*

Figure II.1 : Gypse, variété sélénite.....	22
Figure II.2 : Gypse, Sebkha d'Ouargla.....	22
Figure II.3 : Gypse, variété anhydrite.....	22
Figure II.4 : Projection de la structure du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ par WOOSTER en 1936.....	23
Figure II.5: Images MEB des plâtres Prestia obtenues respectivement par voie humide (α) et voie sèche (β)	23
Figure II.6 : Etapes de fabrication du plâtre.....	29
Figure II.7: Famille des liants et produits à base de plâtre.....	31
Figure II.8 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la densité sèche du plâtre.....	32

Figure II.9 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la résistance mécanique du plâtre	32
Figure II.10 : Solubilité des différentes phases du sulfate de calcium en fonction de la température	33
Figure II.11 : Fontis ayant atteint la surface.....	33
Figure II.12: Organigramme de Propriétés physiques et mécaniques du plâtre.....	34
Figure II.13 : Fuseau granulométrique des sables. Analyse granulométrique NF P 18 – 804	35
Figure II.14 : Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier.....	35
Figure II.15 : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton...	41
Figure II.16 Variation de la résistance à la compression des BPL (8/15) en fonction du rapport Liège/Plâtre	42
Figure II.17 : Variation de la résistance à la compression des BPL (3/8) en fonction du rapport Liège/Plâtre	42
Figure II.18 : Variation de la conductivité thermique en fonction du rapport Liège/Plâtre	43

Chapitre III
Caractérisations des matériaux et techniques expérimentales

Figure III. : plâtre utilisé.....	45
Figure III.1 : Diffractomètre de rayons X de l'UATL.....	47
Figure III.2 : Principe de l'essai de diffraction aux rayons X.....	47
Figure III.3 : Diffractogramme de la poudre du plâtre.....	47
Figure III.4 : Diffractogramme de la poudre du Gypse.....	47
Figure III.5 : Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique absolue du plâtre	48
Figure III.6 : Dispositif pour l'essai de récipient et entonnoir à trépied.....	50
Figure III.7 : Récipient standard.....	50
Figure III.8: Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge.....	52
Figure III.9: Détermination du début et fin de prise.....	52
Figure III.10 : Diffragtogramme aux rayons X du sable de dune.....	53

Figure III.11 : Vu général (à grande échelle, MEB.) du sable de dune.....	54
Figure II.12 : Courbes granulométriques de sable de dune.....	54
Figure III.13 : Pycnomètre rempli d'eau + échantillon.....	56
Figure III.14 : Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique de polystyrène expansé	56
Figure III.15 : Courbes granulométriques des granulats de polystyrène expansé 3/8....	57
Figure III.16: la courbe granulométrique de caoutchouc.....	58
Figure III.17 : Malaxeur normalisé pour pâte utilisé.....	60
Figure III.18 : Dimensions d'un malaxeur.....	60
Figure III.19 : Moules utilisés pour l'essai mécanique.....	61
Figure III.20 : Machine utilisée pour la mesure des résistances mécaniques.....	62
Figure III.21 : Dispositif de flexion par trois points.....	62
Figure III.22 : Dispositif de l'écrasement par compression.....	63
Figure III.23.: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.....	64
Figure III. 24 : Schéma de la sonde TPS.....	66
Figure III. 25 : Dispositif de serrage, sonde, éprouvette.....	66
Figure III. 26 : Vue d'une sonde Hot disc.....	67
Figure III.27 : Dispositif expérimental pour la mesure de la caractéristique thermique (méthode TPS).	68
Figure III. 28 : Schéma de la sonde TPS (mesure caractéristiques thermiques du polystyrène)	68

Chapitre IV

Comportement thermo-mécanique des bétons de plâtre légers à base des déchets industriels

Figure IV.1 : Variation de la masse volumique de BPPSE en Kg/m ³	72
Figure IV.2 : Variation de la masse volumique de BPDC.....	72
Figure IV.3 : Variation de la masse volumique de BPDC et BPPSE à 28 jours.....	73
Figure IV.4 : Variation de la masse volumique de BPDC et BPPSE à 28 jours.....	73

Figure IV.5 Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour BPDC....	74
Figure IV.6 : Variation de la résistance à la flexion de BPPSE, en MPa en fonction de leurs âges	74
Figure IV.7 : Variation de la résistance à la flexion des BPDC, en MPa en fonction de leurs âges	75
Figure IV.8 : Variation de la résistance à la flexion de BPPSE et BPDC en MPa en fonction de pourcentage des granulats	75
Figure IV.9 : Variation de la résistance à la compression de BPPSE en MPa en fonction de leurs âges	76
Figure IV.10 : Variation de la résistance à la compression de BPDC en MPa en fonction de leurs âges	76
Figure IV.11 : Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jours en MPa en fonction de pourcentage des granulats	77
Figure IV.12: Variation de la masse volumique de BPPSE en fonction de la résistance à la compression	78
Figure IV.13. Variation de la conductivité thermique en fonction de pourcentage.....	80
Figure IV.14 : Variation de conductivités thermiques λ en fonction de densité ρ	81
figure IV.15 .la variation de la chaleur spécifique en fonction de pourcentage de deux granulats	82
Figure IV.16 .la variation de la diffusivité thermiques en fonction de pourcentage de deux granulats	83
Figure III.17 : Variation de conductivité thermique de bétons de plâtres en fonction de la résistance à la compression	84

Abstract

In this study, producing of insulating material based on plaster concrete designed for civil engineering structures and contained industrial wastes, has been experimentally investigated. The basic idea of this work consists to incorporate two types of wastes, rubber particles and polystyrene beads. These additions were introduced in various percentages: 10, 20, 30, 40 and 50%. 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 industrial wastes, the obtained results show that the inclusion of rubber and polystyrene 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 cette étude la potentialité de produire un matériau isolant à base du béton de plâtre destiné aux constructions et contenant des déchets industriels, a été expérimentalement étudié. L'idée de base de ce travail consiste à incorporer deux types de déchets, des particules caoutchouteuses et des billes de polystyrène. Ces ajouts ont été ajoutés en différents pourcentages: 10, 20, 30, 40 et 50% par rapport au volume total des constituants. La démarche expérimentale entreprise consiste à étudier l'effet de ces ajouts 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 industriels, les résultats obtenus montrent que l'inclusion du caoutchouc et du polystyrène 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.

الملخص

في هذه الدراسة تمت دراسة إمكانية إنتاج المواد العازلة المصنوعة من الخرسانة الجبسية التي تحتوي النفايات الصناعية تجريبيا للمباني والهياكل. والفكرة الأساسية لهذا العمل تتكون من دمج نوعين من النفايات، وهي الجسيمات المطاطية وحببات البولسترين. تم إدخال هذه الإضافات في نسب مختلفة: 10، 20، 30، 40 و50٪ بالنسبة للحجم الإجمالي للمكونات. ويتكون المنهج التجريبي من دراسة تأثير هذه الإضافات على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للمادة. وبالإضافة إلى فوائد بيئية من النهج المقترح في هذه الدراسة، وإنشاء تطبيق جديد يسمح لتثمين النفايات الصناعية، فقد بينت النتائج أن إدراج المطاط والبوليسايرين في الخرسانة الجبسية أدا الى خفض الموصلية الحرارية و نفاذية 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 des matériaux, 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, la 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 des 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 et qui sont

- **Sur le plan « université – secteur industriel »**, 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 bétons de plâtre légers dans la construction, ce qui conduit non seulement à la réduction de la consommation d'énergie 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, ce qui peut contribuer à la protection de notre environnement qui devient de plus en plus pollué par le rejet des déchets tant domestiques qu'industriels.

Ce travail a été divisé en quatre chapitres

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les bétons légers

Le deuxième consacré à des généralités sur le plâtre et les bétons de plâtre et ses utilisations

Le troisième chapitre on a procédé à la caractérisation des matériaux utilisés et techniques expérimentales

Le quatrième chapitre concerne l'étude du comportement physico-mécanique et mesures des propriétés thermiques des bétons de plâtre légers élaborés

Enfin nous terminerons notre étude par une conclusion générale et des recommandations et perspectives en considération les futures recherches

Chapitre I

Béton légers

I- les Bétons légers

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 1850 kg/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].

On regroupe sous le terme « béton léger » l'ensemble des bétons dont la densité est inférieure à celle d'un béton ordinaire (égale à environ 2.4) [3]. Les bétons légers sont des bétons constitués de granulats de faible densité (argile, schiste, bille de polystyrène, particules de bois), ces matériaux sont obtenus par substitution des gravillons traditionnels.

Ces matériaux font référence à des bétons de masse volumique plus faible ($\rho < 1800 \text{ Kg/m}^3$) ils ont une résistance comparable aux bétons de granulats rigides tout en étant de 25% à 35% plus légers [4]. ils sont définis comme des bétons à haute porosité dont la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m³ [5]; la commission L' A.C.I [6] 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 [7].

On note trois dénominations pour ces bétons, soient :

- 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 [8].

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

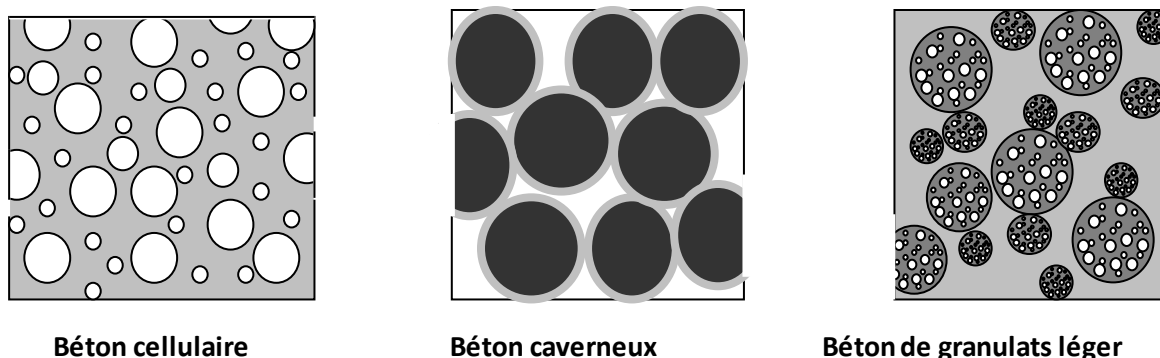


Figure I.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger [9].

I-1. Classification du béton léger

A. Bétons légers de structure

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 [10].

B. 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.

C. 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 entraînement 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) [10].

Le guide ACI 213R-87 [10] 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 [10].

Classification	ρ (kg/m ³)	R _c (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 [11], basée sur les travaux de Kass J.L. et Compbell D(1972) [11] 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) [11]

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:

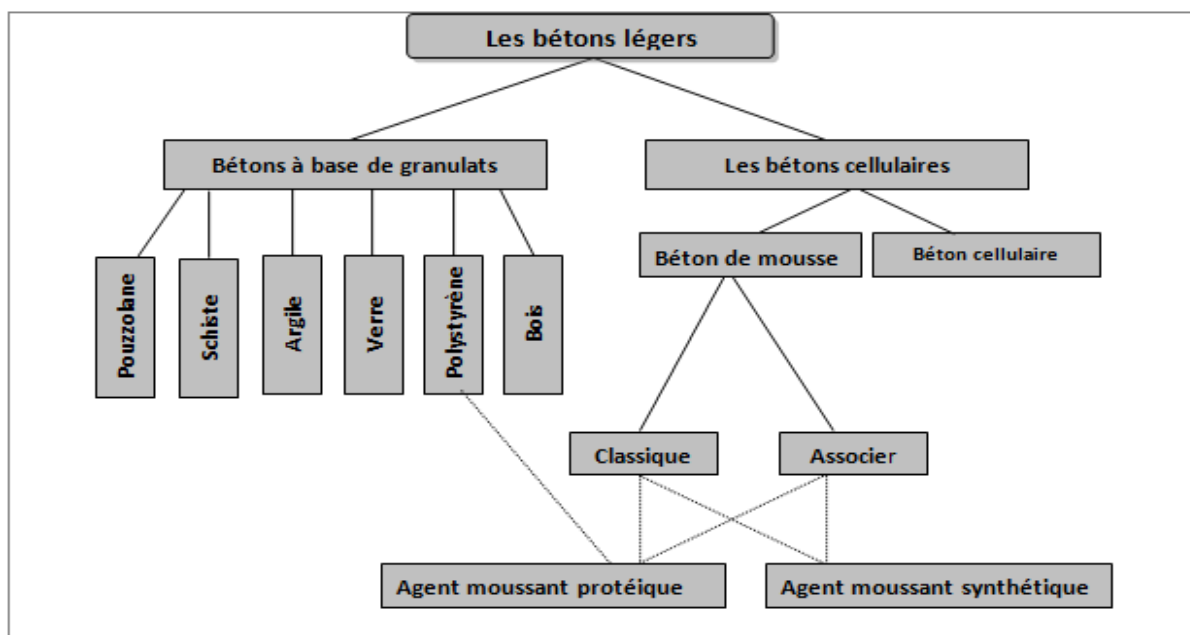


Figure I.2 : Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [12].

✓ Différents types de granulats légers

Les granulats légers se différencient des autres granulats par leur faible masse volumique, celles-ci est inférieure à 1200 kg/m³ selon Rilem [11], 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 [6], 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 :

a) 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 [5]. Les granulats légers naturels ne sont pas très utilisés même si leur emploi permet de confectionner des bétons de résistance moyenne [7].

Ce sont des matériaux minéraux naturels non préparés qui n'ont subi que de traitement mécanique tels que lavage, broyage et tamisage [13,14].

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 [8].

b) 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 certains régions, comme la vase à Taiwan et NYT (NeapolitanYellowTuff) en Italie; soit à partir

de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'PSE (Polystyrène Expandé) [8], 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 :

➤ **Matériaux naturels ayant subi un traitement thermique**

Ces matériaux sont des minéraux naturels préparés [15], ils 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 [7]. Cette catégorie de granulats est la plus importante et on y trouve en particulier: 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 [8].

c) 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.

Le polystyrène expansé (PSE) élément utilisé dans la composition du béton sujet de notre travail est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires.

Le PSE est obtenu à partir d'un polystyrène cristal auquel on a ajouté en cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane, C_5H_{12}) [17].

Le béton léger est obtenu dans cette catégorie de matériaux en remplaçant totalement ou partiellement les agrégats standards par un composé de faible poids (léger) pour atteindre des densités plus faibles, leur masse volumique varie suivant la classe granulométrique de 400 à 1300 kg/m^3 en diminuant le pourcentage de billes de polystyrène constituant le gros granulat par rapport au mortier .

La figure I.4 Présente quelques exemples de granulats artificiels.

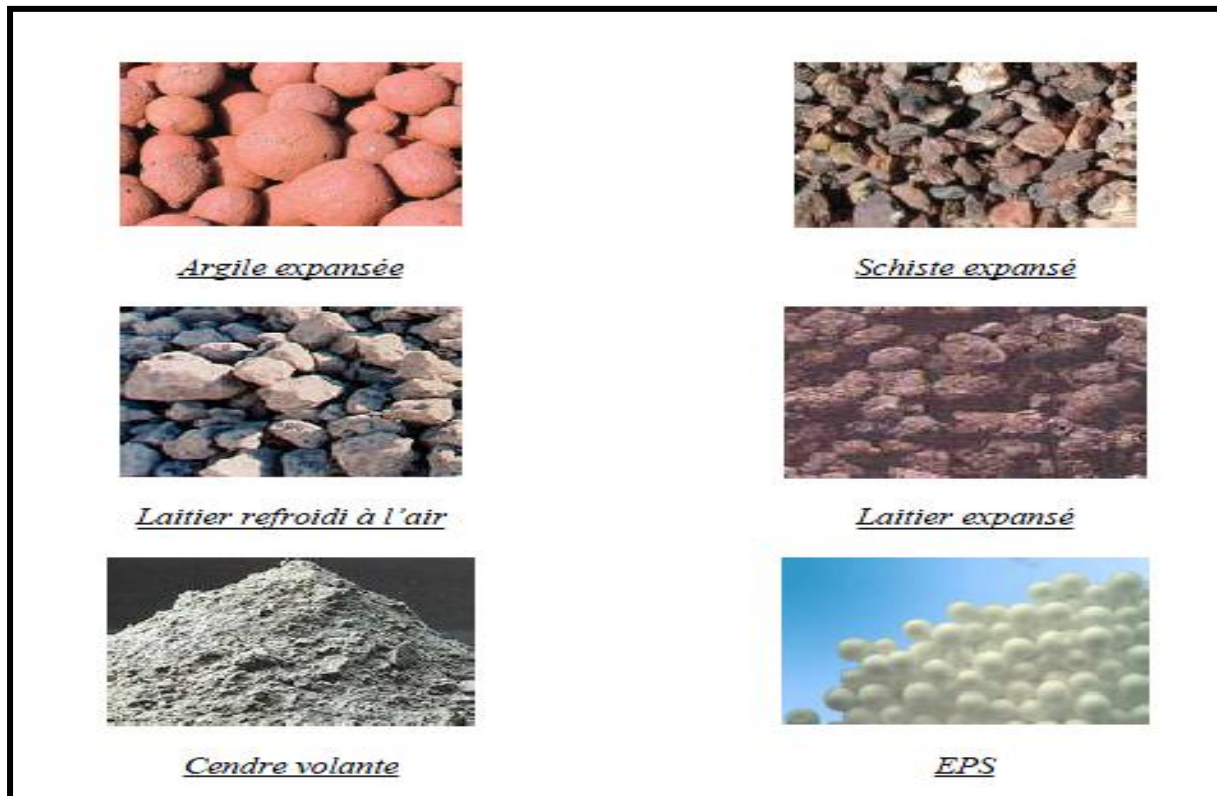


Figure I-4: Différents granulats légers artificiels [8].

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.

Tableau I.3 : Les principales caractéristiques des bétons légers [18].

Type de béton		Masse volumique des granulats (kg/m ³)	Masse volumique sèche du béton (Kg/m ³)	Résistance à la compression à 28jours (MPa)	Retrait de séchage □□m/m)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ K ⁻¹)
Laitier expansé	Fin	900	1850	21	500	0.69
	grossier	650	2100	41	600	0.76
Argile expansée au four giratoire	Fin	700	1200	17	600	0.38
	grossier	400	1300	20	700	0.40

Argile expansée au four giratoire avec sable naturel	grossier	400	1500	20	-	0.57
			1600	35	-	-
			1750	50	-	-
			1900	70	-	-
Argile frittée	Fin	1050	1500	25	600	0.55
Expansée	grossier	650	1600	30	750	0.61
Ardoise expansée au four giratoire	Fin	950	1700	28	400	0.61
	grossier	700	1750	35	450	0.69
Cendres volantes frittées	Fin	1050	1500	25	300	-
	grossier	800	1540	30	350	-
			1570	40	400	-
Cendres volantes frittées avec sable naturel	grossier	800	1700	25	300	-
			1750	30	350	-
			1790	40	400	-
Pierre ponce		500-800	1200	15	1200	-
			1250	20	1000	0.14
			1450	30	-	-
Perlite		40-200	400-500	1.2-3	2000	0.05
Vermiculite		60-200	300-700	0.3-3	3000	0.10
Cellulaire	cendre volante	950	750	3	700	0.19
	sable	1600	900	6		0.22
Cellulaire autoclave		-	800	4	800	0.25

I-2. Propriétés physique et mécaniques des bétons légers

I-2.1. 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/m^3 alors qu'elle se situe autour de 1600kg/m^3 pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900kg/m^3 pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650kg/m^3 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-2.2. Porosités

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 (\AA) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée ϕ_{g} , 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 ϕ_1 . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H. varie entre $0.01\ \mu\text{m}$ et $5\ \mu\text{m}$ et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre $5\ \mu\text{m}$ et $1000\ \mu\text{m}$. L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$\phi_1 = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{liant}}} \dots\dots\dots (\text{I.1})$$

Avec :

V_{vide} : volume des vides contenus dans la matrice de liant (m^3)

V_{liant} : volume total occupé par la pâte de liant (m^3)

Enfin, l'arrangement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement de granulats et du liant) crée des vides supplémentaires, à l'origine de la porosité microscopique du matériau.

$$\phi_{\text{meso}} = \frac{V_{\text{vide}}}{V_t} \dots\dots\dots (\text{I.2})$$

Avec :

V_{vides} : volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule.

V_t : volume total occupé par le matériau (m^3).

La porosité d'après [19] est de l'ordre de 9% d'un béton hydraulique, de 36% d'un béton d'argile expansé, de 75 à 82% d'un béton cellulaire et de 52% d'un béton de bois.

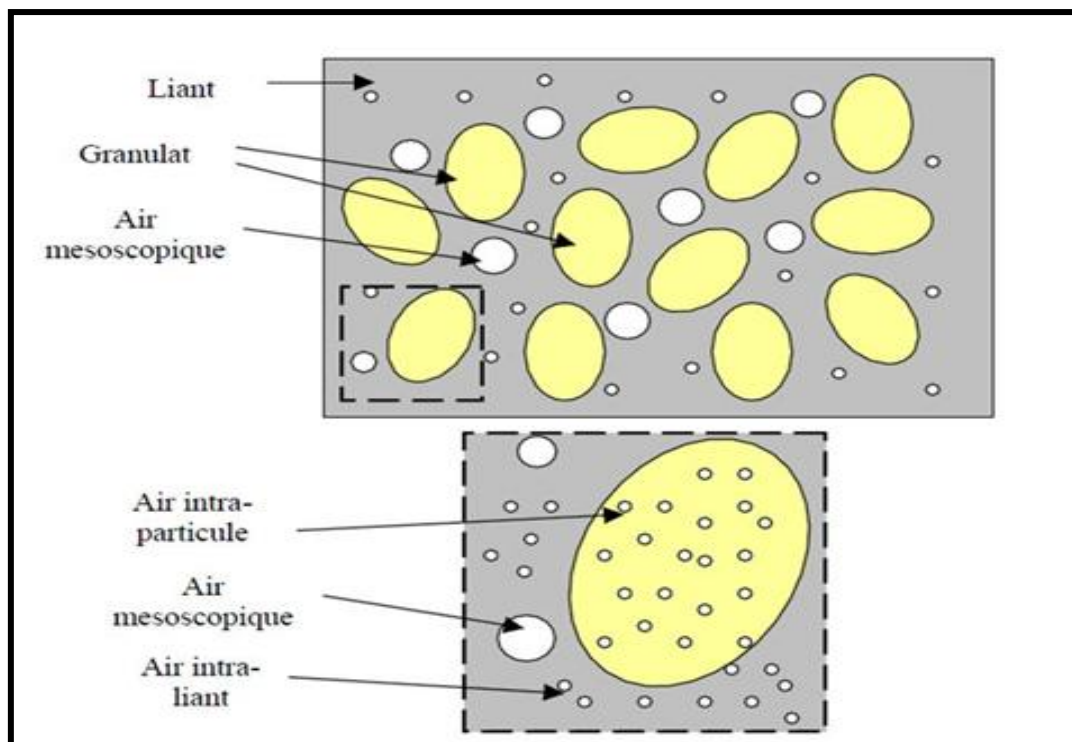


Figure I.5 : Porosité du béton [19].

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 [21].

Tableau I.4 : Différentes classes de la porosité [21].

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-2.3. Comportement et performances mécaniques

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 [19].

Les niveaux de performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre ϕ_g 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 ϕ_g diminue. Des campagnes expérimentales ont mis en relation performances mécaniques et masse volumique ρ des bétons légers. Dans le cas de granulats d'argile expansée de type Liapor [13] a obtenu une relation linéaire entre la résistance en compression et la masse volumique (Figure I.6).

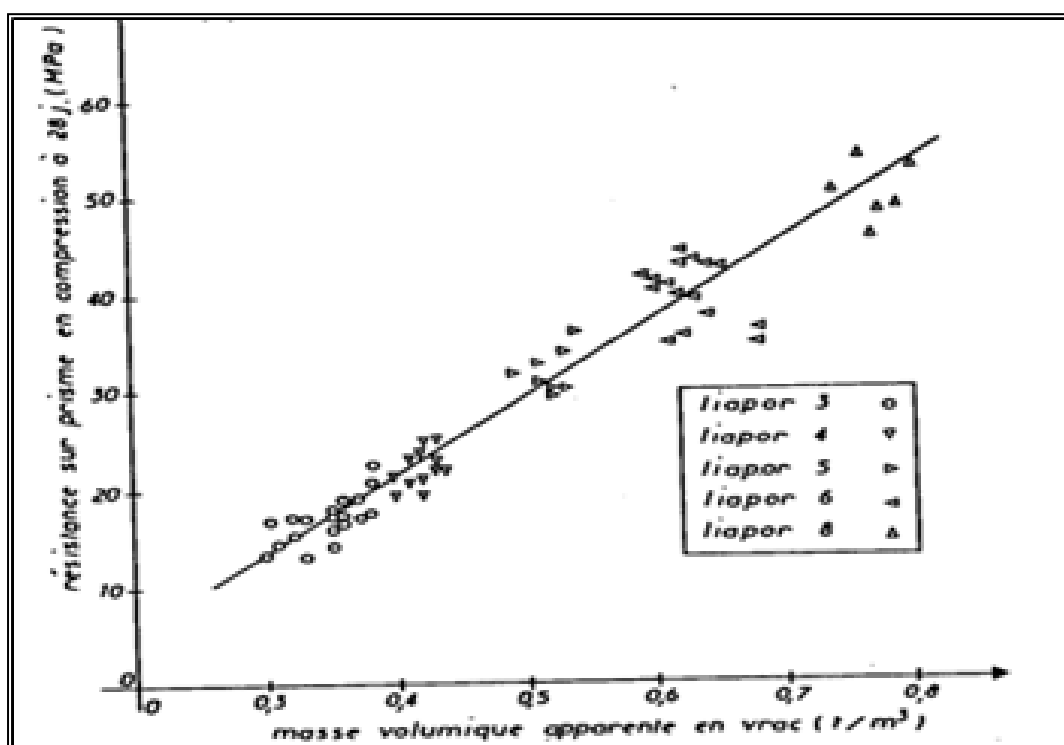


Figure I.6 : La résistance sur prisme en compression à 28j (MPa) en fonction
De la masse volumique [13].

Dans le cas du béton cellulaire, la grande proportion de vides d'air dans le matériau est un facteur essentiel dans le niveau de performances. On distingue deux types de pores: les macropores (diamètre supérieur à 60 μm) et les micropores (diamètre < 60 μm) avec une répartition de 3/4 de macropores pour 1/4 de micropores [23].

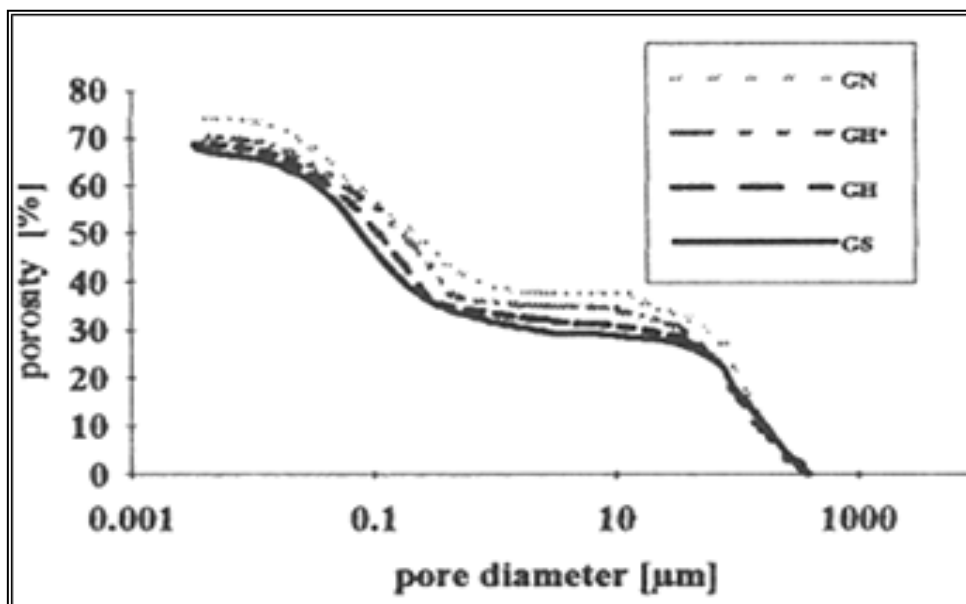


Figure I.7 : Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores [23]

Les caractéristiques de quelques bétons légers sont représentées dans le tableau I.5.

Tableau I.5 : Caractéristiques de quelques bétons légers [19].

Constituants			ρ(kg/m3)	Porosité ε	Rc (MPa)	E (GPa)	ε (m/m)	
Nom	Masse (Kg)	Volume (m3)						
Granulats	Granulat minéral (grés, granite		2600	< 1%	-	60	-	
	Argile expansée		850	60à70%	6à9	-		
	Copeau de bois en vrac		275	75 %	-	10à12		
	Granulat bois Agresta		600	60%	-			
Béton hydraulique	Granulat	755	0.285	2330	9%	30	36	1.10-4
	Sable	925	0.350					
	Ciment	440	0.140					
	Eau	210	0.215					
	Air	-	0.015					
Béton argile	Granulat	351	0.414	1600	36%	25	14	-

expansé	Sable	602	0.230					
	Ciment	400	0.127					
	Eau	193	0.193					
	Air	-	0.025					
Béton cellulaire	Mortier ciment			350-650	75à82%	5	2 à 3	2.10-3
	Air							
Béton de bois	Copeaux de bois	170	0.212	600-900	52 %	3.5à4	-	-
	Ciment	350	0.113					
	Eau	200	0.200					
	Air	-	0.379					
	Sable*	250	0.096					
	Filler*	-	-					

I-2.4. 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-2.5. L'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.8 : Trois types de porosité présente dans les matériaux [19].

I-2.6. 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 [12].

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 $0,60 \text{ W/(m.K)}$ [19]. 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 ($\Phi \approx 80 \%$) 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).

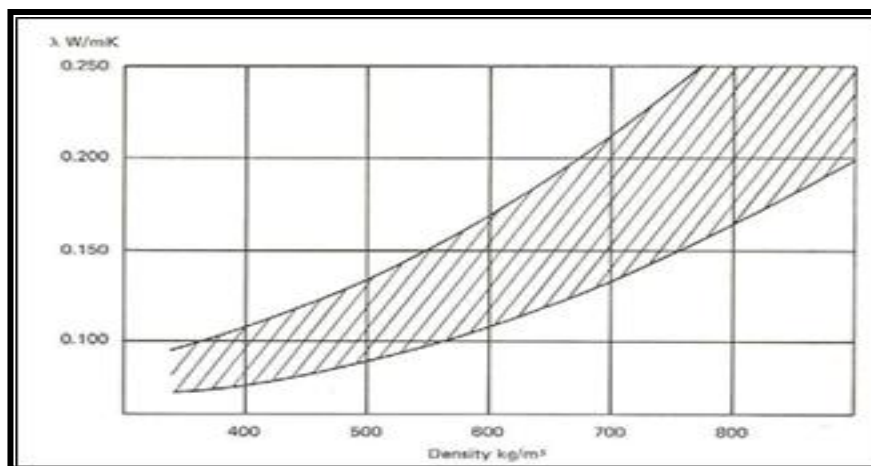


Figure I.9 : Conductivité thermique λ en fonction de la Masse volumique sèche du béton cellulaire [20].

➤ 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.6 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [19].

	ρ (kg/m ³)	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

Un dernier élément concernant les propriétés thermiques des bétons légers est lié au pouvoir absorbant de ces matériaux, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeables. L'eau étant un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du béton, en se substituant à l'air isolant.

➤ Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre léger a base des granulats de liège [22] le tableau suivant :

Tableau I.7 : Caractéristiques physique et mécanique de béton plâtre liège [22].

	N°	L/P	A	U(V)	I(A)	(W)	L(m)	(W/m°C)	ρ_{app} (kg/m ³)
BPT	1	0	1.694	2.5	0.38	0.95	0.06	0.744	1251.563
BPLLE 3/8	2	0.5	2.657	2.5	0.38	0.95	0.06	0.474	963.281
	3	1	2.876	2.5	0.38	0.95	0.06	0.438	941.406
	4	2	4.465	2.5	0.38	0.95	0.06	0.282	646.094
	5	3	5.905	2.5	0.38	0.95	0.06	0.213	534.375
BPLLE 8/15	6	0.5	2.63	2.5	0.38	0.95	0.06	0.479	973.438
	7	1	3.911	2.5	0.38	0.95	0.06	0.322	933.594
	8	2	3.971	2.5	0.38	0.95	0.06	0.317	716.406
	9	3	3.377	1.8	0.263	0.4734	0.06	0.186	590.625

I-3. Autres propriétés du béton léger

- **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 12cm 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 [24].

I-4. Avantages et inconvénients des bétons légers

-Avantage

- ✓ 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.

-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.

I- Conclusion

Les bétons légers font partie des bétons spéciaux. Malgré qu'ils soient récemment élaborés, ils ont fait l'objet de plusieurs études et recherches en raison de leurs performances physiques liées à leur légèreté et à leur pouvoir isolant. En plus, la crise du logement ; le coût énorme de la consommation d'énergie et les répercussions de certains déchets sur l'environnement, ont fait des bétons légers parmi les bétons les plus réclamés dans le domaine de l'isolation de la construction. Mais comme n'importe quel type de béton, de nombreuses études ont mis en évidence beaucoup de particularités relatives aux bétons légers et un certain nombre de problèmes liés à leur mise en œuvre qu'on peut énumérer comme suit :

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence notable des granulats légers sur les performances mécaniques du béton léger, à l'inverse des granulats de densité normale. La principale distinction des bétons de granulats légers par rapport aux bétons de granulats rigides est la plus faible masse volumique qui diminue à la fois le module élastique et la résistance du béton. La masse volumique du béton peut varier d'un peu plus de 300 à environ 1800 kg/m³ et la résistance correspondante de 0,3 à 70 MPa, atteignant parfois même 90 Mpa . La grande diversité de composition se retrouve dans la grande variété des propriétés des bétons de granulats légers qui sont des matériaux

Poreux pulvérulents, naturels ou artificiels. Ces bétons peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

A la base des classes de béton léger en fonction de la densité et les valeurs limitent de la résistance mécanique et de la conductivité thermique ; nous avons retenu les valeurs cibles suivantes :

- Pour un béton léger de construction : la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m³, une résistance à la compression supérieure à 15 MPa.
- Pour un béton léger d'isolation et de construction (isolant porteur): la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m³, une résistance à la compression supérieure à 3.5 MPa et une conductivité thermique inférieure à 0.75 W.m⁻¹.K⁻¹. (Classe II).
Pour un béton léger d'isolation (élément de remplissage): la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m³, elle peut descendre jusqu'à 300 kg/m³, une résistance à la compression supérieure à 0.50MPa et une conductivité thermique inférieure à 0.30 W.m⁻¹.K⁻¹. (Classe III).
- La valeur cible des variations dimensionnelles est de l'ordre de 1.2 mm/m.

Chapitre II
Recherches
bibliographiques

Introduction

Connu depuis l'antiquité, le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme. S'il est encore employé sous sa forme traditionnelle de poudre gâchée avec de l'eau pour réaliser des enduits, c'est sous la forme d'éléments préfabriqués en usine (carreaux, dalles, plaques) que son utilisation se développe aujourd'hui pour répondre aux besoins de la construction.

Le plâtre a également des usages dans d'autres secteurs d'activité : brasserie, boulangerie, fabrication de moules pour vaisselle et sanitaires.

Le plâtre s'obtient par déshydratation du gypse – roche naturelle ou sous-produit de certaines industries – qui est un sulfate de calcium hydraté de formule $\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$.

II-1-Généralités sur plâtre

II-1-1- Origines minéralogiques du plâtre

a. Origine naturel

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 a 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). C'est un fragment pur que l'on retrouve dans la nature. Il est inorganique c'est à dire qu'il ne s'est pas formé à partir de la vie. Il est formé d'éléments chimiques qui se sont mis ensemble mais qui donnent un minéral pur. Les minéraux se regroupent ensemble ensuite pour former une roche sédimentaire appelée pierre à plâtre présente des propriétés cristallographiques, chimiques et physiques [25].

b- Origine artificiel

1. Anhydrite chimique

C'est un sous-produit de la fabrication de l'acide fluorhydrique à partir du spath fluor coproduit de l'anhydrite appelée **fluor anhydrite** selon la réaction suivante :

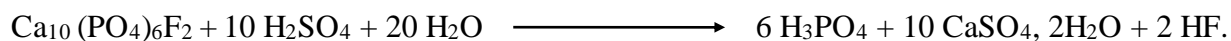


2. Gypse de synthèse

C'est le produit d'une réaction chimique industrielle. Les principales sources de gypse chimique sont :

* la fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) :

Par attaque sulfurique du phosphate naturel. L'industrie des engrais phosphatés produit du gypse selon la réaction :



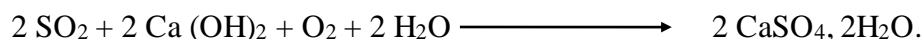
L'élimination du gypse est effectuée par filtration.

* la fabrication de l'acide borique (borogypse), des acides citrique (citrogypse) et tartrique, du dioxyde de titane (TiO_2) (titanogypse), du sucre... Les quantités de gypse produites par ces industries restent limitées.

* La désulfuration des gaz et fumées

Le but de cette méthode est d'éliminer le soufre des gaz de combustion des centrales thermiques, pour produire un gypse appelé désulfogypse (Des quantités importantes de phosphogypse et de désulfogypse sont ainsi produites annuellement dans le monde.

La technique de désulfuration la plus couramment adoptée, consiste à absorber le dioxyde de soufre (ainsi que les oxydes d'azote) présent dans les gaz de combustion, par une suspension aqueuse d'hydroxyde de calcium (c'est le classique lait de chaux) selon la réaction ci-dessous:



La désulfuration des gaz de combustion de charbon et de fuel est de plus en plus rendue obligatoire afin de préserver l'environnement. Cela concerne principalement les centrales thermiques au charbon qui produisent de l'électricité, des pays tels que l'Allemagne, la Grande Bretagne, les Etats-Unis, le Japon, pratiquent la désulfuration des fumées [25, 26].

II-1-2-Types de gypse naturel

Parmi les variétés du gypse on peut citer :

a- Sélénite

Nom venant du grec Sélène, signifiant Lune. Ce terme désigne un gypse en cristaux transparents, bien formés, isolés ou groupés, pouvant atteindre plusieurs mètres de développement.

b-Ordite

Qui est une pseudomorphose de gypse d'un minéral inconnu, découverte à Orda, PermskayaOblast', Oural, Russie.

c-Albâtre

Qui est un gypse en masses compactes très finement grenues. Son nom viendrait peut être de la ville égyptienne de Alabaston également l'albâtre lorsqu'il est pur est translucide et utilisé traditionnellement comme vitrage au Yémen. Impur, l'albâtre est veiné.

d- Gypse saccharoïde

dont le nom dérive du grec saccharos, sucre, qui est un gypse en masses granulaires pulvérulentes grains fins, blancs ou délicatement ombrés, souvent colorés et pouvant Contenir des traces d'argile, d'oxyde de fer, de calcite (Ca CO_3) ou d'anhydrite (Ca SO_4).

c-Gypse fibreux

Qui est un gypse en couches à fibres parallèles, ou en concrétions à fibres courbées et agrégats cohérents avec une structure fibreuse

e -Rose des sables

Gypse en cristaux lenticulaires, plats, à inclusions sableuses, disposés en rose et mêlés au sable du désert (dune) [28].



Figure II.1 : Gypse, variété sélénite [28].



Figure II.2 : Gypse, Sebka de ouargla [28].



Figure II.3 : Gypse, variété anhydrite [28].

et d

Elle est constituée de feuillets comme le montre la Figure II.4. Chaque molécule d'eau est liée non seulement à un atome de calcium et à un atome d'oxygène de son feuillet, mais encore, à un atome du feuillet adjacent [27].

Ces dernières liaisons qui unissent les feuillets les uns aux autres sont très faibles. Ainsi, s'expliquent le clivage facile et la forte anisotropie de dilatation. Le gypse comporte des liaisons ioniques dans les feuillets ($\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$) dues aux différences de charges électriques, (liaisons fortes et des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions sulfate, l'atome d'oxygène de la molécule d'eau étant relié à un ion calcium.

-L'hémi hydrate α a une phase très bien cristallisée, non poreuse, constituée de cristaux bien individualisés et facilement indexables est obtenue par un mécanisme de dissolution/recristallisation en milieu liquide.

-Pour l'hémi hydrate β l'eau du gypse s'élimine à l'état de vapeur sèche et nous obtenons un solide microporeux constitué d'un assemblage de microcristaux (Figure II.5) [29].

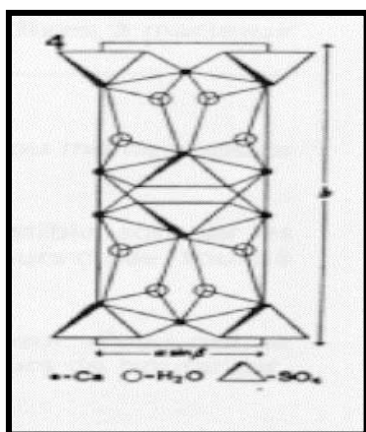


Figure II.4 : Projection de la structure du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ par WOOSTER en 1936 [27].

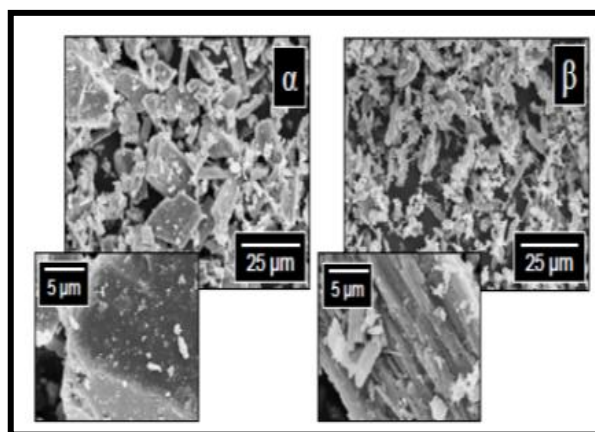


Figure II.5 : Images MEB des plâtres Prestia obtenues respectivement par voie humide (α) et voie sèche (β) [29].

II-1-4-Phases de déshydratation du gypse

La fabrication du plâtre repose sur un principe simple, c'est l'élimination totale ou partielle de l'eau de constitution du gypse.

Soumis à la chaleur, le gypse conduit à une série de produits partiellement hydratés ou anhydres, cette opération a des implications complexes mettant en jeu des phénomènes de cristallisation. Le tableau I.1 donne les caractéristiques des différentes phases de déshydratation du gypse :

Tableau II.1 : Phases de déshydratation du gypse [25].

Phase	CaSO ₄ , 2H ₂ O	CaSO ₄ , 1/2H ₂ O		CaSO ₄		
		Forme α	Forme β	Forme III	Forme II	Forme I
Appellation	Gypse	Semi-hydrate α	Semi-hydrate	anhydrite anhydrite soluble	anhydrite II anhydrite insoluble	Anhydrite I
Système cristallin	Monoclinique	Rhomboédrique		hexagonal	Orthorhombique	Cubique à faces centrées
Teneur en eau(%)	20.92	6.20	6.20	0	0	0
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2.31. 10 ³	2.76.10 ³	2.63. 10 ³	2.58. 10 ³	2.93. 10 ³ 2.97. 10 ³	2.93. 10 ³ 3. 10 ³
Masse molaire (g/mol)	172.20	145.15	145.15	136.10	136.10	136.10
Volume molaire (cm ³ /mol)	74.5	52.40	55.20	52.80	45.8 à 46.4	

La déshydratation du gypse par la chaleur conduit à des réactions chimiques (voir la Figure II.3) où l'évaporation de l'eau de constitution du gypse nous donne les phases suivantes :

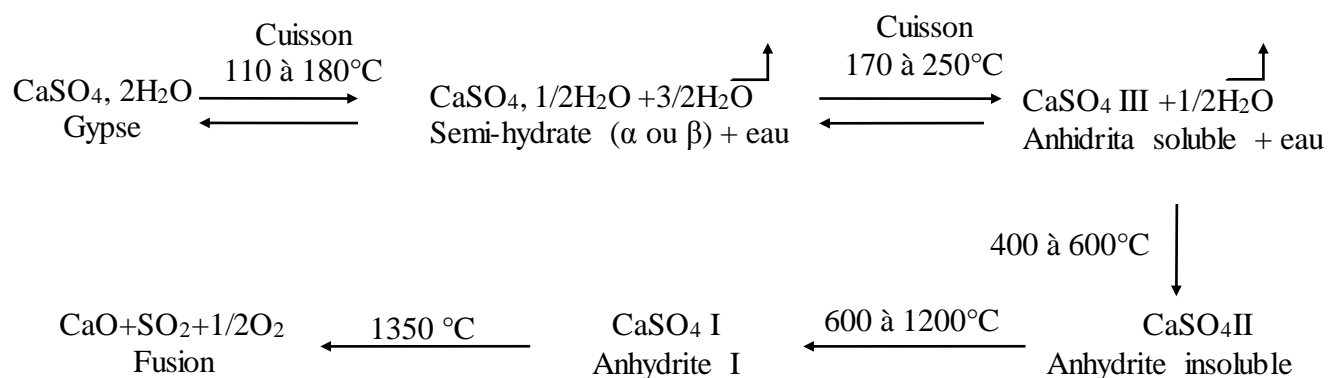


Figure I.3 : Réactions chimiques de déshydratation du gypse par la chaleur [25].

II-1-5-Gisement de gypse

Les gisements de gypse exploités sont nombreux dans le monde, particulièrement en Chine, en Amérique du Nord, en Europe.

- Aux Etats Unis, la production minière est assurée par 46 sociétés qui exploitent 55 carrières dans 18 états.
- Au Canada, la production est assurée par 9 carrières, 85 % de la production étant réalisée en Nouvelle Ecosse, d'où une grande partie de la production est exportée vers les Etats Unis.
- En Europe, 160 carrières sont en exploitation, dont 26 en Espagne. [30]
- En France le bassin parisien avec la carrière Lambert de Corneilles-en-Parisis [31].
- L'Algérie est Le pays à un grand potentiel en gypse Les grands gisements existent à Dahra (région du chellif), Djebel Chegga, Mostaganem, Arzew, Sidi Bel abbés, Habouch (montagnes mina) et les Babors.

I-1-6-Production du gypse

Le tableau I.2 présenté la production du gypse naturel dans le Monde.

Tableau II.2 : Production du gypse naturel, en 2009 [26].

Pays	production du gypse naturel, en 2009 en millions de t.
Chine	42
Etats Unis	9,4
Iran	12
Espagne	11,5
Thaïlande	8
Japon	5,8
Canada	5,5
Italie	5,4
France	4,8
Mexique	4,5
Monde	152

- US Gypsum Corp. (USG) avec 9 carrières en exploitation aux Etats Unis, 3 au Canada et 3 au Mexique.
- National Gypsum Corp. (NGC) avec 7 carrières aux Etats Unis et une au Canada, la plus importante exploitation mondiale, à Milford Station au nord d'Halifax, en Nouvelle Ecosse.
- Georgia Pacific Corp. (GPC) 7 carrières exploitées aux Etats Unis.
- Groupe Saint-Gobain et ses filiales exploitent 75 carrières dans le monde.
- Groupe Knauf, 65 carrières avec une production annuelle de 5 millions de t de gypse.
- Groupe Lafarge, 21 carrières [26].

Le tableau I.3 donne quelques exploitations du gypse en Algérie.

Tableau II.3 : Quelques exploitations de gypse en Algérie [32].

Wilaya	Nom de l'exploitation	Activités
ALGER	SCAL SPA SOCIÉTÉ DES CIMENTS ALGÉROISE	Extraction et préparation du gypse pour ciment
	ZIDANE MARBRE	Exploitation de marbre et gypse
BATNA	CARRIÈRE DE PLÂTRE BOUCHAREB	Exploitation de gypse pour plâtre
	HEDDA EURL	
	CARRIÈRE PLÂTRE BELLAHCÈNE MESSAOUD SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
BÉJAÏA	BENAMARA EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
BISKRA	ENTREPRISE DE PLÂTRE ET DÉRIVÉS S	Exploitation de gypse pour plâtre
	PLÂTERIE EL GHAZAL EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
BOUIRA	ENFA PLÂTRE (GYPSE, PLÂTRE) SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	ERCC SPA	Exploitation de gypse pour ciment
CONSTANTIN	SPDE SPA	Exploitation de gypse pour ciment
GHARDAÏA	GHARDAÏA PLÂTRE SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	PLÂTRE DU SUD SPA	Exploitation de gypse pour plâtre
	SPDC SPA PLÂTRERIE	Exploitation de gypse pour plâtre
	DE GHARDAÏA FILIALE ERCC	
GUELMA	GYPSE EN NADOR EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
KHENCHEL	IKHLASSE SARL	Exploitation de gypse pour plâtre

MASCARA	E.MA.CO EPE (UNITÉ PLÂTRIÈRE D'OGGAZ)	Exploitation de gypse pour plâtre
	ERCO EPE/SPA	Exploitation de gypse pour plâtre
MILA	BOUSBAAË ET AÏSSAOUI (GYPSE EL HASSI AÏSSAOUI ET ASSOCIÉ SNC)	Exploitation de gypse pour plâtre
	SO.PLAT SPASOCIÉTÉ DES PLÂTRES GRAREM GOUGA	Exploitation de gypse pour plâtre
M'SILA	CHALLA PRODUCTION DE PLÂTRE SA	Exploitation de gypse pour construct
	EL DJABES (DOKMANE ABDELATIF) EU	Exploitation de gypse pour plâtre
ORAN	ERCO PLÂTRE (SODEPAC) SPA	Exploitation de gypse pour plâtre et ciment
SÉTIF	GUELLAL PLÂTRE D'OR SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
	GUESMIA D'EXTRACTION PRÉPARATION	Exploitation de gypse pour plâtre
TÉBESSA	CARRIÈRE DYR EURL	Exploitation de gypse pour plâtre
	MANDRA SOUTIRAGE ET PRÉPARATIO DE SOL SARL	Exploitation de gypse pour plâtre
TISSEMSILT	PLÂTRIÈRE DE SIDI BOUTOUCHENT SA	Exploitation de gypse pour plâtre

Les informations existantes sont très faibles mais le gypse est un minerai très commun dans la région méditerranéenne [32].

D'après l'arrêté du 26 Chaoual 1423 correspondant au 30 décembre 2002, du Ministère de l'énergie et des Mines [32] fixant les listes des substances minérales et dans l'article 5 [32] comme suivant :

Les substances minérales non métalliques pour matériaux de construction les substances minérales énumérées ci-après :

- 1- calcaire, grès et autres substances analogues destinées pour l'agrégat.
- 2-schistes, ardoise.
- 3-marbre, travertin, aragonite, calcaire ornemental, serpentinite, granite onyx et autres pierres ornementales.
- 4-gypse, anhydrite.
- 5-argile, marnes.
- 6-tuf.
- 7-sable de construction [32].

II-1-7-Étapes de fabrication du plâtre

Fabrication du plâtre nécessite plusieurs étapes :

a. Extraction du gypse

À l'aide d'explosifs et d'engins, quand il s'agit de gisement à ciel ouvert (des carrières).

b. 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.

c. 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.

d. Stockage du gypse

Le gypse ainsi sélectionné est stocké dans des sillons.

e. 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.

f. 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.

g. 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...

h. 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 [33].

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

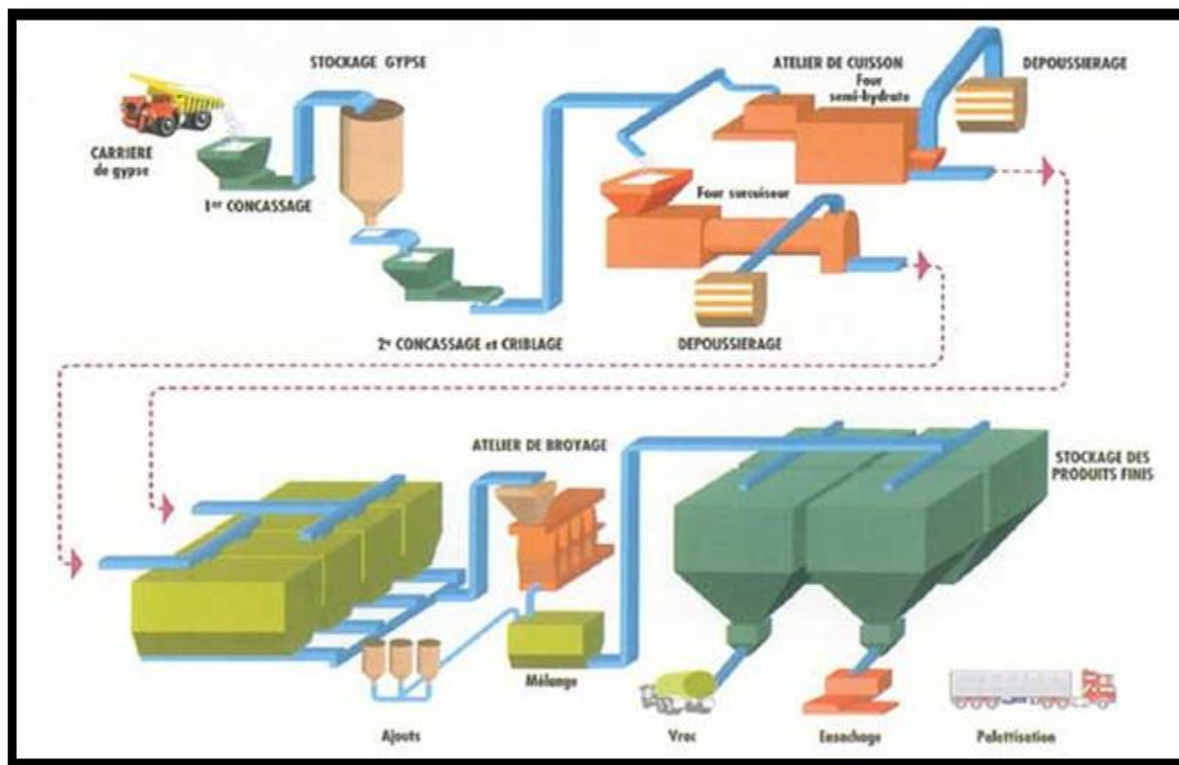


Figure II.6 : Etapes de fabrication du plâtre [33].

II-1-8- Recyclage

Le gypse utilisé en construction est totalement recyclable car mis en œuvre sous forme de plâtre il est réhydraté en gypse. Les chutes de fabrication et d'installation des plaques de plâtre sont récupérées et recyclées dans la fabrication de nouvelles plaques. Le plâtre provenant de la démolition d'immeubles est également, en partie, recyclé en agriculture. Aux Etats Unis, le recyclage représente, en 2009, avec 4 millions de t, environ 20 % de la consommation du pays [26].

II-1-9-Utilisations

a- Cimenteries :

Le ciment contient de 3 à 5 % de gypse qui sert de régulateur de prise, soit une

consommation mondiale de l'ordre de 39 millions de t. En France, en 2008, 872 000 t de gypse ont été consommées dans les ciments [26].

b- Agriculture

Le gypse apporte les ions calcium et sulfate nécessaires à la croissance des plantes, en évitant l'augmentation du pH comme dans le cas de l'apport de chaux.

c- Autres utilisations

Industries du papier, des peintures, traitement des eaux, constructions dans les régions sèches, Prothèse dentaire, chirurgie... [26].

III-1-10-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) [34, 35].

La Figure II.8 présenté la famille des liants et produits à base de plâtre :

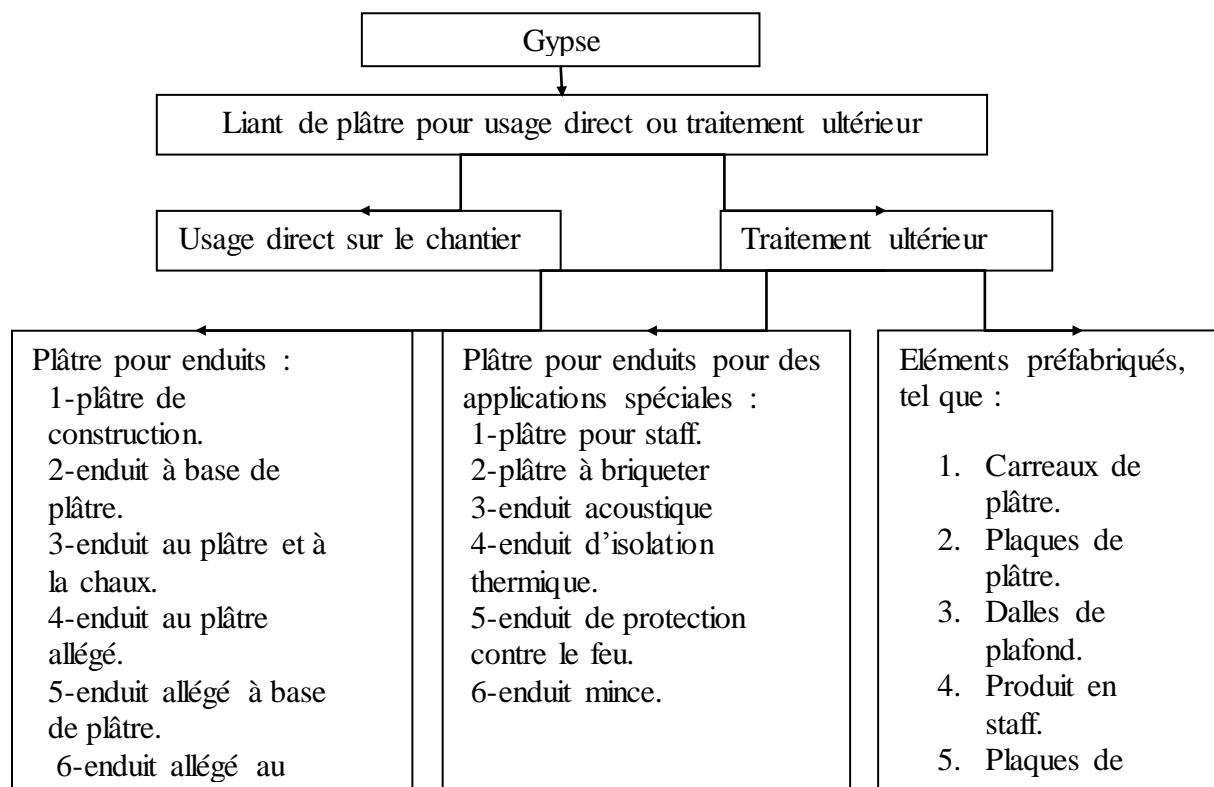


Figure II.7 : Famille des liants et produits à base de plâtre [36].

II-1-11-Propriétés physiques et mécaniques du plâtre

- **Prise du plâtre**

Le plâtre est caractérisé par un temps de prise court et un durcissement rapide accompagné d'une forte élévation de température [36].

- **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% [36].

- **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 :

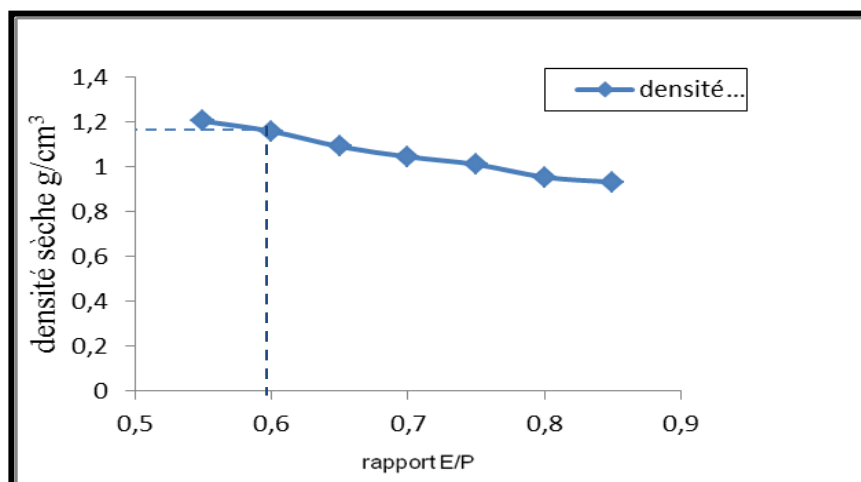


Figure II.8 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la densité sèche du plâtre [35].

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 [34].

- **Résistance mécanique**

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 :

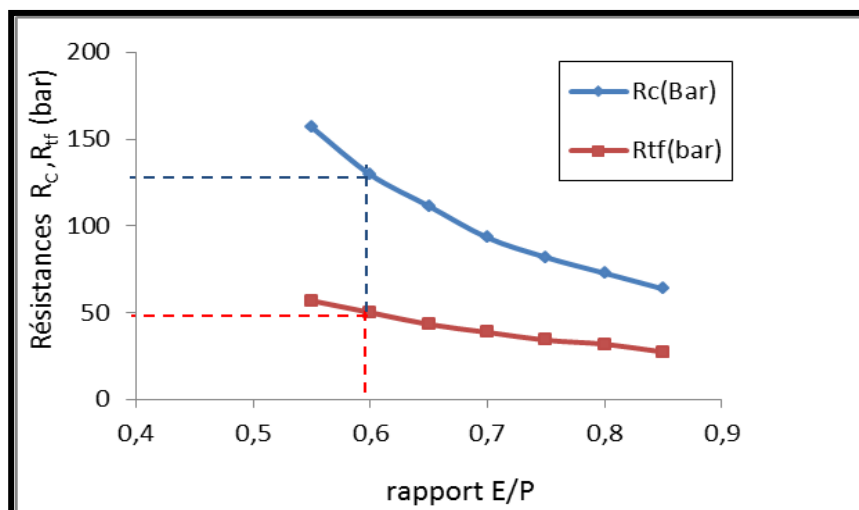


Figure II.9 : Influence du rapport E/P de plâtre sur la résistance mécanique du plâtre [35].

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% [37, 35].

- **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.

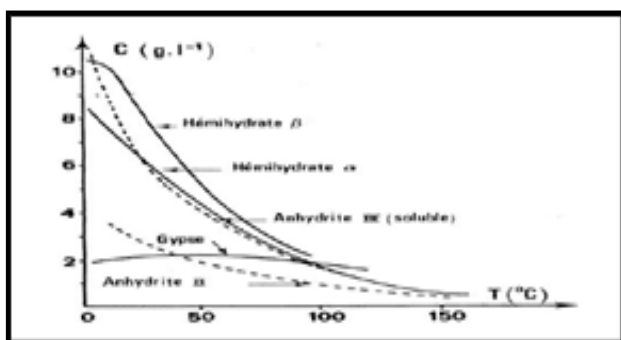


Figure II.10 : Solubilité des différentes phases Du sulfate de calcium en fonction de La température [29].



Figure II.11 : Fontis ayant atteint la surface [27].

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.12 résumé les propriétés de confort :

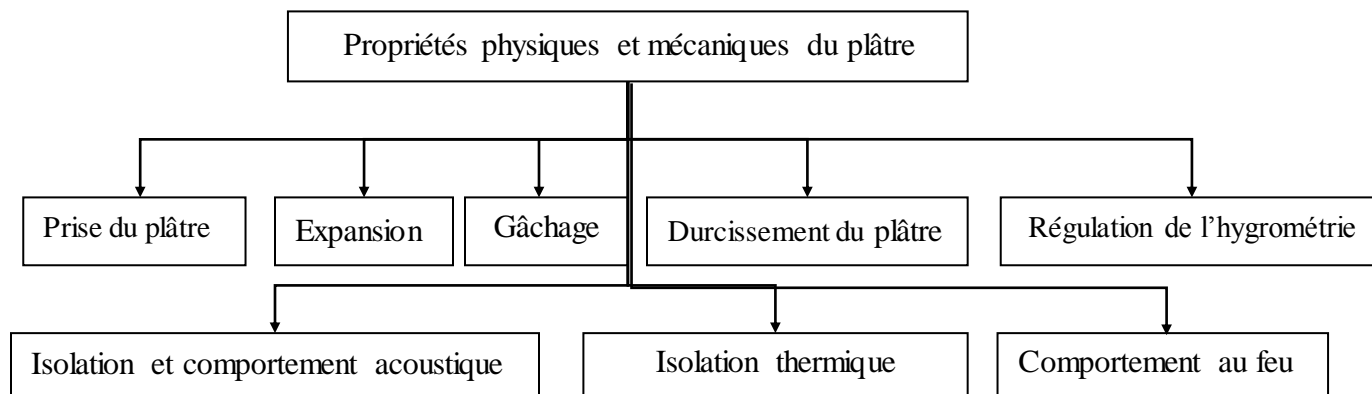


Figure II.12 : Organigramme de Propriétés physiques et mécaniques du plâtre.

II-2-Plâtre avec ajouts :

Vimmorava et al [38] constatent que l'ajout de 15 % de micro silicate augmente la densité absolue du composite avec plus de 50 % que l'ajout de perlite par contre l'ajout de 20 % de la masse de gypse diminue, la densité a une valeur inférieure à 300 kg / m³. Concernant la résistance à la compression, l'ajout de 15 % de micro silicate, augmente 3 fois la résistance à la compression, alors que l'ajout de 50 % de carbonate de calcium CaCO₃, la résistance à la compression augmente 2 fois, par contre l'ajout de 20 % de perlite diminue considérablement la résistance à la compression à 0,3Mpa.

II-3-Mortier de plâtre :

Le mortier de plâtre résulte d'un mélange bien homogénéisé de plâtre, de sable et d'eau. Les études [39] 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 [39] 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.

important. Concernant le plâtre d'Ouled Djellal, 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-3-3- Méthode de composition du mortier de plâtre

Le C.N.E.R.I.B [39] 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

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

Tableau II .4 : Valeurs des contraintes des essais mécaniques sur éprouvettes en mortier de plâtre 4 x 4x 16 cm.3							
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 .4: 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-4-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-4-1-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** [39].

a-Définition de la méthode de Vallette :

C'est une méthode expérimentale [28], 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 [29], 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 $5 d$, 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 $5 d$, 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-4-2-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 granulats.

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 [39]** 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-4-3-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 gachage ;
- Ajouter progressivement ce mélange (eau + chaux) aux constituants (plâtre + gravier + Sable) ;
- éviter un long malaxage, pour ne pas accélérer la prise.

II-4-4-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.5 : 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 [37] 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.

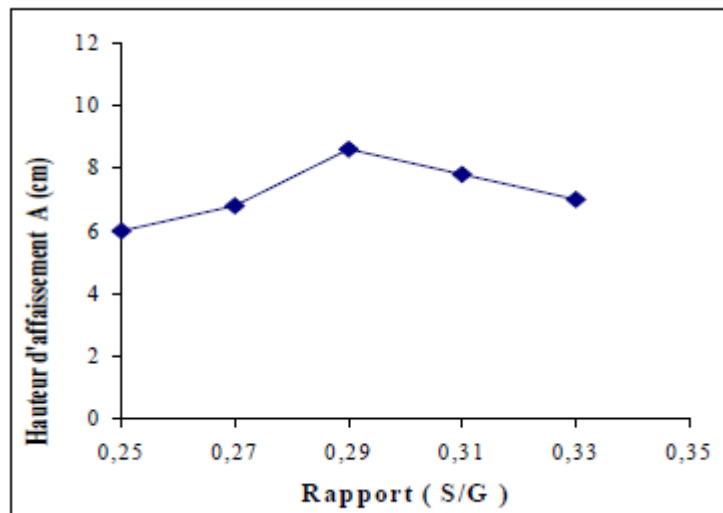


Figure II.15 : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton [37]

II-4-5-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 [40].

II-4-6-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 [17] 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 [22] 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.17

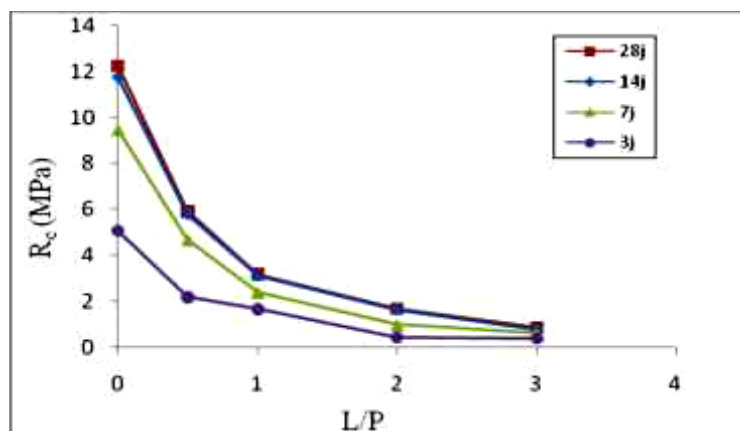


Figure II.16 Variation de la résistance à la compression des BPL (8/15)
En fonction du rapport Liège/Plâtre

Les mêmes études [22] 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.

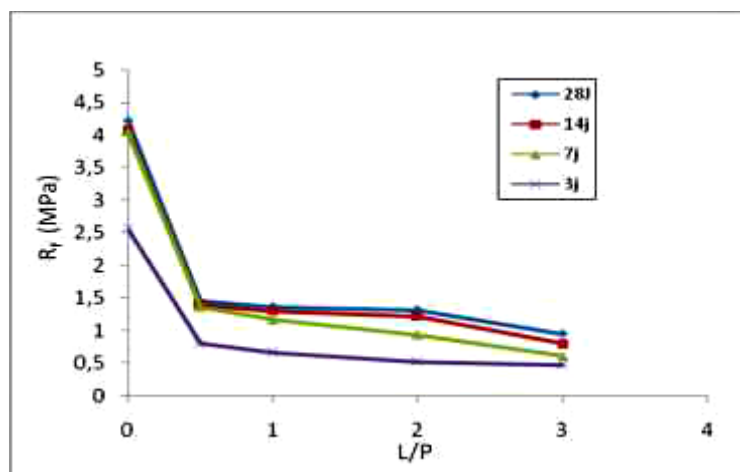


Figure II.17 : Variation de la résistance à la flexion des BPL (3/8) en fonction du rapport Liège/Plâtre

Les études [21] 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%.

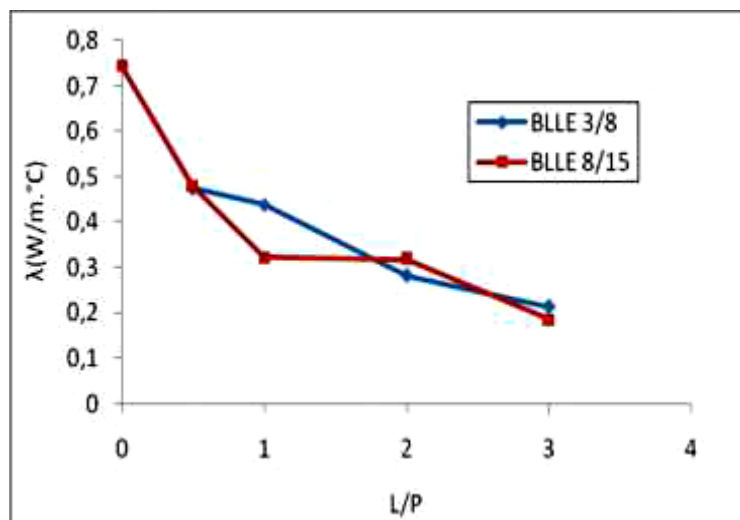


Figure II.18 : Variation de la conductivité thermique en fonction du rapport Liège/Plâtre [22]

II-5-Règlementations du plâtre en Algérie

Ces recommandations sont spécifiques à l'Algérie, elles viennent de compléter les règles et les usages du plâtre connus universellement. Ces recommandations sont valables pour les ouvrages construits en blocs de plâtre dont les caractéristiques techniques sont régulières et connues. Sachant que les plâtres utilisés sont des plâtres de construction (PGC, PFC) avec une contrainte de rupture $R > 40 \text{ kgf/cm}^2$ à l'état sec et à 28 jours. Le tableau (I.5) présente les normes Algériennes sur les plâtres

Tableau I.6 : Normes Algériennes sur les plâtres [41].

Références	Intitulé
NA 524	Plâtre - conditions générales des essais.
NA 525	Plâtre - détermination de masse volumique en poudre.
NA 526	Plâtre - détermination des caractéristiques mécaniques.
NA 527	Plâtre - détermination de la finesse de mouture du produit en poudre.
NA 528	Plâtre - détermination de la teneur en eau de cristallisation

Les constructions en murs porteurs de plâtre ne sont autorisées que pour les ouvrages simples à un ou deux niveaux quel que soit leur usage. Nous mettons dans ce qui suit les conditions

d'utilisation et de mise en œuvre de plâtre pur et mortier de plâtre comme étant des produits principaux entrant dans la confection des éléments en plâtre :

II- Conclusion

Nous avons également essayé de recueillir le maximum des études effectués par quelques auteurs sur les propriétés physico-chimiques et minéralogique du plâtre se trouvant dans les régions de notre pays et qui contribue à la valorisation et au développement des ressources naturelles et locales ; dont les résultats obtenus par ces auteurs sont : densité, prise.

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%.

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 /. m K), 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.

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%.

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

Chapitre III
Caractérisations
des matériaux et
techniques
expérimentales

I. 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 billes de polystyrènes et le sable de dune ainsi que l'eau de gâchage.

Les matériaux élaborés dans cette étude sont des bétons de plâtre à base de billes de polystyrène expansé. 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 et l'isolation par les billes de polystyrène .

III-1- Plâtre

Le plâtre utilisé provenant de l'usine **S.P.A** oasis plâtre, Ghardaïa. Une analyse minéralogique et chimique nous a été transmise par l'usine.

III-Plâtre

Le plâtre utilisé provenant de l'usine **S.P.A** oasis plâtre, Ghardaïa. Une analyse minéralogique et chimique nous a été transmise par l'usine.



Figure III. : Plâtre utilisé

III.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

III.1.1. Analyses chimiques

Ces essais sont généralement effectués dans les usines de fabrication du plâtre afin de déterminer sa composition et la teneur de chaque composant du plâtre fabriqué.

- L'analyse minéralogique, nous montre que le plâtre utilisé possède une teneur en $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ environ 96%, ce qui nous a permis de le classer en classe I qui correspond à une teneur en $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ supérieure à 90 %.
- les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Analyse chimique du plâtre utilisé.

Constituants	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	KO	CL
Pourcentage (%)	0,70	0,10	0,08	32,15	0,53	44,95	0,09	0,03	0,002

En plus, on donne la perte à des températures différentes :

À 50° C : 0,3 %

À 350° C : 20,2 %

À 850° C : 21,30%

D'après le tableau II.1, on remarque que les deux espèces les plus prépondérantes sont le SO₂ et le CaO. Ce qui affirme que le constituant le plus essentiel dans le plâtre utilisé est le sulfate de calcium.

III-1-2-Analyse élémentaire par diffractométrie des rayons X

- La diffractométrie des rayons X est une technique de plus en plus utilisée pour l'étude de la composition minéralogique des matériaux. Cette technique est disponible au niveau de l'université de Laghouat dont l'appareillage utilisé est représenté sur les figures (III.1, III.2)
- Cet essai concerne les matériaux cristallisés. Il est réalisé à l'aide d'un diffractomètre de rayons X. Celui-ci est équipé d'un tube à anode de cuivre de rayonnement $\lambda_{k\alpha 1} = 1.54056\text{Å}$ et un compteur proportionnel.
- L'identification des minéraux s'effectue en comparant les diagrammes des échantillons étudiés avec les diagrammes standards des principaux minéraux.
- A noter que l'amplitude et le nombre de pics d'une certaine substance obtenus sur le diagramme de diffraction X ne reflète en aucun cas la surabondance de cette substance dans le composé, ceci dépend du degré de cristallisation et de l'orientation de la substance. Il existe une relation entre l'intensité des raies de diffraction d'une espèce minérale et sa concentration dans un mélange, cette relation permet une analyse quantitative des différents minéraux dans le mélange.



Figure III.1 : Diffractomètre de rayons X de l'UATL.

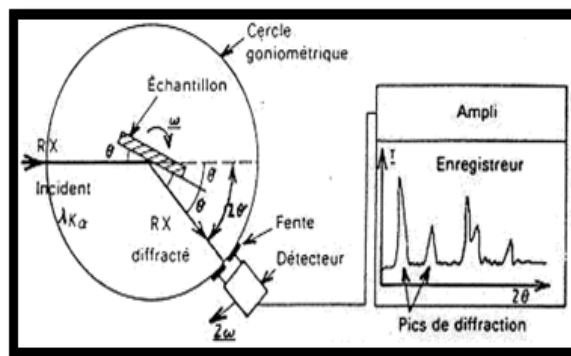


Figure III.2 : Principe de l'essai de diffraction aux rayons X.

Les résultats de l'analyse minéralogiques de plâtre et gypse représentés sur la figure III.3 et la figure III.4.

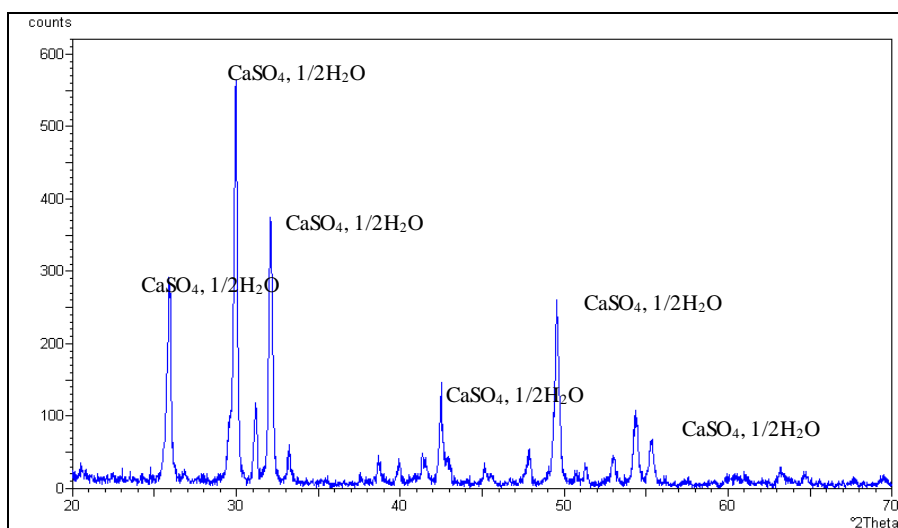


Figure III.3 : Diffractogramme de la poudre du plâtre.

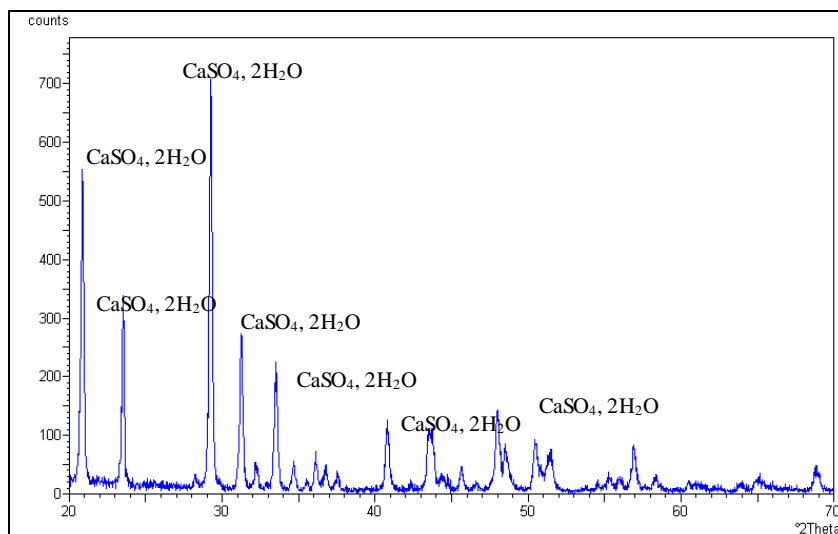
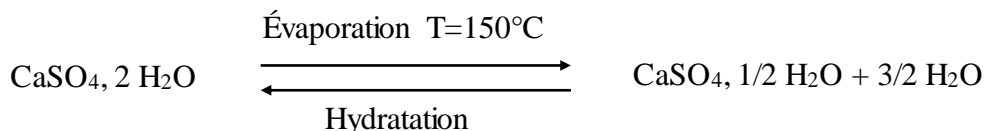


Figure III.4 : Diffractogramme de la poudre du Gypse.

Malgré que le plâtre et le gypse sont deux matériaux cristallins purs, et leur composant principal est le sulfate de calcium (CaSO_4), la comparaison entre les deux diffractogrammes du plâtre et du gypse (Figure II.3 et Figure II.4) montre qu'il existe une différence dans la composition et la structure cristalline des deux matériaux, cette différence est due à l'évaporation ou l'hydratation d'une molécule et demi d'eau de composition ($3/2 \text{ H}_2\text{O}$) selon la réaction suivante :



Avec deux systèmes cristallins différents : rhomboédrique pour le plâtre ($\text{CaSO}_4, 1/2 \text{ H}_2\text{O}$) et monoclinique pour le gypse ($\text{CaSO}_4, 2 \text{ H}_2\text{O}$).

III.1-2- Masse volumique absolue NFP 18-555

1) Principe de la mesure

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit, lorsqu'on introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue.

2) Équipement nécessaire

- Un densimètre de chatelier d'une contenance minimale de 50 cm^3 .
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le plâtre, le benzène.
- Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre, précis à $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, permettant de connaître la température du laboratoire.
- Papiers filtres.



Figure III.5 : Équipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique absolue du plâtre.

3) Conduite de l'essai

- Remplir l'appareil de benzène jusqu'à ce que le niveau zéro.
- Éviter de mouiller les parois lors du remplissage. Immerger le densimètre dans un récipient contenant de l'eau à 20 ± 1 °C.
- Pendant l'équilibrage de température, peser une masse de plâtre de 60 g à 0,1 g près.
- Repérer exactement le niveau atteint N_0 . correspond au volume initial sur le densimètre V_0 .
- Verser le plâtre très lentement (en $\frac{1}{4}$ d'heure environ) dans l'appareil en prenant garde à ne pas laisser de dépôt sur les parois.
- Déplacer le densimètre contenant le plâtre, de récipient et le poser sur la table.
- Boucher le densimètre, l'incliner à 45° par rapport à la table et le faire rouler avec un mouvement de va-et-vient de manière à faciliter le départ de l'air.
- Replacer l'appareil dans le bain et lire le niveau N_1 du liquide correspond au volume final sur le densimètre V_1 après équilibrage de température.
- A l'aide d'un papier filtre récupérer le benzène.
- A l'aide d'une solution lavante nettoyer le densimètre de dépôt de plâtre.

La masse volumique absolue est déterminée par la relation :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_p}{V_1 - V_0} \dots\dots\dots(\text{II.1}).$$

M_p : étant la masse du plâtre introduite (en générale prise égale à 60g)

V_1 : volume final lu sur le densimètre

V_0 : volume initial pris comme référence ($V=0$).

La masse volumique absolue du plâtre utilisé est **2521.34 Kg/m³**. Nos résultats sont en accord avec littérature.

III-1-3-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 :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(\text{II.2}).$$

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 volume connu).

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 :

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



Figure III.6 : Dispositif pour l'essai de récipient et entonnoir à trépied.



Figure III.7 : Récipient standard.

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

Tableau III.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 ρ_{app} (g/cm^3)
1	2395.9	3218.2	822.3	1000	0.8223
2	2395.9	3211	815.1	1000	0.851
3	2395.9	32288.3	832.4	1000	0.8324
				Moyenne	0.8232

Alors la masse volumique apparente du plâtre de construction est **823.27 Kg/m³**.

III-1-4-Compacité et Porosité NFP 18-555

La porosité est une caractéristique très importante, elle influe sur les caractéristiques physico mécaniques des bétons. Plus la porosité est faible, plus le béton est dense et plus sa résistance est grande par contre son pouvoir isolant est médiocre.

On définit la compacité d'un matériau comme le rapport du volume solide sur le volume total. Et la porosité comme le rapport du volume des vides sur le volume total.

La compacité et la porosité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égal à 100% : $P+C=1$ [13].

Si l'on connaît la masse volumique apparente et absolue du matériau, il est aisé alors de calculer sa compacité et sa porosité selon la formule suivante :

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} \dots\dots\dots (II.3).$$

$$P = 1 - C \dots\dots\dots (II.4).$$

***Compacité**

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} = 0.33 \implies C = 33 \%$$

***Porosité**

$$P = 1 - C = 1 - 0.33 = 0.67 \implies P = 67 \%$$

III-1-5-Finesse de mouture NFB 12-301

La norme NFB 12-301 distingue les plâtres de construction selon la finesse par tamisage, le contrôle des plâtres est souvent effectué en usine à l'aide des tamis d'ouverture 0,8, 0,4 ou 0,2mm [12]. La finesse par tamisage sur un échantillon de 100g de plâtre de construction est comme dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Finesse des plâtres de construction

Tamis		Refus r(en %)de la masse initiale	
Ouverture	Module	PGC	PFC
0,8	30	$5 \leq r < 20$	$r \leq 2$
0,4	27	$20 \leq r < 40$	$r \leq 15$
0,2	24		$r \leq 35$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.4

Tableau III.4 : Finesse de mouture du plâtre.

Tamis		Refus (r %)de la masse initiale	
Ouverture (mm)	Module	1	2
0,8	30	6,9	5,2
0,4	27	12,2	4,5
0,2	24	15,2	20,3

D'après les résultats obtenus et le tableau II.4 on peut remarquer que pour le tamis 0,8mm, $5 < r = 6,9 < 20$ et $5 < r = 5,2 < 20$ alors le plâtre utilisé est un plâtre gros de construction.

III-1-6-Prise NFB 12-401

Cet essai est prescrit par la norme NFB 12-401, il constitue une indication indispensable pour

la prise d'un plâtre qui est en fonction de :

- Sa nature (à prise lente ou rapide).
- Sa finesse.
- La température de milieu de conservation.
- La teneur et la nature des adjuvants (retardateurs ou accélérateurs de prise).
- Le rapport E/P.

Les temps de début et de fin de prise, sont mesurés à l'aide d'un appareil analogue à l'aiguille de VICAT (utilisée pour les ciments) [12], muni d'un cône à son extrémité, l'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standard dans une pâte de plâtre, le début de prise est définie comme étant le temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance $d \geq 2,5$ cm du fond du moule. La fin de prise correspond au temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte de plâtre [59].

A une température de 20 °C les temps du début de prise d et de la fin de prise f des plâtres de construction gros PGC sont montré dans le tableau suivant :

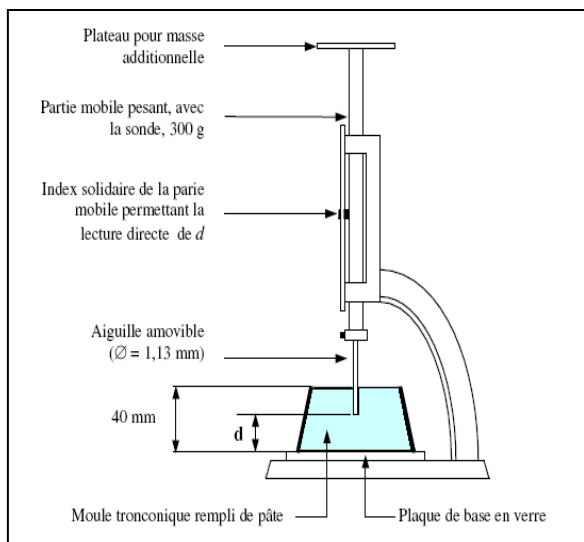


Figure III.8: Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge [59].

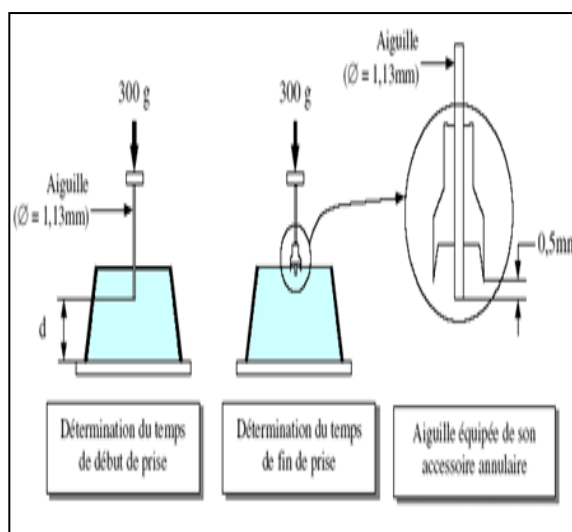


Figure III.9: Détermination du début et fin de prise [59].

Essai est réalisé à l'aide de l'aiguille de Vicat, elle a été déterminée selon les prescriptions de la norme EN 196-3. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : Temps du début de prise et de la fin de prise de plâtre

Début de prise (mn)	Fin de prise (mn)	Temps de prise (mn)
3min 30sec	11min 05sec	7min, 35sec

III-2- Sable de dune

Le sable utilisé dans cette étude est un sable de dune provenant de la région nord de la ville de Laghouat.

III-2-1- Analyse minéralogique et chimique

Les résultats de l'analyse minéralogiques et chimiques sont représentés sur la figure II.10 et le tableau II.6

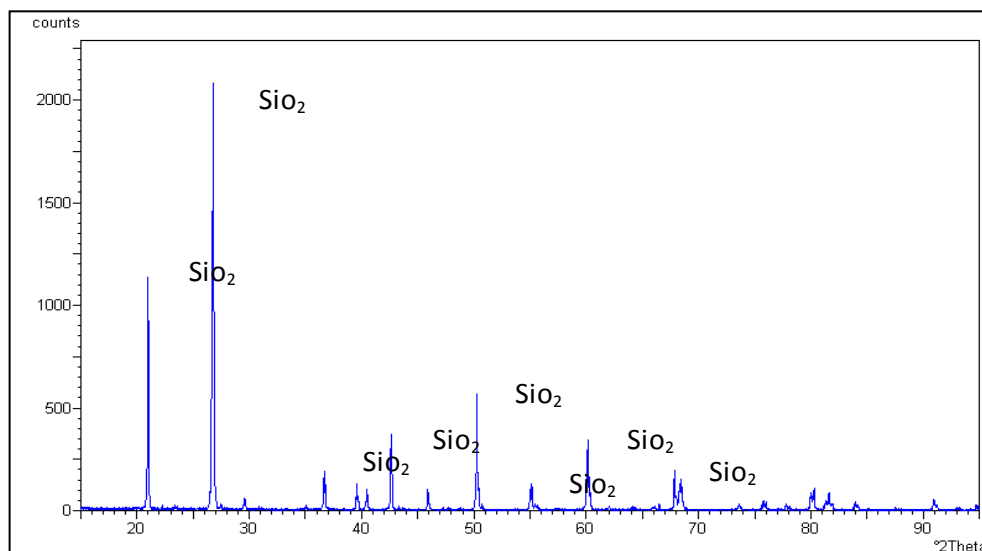


Figure III.10 : Diffractogramme aux rayons X du sable de dune.

Le diffractogramme de la figure III.10 obtenu par analyse minéralogique de ce sable, menée par rayons X au diffractomètre, confirme la présence du composant minéralogique de l'espèce SiO₂ (silice).

Tableau III.6 : Analyse chimique du sable de dune [62].

Résidus insolubles (SiO) %	95,87
Teneur en sulfate (SO ₃)%	0,91
Matières organiques MO%	-----
Teneur en chlorures %	0,36
Carbonate de Calcium CaCO ₃ %	2.5

Les résultats ci-dessus montrent que le sable utilisé est de nature siliceuse, vu la dominance de la silice (SiO_2) au tableau III.6

✓ Morphologique des grains de sable de dune

Une photo du sable dunaire à grande échelle visualisé par microscope électronique à balayage (M.E.B), effectué par M. Bederina [61] au laboratoire de l'I.U.T d'Amiens en France montre que la majorité des grains possèdent des formes arrondies avec une faible angularité (figure III.11).

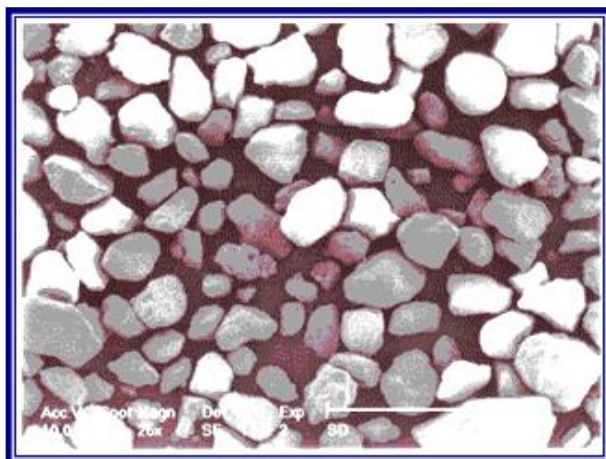


Figure III.11 : Vu général (à grande échelle, MEB.) du sable de dune [61].

D'après les tableaux A1 (voir l'annexe), on a tracé la courbe granulométrique représenté sur la figure II.13.

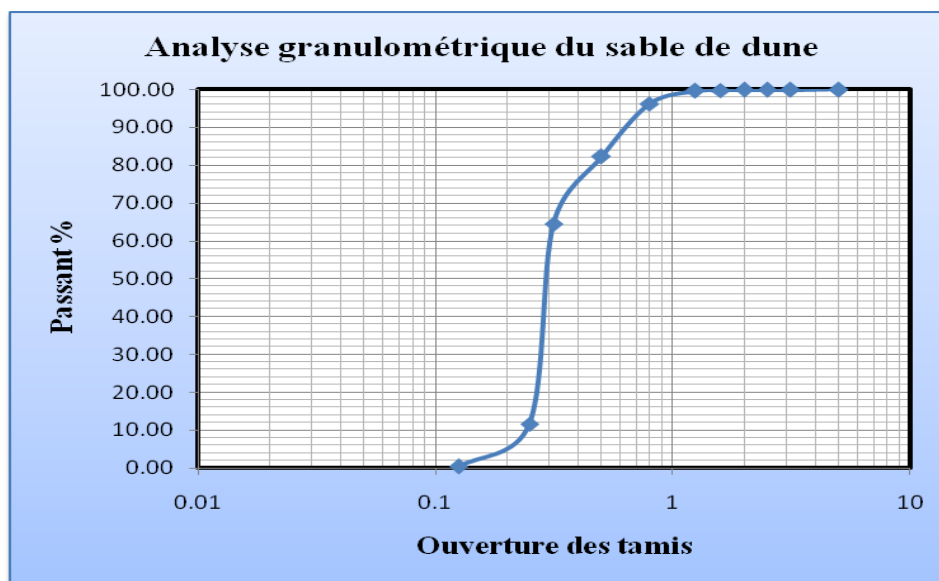


Figure II.12 : Courbes granulométriques de sable de dune.

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

III-2-2-caractéristiques physique du sable utilisé

Les caractéristiques physiques de sable dans de tableau-III.7

tableau-III.7 .Caractéristiques physiques du sable de dune	
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1428±14
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2596±26
Compacité (%)	55±0.1
Porosité (%)	45±0.01
Module de finesse	1.18±0.01
Equivalent de sable (%)	86±0.5

III-3-Granulats des billes de polystyrène classe 3/8

Les billes de polystyrènes expansés utilisés ont été ramenées de la société Algérienne de polystyrène (Fabrication de panneaux, plaques et emballage en polystyrène) zone industrielle Aïn Oussara Djelfa.

Ce sont des granulats organiques artificiels ; les échantillons se présentent sous forme de billes parfaitement sphériques; l'enveloppe extérieure de ces perles est lisse et d'un grain serré ce qui les rend hydrophobes, elles demeurent donc imperméables, même sous forte pression d'eau.

III-3-1-Masse volumique absolue NFP 18-555

Il s'agit de déterminer la masse volumique du polystyrène non expansé qui se présente sous forme de perles de diamètre environ 0.2mm. Elle est déterminée à l'aide du densimètre de Chatelier. Ce dernier est rempli d'eau jusqu'au trait correspondant au zéro de l'échelle de volume. Puis on introduit une masse de 3g de polystyrène, et on lit sur l'échelle des volumes la valeur du volume déplacé. La masse volumique sera égale au rapport de la masse du polystyrène introduite sur le volume mesuré.

◆ Méthode de la mesure au pycnomètre

On détermine avec précision la masse M_1 du pycnomètre rempli d'eau. Puis on détermine avec précision la masse M_2 d'un échantillon de matériau sec (environ 3 g), et introduire la totalité du matériau dans le pycnomètre, rempli d'eau, et on ferme le bouchon et remplir le

volume restant du pycnomètre de l'eau. Dans tous les cas on vérifie que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'air, puis on pèse alors le pycnomètre, soit M_3 .

On peut alors écrire la relation entre les différents poids mesurés :

$$M_3 = M_1 + M_2 - (M_2 / \rho_s) * \rho_w \dots\dots\dots (II.12)$$

On en déduit la masse volumique ρ_s du matériau, connaissant la masse volumique de l'eau ρ_w qui est égale à 1g/cm^3 ou 1000 Kg/m^3 .



Figure III.13 : Pycnomètre rempli d'eau + échantillon.



Figure III.14 : Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique de polystyrène expansé

III-3-2-Masse volumique apparente : NFP 18-555

Les résultats obtenus des caractéristiques physiques des billes de polystyrène sont présentés sur le **tableau III-8**.

Tableau III-8 : Caractéristiques physiques des billes de polystyrène	
Masse volumique apparente (kg/m^3)	12.13±14
Masse volumique absolue (kg/m^3)	18.5 ±26
Compacité (%)	65.57 %±0.1
Porosité (%)	34.43 % ±0.01

D'après les tableaux A2 (voir l'annexe), on a tracé la courbe granulométrique des billes de polystyrène expansé 3/8 représenté sur Figure II.18.

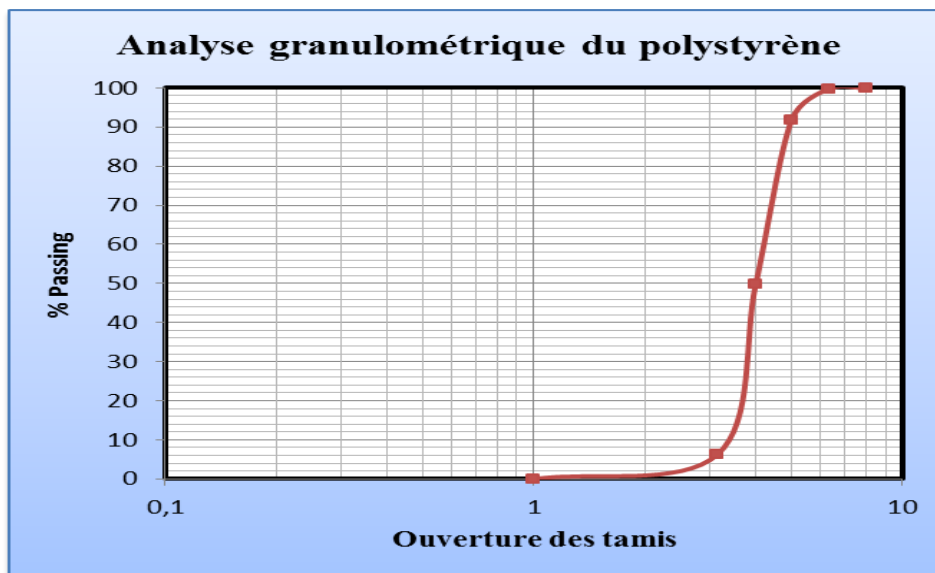


Figure III.15 : Courbes granulométriques des granulats de polystyrène expansé 3/8.

On a d'après la figure II.15 les résultats suivants :

$D_{10} = 3.4 \text{ mm}$, $D_{30} = 3.8 \text{ mm}$, $D_{60} = 4.4 \text{ mm}$

III-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, principalement de pneus de camion. La classe granulaire employée est 3/8

III-4-1-Analyse granulométrique par tamisage :

D'après les tableaux A3 (voir l'annexe), on a tracé la courbe granulométrique des Granulats de déchets de caoutchouc 3/8 représenté sur Figure II.16.

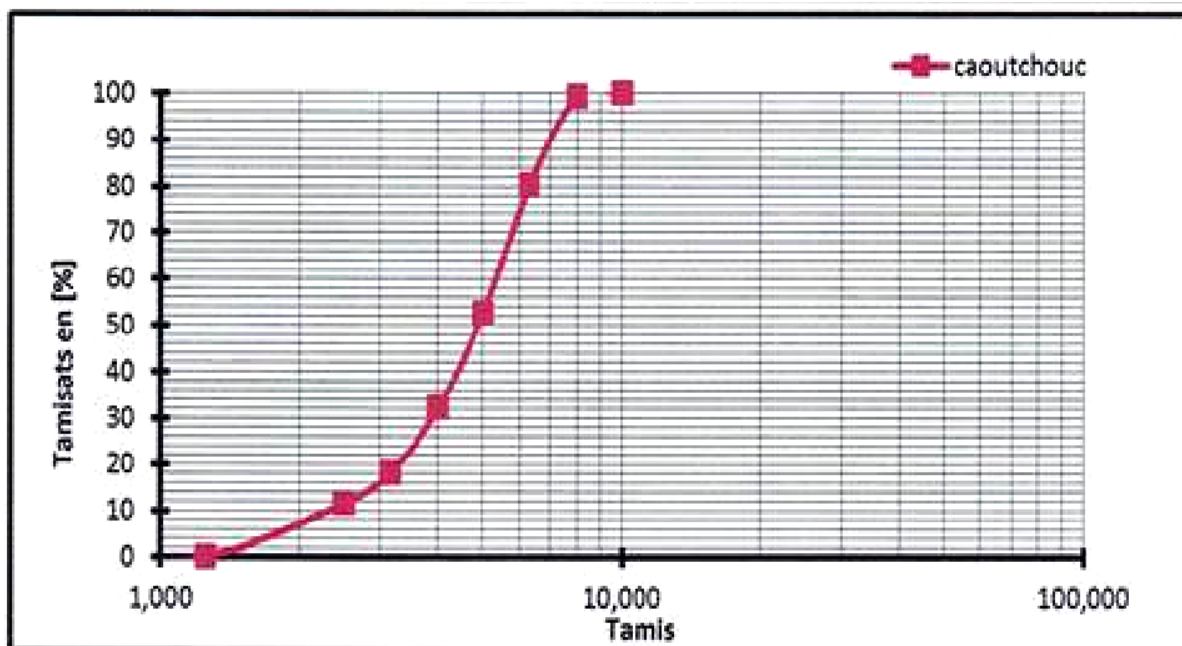


Figure III.16: la courbe granulométrique de caoutchouc

Masse volumique apparente (kg/m ³)	1111±14
Densité spécifique (kg/m ³)	491±26
Compacité (%)	44.19 %±0.1
Porosité (%)	55.8 % ±0.01

V. 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.

L'eau qui est utilisée pour la confection de notre béton doit vérifier deux fonctions principales. D'une part, une fonction physique qui permet de conférer au béton les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. Cette eau doit être propre.

Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5. Si le choix a été porté sur cette eau c'est sa pureté et l'absence des excès des teneurs de sels, de sulfates et d'acides et ceux-ci on se basant sur le rapport fourni par le laboratoire ADE de Laghouat (Algérienne des eaux de Laghouat ex EPDEMIA).

Nature du point d'eau		Robinet		
Ca ²⁺ en mg/l	104	Balance cations m. éq/l		5.20
Mg ²⁺ en mg/l	97			8
Na ⁺ en mg/l	102.3			4.45
K ⁺ en mg/l	646			0.14
Cl ⁻ en mg/l	148	Balance Anions m. éq /l		4.17
SO ₄ ⁻² en mg/l	520			10.82
HCO ₃ ⁻ en mg/l	94			/
NO ₃ ⁻ en mg/l	12.4			0.2
Résidu sec à 105°C	PH	Conductivité en 1/10 mm à 25°C		dureté totale
Test chlore (ml d'eau de Javel à 15°/m ³)		T.A.C	S.A.F	I.S
MINERALISATION	M.O milieu Acide en O ₂	SiO ₂		Somme des ions
Cations	Ca ²⁺ = 15%	Mg ²⁺ = 23.2%	Na ⁺ + K ⁺ = 13.4%	
Anions	HCO ₃ ⁻ = 4.5%	SO ₄ ⁻² = 53.8%	Cl ⁻ + NO ₃ ⁻ = 12.6%	

Tableau II.10: Composition chimique de l'eau de gâchage

III-5-Méthodes expérimentales :

III-5-1-Mise en œuvre

a) Le malaxeur

Nous avons adoptées pour les bétons légers, un malaxage normalisé selon la norme européenne **EN 196-1 [60]** 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 III.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 III.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 III.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 III.17 : Malaxeur normalisé pour pâte utilisé.

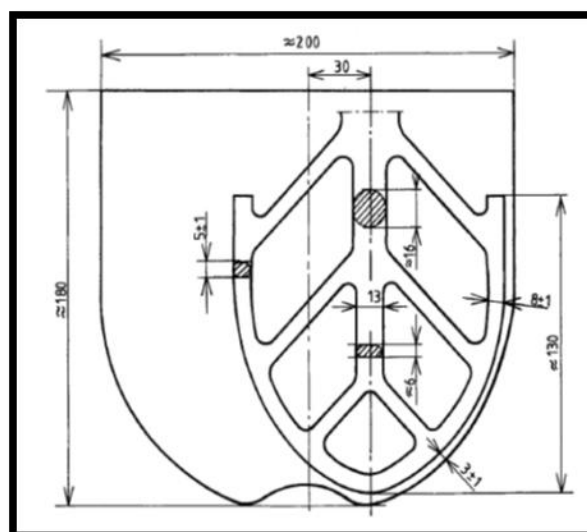


Figure III.18 : Dimensions d'un malaxeur.

Le malaxeur est fonctionné aux vitesses données au tableau suivant :

Tableau III.11: 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, billes de polystyrène et sable dunaire 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'au moment que le BPLPE devient une pâte 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 [13]. Il doit satisfaire le critère de l'échelle 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 7x28 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 éprouvettes de plâtre polystyrène et sable de dune sont démoulés et conservés dans les mêmes conditions de conservation que les éprouvettes de plâtre polystyrène, à l'exception des éprouvettes destinées aux essais de retrait.

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

❖ Les échantillons sont conservés dans les conditions suivantes :

- Température (C°) : $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Humidité (%) : $45\% \pm 5\%$

Les moules utilisés pour les essais mécaniques et le d'essai de variation dimensionnelle sont représentés sur les figures ci-dessus :

Figure III.19 : Moules utilisés pour l'essai mécanique



III-5-2-Caractéristiques mécaniques des BPLPE

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 flexion à trois points et l'essai de compression, qui sont réalisés selon la norme EN 196-1[60], sur les échantillons réalisés, moyennant un appareil d'essais mécanique de marque "CONTROLS" de charge maximale de 100 KN figure (III.12). La valeur de la charge de rupture est lue directement sur le fichier résultat.



Figure III.20 : Machine utilisée pour la mesure des résistances mécaniques

a- Essais de résistance à la flexion

L'essai de flexion à 3 points est effectué sur des prismes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$. Le résultat prise est la moyenne de trois essais.

La figure III.13 montre le dispositif de flexion :

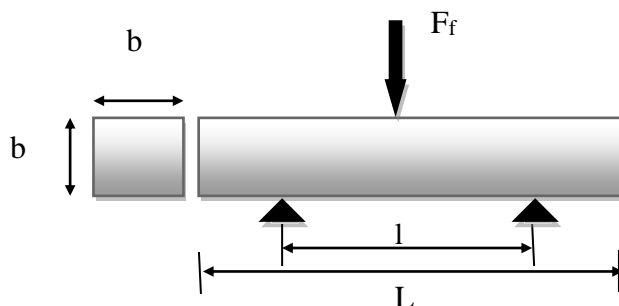


Figure III.21 : Dispositif de flexion par trois points.

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

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

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 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 :

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

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 III.22 montre le dispositif de l'écrasement par compression :

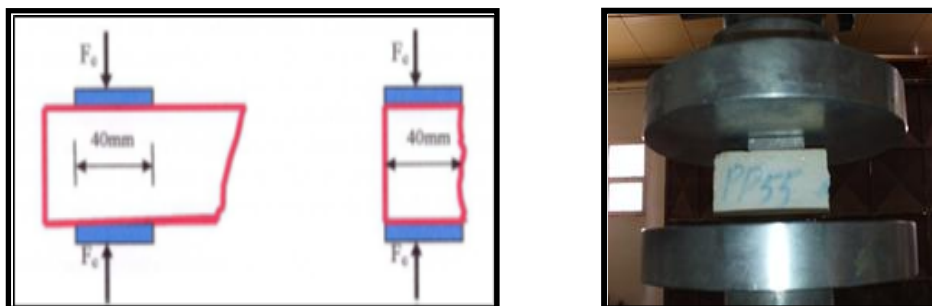


Figure III.22 : Dispositif de l'écrasement par compression.

Absorption par capillarité : Essai d'absorption d'eau

III.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 :

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

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 $HR = 45 \pm 10 \%$).

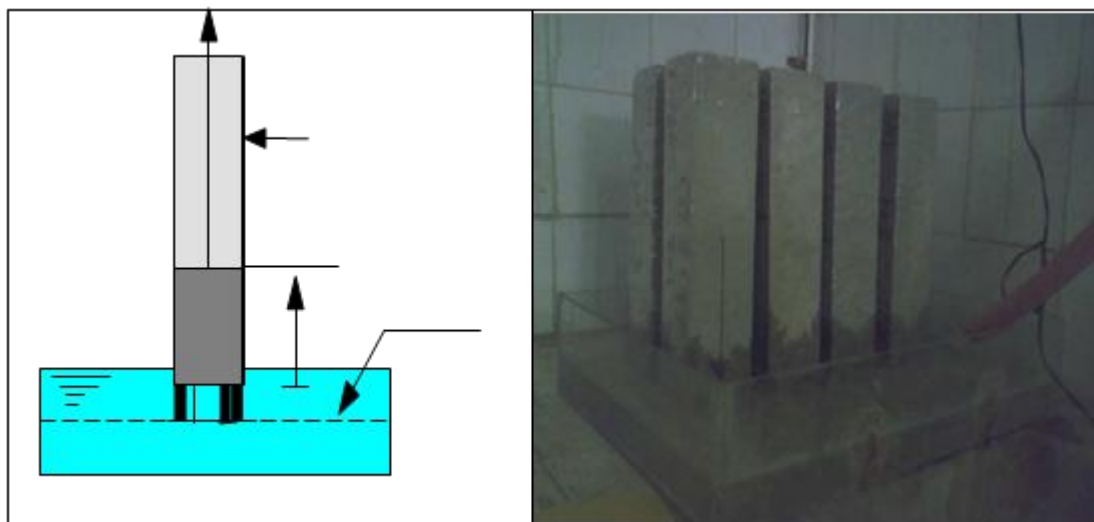


Figure II.23.: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

III-6-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.

III-6-1-Transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur est un phénomène d'échange d'énergie qui intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température. Le transfert de chaleur se fait en réalité selon trois modes particuliers : conduction, rayonnement et convection. La connaissance des propriétés thermo physiques d'un matériau permet de comprendre ou de prévoir son comportement lorsqu'il est soumis à des variations de température. Les propriétés thermo physiques qui doivent être généralement connues sont : la diffusivité thermique, la conductivité thermique, la chaleur massique et l'enthalpie de transformation.

Avant d'expliciter les procédures expérimentales, il est nécessaire de définir les paramètres caractérisant le pouvoir isolant d'un matériau:

➤ La conductivité thermique

La conductivité thermique λ exprimée en $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, 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.

➤ La capacité calorifique

Elle traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner la chaleur, elle est notée (**C**) et exprimée en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

➤ La diffusivité thermique

Le rapport $a = \lambda/\rho C$ est appelé diffusivité thermique du matériau, elle exprime la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en (m^2/s) .

➤ L'effusivité thermique

L'effusivité thermique est la propriété d'un corps à arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact, elle est caractérisée par un coefficient d'arrachement ou effusivité, $b = \sqrt{\lambda\rho c}$ exprimée en $(\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1})$ [35].

III-6-2-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 [35], et la méthode de la sonde plane **TPS** (Transient Plane Source) [35].

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.

III-6-3-Dispositif expérimental :

L'essai consiste à placer en sandwich la sonde TPS (figure IV.1) et la relier à un circuit électrique. La variation de la résistance au borne du pont de Whestone, ΔU permet d'accéder à la différence de potentielle $\Delta E(t)$ aux bornes de l'élément TPS. Une relation entre $\Delta E(t)$ et la variation de température dans l'élément TPS peut être établie. Celle-ci est fonction de la diffusivité thermique a et de conductivité thermique λ . Un traitement mathématique approprié permet d'accéder à λ a et ensuite c .

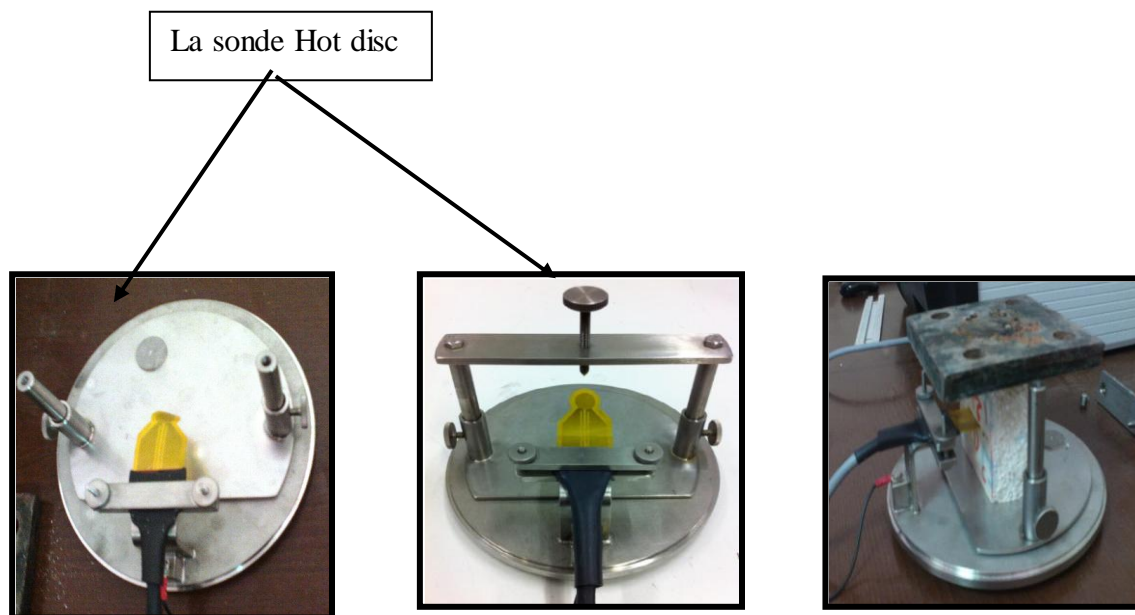


Figure III. 24 : Schéma de la sonde TPS.

Figure III. 25 : Dispositif de serrage, sonde, éprouvette.

III-6-4-Avantages de la méthode TPS

Les principaux avantages de la technique TPS [(Transient 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.

III-6-5-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, 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 [45], 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 métallique 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.

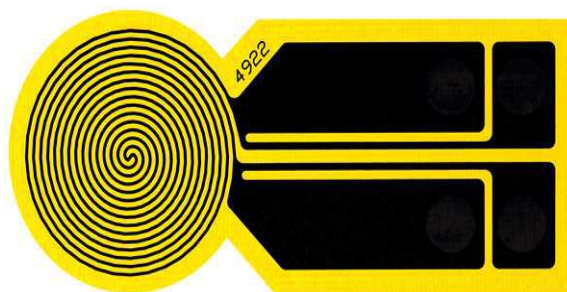


Figure III. 26 : Vue d'une sonde Hot disc.

VI. Résultats des mesures

Les résultats de la mesure des caractéristiques thermiques des BPLPE et BPSLPE par la technique TPS pour les tailles de billes de polystyrène en l'échantillon respectivement 0%, 25%, 30%, 35%, 40% 45%, 50%, 55%, 60% et selon le pourcentage de polystyrène sont donnés sur les tableaux IV.1 , IV. 2. et IV.3.

VI.1. Conductivité thermique de polystyrène

Le polystyrène est un matériau très réputé par ces performances thermiques, il est très utilisé dans l'isolation thermique des constructions sous forme de panneaux de 5cm entreposés

entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. En générale elle varie entre 0.027 à $0.037 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux.

La Figure IV. 4 montre le dispositif utilisé pour la détermination des caractéristiques thermo-physique du polystyrène

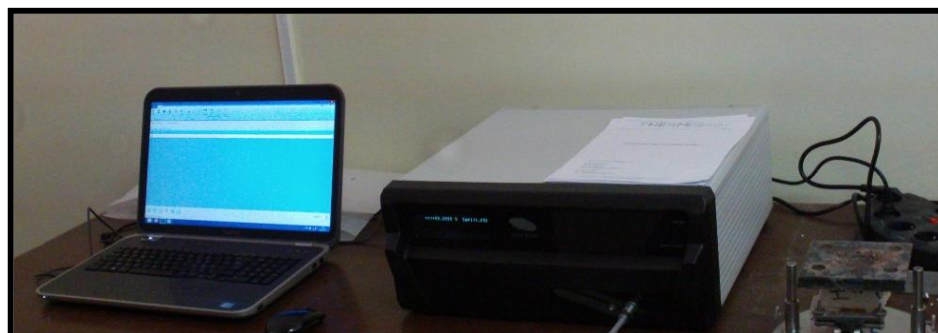


Figure III.27 : Dispositif expérimental pour la mesure de la caractéristique Thermique (méthode TPS).

La Figure IV. 5 montres la sonde TPS pour mesurer les caractéristiques thermiques du polystyrène expansé.

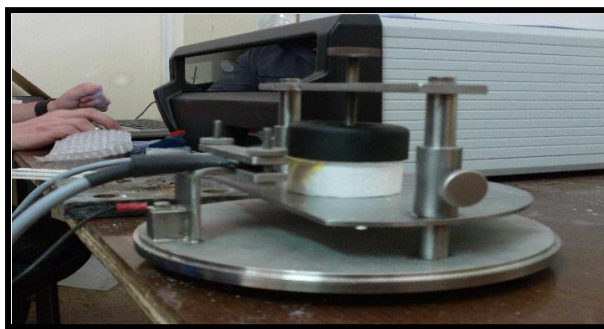


Figure III. 28 : Schéma de la sonde TPS (mesure caractéristiques thermiques du polystyrène).

III. 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 plâtre utilisé est de qualité et cela d'après sa tenue en $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ élevée.
- Le sable de dune est un sable siliceux et très propre.

- La caractérisation des billes de polystyrène utilisé a révélé une masse volumique absolue de 18.5 kg/m³ et masse volumique apparente de 12.13 kg/m³ est une granulométrie de classe (3/8)

Ces billes sont des granulats organiques artificiels ; se présentant sous forme de billes Parfaitement sphériques. Elles sont hydrophobes et imputrescibles

- Pour les granulats de déchets de caoutchouc : masse volumique absolue de 1110 kg/m³ et masse volumique apparente de 491 kg/m³

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

Chapitre IV

Comportement thermo- mécanique des bétons de plâtre légers à base des déchets industriels

Introduction

L'incorporation des billes de polystyrène expansées 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 deux granulats légers sont : les billes de polystyrène et 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, et thermiques : la conductivité , chaleur spécifique et la diffusivité

IV-1-Formulation des bétons de plâtre légers

L'absence d'une méthode universelle pour la formulation des bétons de plâtre, nous a conduits à suivre les recommandations pour la construction en plâtre donnée par CNERIB [35].

-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 [35].

-Concernent les granulats légers, on a essayé d'incorporer les billes de polystyrène et les granulats de déchets de caoutchouc dans la matrice : mortier de plâtre (plâtre + sable), le pourcentage de granulats utilisés et de 0 à 50 % avec un pas de 10 %.

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

BPPSE : Béton Plâtre Polystyrène Expansé

♦ $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$.

BPDC : Béton Plâtre Déchets de Caoutchouc

♦ $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$.

Les résultats de la formulation des bétons de plâtre légers à base des billes de polystyrène

Pourcentage de polystyrène (%)	Masse de polystyrène (g)	Masse de plâtre (g)	E/P	Masse de l'eau (g)	S/P	Masse de sable (g)	Masse de chaux (g)
0	0	4000	0.6	2400	0.5	2000	240
10	8.79	3600	0.6	2160	0.5	1800	216
20	17.58	3200	0.6	1920	0.5	1600	192
30	26.37	2800	0.6	1680	0.5	1400	168
40	35.16	2400	0.6	1440	0.5	1200	144
50	43.95	2000	0.6	1200	0.5	1000	120

Tableau IV.1 : Compositions pondérales de BPLPE polystyrène expansé

et granulats de déchets de caoutchouc sont illustrés sur les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.2 : Compositions pondérales de BPDC

Pourcentage de déchets de caoutchouc (%)	Masse de déchets de caoutchouc (g)	Masse de plâtre (g)	E/P	Masse de l'eau (g)	S/P	Masse de sable (g)	Masse de chaux (g)
0	0	4000	0.6	2400	0.5	2000	240
10	527.6	3600	0.6	2160	0.5	1800	216
20	1055.2	3200	0.6	1920	0.5	1600	192
30	1582.9	2800	0.6	1680	0.5	1400	168
40	2110.5	2400	0.6	1440	0.5	1200	144
50	2638.1	2000	0.6	1200	0.5	1000	120

IV-2-Caractérisation du béton durci

IV-2-1-Caractéristiques physiques des Bétons de plâtre

a. Masse volumique apparente des bétons

Les éprouvettes 70×70×280cm³ des deux types de bétons 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.

*** Variation de la masse volumique de BPLPSE**

Les résultats de la variation de masse volumique du **BPLPSE**, sont illustrés sur la figure IV.1 et le tableau A3 (voir l'annexe)

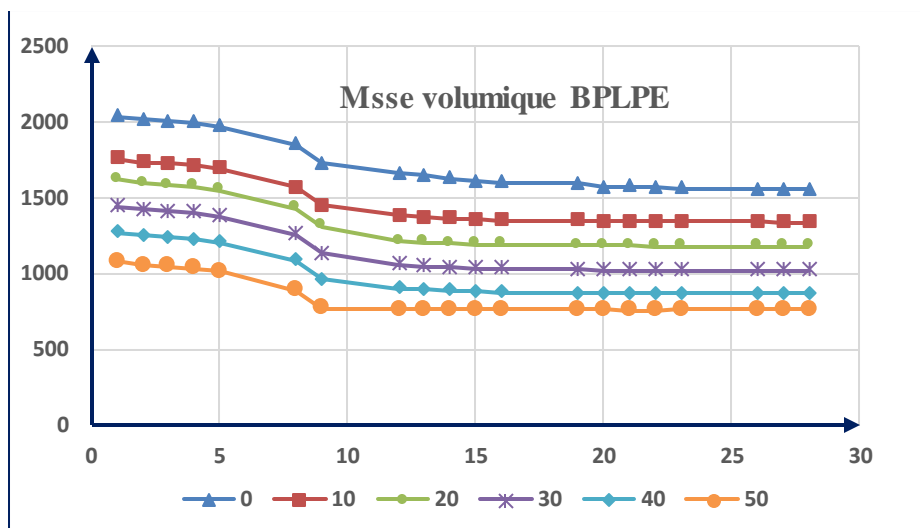


Figure IV.1 : Variation de la masse volumique de BPPSE en Kg/m³.

Variation de la masse volumique de BPDC

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

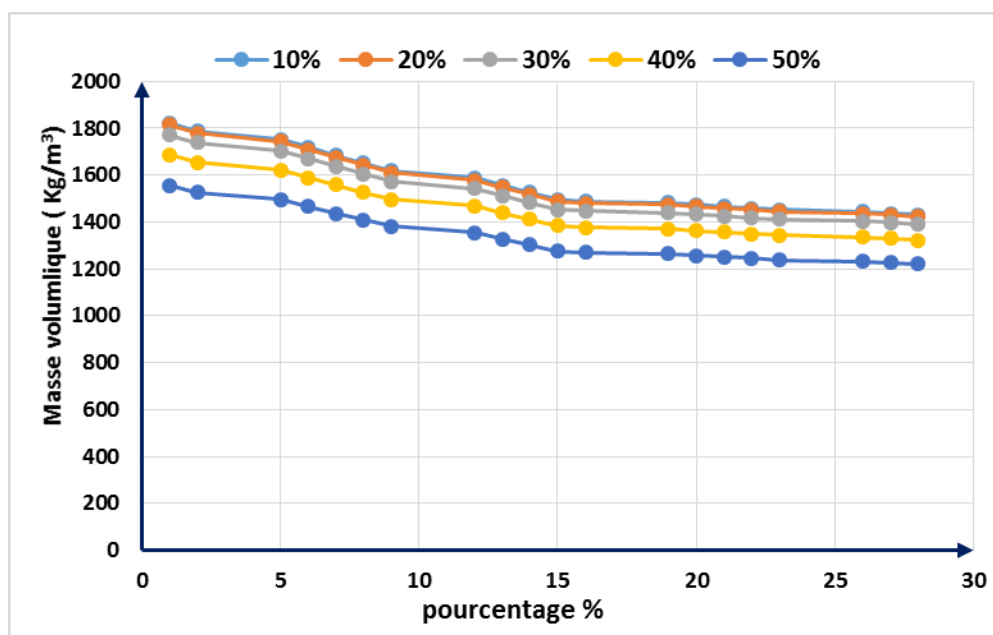


Figure IV.2 : Variation de la masse volumique de BPDC

D'après les figures IV.1, IV.2, la masse volumique apparente des bétons élaborés (BPPSE, 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 granulats de polystyrène et le déchet de caoutchouc la masse volumique décroît.

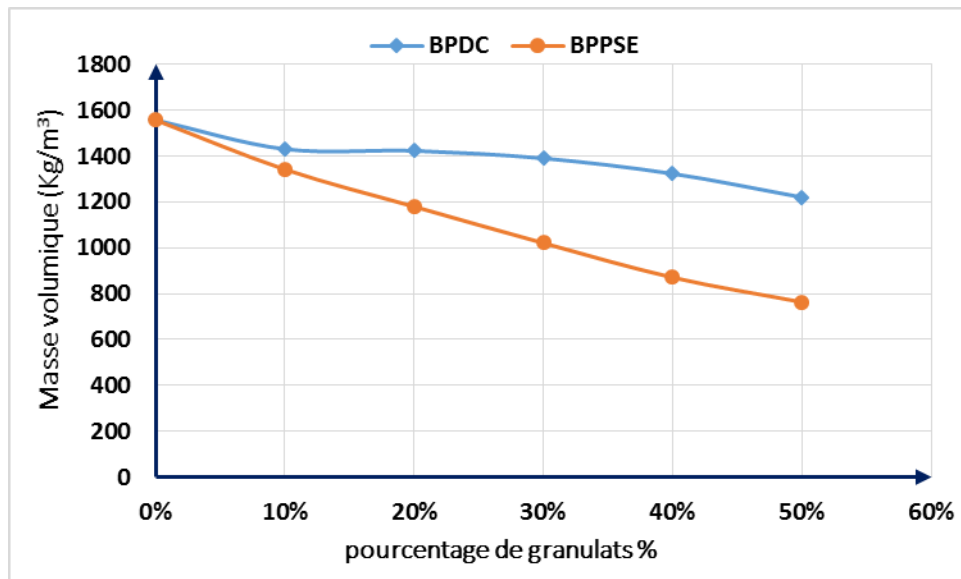


Figure IV.3 : Variation de la masse volumique de BPDC et BPPSE à 28 jours

On a enregistré une diminution de la masse volumique apparente de l'ordre de 49% pour le BPPSE, et de 21 % pour le BPDC, et cela par rapport au béton témoin (0%).

Cette diminution considérable de la masse volumique du matériau peut être due à la faible masse volumique des billes de polystyrène et des granulats de déchets de caoutchouc introduites, nos résultats sont en accord avec les études des matrices cimentaire et billes de polystyrènes [66] et études des matrices plâtre léger avec granulats de liège [22].

b- d'absorption d'eau par capillarité des bétons légers de BPPSE et BPDC

L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué sur des éprouvettes (10×20) cm³ sur une période de 4 jours. Les figures (IV.4., IV.5) montrent l'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps.

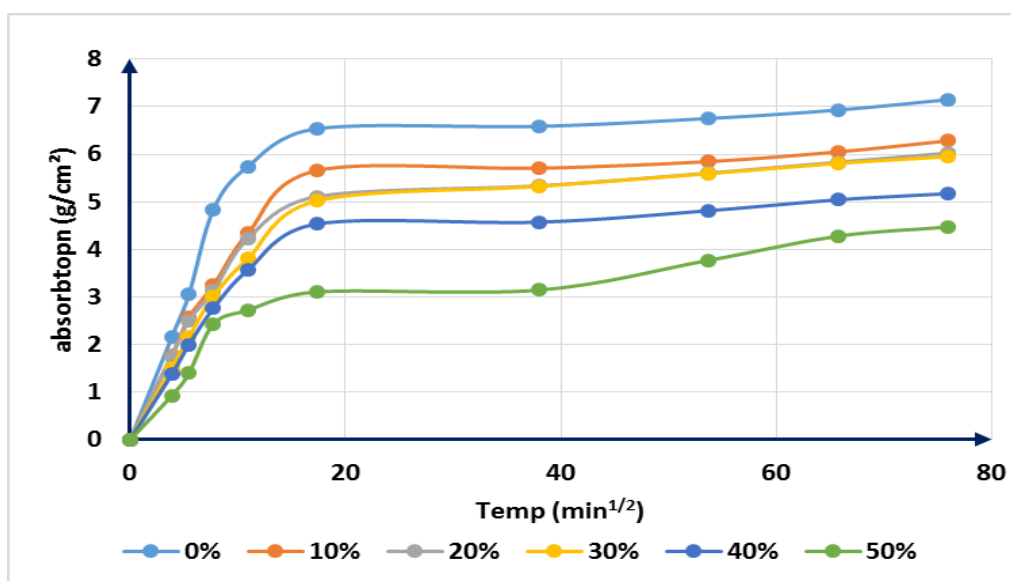


Figure IV.4 : Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour BPPSE

BPDC :

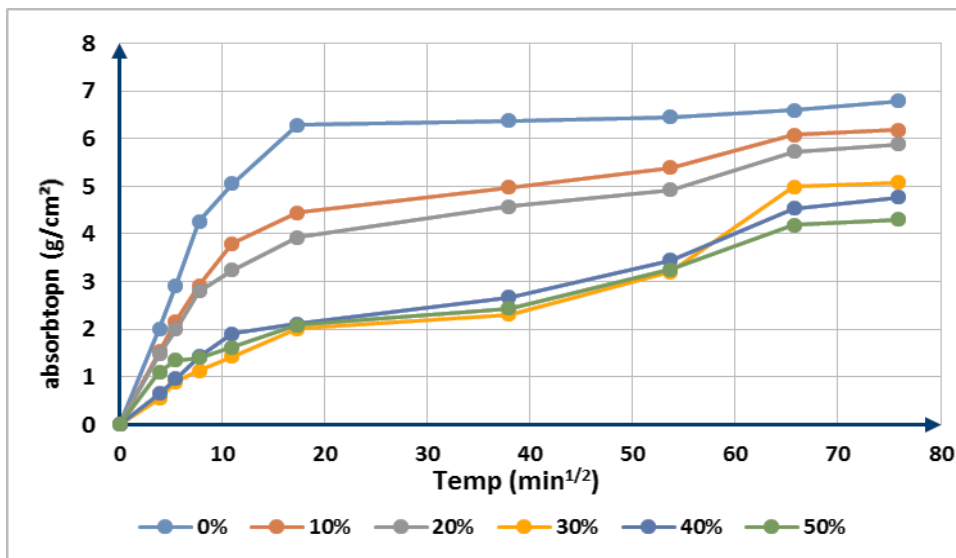


Figure IV.5 Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour BPDC

D'après les résultats obtenu 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 BPPSE est 48.6% e pour le BPDC est 53.89 %

Donc le BPDC absorbe l'eau plus que BPPSE et cela revient à la nature des granulats utilisés

IV-2-2-Caractéristiques mécaniques des BPLPE

- * **Variation de la résistance à la flexion de BPLPE**
- * Les résultats de la variation de résistance à la flexion des **BPPSE et BPDC** sont illustrés sur la figure IV.6 et figure IV.7 et le tableau A7 et le tableau A8 (voir l'annexe).

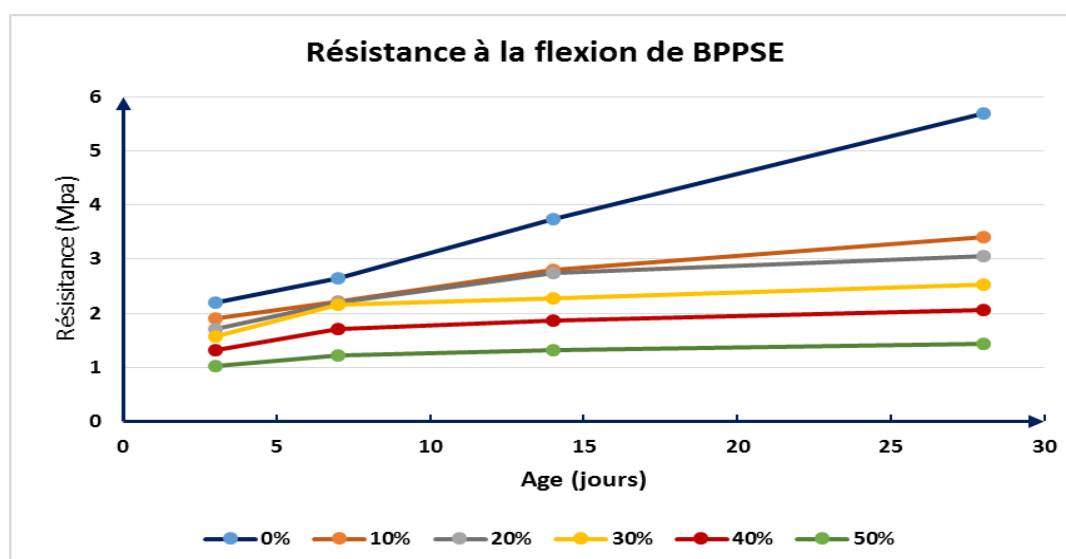


Figure IV.6 : Variation de la résistance à la flexion de BPPSE, en MPa en fonction de leurs âges.

* Variation de la résistance à la flexion de BPDC, en fonction de leurs âges :

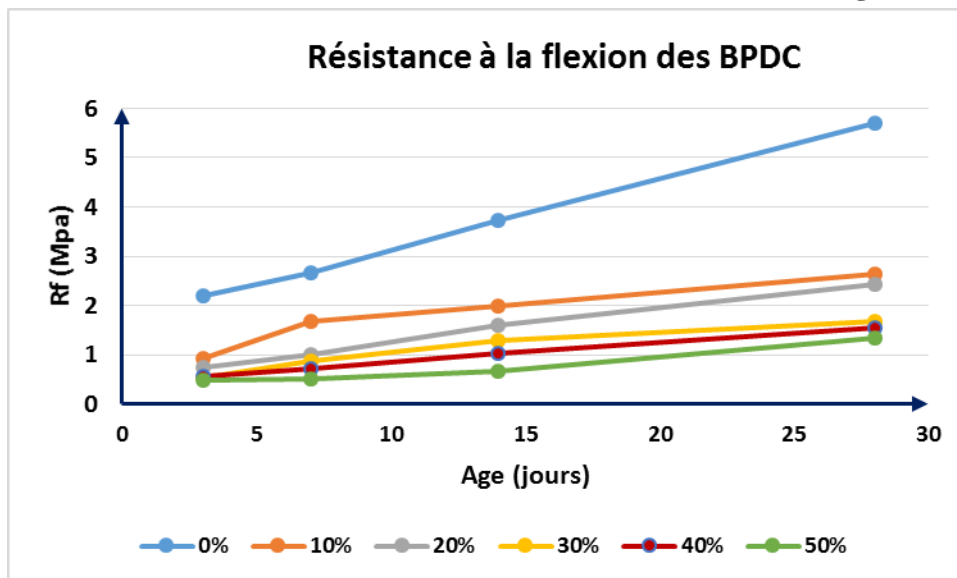


Figure IV.7 : Variation de la résistance à la flexion des BPDC, en MPa en fonction de leurs âges.

1. Variation de la résistance à la flexion a 28 jours des bétons de plâtre en fonction de pourcentage des granulats

Les résultats de la variation de résistance à la flexion du BPPSE et BPDC sont illustrés sur la figure IV.8 et le tableau A9 (voir l'annexe).

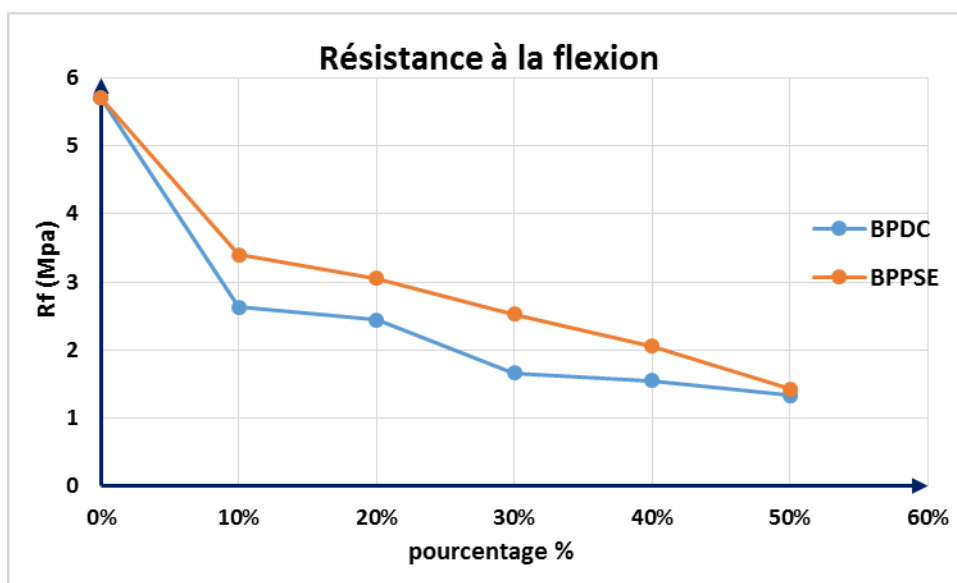


Figure IV.8 : Variation de la résistance à la flexion de BPPSE et BPDC en MPa en fonction de pourcentage des granulats

Variation de la résistance à la compression de BPPSE

Les résultats de la variation de résistance à la compression du BPPSE sont illustrés sur la figure IV.9 et figure IV.10 et le tableau A10 et le tableau A11 (voir l'annexe).

1. Variation de la résistance à la compression des BPPSE en fonction de leurs âges

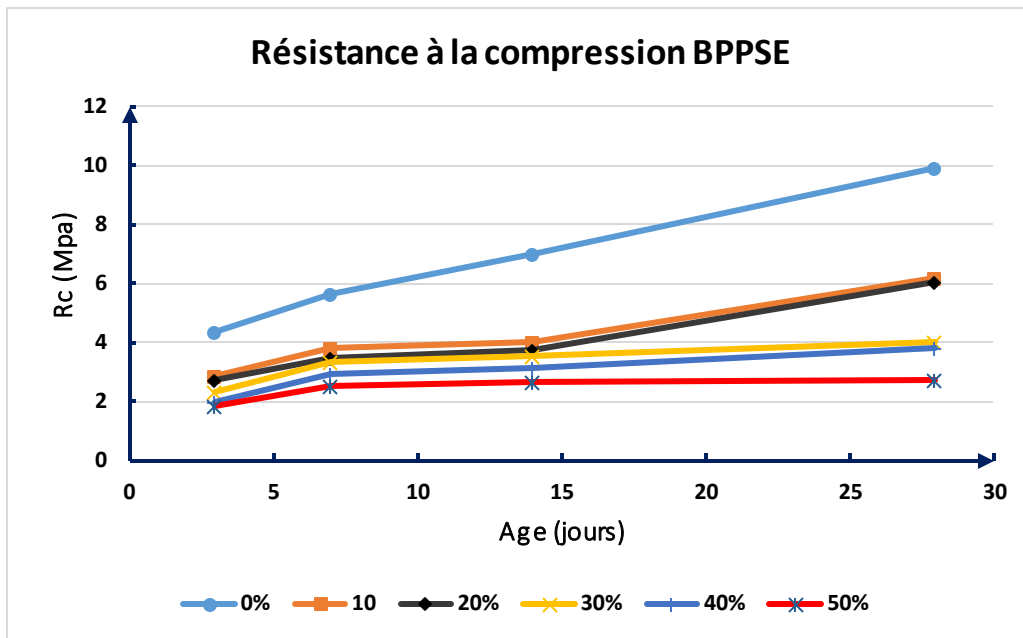


Figure IV.9 : Variation de la résistance à la compression de BPPSE en MPa en fonction de leurs âges

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

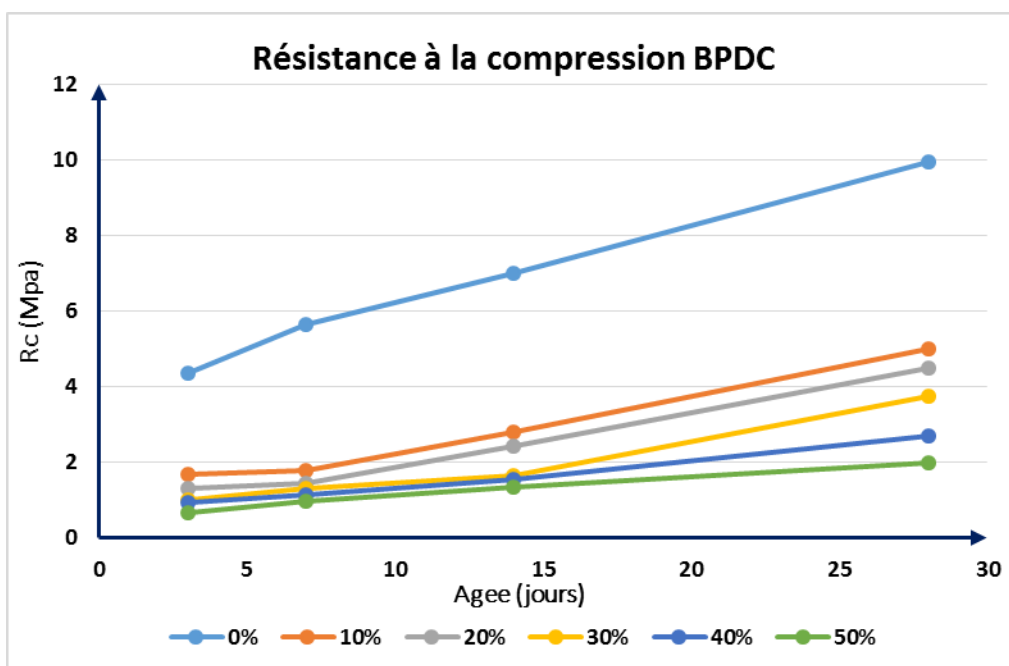


Figure IV.10 : Variation de la résistance à la compression de BPDC en MPa en fonction de leurs âges

6. Variation de la résistance à la compression a 28 jours des bétons de plâtres en fonction de pourcentage des granulats

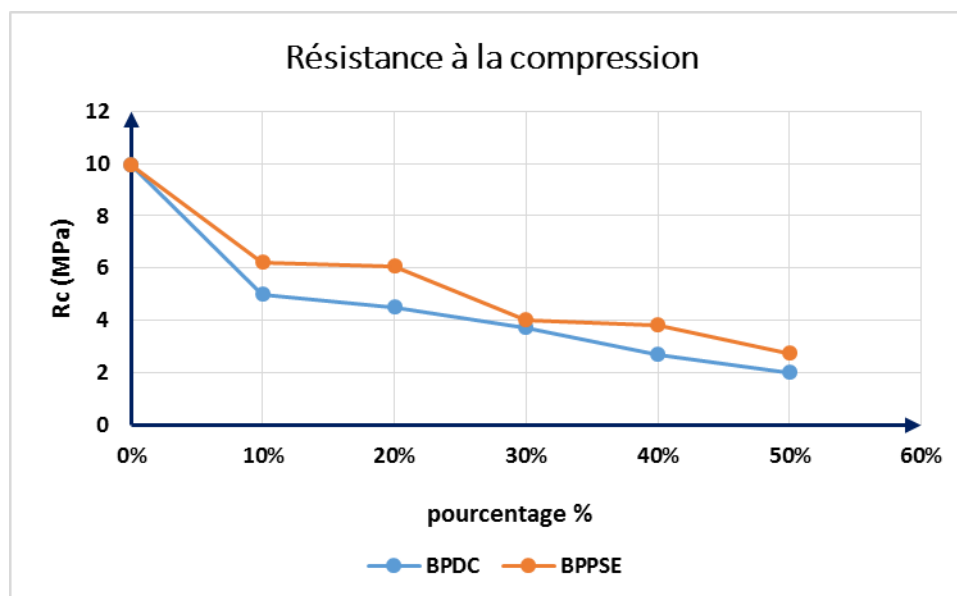


Figure IV.11 : Variation de la résistance à la compression des bétons de plâtre à 28 jours en MPa en fonction de pourcentage des granulats.

D'après les résultats des essais mécaniques effectués sur les quatre bétons élaborés (BPPSE BPDC) on remarque que ce soit la résistance de compression ou la résistance de flexion, diminue avec l'augmentation de la teneur des PSE et des DC

La figures **IV.6**, **IV.8** est montrent une décroissance dans la résistance de flexion en fonction du dosage en PSE. Le taux de décroissance est de l'ordre de 74.9 % (de **5.7** à **1.43** MPa) pour le BPPSE.

La figures **IV.7**, **IV.8** est 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 76.56 % (de **5.7** à **1.34** MPa) pour le BPDC

La figures **IV.9**, **IV.11** est montrent une décroissance dans la résistance à la compression en fonction du dosage en PSE. Le taux de décroissance est de l'ordre de 72.4 % (de **9.05** à **2.75** MPa) pour le BPPSE,

La figures IV.10, IV.11 est 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 79.9 % (de 9.05 à 2 MPa) pour le BPPDC

Les gammes de masse volumique dans lesquelles varient ces résistances sont 1557.34 à 762.9 kg/m³ pour le BPPSE, et de 1557.34 à 1220.5 kg/m³ pour le BPDC.

IV-2-3-Variation des caractéristiques physiques en fonction de résistance à la compression

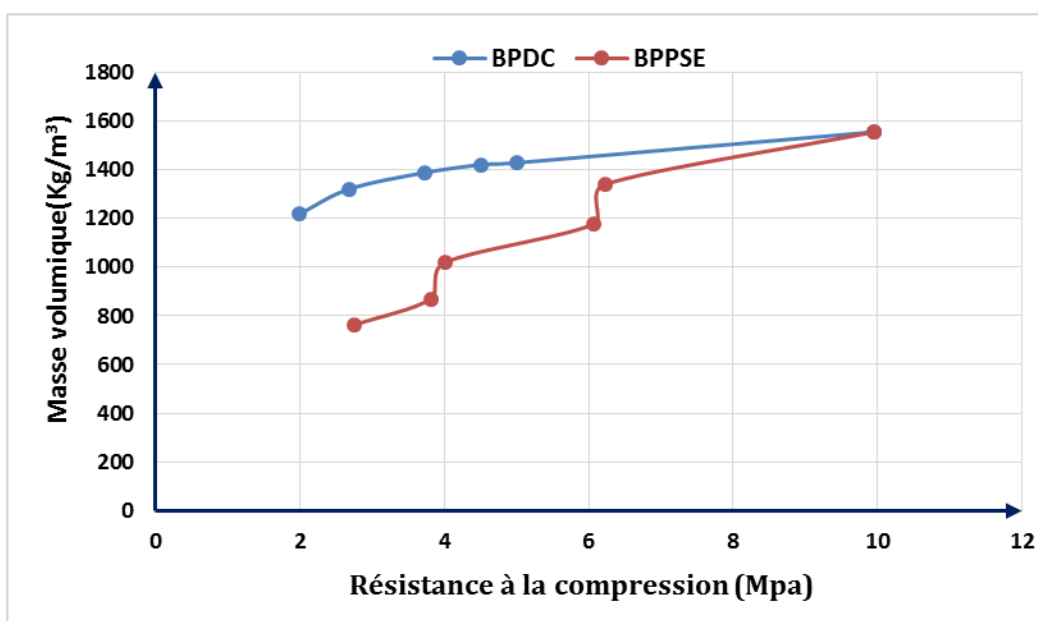


Figure IV.12 : Variation de la masse volumique de BPPSE et BPDC En fonction de la résistance à la compression

- la figure IV.12 représente variation de la masse volumique des BPPSE et BPDC, en fonction de la résistance à la compression, Nous pouvons remarquer que la masse volumique s'accroît dans le même sens que la résistance à la compression.

IV-3-Résultats des caractéristiques thermiques

Les deux tableaux IV.3, IV.4 présentent les résultats des caractéristiques thermique mesurées (BPPSE, BPDC) pour différents pourcentage de EPS et DC

Tableau IV.3 : Résultat de l'essai thermique du BPPSE.

	Conductivité thermique λ (W. m ⁻¹ .K ⁻¹)	Diffusivité thermique a (mm ² /s)	Chaleur spécifique c (MJ. m ⁻³ .K ⁻¹)	Densité ρ (Kg/m ³)
0%	0.615	1.544	0.54	1599.611
10%	0.513	0.947	0.60	1351.555
20%	0.394	0.488	0.68	1188.776
30%	0.380	0.476	0.78	1027.94
40%	0.302	0.388	0.89	872.6919
50%	0.198	0.228	1.14	763.1195

Tableau IV.4 : Résultat de l'essai thermique du BPDC

	Conductivité thermique λ (W. m ⁻¹ .K ⁻¹)	Diffusivité thermique a (mm ² /s)	Chaleur spécifique c (MJ. m ⁻³ .K ⁻¹)	Densité ρ (Kg/m ³)
0%	0.615	1.544	0.54	1451.56
10%	0.550	0.454	0.83	1436.13
20%	0.527	0.291	1.03	1422.851
30%	0.486	0.301	1.14	1418.55
40%	0.462	0.327	1.27	1365.82
50%	0.296	0.176	1.38	1220.508

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

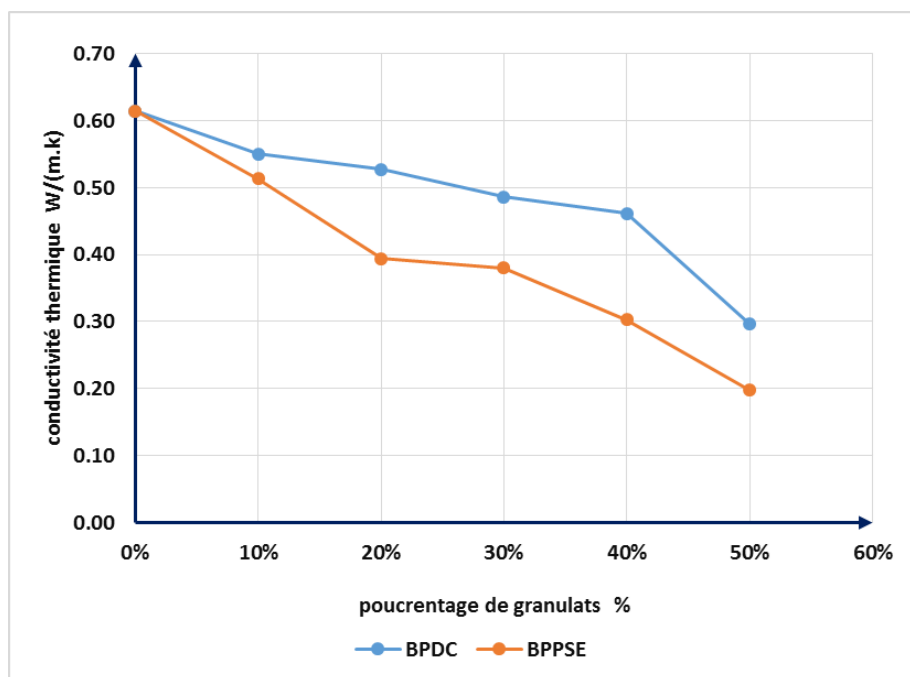


Figure IV.13. Variation de la conductivité thermique en fonction de pourcentage

D'après la figure IV.13 on constate que la conductivité thermique décroît avec l'augmentation du pourcentage de polystyrène et granulats de déchet de caoutchouc et cela pour les compositions élaborées est en accord avec la littérature [22,45].

- Pour le BPPSE, La conductivité thermique la plus faible est de $0.198 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ce qui est en accord de 50 % de polystyrène, la diminution de la conductivité thermique est de l'ordre de 67.8 % par rapport au béton témoin. Celle d'un béton ordinaire est d'environ $1.4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, donc l'allégement du polystyrène permet de diminuer de presque 85.9 % la conductivité thermique par rapport à un béton normal
- Concernant le BPDC, la conductivité thermique obtenue est de l'ordre de 0.296 W/(m.k) pour un pourcentage de DC 50% et on a enregistré une diminution de 51.86 % par rapport au béton témoin, elle est d'environ 78.9 % moins que celle d'un béton ordinaire.
- D'après les figures ci-dessus on peut remarquer que les bétons de polystyrène présentent des performances thermiques meilleures que celles des bétons de déchets de caoutchouc en effet :
 - La conductivité thermique des BPPSE est inférieure à celle des BPDC d'une proportion de 24.3 % en moyenne, mais les conductivités thermiques des deux types de bétons sont largement inférieures à celle du béton témoin

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

2. Variation de la conductivité thermique λ en fonction de masse volumique

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

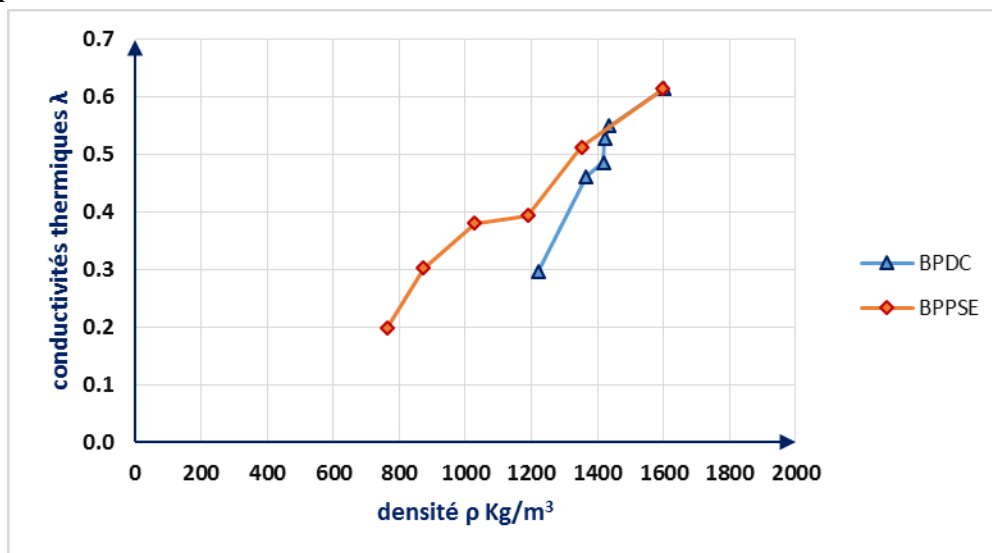


Figure IV.14 : Variation de conductivités thermiques λ
En fonction de densité ρ .

D'après la figure IV.14 la conductivité thermique augmente lorsque la masse volumique augmente, car on diminue la proportion de vides, dans le matériau ; en effet l'ajout de billes PSE et granulats de DC à la matrice conduit à une forte variation de la densité. Plus la teneur en billes PSE et DC sont importantes, plus la masse volumique n'est faible, de deux composites. On en déduit donc que la contribution de l'augmentation de la porosité du fait de l'ajout des deux types de granulats joue un rôle important dans l'allégement 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

3. Variation de la chaleur spécifique C

La figure IV.15 Représenté la variation de la chaleur spécifique en fonction de pourcentage de deux granulats

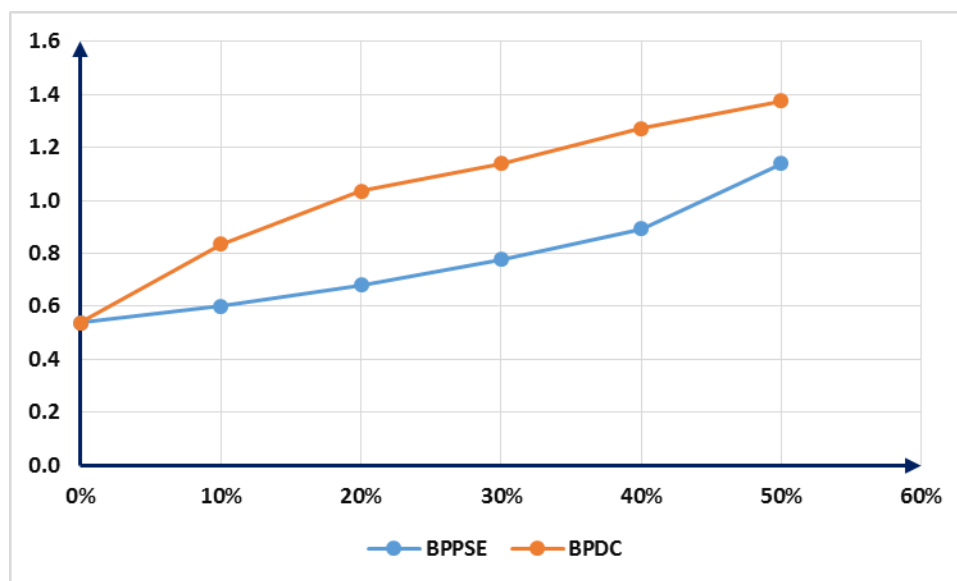


Figure IV.15 .la variation de la chaleur spécifique en fonction de pourcentage de deux granulats

- La figure IV.15 montre que la chaleur spécifique augmente avec le dosage en granulats légers, cette constatation est d'accord aux quelques travaux réalisés et cela dépend de la nature des granulats utilisés.
- Concernant le BPPSE la chaleur spécifique obtenue est de l'ordre de $1.14 \text{ MJ. m}^3.\text{K}^{-1}$ pour un pourcentage de polystyrène 50% et on a enregistré une augmentation de 52.7 % par rapport au béton témoin
- Concernant le BPDC la chaleur spécifique obtenue est de l'ordre de $1.38 \text{ MJ. m}^3.\text{K}^{-1}$ pour un pourcentage de 50% de DC on a enregistré une augmentation de 60.9 % par rapport au béton témoin
- Lorsqu'on compare les chaleurs spécifiques des deux bétons on voit que le béton de plâtre à base déchets de caoutchouc a la capacité d'emmagasiner la chaleur mieux que le béton de plâtre à base de polystyrène cela est dû au fait que pour les BPDC les caractéristiques thermiques sont gouvernées par les caractéristiques des granulats. Sachant que le déchet de caoutchouc possède une capacité calorifique supérieure à celle du polystyrène, il en résulte que pour une même densité, les BPDC possèdent un pouvoir de stockage plus grand que celui des BPPSE

3. Variation de la diffusivité thermique

La figure IV.16 représenté la variation de la diffusivité thermiques en fonction de pourcentage des granulats PSE et DC

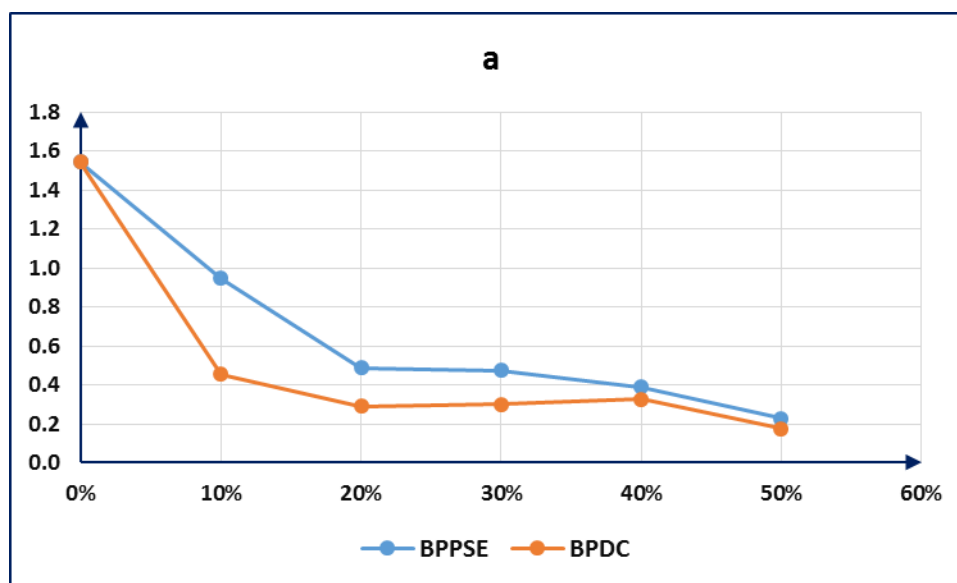


Figure IV.16 .la variation de la diffusivité thermiques en fonction de pourcentage de deux granulats

- Les courbes de différents dosages en granulats présentent une tendance générale identique avec une diminution très nette de la diffusivité lorsque la teneur en granulats augmente, cette diminution peut être attribué à la texture des granulats utilisés.
- Concernent le BPPSE la diffusivité thermiques obtenue est de l'ordre de $0.228 \text{ mm}^2/\text{s}$ pour un pourcentage de polystyrène 50% et on a enregistré une diminution de 85.3% par rapport au béton témoin.
- Concernent le BPDC la diffusivité thermiques obtenue est de l'ordre de $0.176 \text{ mm}^2/\text{s}$ pour un pourcentage de DC 50% et on a enregistré une diminution de 88.6% par rapport au béton témoin.
- En termes de diffusivité, la comparaison entre les deux types de bétons n'est pas tranchante mais on peut dire que la vitesse de propagation d'une perturbation thermique est faible dans les BPDC que pour Les BPPSE même si la différence n'est pas trop significative
- Les faibles diffusivités thermiques liées à des fortes capacités calorifiques sont signe déterminant d'un matériau thermiquement performant, nos résultats sont accord avec la littérature [45].

IV-4-Variation des caractéristiques thermiques en fonction de résistance à la compression

Les figures ci-dessous illustrent la variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression

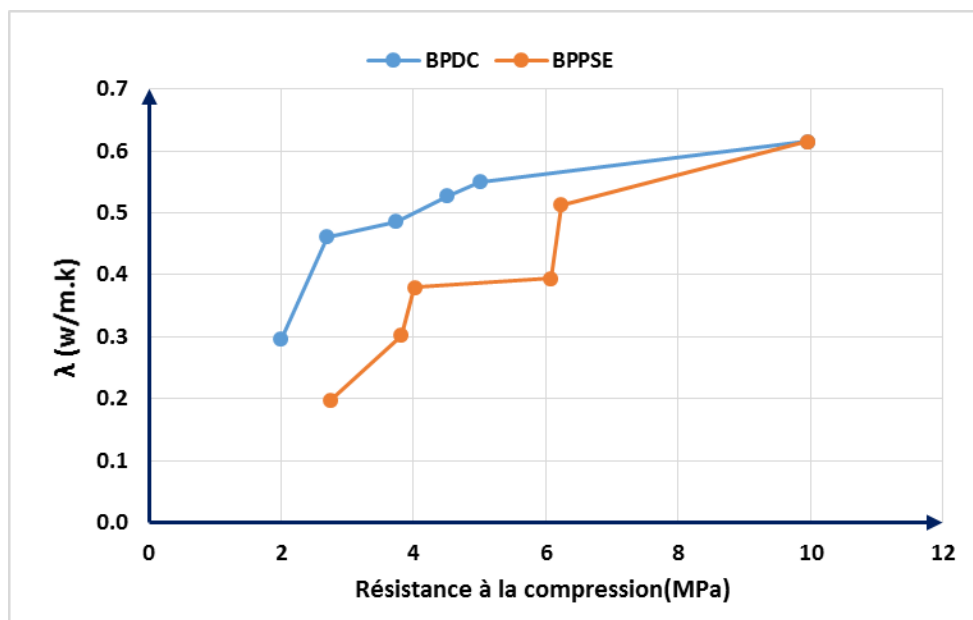


Figure III.17 : Variation de conductivité thermique de bétons de plâtres En fonction de la résistance à la compression

On montre que la conductivité thermique augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la résistance à la compression. Ce qui est en accord avec les travaux [44].

Cette constatation doit être considérée comme un critère de choix de ces matériaux pour qu'ils soient utilisés comme des isolants ou des isolants porteurs et qui détermine les classes des bétons pour les deux types des granulats utilisés (tableaux ci-dessous).

		0%	10%	20%	30%	40%	50%
Rc	EPS	9.95	6.23	6.08	4.01	3.81	2.75
	DC	9.95	5.00	4.51	3.74	2.69	2.00
λ (W /m.k)	EPS	0.615	0.513	0.394	0.380	0.302	0.198
	DC	0.615	0.550	0.527	0.486	0.462	0.296
Classe du Béton	BPPSE	Classe II	Classe II	Classe II	Classe II	Classe II	Classe III
	BPDC	Classe II	Classe II	Classe II	Classe II	Classe III	Classe III

Tableau IV-5 : classification fonctionnelle des bétons légers est recommandée par la RILEM

NB :

Classe I : Béton léger de construction

Classe II : Béton léger de construction et isolation

Classe III : Béton léger d'isolation

IV. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à présenter et interpréter les résultats des essais physico-mécaniques des bétons de polystyrène élaborés,. Ce chapitre nous a permis de prendre connaissance des classes de bétons légers en fonction de leurs densités et les valeurs limites des résistances mécaniques

Ce chapitre a été consacré aussi à présenter et interpréter les résultats de l'essai de mesure des propriétés thermiques des composites élaborés.

- * Les gammes de masse volumique dans lesquelles varient ces résistances sont **1557.34 à 762.9 kg/m³** pour le BPPSE, et de **1557.34 à 1220.5 kg/m³** pour le BPDC
- * L'étude de d'absorption d'eau par capillarité montre que l'augmentation des dosages des granulats, entraine une diminution l'absorption d'eau, et la diminution moyen pour BPPSE est 48.6% e pour le BPDC est 53.89 % par apport le béton témoin
- * Les dosages en teneur des granulats allant de 0 à 50% (avec un pas de 5%), les résistances obtenues en flexion diminuent de 5.7 à **1.43 MPa** pour le BPPSE et de **5.7 à 1.34 MPa** pour le BPDC,
- * Les résistances obtenues en compression diminuent de **9.95 à 2.75 MPa** pour le BPPSE, et de **9.95 à 2. MPa** pour le BPDC
- * Les résultats expérimentaux 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.

Malgré le béton de caoutchouc est plus dense par rapport le béton de polystyrène mais on a observé que la résistance béton de caoutchouc est faible, mais nos résultats restent en accord avec les travaux sur le béton de caoutchouc de [**Ana Jiménez Rivero 2014**]

Ces résistances restent bien dans les normes exigées et pour un béton de structure et isolation et béton d'isolation (classe II, classe III) conformément au classement fonctionnel de la RILEM [11] (**tableau I.1 du chapitre I**).

Ces résistances restent bien dans les normes exigées pour un béton léger de béton de faible résistance ($\rho = 300-800 \text{ kg/m}^3$) et résistance de compression ($R_c < 7\text{MPa}$) conformément Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87 [10] (**tableau I.4 du chapitre 1**).

- la conductivité thermique de BPDC obtenue est de l'ordre de 0.296 W/ (m.k) pour un pourcentage de DC 50% et on a enregistré une diminution de 51.86 % par rapport au béton témoin, Elle est d'environ 78.9 % moins que celle d'un béton ordinaire.
- les bétons de polystyrène présentent des performances thermiques meilleures que celles des bétons de déchets de caoutchouc en effet :
 - La conductivité thermique des BPPSE est inférieure à celle des BPDC d'une proportion de 24.3 % en moyenne, mais les conductivités thermiques des deux types de bétons sont largement inférieures à celle du béton ordinaire avec un rabatement de 85%.
- Les faibles diffusivités thermiques liées à des fortes capacités calorifiques sont signe déterminant d'un matériau thermiquement performant. Donc, utilisé comme des éléments de remplissage, les BPSE et les BPDC peuvent procurer une isolation thermique très intéressante et par conséquent un gain d'énergie très remarquable par rapport aux matériaux ordinaires communément employés dans la construction.

Conclusion Générale

Ce travail, qui entre dans le cadre de la valorisation des différents matériaux et de la réutilisation des déchets industriels, avait pour but l'élaboration de nouveaux bétons qui peuvent remplacer le béton classique utilisé dans la construction tout en assurant une bonne isolation thermique. Ceci peut, d'une part répondre aux besoins économiques et d'autre part, participer à la protection de l'environnement. Pour atteindre ce but, une étude approfondie du comportement mécanique et du comportement thermique était, donc, nécessaire pour évaluer les caractéristiques spécifiques de ces matériaux et de les classer parmi les différents bétons légers, les matériaux étudiés sont des bétons de plâtre, à base de billes de polystyrène et de déchets de caoutchouc. Le présent travail est axé sur l'influence de l'ajout du polystyrène expansé PSE du caoutchouc (DC) sur le comportement mécanique et thermique du béton plâtre.

Les principales conclusions de ce travail de mémoire peuvent se résumer comme suit :

- L'étude bibliographique a montré la possibilité d'utilisation des bétons légers dans plusieurs domaines malgré la diminution de leur résistance mécanique. En effet, les propriétés intéressantes des bétons légers, telles que la légèreté, la bonne capacité d'isolation phonique thermique, etc., ne peuvent qu'élargir le domaine d'application de ce type de composites.
- L'introduction du polystyrène et du caoutchouc dans la matrice plâtre-sable de dunes a permis d'atteindre des densités du composite comprises entre **1557.34** à **762.9 kg/m³** pour le BPPSE, et de **1557.34** à **1220.5 kg/m³** pour le BPDC pour des dosages en granulats compris entre 0 et 50%. Par rapport au béton témoin, une diminution de la masse volumique apparente de l'ordre de 49% pour le BPPSE, et de 21 % pour le BPDC, a été enregistrée.
- Pour les composites préparés à base de polystyrène et de caoutchouc, la résistance de flexion est inversement proportionnelle avec le dosage incorporé. Le taux de diminution est de l'ordre de 74.9% et 76.56% pour les mélanges contenant le polystyrène et le caoutchouc, respectivement.
- De sa part, la résistance en compression est inversement proportionnelle avec le dosage en déchet ajouté. Le taux de diminution est de l'ordre de 72,49% et 79,9% pour les mélanges contenant le polystyrène et le caoutchouc, respectivement.

- L'étude du transfert de chaleur menée dans notre recherche a permis de bien assimiler le phénomène de conduction dans les matériaux, bien que cette étude s'est toutefois limitée au calcul de la conductivité thermique ; mais elle fait partie des propriétés les plus importantes, elle s'agit du bon pouvoir isolant que présente ces matériaux. La conductivité thermique a nettement diminuée par ajout des billes de PSE et granulats de DC. Les propriétés thermiques du béton de plâtre léger sont liées à leurs masses volumiques, autrement dit, plus la masse volumique est faible plus la conductivité thermique est faible. Pour la gamme des bétons élaborés on a pu obtenir une conductivité thermique inférieure à $0,30 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, une valeur de $0,198 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ est enregistrée pour le BPSE pour pourcentage PSE de 50 %, contre $0,296 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le BPDC de pourcentage 50 % de DC
- Les courbes diffusivité-dosages en granulats présentent une tendance générale identique avec une diminution nette de la diffusivité lorsque la teneur en granulats augmente, cette diminution peut être attribuée à la texture des granulats utilisés, dont nos résultats sont accord avec la littérature. Pour le mélange préparé à base du polystyrène (50%), la diffusivité thermique se baisse par $0,228 \text{ mm}^2/\text{s}$, ce qui représente 85.3% de réduction, par rapport au béton témoin. Pour le cas du caoutchouc et un même taux de remplacement (50%), la diffusivité thermique diminue par 88.6% par rapport au béton témoin.
- la chaleur spécifique augmente avec le dosage en granulats légers, cette constatation est en accord aux quelques travaux réalisés et cela dépend de la nature des granulats utilisés.
- Il est à signaler que les valeurs de conductivité thermique obtenues à sec sont conformes aux recommandations de la RILEM (tableau I.1 du chapitre I) qui préconise un coefficient de conductivité thermique inférieur à $0,30 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour un béton léger d'isolation (classe I) et un béton léger de construction et d'isolation (classe III).
- En combinant les deux aspects mécanique et thermique, nous pouvons conclure, qu'à des teneurs en granulats bien déterminées, il est possible d'obtenir un béton pouvant jouer le rôle d'isolant, aussi bien pour les mélanges de BPPSE que pour les mélanges de BPDC). Les bétons contenant le polystyrène présentent une performance thermique meilleure que ceux préparés à base du caoutchouc. En effet, la conductivité thermique des BPPSE est inférieure à celle des BPDC d'une proportion de 24.3 % en moyenne, mais la conductivité

thermique des deux types de bétons est inférieure à celle du béton ordinaire avec un rabatement de 85%.

Toutefois, la faible diffusivité thermique liée à une forte capacité calorifique est un signe déterminant d'un matériau thermiquement performant. Donc, il est possible d'être utilisé comme élément de remplissage. Le BPSE et le BPDC peuvent procurer une isolation thermique très intéressante et par conséquent un gain d'énergie très remarquable par rapport aux matériaux classiques.

Annexe

Tableau A1 : Analyse granulométrique du sable de dune.

Analyse granulométrique du sable de dune					
M= 2000 g					
coefficient AFNOR	Diamètre des tamis (mm)	Masse refus partiel (g)	Masse refus cumulée (g)	% Refus cumulée	% Passing
38	5	0	0	0,00	100,00
36	3,15	1.3	1.3	0.065	99,94
35	2,5	0.4	1.7	0.085	99,92
34	2	0.6	2.3	0.115	99,89
33	1,6	1.5	3.8	0.19	99,81
31	1,25	4.4	8.2	0.41	99,59
29	0,8	67.6	75.8	3.79	96,21
27	0,5	279.8	355.6	17.78	82,22
25	0,315	352.9	708.5	35.425	64,58
24	0,25	1057.8	1766.3	88.315	11,69
21	0,125	225.3	1991.6	99.58	0,42
-	f	0	0	0	0

Tableau A2 : Analyse granulométrique de polystyrène.

Analyse granulométrique de polystyrène					
M =40 g					
Coefficient AFNOR	Diamètres des tamis (mm)	Masse refus partiel (g)	Masse refus cumulée (g)	% Refus cumulée	% Passing
40	8	0	0	0	100
39	6,3	0.1	0.1	0.25	99,75
38	5	3.2	3.3	8.25	91,75
37	4	16.8	20.1	50.25	49,75
36	3,15	17.4	37.5	93.75	6,25
30	1	2.5	40	100	0
-	f	0	0	0	0

Tableau A3 : Variation de la masse volumique de BPPSE

Masse volumique BPPSE						
	0 %	10%	20%	30%	40%	50%
1	2042.887	1762.275	1621.604	1449.35	1276.123	1082.246
2	2019.017	1738.405	1597.734	1425.48	1252.253	1058.376
3	2007.537	1726.925	1586.254	1414	1240.773	1046.896
4	1997.737	1717.125	1576.454	1404.2	1230.973	1037.096
5	1976.247	1695.635	1554.964	1382.71	1209.483	1015.606
8	1854.377	1573.765	1433.094	1260.84	1087.613	893.7359
9	1732.507	1451.895	1311.224	1138.97	965.7434	771.8659
12	1663.994	1384.111	1213.557	1063.654	905.9767	766.5209
13	1647.959	1373.421	1206.754	1051.263	897.7162	765.5491
14	1632.167	1366.861	1201.895	1041.302	891.6424	765.0632
15	1613.703	1360.301	1196.793	1036.443	885.8115	764.3343
16	1602.284	1356.657	1194.121	1033.528	879.2517	763.6054
19	1599.611	1351.555	1188.776	1027.94	872.6919	763.1195
20	1573.858	1349.854	1186.589	1026.239	871.2342	762.8766
21	1579.446	1348.639	1185.617	1023.81	871.4772	762.3907
22	1568.999	1347.425	1184.159	1022.595	870.9913	762.3907
23	1564.626	1346.21	1183.188	1021.866	870.7483	762.8766
26	1560.982	1344.266	1182.216	1021.623	870.7483	762.8766
27	1557.823	1342.323	1180.272	1020.651	870.5053	762.8766
28	1557.337	1341.837	1179.543	1020.651	870.5053	762.8766

Tableau A4 : Variation de la masse volumique de BPDC

Masse volumique de BPDC						
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
1	2042.887	1814,86	1749,27	1709,18	1667,63	1540,08
2	2019.017	1784,98	1736,88	1688,04	1631,92	1521,86
5	2007.537	1704,08	1675,65	1662,53	1607,87	1494,16
6	1997.737	1658,89	1646,5	1636,29	1529,15	1417,63
7	1976.247	1634,83	1610,78	1561,22	1502,18	1409,62
8	1854.377	1607,87	1585,27	1539,35	1488,33	1401,6
9	1732.507	1587,46	1565,59	1524,78	1483,23	1395,77
12	1663.994	1532,07	1517,49	1511,66	1475,94	1389,21
13	1647.959	1521,13	1504,37	1500	1473,76	1365,16
14	1632.167	1516,03	1494,89	1486,15	1468,65	1360,78
15	1613.703	1508,74	1486,88	1478,86	1465,74	1354,95
16	1602.284	1502,91	1478,13	1475,21	1462,82	1352,04
19	1599.611	1496,35	1474,48	1471,57	1462,09	1349,85
20	1573.858	1491,98	1472,3	1469,38	1457,72	1346,93
21	1579.446	1489,06	1472,3	1466,47	1454,08	1344,02
22	1568.999	1484,69	1470,11	1462,83	1453,35	1344,02
23	1564.626	1481,77	1467,93	1462,09	1451,89	1341,83
26	1560.982	1478,13	1467,93	1459,91	1451,89	1340,37
28	1557.823	1475,22	1467,2	1459,91	1450,43	1340,37

Tableau A5 : Les résultats de l'essai absorption.de BPPSE

Pourcentage % t (min ^{1/2})	0%	10%	20%	30%	40%	50%
0	0	0	0	0	0	0
3.873	2.153	1.771	1.758	1.516	1.376	0.930
5.477	3.057	2.573	2.510	2.166	2.000	1.401
7.746	4.841	3.248	3.134	3.019	2.764	2.433
10.954	5.745	4.344	4.229	3.809	3.567	2.726
17.321	6.535	5.656	5.108	5.019	4.535	3.108
37.947	6.586	5.707	5.338	5.325	4.573	3.146
53.666	6.752	5.847	5.605	5.592	4.815	3.771
65.727	6.930	6.051	5.834	5.809	5.045	4.280
75.895	7.146	6.280	6.025	5.949	5.172	4.471

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

Pourcentage % t (min ^{1/2})	0%	10%	20%	30%	40%	50 %
0	0	0	0	0	0	0
3.873	2.153	1.771	1.758	1.516	1.376	0.930
5.477	3.057	2.573	2.510	2.166	2.000	1.401
7.746	4.841	3.248	3.134	3.019	2.764	2.433
10.954	5.745	4.344	4.229	3.809	3.567	2.726
17.321	6.535	5.656	5.108	5.019	4.535	3.108
37.947	6.586	5.707	5.338	5.325	4.573	3.146
53.666	6.752	5.847	5.605	5.592	4.815	3.771
65.727	6.930	6.051	5.834	5.809	5.045	4.280
75.895	7.146	6.280	6.025	5.949	5.172	4.471

Tableau A7 : Variation de la résistance à la flexion de BPPSE en MPa.

résistance à la flexion de BPPSE				
	3	7	14	28
0%	2.2	2.65	3.73	5.7
10%	1.9	2.22	2.8	3.4
20%	1.7	2.2	2.74	3.05
30%	1.57	2.16	2.27	2.53
40%	1.31	1.71	1.87	2.06
50%	1.03	1.22	1.31	1.43

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

Résistance a la flexion de BPDC				
	3J	7j	14J	28J
0%	2.2	2.65	3.73	5.7
10%	0.53	1.01	1.67	2.63
20%	0.73	1.98	1.60	2.44
30%	0.53	0.86	1.28	1.66
40%	0.57	0.73	1.02	1.55
50%	0.47	0.50	0.66	1.34

Tableau A9 : Variation de la résistance à la flexion de BPPSE et BPDC a 28 jours

la résistance à la flexion a 28 jours BPPSE et BPDC						
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
BPPSE	5,7	3,4	3,05	2,53	2,06	1,43
BPDC	5,7	2,63	2,44	1,66	1,55	1,34

Tableau A10 : Variation de la résistance à la compression des BPPSE mm en MPa.

Résistance à la compression BPPSE				
	3	7	14	28
0%	4.36	5.64	7.02	9.95
10	2.9	3.8	4.01	6.23
20%	2.72	3.48	3.73	6.08
30%	2.32	3.33	3.54	4.01
40%	1.96	2.95	3.14	3.81
50%	1.83	2.52	2.7	2.75

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

Résistance à la compression BPDC				
	3	7	14	28
0%	4.36	5.64	7.02	9.95
10%	1.67	1.80	2.80	5.00
20%	1.32	1.43	2.44	4.51
30%	1.02	1.31	1.66	3.74
40%	0.93	1.13	1.55	2.69
50%	0.66	0.98	1.34	2.00



Plâtre



Polystyrène



Sable de dune

Figure A1 : Matériaux utilisés.



Figure A2 : Malaxeur utilisés.

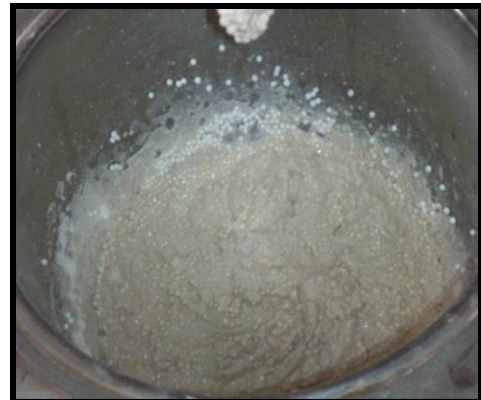


Figure A3 : Pâte après le mixage.

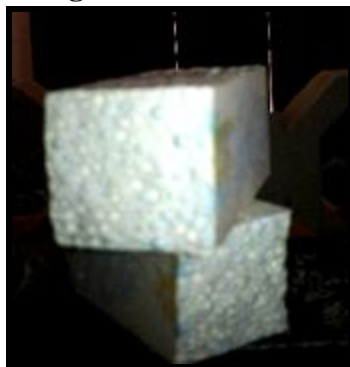


Figure A4 : BPPSE



Figure A5 : Dispositif expérimental de la technique TPS.

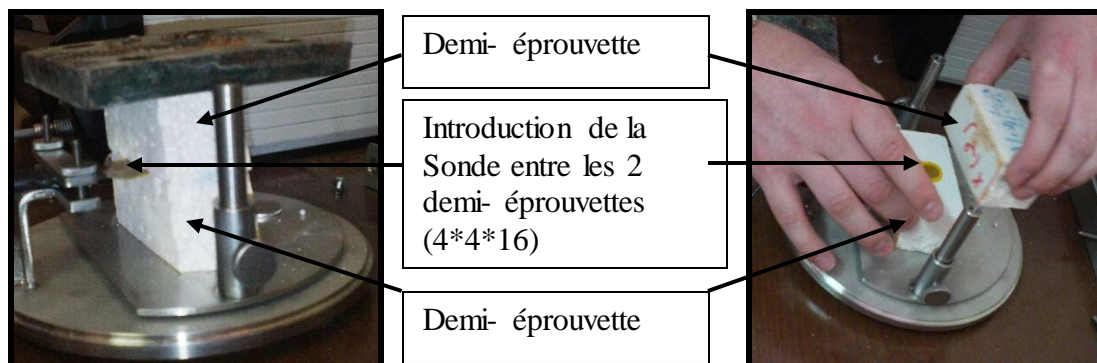


Figure A6 : Introduction de la sonde entre les deux demi-éprouvettes.

References Bibliographies

- [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] **Miled, K., Sab, K., & Le Roy, R. (2007)**. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modelling. *Mechanics of Materials*, 39(3), 222-240.
- [4] **Shink, M. (2003)**. *Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers* (Doctoral dissertation, Université Laval).
- [5] **Cormon, P. (1972)**. BETONS LEGERS D'AUJOURD'HUI. *EYROLLES*.
- [6]] **American Concrete Institute, (1970.)**, Guide pour le béton de structure à base de granulats légers, Traduction du CATED, SDT BTP.
- [7] **ADAM. NEVILLE, (2000)** : propriétés des bétons, traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, **Paris, p 470**
- [8] **Yang, k (2008)** ;caractérisation mécanique des bétons de granulats légers ,expérience et modélisation ,thèse de doctorat de l'université de Cergy –pontoise
- [9] **Short, A., & Kinniburgh, W.** Lightweight Concrete, 1978.
- [10] **ACI, B. (1999)**. 213R-87, guide for structural lightweight aggregate concrete. *American Concrete Institute International*,
- [11] **RILEM (1970)**: Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13.PP 60-69.
- [12] **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.
- [13] **M. Arnaud, M. Virlogeux**, Granulats et Bétons légers, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1986
- [14] **LEDHEM A (1997)**: « Construction à l'étude d'un béton de bois, mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois », Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon.

- [15] **ZIREGUE A** (2005) : Valorisation de coproduits industriels influence de différents acteurs d'allègement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment., Thèse de Magister, l'UAT de Laghouat
- [16] **Technique de l'ingénieur** par Daniel wyart polystyrène expansé ou PSE
- [17] **G.Ddreux**, Nouveau guide du béton, édition Eyrolles, paris, 1995.
- [18] **Benmalek, M. L., Houari, H., Bali, A., & Quéneudec, M.** (2000). Comportement d'un composite fine minérale-ciment-bois élaboré à l'aide de déchets industriels solides. *Sciences & Technologie A*, (13), 65-72.
- [19]**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*.
- [20]**AAC EURO-INTERNATIONAL COMMITTEE FOR CONCRETE 1978.** *Autoclaved aerated concrete: CEB manual of design and technology*. Construction Press,
- [21] **BEDERINA M**, (2007) : Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons de sable à base de déchets de bois -Thèse de doctorat ENP Alger.
- [22] **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
- [23] **JACOBS AND MAYER, (1992)** porosity and permeability of autoclaved aerated concrete
- [24] **STEOPOE A.** (1970):: "La durabilité du béton", Eyrolles, Paris.
- [25] **Daligand.D** Plâtre, Techniques de l'ingénieur, traité Construction, n° C 910.
- [26] société chimique de France www.societechniquede france.fr
- [27] www.ruedeslumieres.morkiltu.org
- [28]www.jeanduppe rex.ch/site/gypse.html
- [29] **Hamouda JAFFEL.** Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. PhD thèses, Ecole Polytechnique, 2006.
- [30] **Eurogypsum** www.Eurogypsum.org Rue de la presse, 4, B-1000 Bruxelles
- [31] syndicat **NATIONAL DES INDUSTRIES DU PLATRE**
- [32] Ministère de l'énergie et des mines www.mem-algeria.org
- [33]**Lafarge** .www.Lafarge.fr

- [34]. **JEAN. FESTA.** " *Le plâtre et ses applications traditionnelles et modernes*". Edition Eyrolles, 1996.
- [35] **Papadakis M, (1970)** : Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre, édition Dunod
- [36]**Costes.J (1981)** *Le plâtre et ses applications traditionnelles et modernes*". Edition Eyrolle
- [37]**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
- [38] **Vimmrova A., Keppert M., Svoboda L., Cerny R.,** Light weight gypsum : Design strategies for multifunctionnory. *Journal of cement concrete composite* 33, 2011, pp.84-89.
- [39] **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.
- [40] **Abdelmoumen Chaker A.,** Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien. Thèse de doctorat. Université de Constantine. 1999.
- [41] **Cherait Y et Nafa Z, (2006)** : Eléments de matériaux de construction et essai, édition Direction de publication universitaire Guelma
- [42] **Goual, M. S. (2001).** Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'Aluminium pulvérulent: caractérisation et comportement thermo hydrique (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat d'État, département de Génie civil, École Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie).
- [43] **Rivero, A. J., de Guzmán Báez, A., & Navarro, J. G. (2014).** New composite gypsum plaster–ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, 55, 146-152.
- [44] **NASSIMA S (2010)** : Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation Thèse de doctorat ; UNIVERSITE de Constantine
- [45] **HABIBA, B. O. (2012).** *Performance d'un composite sable de dune-ciment et granulats de polystyrène expansé* (Doctoral dissertation, Université Amar Telidji de Laghouat).

Abstract

In this study, producing of insulating material based on plaster concrete designed for civil engineering structures and contained industrial wastes, has been experimentally investigated. The basic idea of this work consists to incorporate two types of wastes, rubber particles and polystyrene beads. These additions were introduced in various percentages: 10, 20, 30, 40 and 50%. 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 industrial wastes, the obtained results show that the inclusion of rubber and polystyrene 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 cette étude la potentialité de produire un matériau isolant à base du béton de plâtre destiné aux constructions et contenant des déchets industriels, a été expérimentalement étudié. L'idée de base de ce travail consiste à incorporer deux types de déchets, des particules caoutchouteuses et des billes de polystyrène. Ces ajouts ont été ajoutés en différents pourcentages : 10, 20, 30, 40 et 50% par rapport au volume total des constituants. La démarche expérimentale entreprise consiste à étudier l'effet de ces ajouts 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 industriels, les résultats obtenus montrent que l'inclusion du caoutchouc et du polystyrène 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.

الملخص

في هذه الدراسة تمت دراسة إمكانية إنتاج المواد العازلة المصنوعة من الخرسانة الجبسية التي تحتوي النفايات الصناعية تجريبيا للمباني والهياكل. والفكرة الأساسية لهذا العمل تتكون من دمج نوعين من النفايات، وهي الجسيمات المطاطية وحببات البولسترين. تم إدخال هذه الإضافات في نسب مختلفة: 10، 20، 30، 40 و50% بالنسبة للحجم الإجمالي للمكونات. ويتكون المنهج التجريبي من دراسة تأثير هذه الإضافات على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للمادة.

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

