

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

**Etude comparative sur les caractéristiques de
différents types de bétons légers**

L'étudiant :

HAMMOU Meriem

Encadreur :

Dr ABDELAZIZ Salim

Promotion Juillet 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein de Laboratoire de génie civil, Université Mohamed KHIDER de Biskra.

Je voudrais en tout premier lieu remercier chaleureusement Ma encadreur Docteur **Mr ABDELAZIZ Salim** au département de génie civil et hydraulique et , qui ont suivi et encadré ce travail avec intérêt et compétence.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant à ce jury et de juger ce travail.

Nous adressons nos remerciements aux responsables et techniciens du laboratoire de matériaux de construction de l'université de Biskra pour leurs aides à la bonne réalisation de la partie expérimentale de ce mémoire, en particulier M^r **ABDELMONAIM**.

J'exprime mes profonds remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé au cours de ce travail. en particulier **Zghidi Mohamed**

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les grande et les protégé pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

*A mes frères :**Elhadj, Rabeh***

*A mes sœurs :**Habiba, Khadidja***

*Ma plus belle personne au monde, ma jumelle **Roufaida***

*Mes copines :**Khadidja et Karima***

Mes collègues :samir, youmna, rania, nadji, djaber

A tous mes amis de la promotion 2eme master génie civil

2018/2019

Résumé

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Ce mémoire est consacré à l'étude de la formulation et de la caractérisation des différents types de bétons légers. Ce matériau fait partie de la gamme des bétons spéciaux, utilisé pour améliorer les propriétés thermiques et acoustiques des bétons.

La formulation du béton contient des différents mélange du béton : de béton des granulats légers est faite en substituant le gravier par du polystyrène expansé et du liège, béton caverneux avec 3 pourcentage de sable et béton cellulaire.

Les résultats de l'étude ont montré que l'allègement des bétons par incorporation des granulats légers est accompagné par une réduction de résistance mécanique, ceci est dû la fragilité des granulats légers et leurs pouvoirs d'absorption plus élevé que le gravier.

La diminution de la quantité de sable dans le béton ça change leur résistance mécanique

L'utilisation de la poudre d'aluminium dans le béton augmente le volume des pores et la porosité des bétons qui est relativement augmenté sa masse volumique.

Mots clés : béton léger, polystyrène, résistance mécanique, liège, béton caverneux, béton des granulats légers, béton cellulaire, poudre d'aluminium.

الملخص

الخرسانة هي أكثر المواد المستخدمة في مجال البناء. هذه المذكرة مكرسة لدراسة صياغة وتوصيف أنواع مختلفة من الخرسانة الخفيفة. هذه المادة هي جزء من مجموعة الخرسانة الخاصة، وتستخدم لتحسين الخصائص الحرارية والصوتية للخرسانة.

تحتوي التركيبة الخرسانية على خلطات مختلفة يتم تصنيع الركام الخفيف من الخرسانة عن طريق استبدال الحصى بالبوليستيرين الموسع والفلين والخرسانة الكهفية مع 3 كميات من الرمل والخرسانة الهوائية

أظهرت نتائج الدراسة أن تفنيح الخرسانة عن طريق دمج المجاميع الضوئية يرافقه انخفاض في القوة الميكانيكية، ويرجع ذلك إلى هشاشة مجاميع الضوء وقدرات امتصاصها أعلى من الحصى.

النقص في كمية الرمال في الخرسانة يغير قوتها الميكانيكية

يزيد استخدام مسحوق الألمنيوم في الخرسانة من حجم المسام ومسامية الخرسانة التي تزيد من كثافتها نسبيًا.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة خفيفة الوزن، البوليستيرين، القوة الميكانيكية، الفلين، الخرسانة الكهربية، الخرسانة خفيفة الركام، الخرسانة الخلوية، مسحوق الألمنيوم.

TABLE DES MATIERES

DEDICASES.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME.....	III
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	V
SOMMAIRE.....	VI
LISTE DES TABLAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES.....	XVI
LISTE DES PHOTOS.....	XX
INTRODUCTION GENERALE.....	1

SOMMAIRE

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

Introduction	1
I.1: Historique des bétons légers	1
I.1.1: L'émergence du béton léger après-guerre	2
I.2: Etat de l'art	4
I.2.1 : Bétons légers	4
I.2.1.1 : Définition	4
I.2.1.2 : Classification du béton léger	5
I.2.1.3 : Types des bétons légers	7
I.2.1.3.1 : Béton cellulaire	8
I.2.1.3.1.1 : Historique	8
I.2.1.3.1.2 : Définition	8
I.2.1.3.1.3 : Composition	8
I.2.1.3.1.4 : Fabrication	9
I.2.1.3.1.5 : Propriétés	9
I.2.1.3.1.6 : Utilisation	10
I.2.1.3.1.7 : Avantages et inconvénients	10
I.2.1.3.1.7.1 : Avantages	10
I.2.1.3.1.7. : Inconvénients	11
I.2.1.3.2 : Béton caverneux	11

I.2.1.3.2.1 : Définition	11
I.2.1.3.2.2 : Composition	11
I.2.1.3.2.3 : Fabrication	12
I.2.1.3.2.4 : Propriétés	12
I.2.1.3.2.5 : Utilisation	13
I.2.1.3.2.6 : Avantages et les inconvénients	13
I.2.1.3.2.6.1 : Avantages	13
I.2.1.3.2.6.2 : Inconvénients.....	14
I.2.1.3.3 : Bétons de granulats légers	14
I.2.1.3.3.1 : Historique	14
I.2.1.3.3.2 : Définition	15
I.2.1.3.3.3 : Composition	15
I.2.1.3.3.4 : Caractéristiques et propriété	15
I.2.1.3.3.5 : Utilisations	16
I.2.1.4 : Granulats légers	16
I.2.1.4.1: Granulats naturels	17
I.2.1.4.2: Granulats artificiels	18
I.2.1.5: Propriétés des bétons légers	18
I.2.1.5.1: Propriétés physiques	18
I.2.1.5.1.1: Légèreté	18
I.2.1.5.1.2: Porosités	19
I.2.1.5.1.3: L'absorption	20
I.2.1.5.1.4: La masse volumique	21
I.2.1.5.1.5: La rhéologie à l'état frais	22
I.2.1.5.2 : Propriétés mécaniques	23
I.2.1.5.2.1 : Résistance en compression	24
I.2.1.5.2.2: Résistance à la traction.....	25
I.2.1.5.3 : Propriétés thermiques	25
I.2.2: Fabrication et utilisation des bétons légers	27
I.2.2.1 : Fabrication	27
I.2.2.2 : Utilisation	27
I.2.2.2.1 : Bâtiment	27
I.2.2.2.2 : Génie-civil	28

I.2.2.2.3 : Divers.....	28
I.2.2.3:Avantages et inconvénients	29
I.2.2.3.1 : Avantages	29
I.2.2.3.2 : Inconvénients	29
I.3 : Travaux récents sur les bétons légers	30
Conclusion	33

CHAPITRE II

Caractéristiques des matériaux

Introduction	34
II.1 : Matériaux utilisés	35
II.1.1 : Liant	35
II.1.1.1 : Composition chimique	35
II.1.1.2 : Propriétés physiques	36
II.1.1.3 : Caractéristiques Physico-mécaniques	36
II.1.1.4 : Masse volumique	37
II.1.2 : Sable	37
II.1.2.1 : Masse volumique	37
II.1.2.2 : Equivalent de sable	38
II.1.2.3 : Analyse granulométrique	39
II.1.2.4 : Absorption d'eau	40
II.1.3 : Granulats.....	40
II.1.3.1 : Granulat naturel	40
II.1.3.1.1 : Masse volumique	41
II.1.3.1.2 : Analyse granulométrique	41
II.1.3.1.3 : Essais de Los Angeles	42
II.1.3.2 : Granulat légers	43
II.1.3.2.1 : Polystyrène	43
II.1.3.2.1.1 : -Masse volumique	43
II.1.3.2.1.2 : Absorption d'eau	44
II.1.3.2.2 : le liège	45
II.1.3.2.2.1 : -Masse volumique	46
II.1.3.2.2.2 : Absorption d'eau	46

II.1.4 : Poudre d'aluminium	47
II.1.4.1 : La masse volumique	48
II.1.5 : Chaux	48
II.1.5.1 : La masse volumique	49
II.1.6 : Gypse	49
II.1.6.1 : La masse volumique	50
Conclusion	50

CHAPITRE III

Formulation des bétons et essais

Introduction	51
III.1 : La formulation des bétons	52
III.1.1 : Méthode de SCRAMTAIEV	52
III.1.1.1 : Les différents mélanges des bétons	53
III.1.1.2 : Le calcul des quantités des bétons	53
III.1.1.2.1 : Béton ordinaire	53
III.1.1.2.2 : Béton léger à base de polystyrène	54
III.1.1.2.3 : Béton léger à base de liège	54
III.1.1.2.4 : Béton caverneux	55
III.1.1.2.5 : Béton cellulaire	55
III.1.2 : Préparation des éprouvettes	56
III.1.2.1 : Mélange de béton	56
III.1.2.2 : Remplissage et vibration	57
III.1.2.3 : Type d'éprouvette	57
III.1.3 : Programme des essais	57
III.1.3.1 : Ouvrabilité	57
III.1.3.2 : Mesures de la résistance à la compression.....	58
III.1.3.3 : Mesures de la résistance à la flexion	58
III.1.3.4 : Mesure de la conductivité thermique	59
Conclusion	59

CHAPITRE IV

Analyse et discussion des résultats

Introduction	60
IV.1 : Comportement des bétons frais	60
IV.1.1 : Affaissement des bétons	60
IV.2 : Propriétés physique des bétons durcis	61
IV.2.1 : Masse volumique	61
IV.2.2 : Absorption d'eau pendant la phase de la cure	63
IV.3 : Propriétés mécanique des bétons durcis	64
IV.3.1 : Résistance à la compression	64
IV.3.2 : Résistance à la flexion	66
IV.4 : La conductivité thermique	67
CONCLUSION GENERALE.....	69
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXE	

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

Tableau I.1 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité

Tableau I.2 : Classification des bétons légers en Fonction De la densité

Tableau I.3 : Différentes classes de la porosité

Tableau I.4 : vibration recommandée en fonction de l'ouvrabilité du béton

Tableau I.5 : Les résultats d'essais

Tableau I.6 : Les résultats d'essais

Tableau I.7: Les résultats d'essais

Tableau I.8 : Les résultats d'essais

CHAPITRE II

Caractéristiques des matériaux

Tableau II.1: composition chimique du ciment utilisé [FICHE TECHNIQUE]

Tableau II.2: Caractéristiques du ciment [FICHE TECHNIQUE].

Tableau II.3 : Propriétés du ciment du fiche techniques.

Tableau II.4 : Propriétés du ciment.

Tableau II.5: la masse volumique de sable 0/5 de Lioua.

Tableau II.6: Les résultats d'équivalent de sable

Tableau II.7 : La masse volumique du gravier 7/15

Tableau II.8: Propriétés du béton léger confectionné à partir de polystyrène [35]

Tableau II.9 : Mesure de masse volumique apparente et absolue du polystyrène

Tableau II.10: Résultats d'absorption d'eau pour les granulats étudiés.

Tableau II.11: L'absorption d'eau en fonction du temps

Tableau II.12: Mesure de masse volumique apparente et absolue du liège

Tableau II.13: L'absorption d'eau en fonction du temps

Tableau II.14: Mesure de masse volumique apparente et absolue de la poudre d'aluminium

Tableau II.15: Mesure de masse volumique apparente et absolue de la chaux

Tableau II.16: Mesure de masse volumique apparente et absolue du gypse

CHAPITRE III

Formulation des bétons et essais

Tableau III.1: Méthode de calcul des quantités de matériau (méthode de Scramtaiv)

Tableau III.2 : valeurs de α en fonction: $\frac{E}{C}$

Tableau III-3: Composition des mélanges de béton pour 1m³

Tableau III.4: Composition de mélange de béton cellulaire pour 1m³

CHAPITRE IV

Analyse et discussion des résultats

Tableau IV.01 : Valeur d'affaissement pour tous les différents mélanges de béton

Tableau IV.02 : masse volumique des bétons en Kg/m³.

Tableau IV.03 : l'absorption d'eau par l'éprouvette

Tableau IV.04 : Résistance à la compression des bétons

Tableau IV.05 : Résistance à la flexion des bétons

Tableau IV.04 : La conductivité thermique

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

Figure I.1 : masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours

Figure I.2 : Variation de la résistance en fonction de masse volumique du béton

Figure I.3 : Porosité du béton

Figure I.4 : Les trois types de porosité présente dans les matériaux

Figure I.5 : test du cône d'Abrams

Figure I.6: Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers

Figure I.7 : Conductivité thermique λ en fonction de la Masse volumique sèche du béton cellulaire

CHAPITRE II

Caractéristiques des matériaux

Figure II.1: Courbe granulométrique du sable 0/5

Figure II.2: Courbe granulométrique du granulat naturel(GN) 7/15)

Figure II.3: Absorption d'eau par les granulats du polystyrène pendant 30 minutes

Figure II.4: Absorption d'eau par les granulats du polystyrène pendant 24 heures

Figure II.5: Absorption d'eau par les granulats du liège pendant 1 heure

Figure II.6: Absorption d'eau par les granulats du liège pendant 24 heures.

CHAPITRE IV

Analyse et discussion des résultats

Figure IV.01 : Valeur d'affaissement pour tous les différents mélanges de béton

Figure IV.02 : masse volumique des bétons en Kg/m³.

Figure IV.03 : L'absorption d'eau du type de béton

Figure IV.04: Résistances à la compression des bétons.

Figure IV.05:Résistances à la flexion des bétons

Figure IV.06 ; La conductivité thermique

LISTE DES PHOTOS

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

Photo I.2 : Représentation schématique des différents types de bétons légers

Photo I.2 : Différents granulats légers naturels

Photo I.3 : Différents granulats légers artificiels

CHAPITRE II

Caractéristiques des matériaux

Photo II.1: sable 0/5 de Lioua

Photo II.2: La masse volumique apparente de gravier.

Photo II.3: La masse volumique absolue de gravier.

Photo II.4 : d'équivalent de sable

Photo II.5 : l'analyse granulométrique de sable 0/5 de lioua

Photo II.6 : granulats naturels (gravier) 7/15 Ain Touta

Photo II.7 : La masse volumique apparente de gravier.

Photo II.8 : La masse volumique absolue de gravier.

Photo II.9 : l'analyse granulométrique de gravier 7/15

Photo II.10 : Essais de Los Angeles

Photo II.11 : Granulats de polystyrène

Photo II.12 : Le liège

Figure II.13: les déchets d'aluminium

Photo II.14 : la masse volumique absolue et apparente de la poudre d'aluminium

Photo II.15 : la chaux

Photo II.16 : la masse volumique absolue et apparente de la chaux

Photo II.17 : le gypse

CHAPITRE III

Formulation des bétons et essais

Photo III.1: moule pour éprouvette Cubique (10×10×10)

Photo III.2: moule pour éprouvette prismatique (10×10×40)

Photo III.3 : Essai du champ-test

Photo III.4: Machine Essai de Compression

Photo III.5 : Éprouvettes cubiques (10x10x10) cm³

Photo III.6 : Éprouvettes prismatique (40 x 10 x 10) cm³

Photo III.7: Machine d'essai de flexion

Photo III.8: appareil de CT-Mètre

Photo III.9: Eprouvette (27-13-4)



Introduction générale



Les bétons légers, d'une masse volumique de 1500 à 1900 kg/m³ (2200 à 2600 kg/m³ pour les bétons ordinaires), ont une résistance comparable aux bétons de granulats rigides tout en étant de 25 à 35 % 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. Utilisés en préfabrication, les bétons légers permettent aussi de diminuer les coûts de transport et d'installation. En plus de sa légèreté, le béton léger présente une bonne isolation thermique par rapport au béton normale. Toutes ces caractéristiques expliquent l'intérêt grandissant que l'on porte au béton léger, notamment pour la réhabilitation.

Les bétons légers, c'est à dire ceux dont la masse volumique à l'état sec est inférieure à 1800 kg/m³, sont employés dans le génie civil depuis le début du 20^{ème} siècle, dans les pays développés d'Europe (France, Allemagne), d'Amérique (USA) et d'Asie (Japon et ex URSS). Depuis lors, les applications ne cessent de se multiplier à cause des avantages que présente ce produit tant sur le plan économique que technique. Ces bétons normalement réalisés par trois manières, en employant les agrégats légers, l'aération ou le gaz, ou en réduisant la partie fine du granulat. Dans chacun des trois cas la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton.

Pour développer un tel béton, deux éléments doivent être pris en considération : les concepts liés à la formulation des bétons légers et l'utilisation de granulats légers. Par ailleurs, il devient de plus en plus intéressant d'évaluer le potentiel des matériaux légers comme source de matières premières.

Le béton dit légers sont obtenus par incorporation d'air .trois types de bétons légers sont classiquement distingués selon la façon dont l'air est introduit dans le béton .les trois catégorie sont : « béton cellulaire» «béton caverneux», «béton de granulats légers».

Notre travail présenté ici vise à l'analyser comparative de ces caractéristiques des différents types sur le comportement mécanique et physique des bétons légers en suivant une approche expérimentale après notre choix de granulats ultras légers qui sont le polystyrène et le liège.

Introduction générale

Les objectifs de ce mémoire sont:

- ✓ Formulation se différents types des bétons légers.
- ✓ Comparaison entre les types de béton léger.
- ✓ Analyse du comportement mécanique et physique des bétons légers.
- ✓ Analyse du comportement mécanique et thermique des bétons légers.

Dans ce contexte, ce mémoire s'articule autour de deux parties :

La première partie (**chapitre I**) est consacrée à une synthèse bibliographique

La deuxième partie (**chapitre II.III et IV**) est une partie expérimentale consacrée au travail effectué

* **Chapitre II** représente les matériaux utilisés durant notre étude

* **Chapitre III** représente les procédures de confection des mélanges, ainsi que les différents essais effectués.

* **Chapitre IV** contient les résultats de l'étude expérimentale : caractérisation physique et mécanique et des différents bétons, ainsi que l'analyse et la discussion de ces résultats.



CHAPITRE I :
Synthèse bibliographique



Introduction

Bien que connus depuis plus d'un demi-siècle, les bétons légers ont été relativement peu employés. Toutefois, la crise du logement liée au manque considérable en matériaux de construction ainsi que la consommation d'énergie de chauffage et de rafraîchissement des locaux qui ne cessent d'augmenter, ont provoqué un regain d'intérêt pour l'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels. Leur transformation en bétons légers demeure l'une des solutions les plus économiques afin d'y pallier à ces problèmes. Les Bétons Légers sont des bétons constitués de granulats de faible densité[1]

La masse volumique apparente des bétons traditionnels fabriqués avec des granulats rigides est comprise entre 2200 et 2600 kg/m³. Et la masse volumique apparente sèche des bétons légers est inférieure à 1800 Kg/m³ [RILEM (1970)]. D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'**American Concrete Institute (1970)** limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 Kg/m³ après séchage à l'air pendant 28 jours. La norme **DIN 1042 (1972)**, en Allemagne, limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 Kg/m³

I.1: Historique des bétons légers :

Le béton est un matériau artificiel, composé d'agrégats (le plus souvent du sable et des gravillons), de l'eau et du ciment. En y ajoutant l'adjectif « léger », on fait généralement référence aux différents types de béton caractérisés par un faible poids spécifique. On obtient une densité réduite en ajoutant au mélange des ingrédients spécifiques, ou à l'aide de techniques spéciales de production qui permettent d'obtenir une diminution de masse volumique, soit 500 à 900 kg/m³ pour le béton léger au lieu des 2.000 à 2.500 kg/m³ d'un béton « ordinaire ».

Durant l'entre-deux-guerres, plusieurs marques (internationales) de béton léger sont arrivées sur le marché, mais ce n'est qu'après-guerre que ce type de matériau de construction relativement neuf s'est réellement répandu.

I.1.1: L'émergence du béton léger après-guerre :

Le béton est un matériau de construction relativement lourd, ce qui explique pourquoi le 20^{ème} siècle a vu se succéder les expériences visant à en réduire le poids sans nuire aux autres propriétés.

Au cours des années 1920 et 1930, plusieurs types de béton léger furent élaborés, comme Durisol, Siporex, Argex et Ytong. Durisol, invention belgo-néerlandaise, a été fortement utilisé en Suisse à partir de la fin des années 1930 et est ensuite devenu très populaire dans de nombreux autres pays européens (y compris en Belgique).

Le béton-gaz autoclavé Siporex a été élaboré en Suède dès 1935 et produit à grande échelle en Belgique à partir de 1956/1957 par la S.A. Siporex-Brabant (située à Leeuw-Saint-Pierre). Le béton de granulats léger Argex a quant à lui été produit pour la première fois au Danemark en 1939 sous la marque internationale Leca.

La production initiale annuelle de 20.000 m³ à Copenhague, passa en 1972 à un total de 6 millions de m³ par an dans 13 pays européens, dont la Belgique.

Un autre exemple est Ytong, le premier et probablement le plus célèbre type de béton-gaz autoclavé. Ytong fut inventé par l'architecte suédois Johan Axel Eriksson, professeur adjoint à l'Institut royal de technologie de Stockholm.

Au début des années 1920, Eriksson tenta plusieurs expériences avec différents échantillons de béton-gaz et plaça le mélange dans l'autoclave pour en accélérer le processus de cure, découvrant ainsi presque par hasard les propriétés améliorées du béton-gaz autoclavé. Il déposa un brevet en 1924 et, cinq ans plus tard, trouva un fabricant de produits de construction, Karl August Carlen, désireux d'investir dans une usine.

En novembre 1929, la production industrielle de blocs Ytong commença – Ytong est la contraction de *Yxhult*, lieu où la première usine suédoise fut établie, et *betong*, béton en suédois. Le matériau devint très populaire en Suède à partir de 1935 et connut une véritable expansion juste après la seconde guerre mondiale, devenant ainsi l'un des matériaux de construction les plus importants du pays. Le processus de fabrication fut également exporté vers d'autres pays

et des licences furent vendues à la Norvège, l'Allemagne, au Royaume-Uni, à l'Espagne, la Pologne, Israël, au Canada, à la Belgique et même au Japon.

Une brochure datant des années 1960-1970 fait mention de 34 usines dans 11 pays et d'usines en construction dans quatre pays supplémentaires. Plutôt que d'exporter le matériau lui-même, Ytong décida d'exporter la technique et la marque déposée, permettant ainsi de s'adapter au contexte local.

Ainsi, si la recette d'origine comprenait du schiste bitumeux, les producteurs locaux pouvaient remplacer celui-ci par d'autres matériaux (siliceux) comme des cendres volantes ou des scories. Pour garantir la qualité, un laboratoire de contrôle centralisé fut créé en Suède, tandis que des ingénieurs et techniciens suédois visitaient les usines à l'étranger. En Belgique, une première usine Ytong fut construite à Burcht (près d'Anvers) en 1954-1955.

La S.A. Ytobel y produisit l'Ytong à partir de juin 1955. Ytobel, qui avait acquis la licence pour le Benelux, suivit le processus de fabrication suédois en utilisant comme ingrédients des cendres volantes (provenant de l'usine électrique toute proche de Schelle), du laitier de haut fourneau, de la chaux grasse, de la poudre d'aluminium et de l'eau.

Dès 1955, le journal *Bouwen en Wonen* prédisait, dans un numéro thématique sur le béton, un développement fulgurant pour Ytong en Belgique, car le matériau avait déjà fait ses preuves et montré ses nombreux avantages. L'ascension fut indéniable : la production de l'usine d'Anvers tripla au cours de l'année 1957.

La S.A. Ytobel fut ensuite incorporée au sein de la société belge de production de ciment CBR (Cimenteries et Briqueteries Réunies). La Belgique suivit la tendance en place dans d'autres pays européens, où Ytong et le béton léger en général devinrent très populaires après la seconde guerre mondiale [2]

I.2: Etat de l'art :**I.2.1 : Bétons légers :****I.2.1.1 : Définition :**

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles application, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m³. [3]

D'après ce que n'a vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 Kg/m³.

Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces bétons a une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³. [4]

Ces bétons à des fins d'isolation et d'allègement ou les deux à la fois, il peut également être utilisé pour des éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, Donc les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et ces résistances variées. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructif et économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction.

En fin Le béton léger se caractérise essentiellement par leur faible masse volumique, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction.

I.2.1.2 : Classification du béton léger :

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dont dépendent les autres caractères ou données nécessaires au calcul. Il s'agit :

- de la masse volumique sèche, désignée par γ_{bs} .
- de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, Fonction de leur masse en Kg/m³ [5]

Classe de densité	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Kg/m³	901 à 1000	1001 à 1200	1201 à 1400	1401 à 1600	1601 à 1800	1801 à 2000

Tableau I.1 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [5]

La nouvelle version de la norme EN 206 classe les bétons suivant les fourchettes de masse volumiques indiquées dans le tableau ci- dessous :

Classe de masse volumique	LC1.0	LC1.2	LC1.4	LC1.6	LC1.8	LC2.0
Kg/m³	>800 et ≤ 1000	>1000 et ≤ 1200	>1200 et ≤ 1400	>1400 et ≤ 1600	>1600 et ≤ 1800	>1800 et ≤ 2000

Tableau I.2 : Classification des bétons légers en Fonction De la densité [5]

Une autre classification pour béton léger basée sur la masse volumique est logique, puisque la masse volumique et la résistance sont étroitement liées, ce qui explique pourquoi la norme

ACI 213R -8713.141 classifie les bétons en fonction de la masse volumique (est comprise entre 1350 et 1900 kg/m³) en trois catégories :

❖ **le béton léger de structure : 1350 – 1900 kg/m³**

Dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa.

❖ **le béton léger de faible masse volumique : 300 – 800 kg/m³**

A une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m³ n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique, $R_c < 7$ MPa.

❖ **le béton de résistance moyenne se situe entre les deux :**

Sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa

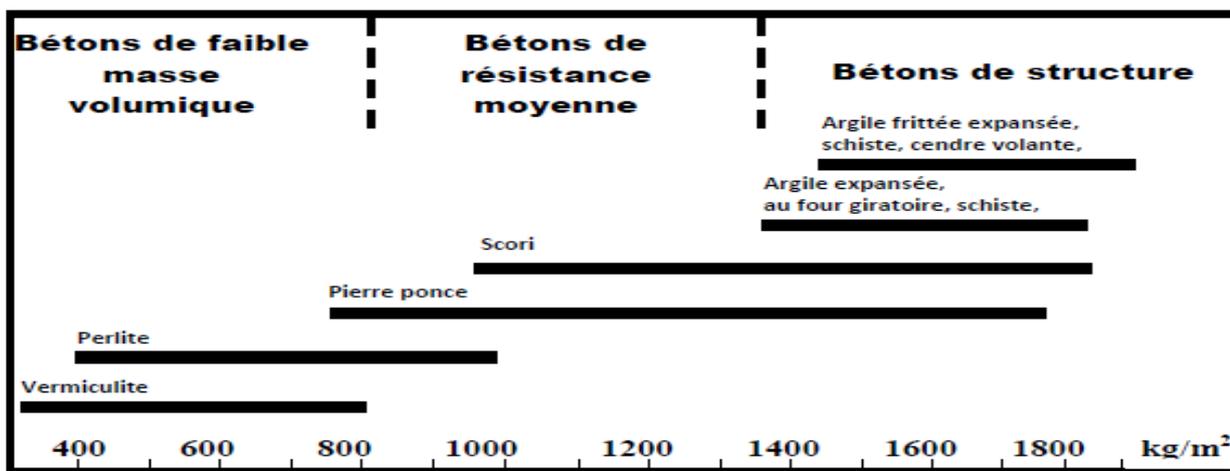


Figure I.1 : masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours[3]

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

- **Des bétons de remplissage** : leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m³, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes. [6]
- **Des bétons porteurs isolants** : leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 1400 kg/m³, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des

précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

• **Des bétons de structure** : Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible. [3]

I.2.1.3 : Types des bétons légers :

Pour développer un béton léger, on doit prendre en considération deux aspects :

- 1) les particularités en matière de formulation des bétons légers,
- 2) la source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplaçant une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- soit dans les granulats.
- soit dans la pâte de ciment.
- Ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins.

Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient :

- 1- les bétons cellulaires.
- 2- les bétons sans fines (caverneux).
- 3 - les bétons de granulats légers (argile expansé...)

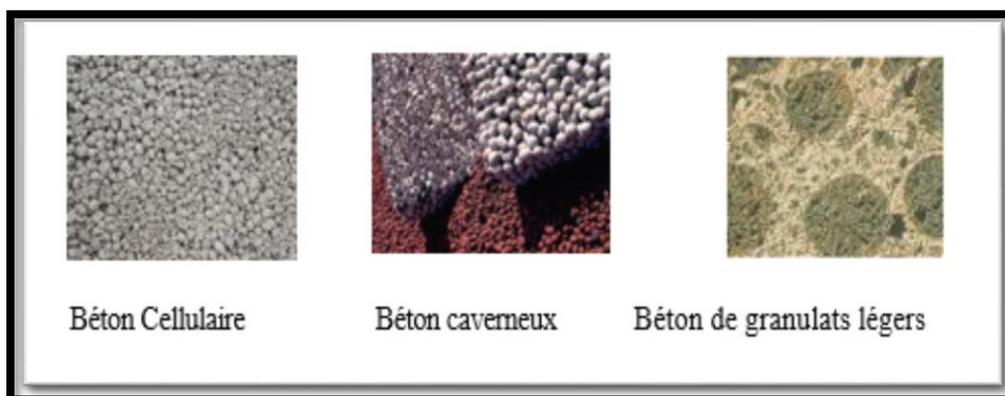


Photo I.2 : Représentation schématique des différents types de bétons légers [7]

I.2.1.3.1 : Béton cellulaire :**I.2.1.3.1.1 : Historique :**

La première invention, qui date de 1880, est attribuée à W. Michaelis. Ce dernier a mis en contact un mélange de chaux, de sable et d'eau avec de la vapeur d'eau saturée sous haute pression et est ainsi parvenu à donner naissance à des silicates de calcium hydratés hydrorésistants. La seconde invention concerne l'expansion des mortiers. En 1889, cette invention a été octroyée à E. Hoffmann. En 1924, le Suédois J.-A. Eriksson débute la production et la commercialisation du béton cellulaire, composé d'un mélange de sable fin, de chaux et d'eau, auquel il ajoute une petite quantité de poudre de métal. Trois ans plus tard, il combine ce processus à l'autoclave, tel que décrit dans le brevet de Michaelis. Enfin, une troisième étape a permis de parvenir au béton cellulaire d'aujourd'hui : la fabrication en série d'éléments de petits et de grands formats, ainsi que celle d'éléments armés (des armatures métalliques protégées contre la corrosion sont déposées dans le moule avant la coulée). Pour ce faire, une méthode de production a été développée après 1945. Les produits sont coupés aux dimensions souhaitées au moyen de fins fils d'acier très tendus, ce qui permet d'obtenir des produits finis de grande précision. Les usines implantées en France fabriquent un produit répondant aux normes actuelles de la construction. Elles sont en outre certifiées ISO 9001.

I.2.1.3.1.2 : Définition :

Le béton cellulaire est un produit à base de matières premières provenant exclusivement de matériaux Minéraux. C'est un produit que l'on classe dans la catégorie des matériaux de construction dits «propres », dans la mesure où 100 kg de matière suffisent à produire 1 m² de maçonnerie de 25 cm d'épaisseur conforme aux réglementations en vigueur pour la construction de maisons individuelles. La fabrication de 1 m³ de béton cellulaire ne nécessite que 250 kWh.

I.2.1.3.1.3 : Composition :

Les matières premières principales pour la fabrication du béton cellulaire sont le sable, la chaux, le ciment et l'eau. Toutes ces matières premières sont présentes en abondance dans la nature. En moyenne, la proportion de matières premières utilisées lors de la fabrication est la suivante :

- Environ **65 %** de sable de quartz siliceux.
- Environ **20 %** de ciment.
- Environ **15 %** de chaux.
- **0,05 %** d'agent d'expansion.
- Environ **1 %** de gypse.
- Eau.

Les pourcentages varient légèrement, mais de façon précise, en fonction de la masse volumique souhaitée. Au final, le béton cellulaire est constitué d'environ 80 % d'air et 20 % de matière.

I.2.1.3.1.4 : Fabrication :

Les produits en béton cellulaire sont exclusivement fabriqués en usine. Les unités de production sont automatisées. Tout est contrôlé en permanence, depuis l'entrée des matières premières jusqu'à la sortie des éléments sur des palettes prêtes à être expédiées. Ce procédé garantit la qualité et la constance du produit.

Les produits en béton cellulaire sont classés en deux catégories principales :

- Les blocs, destinés à la maçonnerie (construction d'habitations, petits collectifs, par exemple).
- Les éléments armés tels que dalles de plancher, toitures, bardages, etc., destinés essentiellement à la construction de bâtiments industriels.

I.2.1.3.1.5 : Propriétés :

Un matériau non polluant : la fabrication du béton cellulaire ne libère aucun produit polluant, que ce soit dans l'air, dans l'eau ou dans la terre. De plus, grâce à un recyclage à chaque phase de la fabrication, il n'y a pas de gaspillage de ressources (matières premières, eau, énergie).

Un matériau moderne : la fabrication du béton cellulaire est industrialisée et permet la production d'un matériau de construction fini aux dimensions précises, aisé à mettre en œuvre.

Un matériau léger, solide et isolant : le béton cellulaire est rempli d'une multitude de bulles d'air emprisonnées dans des cellules qui lui confèrent légèreté, pouvoir d'isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une solidité permettant la réalisation de constructions d'une grande diversité.

Un matériau isotrope : les propriétés physiques et mécaniques du matériau sont conservées quelles que soient l'orientation ou les découpes faites sur le produit. Ainsi l'homogénéité de la structure est parfaite.

Conductivité thermique : la conductivité thermique augmente avec l'augmentation du contenu d'humidité. La quantité des pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique du béton cellulaire.

I.2.1.3.1.6 : Utilisation :

Pour les blocs non armés : murs porteurs, cloisons non porteuses, murs de refend, cloisons coupe-feu et tous les petits travaux d'aménagement ou de réhabilitation.

Pour les éléments armés : le bardage, le compartimentage coupe-feu, les toitures, les planchers, les murs en maison individuelle. [8]

I.2.1.3.1.7 : Avantages et inconvénients :

I.2.1.3.1.7.1 : Avantages :

- Le béton cellulaire est avant tout un matériau de construction léger. Cela est pratique autant pendant le processus de fabrication que pour le transport et la mise en œuvre. En effet, le béton cellulaire procure une manipulation facile.
- Le béton cellulaire est aussi un isolant de première qualité. Cette propriété, il la doit à sa structure qui emprisonne l'air. Par ailleurs, les microcellules d'air sont réparties de façon très homogène, de ce fait le béton cellulaire présente un doublage isolant. Pour info, le coefficient de conductivité thermique du béton cellulaire est très intéressant pour rendre moindre l'impact des variations de température entre l'extérieur et l'intérieur.
- Le béton cellulaire est également facile à découper grâce à sa légèreté, une simple scie manuelle suffit. Il est aussi facile à mettre en œuvre, en plus, on peut réutiliser les chutes. Par ailleurs, son utilisation ne requiert que peu d'eau. Il suffit seulement d'un joint mince pour l'appareillage des blocs.
- Le mode de fabrication du béton cellulaire est aussi écologique du fait qu'aucune substance liquide ou solide n'est rejetée lors du processus. Il n'y a aucun risque donc de polluer ni les eaux ni les sols. En parlant encore de mode de fabrication, il faut savoir qu'il ne requiert que peu d'énergie et en plus, il est possible d'en recycler une partie.

- La pose du béton cellulaire est aussi facile et rapide. Ainsi il est possible de travailler 3 m² par heure pour un mur de 20 cm d'épaisseur en procédant à un assemblage à base de mortier-colle.
- Le béton cellulaire n'attire pas les rongeurs et les insectes.
- Le béton cellulaire est par ailleurs un matériau de construction incombustible.

I.2.1.3.1.7.2 : Inconvénients :

- Le béton cellulaire est plus exposé aux fissures. Ce qui le désavantage par rapport aux parpaings et aux briques qui peuvent être également utilisés pour construire des murs extérieurs d'une maison.
- Le béton cellulaire est aussi très friable. De ce fait, il nécessite l'emploi de cheville de fixation ainsi que de scellement renforcé. En plus, les systèmes de fixation doivent être uniquement des produits spécial béton cellulaire.
- Le béton cellulaire serait aussi, d'après quelques études, un facteur de risque de quelques cas de cancers ainsi que de maladie d'Alzheimer. En effet, il est tout à fait possible qu'on inhale les poussières du béton cellulaire dégagées par ce matériau de construction.
- Le béton cellulaire présente également une isolation phonique insuffisante et il est parfois imperméable à la vapeur d'eau. Les constructions en béton cellulaire sont souvent exposées aux remontées capillaires. [8]

I.2.1.3.2 : Béton caverneux :

I.2.1.3.2.1 : Définition :

Le béton caverneux ou béton drainant est un béton de ciment à structure ouverte permettant l'infiltration de l'eau de pluie. Le nom de ce béton provient des vides qu'il contient et qui ressemblent à des cavernes. Ces vides ont une ouverture allant de 10 à 30 mm [9]

I.2.1.3.2.2 : Composition :

Le béton caverneux est composé de ciment, de granulats grossiers et de l'eau avec peu ou pas de granulats fins. L'addition d'une petite quantité de sable peut augmenter la résistance

mécanique du béton. La pâte est en sous dosage par rapport au volume de vide du squelette granulaire, mais suffisante pour assurer l'adhésion des granulats entre eux [10]

I.2.1.3.2.3 : Fabrication :

Gâcher en bétonnière, ou « malaxeur-transporteur » de chape pneumatique :

- Mettre un ou plusieurs sacs entiers dans la bétonnière (sans dépasser 60 de sa capacité) ;
- Ajouter graduellement, bétonnière en marche env. 3 litres d'eau pour chaque sac ;
- Gâcher pendant env. 3 minutes jusqu'à obtenir un mélange homogène avec les grains gris brillant, bien recouverts de coulis de ciment.

L'emploi de « malaxeur-transporteur » demande de majorer la quantité d'eau en fonction de la distance de pompage. [11]

I.2.1.3.2.4 : Propriétés :

***À séchage rapide** : Il se mélange à une quantité d'eau minime et sèche rapidement, même pour des épaisseurs importantes, grâce à sa structure ouverte et à sa formule à base d'argile expansée hydrophobe Laterlite Plus.

* **La densité** : entre 500 et 600 Kg/m³

* **La porosité** : entre 15 et 25 % du volume

* **une forte perméabilité** : sa perméabilité à l'eau sous une charge de 10 cm d'eau est supérieure à 5 litres par mètre carré par seconde

***L'affaissement** au cône d'Abrams nul.

***Super léger** : Il pèse 600 kg/m³ environ en œuvre, 3 fois moins que les chapes traditionnelles ou fluides et 4 fois moins qu'un béton structural. Il réduit les charges permanentes et est particulièrement indiqué pour la rénovation de planchers, de voûtes ou de toitures existantes ou en zone sismique afin d'éviter des surcharges.

***Isolant** : 10 fois plus isolant que les solutions traditionnelles ($\lambda=0,134$ W/mK), il intègre ou remplace l'isolation de toitures terrasses ou en pente, de planchers et de voûtes et réduit les ponts thermiques. Il améliore l'isolation phonique grâce à sa structure poreuse.

* **Conductivité thermique** : 0,134 W/mK

***Résistant stable et durable :** Il est résistant à la compression (2,5 MPa), stable, indéformable et maintient ses propriétés intactes dans le temps. C'est le support idéal pour les couches de finition supérieures.

***Incombustible et résistant au feu :** 100 minéral, il est incombustible (Euroclasse A1), résistant au feu et sûr, même en cas d'incendie.

***Drainant :** Il est extrêmement perméable à l'eau et peut être utilisé comme support, remplissage ou lestage drainant, en toiture ou sur le sol. [11]

I.2.1.3.2.5 : Utilisation :

En raison de sa grande perméabilité à l'eau, le béton caverneux est utilisé comme matériau pour le pavage des routes résidentielles et piétonnes, des parkings, des trottoirs et des serres[12]

I.2.1.3.2.6 : Avantages et les inconvénients :

I.2.1.3.2.6.1 : Avantages :

***Sécurité :** -les risques d'inondation sont évités

-les chutes cassées par une glissade sur l'eau sont supprimées

-les effets d'éblouissements sont réduits, plutôt pratique quand on doit rentrer sa voiture au garage par temps de pluie.

***Economique :** Puisqu'il laisse passer l'eau, le béton drainant permet le réapprovisionnement des nappes phréatiques. Fini le ruissellement à la surface de votre terrasse ou aux abords de votre piscine. Le cycle de l'eau est respecté et contribue à la bonne hydratation de vos terres. Par ailleurs, ce système permet de désengorger les réseaux d'égouts de votre ville

***Confort :** Grâce à sa perméabilité élevée, dites au revoir aux flaques d'eau en surface ! Le béton drainant a des avantages lorsqu'il pleut, mais également lors de fortes chaleurs : grâce à une ventilation naturelle, la température du sol diminue ce qui vous permet de vous balader pieds nus même sous un soleil de plomb.

***Résistance :** Puisqu'il s'agit de béton, le revêtement est résistant et durable dans le temps.

***Personnalisable :** Vous bénéficiez d'un large choix de couleurs et de finitions : le béton drainant est donc personnalisable jusqu'au choix du joint de dilatation que vous voulez installer et qui vous permet de décorer votre revêtement. [13]

I.2.1.3.2.6.2 : Inconvénients :

Les principales limitations du béton caverneux sont :

- ✓ Dans le cas de fuite de substances nocives pour l'environnement, ils peuvent le traverser et atteindre le sol ;
- ✓ Les pores peuvent être bouchées par de l'argile ou par d'autres matières.
- ✓ Les performances mécaniques sont généralement plus faibles que ceux d'un béton normal. [14]

I.2.1.3.3 : Bétons de granulats légers :**I.2.1.3.3.1 : Historique :**

L'utilisation des granulats légers date de l'époque romaine qui se situe entre 27 avant J. C. et 476 après J. C. Plusieurs édifices pour ne citer que la Panthéon et le Colisée de Rome sont réalisés en partie en béton léger (BREMNER et AL. 1994). Par exemple, le dôme du panthéon d'une portée d'environ 43 mètres a été réalisé avec des matériaux de densités variables dont un contenant de la pierre ponce. Après le déclin de l'empire Romain, l'utilisation des granulats légers naturels tels que la pierre ponce, la pouzzolane, la diatomite etc., a été ralentie jusqu'à l'avènement des granulats légers artificiels tels que l'argile expansée, l'ardoise expansée, cendre volant frittée etc., au XXIème siècle. [15]

Historiquement, l'ingénieur HAYDE STEPHEN est le premier à fabriquer des granulats légers par l'application d'un traitement thermique sur un matériau expansible (ARNOULD et VIRLOGEUX 1986) et (TANG et AL. 2011). Il déposa un brevet en 1918 pour la technique d'expansion de l'argile. De l'ardoise et du schiste à partir d'un four rotatif. C'est le début de la production et de la commercialisation des granulats légers artificiels. Les granulats légers artificiels s'est développé au début des années 1970 avec l'implantation de la première usine en 1964 à WATTEN dans le nord. Selon (CHEN et AL 2012), les granulats légers sont aujourd'hui présents dans différents domaines tels que le bâtiment (béton préfabriqué et béton prêt à l'emploi), les travaux public (remblai), l'horticulture (grainage de jardin), du traitement des eaux (filtre ou lit bactérien). Certains sont peu résistants voire faibles tandis que d'autres sont résistants et durs. [15]

I.2.1.3.3.2 : Définition :

Le béton de granulats légers est un béton léger contenant un pourcentage volumique important de granulats légers induisant une masse volumique inférieure à celle d'un béton normal. [16] La masse volumique de ce type de béton est comprises entre 800 – 2100 kg/m³[17]

I.2.1.3.3.3 : Composition :

Les bétons de granulats légers sont fabriqués avec des granulats à faible masse volumique tel que l'argile expansée, le schiste expansé, le laitier expansé, la pierre ponce, le polystyrène expansé, le liège ou la vermiculite

Les granulats légers absorbent une grande quantité d'eau, ce qui constitue une grande difficulté du point de vue de la plasticité et de l'ouvrabilité des bétons. Le dosage en eau est donc un problème et ne peut pas être pris à la légère. [18]

I.2.1.3.3.4 : Caractéristiques et propriété :

***Résistances :** La résistance des bétons de granulats légers en compression est inférieure à celle des bétons classiques réalisés avec des granulats denses. Cette résistance décroît proportionnellement avec la densité du béton. Cependant, avec de bons granulats et du sable naturel ainsi qu'une augmentation du dosage du ciment, des résistances de même catégorie que ceux des bétons peuvent être atteints. La résistance en traction est également plus faible.

***Ouvrabilité :** L'ouvrabilité est également difficile, toujours à cause des granulats qui absorbent l'eau. Pour y remédier, on peut avoir recours à certains adjuvants comme les entraîneurs d'air ou les plastifiants.

***Fluage :** Leur déformation instantanée est le double des bétons courants.

***Retrait :** Leur retrait est plus important mais est également plus tardif du fait de la déshydratation des mortiers qui est retardée par les granulats absorbant l'eau.

***Conductivité thermique :** C'est l'atout majeur des bétons de granulats légers. En effet, par la présence des bulles d'air intercalées dans l'épaisseur du béton, le béton de granulats légers est un excellent isolant thermique mais également un bon isolant acoustique [19]

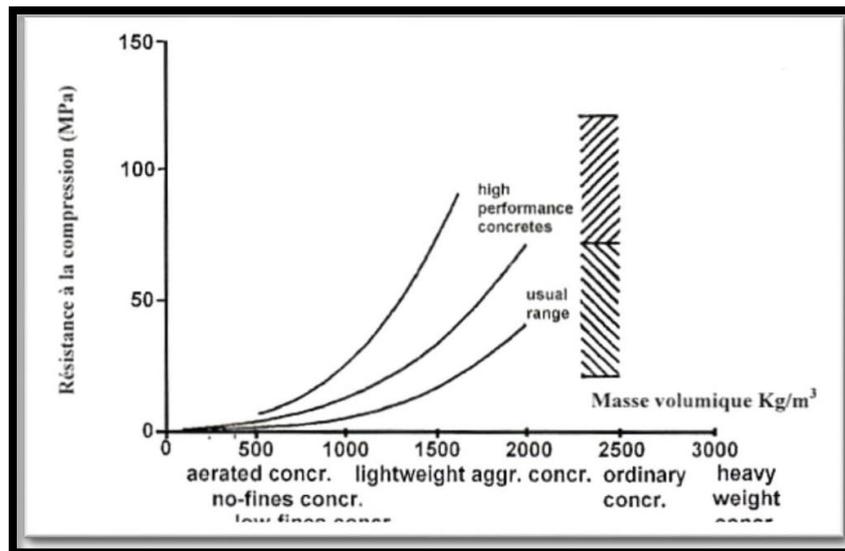


Figure I.2 : Variation de la résistance en fonction de masse volumique du béton [20]

I.2.1.3.3.5 : Utilisations :

Du fait de leur faible résistance en compression, ils sont généralement utilisés pour la fabrication des agglomérés, des bétons isolants (toiture, plancher, etc.), des bétons banchés non porteurs ou des bétons dont les charges ne sont pas considérables.

Néanmoins, la principale utilisation de ce type de béton est sans conteste la préfabrication dans la mesure où il offre un gain conséquent en termes de poids.

Pour des bétons de vermiculite qui ont de meilleures résistances, la construction des poteaux, des poutres et des dalles mais également de tous les ouvrages où le béton est essentiel peut être envisagée.

Les bétons de granulats légers sont utilisés pour alléger des structures telles que les tabliers de pont, pour réparer des murs ou pour isoler thermiquement des bâtiments. [19]

I.2.1.4 : Granulats légers :

La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. Considérant l'importance de ceux-ci, il convient donc d'exposer les principales caractéristiques et les types de granulats utilisés dans la confection de bétons légers. Les granulats légers se différencient des autres granulats par leur faible masse volumique. Celle-ci est inférieure à 1200 kg/m³, tandis que celle de la pierre naturelle est de 2700 kg/m³. L'écart

de masse volumique s'explique par la porosité élevée du granulat ϕ_g , c'est-à-dire une importante proportion volumique de vides d'air contenus dans le granulat. Cet air sera appelé : air intra-particule

$$\phi_g = \frac{V_{\text{capillaires}}}{V_{\text{granulat}}} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$V_{\text{capillaires}}$: volume des vides contenus dans le granulat (m³)

V_{granulat} : volume total occupé par le granulat (m³) [21]

Les granulats légers sont caractérisés par une structure poreuse, il existe dans le monde d'origine naturelle ou artificielle et ayant subi ou non des transformations. Leur utilisation dans le béton a pour but de diminuer de façon plus ou moins importante, selon le granulat léger choisi, la masse volumique. Par contre, cette réduction de la masse volumique a pour conséquence de diminuer la résistance à la compression.

I.2.1.4.1 : Granulats naturels :

Certaines roches, comme la pierre ponce, on a l'état naturel des densités faibles (inférieures à 2) ; en les concassent, on obtient donc des granulats légers. Il existe également d'autres matériaux naturels dans certains pays qui peuvent être utilisés comme granulats légers pour des utilisations locales. La figure I-03 présente quelques exemples de granulats naturels. [22]

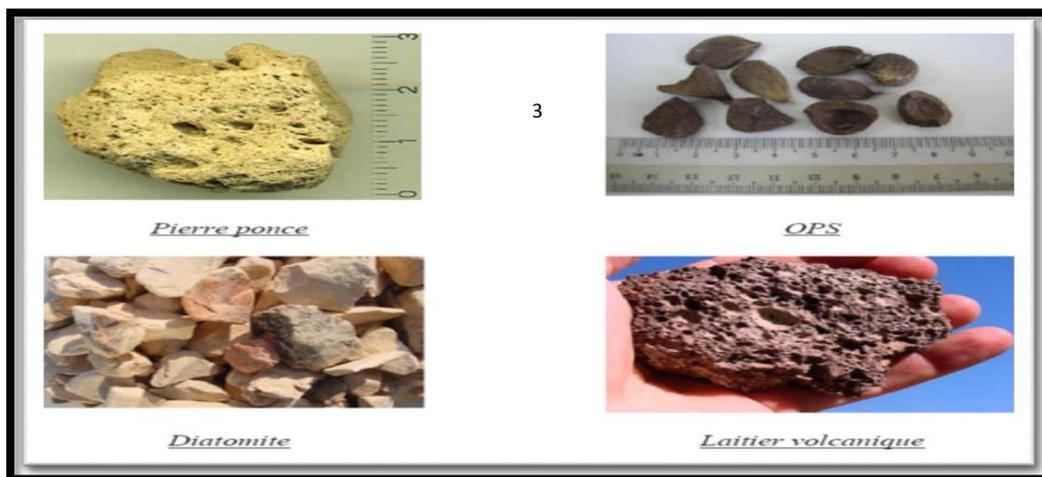


Photo I.2 : Différents granulats légers naturels [22]

I.2.1.4.2 : Granulats artificiels :

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certaines régions, comme la vase à Taiwan et NYT (napolitain Yalow tuff) en Italie, soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (polystyrène Expandé) [22]

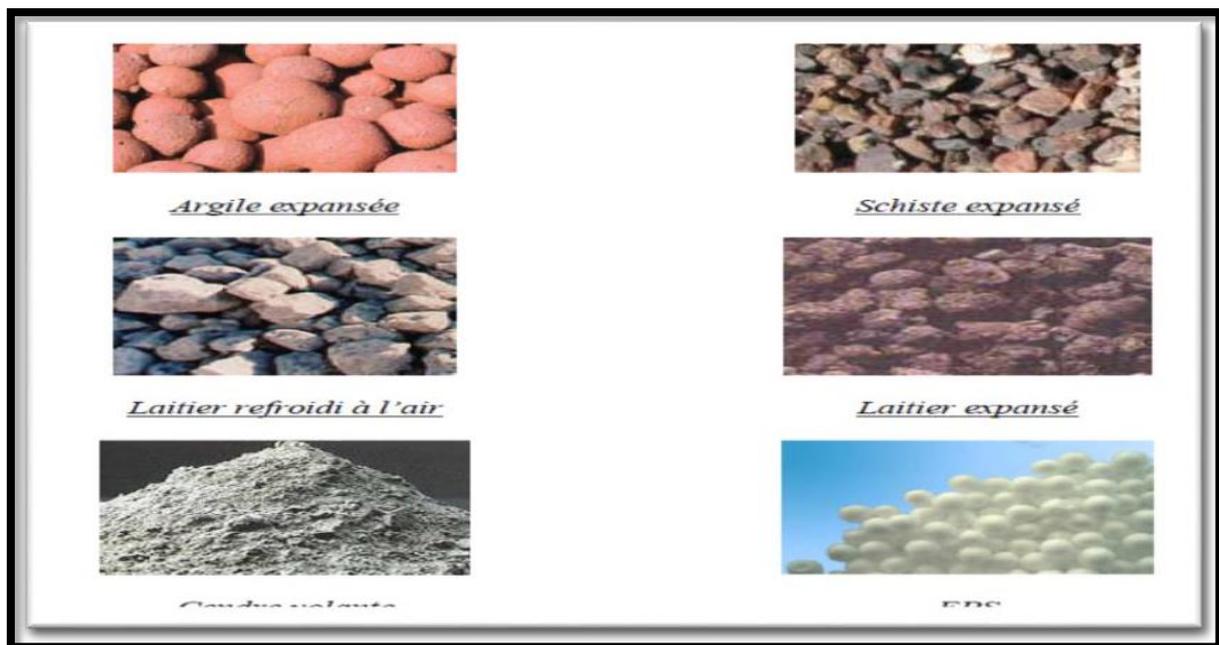


Photo I.3 : Différents granulats légers artificiels [22]

I.2.1.5 : Propriétés des bétons légers :**I.2.1.5.1 : Propriétés physiques :****I.2.1.5.1.1 : Légèreté :**

L'emploi des bétons Légers a pour première conséquence une diminution (minimale) de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300kg/m³ alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m³ pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900kg/m³ pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m³ pour un béton cellulaire.

L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction [21]

I.2.1.5.1.2 : 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 (A_0) 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_l . 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.

$$\Phi_l = \frac{v_{vide}}{v_{liant}} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

Vvide : volume des vides contenus dans la matrice de liant (m^3)

Vliant: 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.

$$\Phi_{meso} = \frac{V_{vide}}{V_t} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

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

V_t : volume total occupé par le matériau (m³) La porosité d'après [11] 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

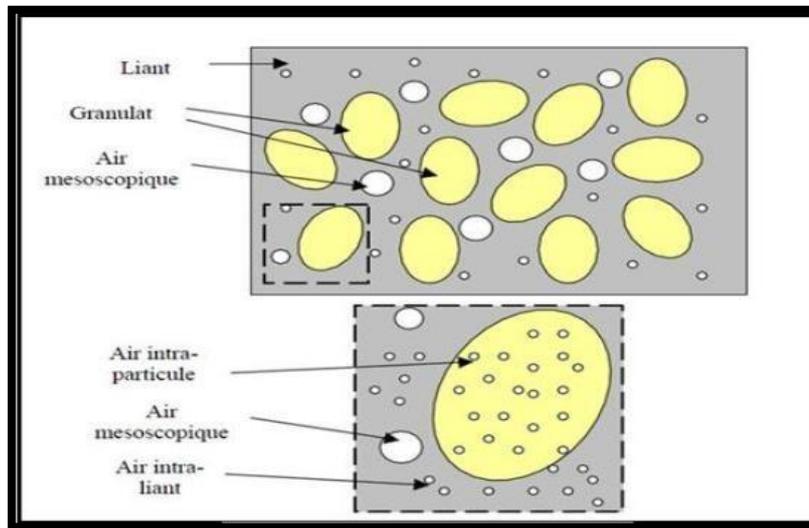


Figure I.3 : Porosité du béton [21]

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

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

Tableau I.3 : Différentes classes de la porosité [23]

I.2.1.5.1.3 : 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.

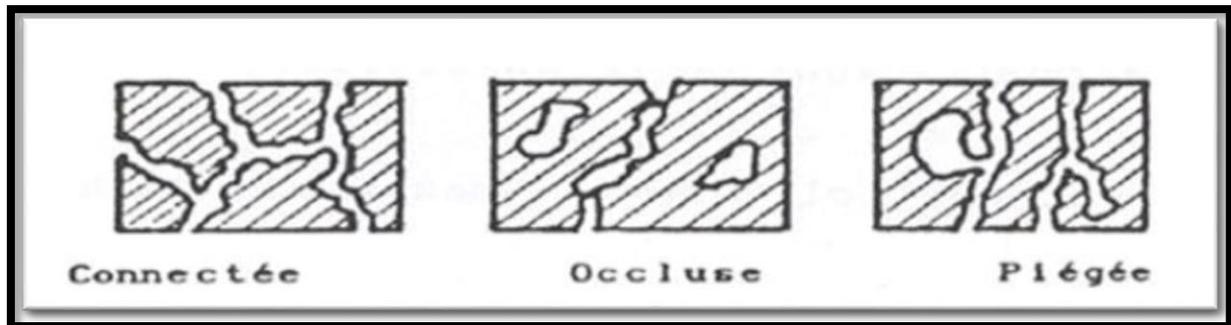


Figure I.4 : Les trois types de porosité présente dans les matériaux [21]

I.2.1.5.1.4 : La masse volumique :

La masse volumique est sans contredit l'un des aspects techniques les plus importants de la présente recherche puisque les travaux sont axés sur la légèreté des éléments de béton pouvant être manipulés manuellement. Par exemple, on peut penser à un élément décoratif extérieur comme une boîte à fleurs de forme cubique de 400 mm avec des parois de 20 mm d'épaisseur.

Le volume de béton d'un tel élément est de 0.016 m³. Dans le cas où le béton utilisé pour la confection de ces éléments aurait une masse volumique de 1000 kg/m³, la masse de l'élément serait de 16 kg. Considérant qu'il s'agit d'un élément en béton avec les propriétés qu'on lui connaît, cette masse est, à toutes fins pratiques, raisonnable.

Dans le cas d'un béton conventionnel, la masse de l'élément serait plutôt de 38 kg. La valeur de 1000 kg/m³ représente donc une valeur appropriée quant à la masse volumique recherchée du béton. La légèreté représente un aspect économique important puisque tout le potentiel de mise en marché de ces éléments en béton repose sur le fait qu'ils puissent être facilement manipulés manuellement. Il est donc essentiel de minimiser autant que possible la masse volumique du béton pour qu'il puisse servir à un nombre maximal d'application.

$$\rho_{bs} = \rho_0 - E_{v0} \quad (I.4)$$

Où ρ_0 désigne la masse volumique réelle du béton frais et E_{v0} la quantité d'eau évaporable du béton

Cette dernière quantité peut être caractérisée par une relation suivante :

$$E_v = E + E_a - 0.25C \quad (I.5)$$

E : quantité d'eau de gâchage

E_a : quantité d'eau absorbée par les granulats légers

C : quantité de ciment [24]

I.2.1.5.1.5 : La rhéologie à l'état frais :

L'ouvrabilité, qui est une propriété importante du béton à l'état frais définit la relation contrainte déformation du matériau, La détermination d'ouvrabilité du béton est exigé pour réaliser le béton de bonne qualité. Les caractéristiques fondamentales pour définir l'ouvrabilité incluent la viscosité, la cohésion, la mobilité, la stabilité, le compactibilité. Une étude étendue a été réalisée à l'université de technologie de Sydney sur la production et les propriétés du béton de polystyrène. Il a été constaté que l'ouvrabilité du béton de polystyrène expansé pourrait être classée en fonction de l'indice de compactage.

L'ouvrabilité (ou maniabilité) se traduit par la capacité du béton de bien remplir tous l'espace du coffrage et d'assurer un bon enrobage des armatures. L'ouvrabilité d'un béton est couramment appréciée par le test du cône d'Abrams, ou le béton est mis dans un moule conique, l'affaissement du béton une fois le moule enlever donne une appréciation sur sa maniabilité. La mise en place du béton dans le moule se fait en 4 couches d'épaisseurs égales, piquer à l'aide d'une tige à raison de 25 coups pour chaque couche. Le cône est ensuite enlevé doucement sans secousses.

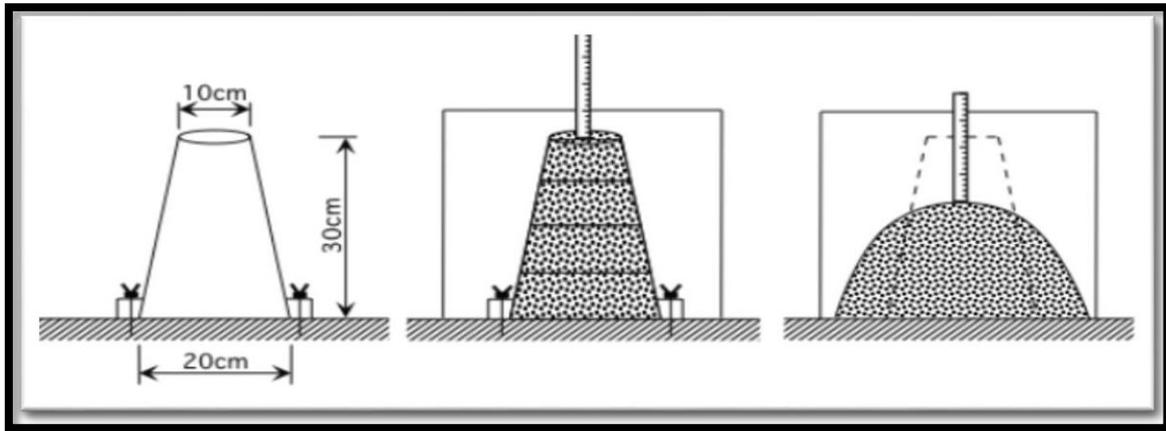


Figure I.5 : test du cône d'Abrams

En fonction de l'affaissement mesuré, la maniabilité du béton est appréciée et une manière de sa mise en œuvre est recommandée.

Affaissement	Béton	Mise en œuvre
0 – 2 cm	Très ferme	Vibration puissante
3 – 5 cm	Ferme	Bonne vibration
6 – 9 cm	Plastique	Vibration courante
10 – 13 cm	Mou	Piquage
> 13 cm	Très mou	Leger piquage

Tableau I.4 : vibration recommandée en fonction de l'ouvrabilité du béton [25]

I.2.1.5.2 : Propriétés mécaniques :

La variété des bétons légers donne lieu à un éventail de densités et de résistances très ouvert. Les masses volumiques s'échelonnent de 250 kg/m³ pour les bétons de polystyrène à faible dosage en ciment, jusqu'à 1800 kg/m³ pour certains bétons d'argile expansée.

Corrélativement, on constate une évolution des résistances à la compression de 1 jusqu'à 30, voire 40 MPa.

La résistance à la traction, 9 à 10 fois plus faible que celle à la compression pour un

béton classique, peut atteindre un pourcentage plus élevé pour les bétons légers : de l'ordre de 20 % de R_c et même 35 à 40 % pour les bétons de bois, dont les granulats jouent le rôle de fibres qui « arment » le béton.

Le module d'élasticité, qui caractérise la loi de comportement déformation-charge du matériau, est plus faible que celui des bétons plus lourds, ce qui conduit à des flèches plus fortes des pièces fléchies. Cette déformabilité supérieure a pour contrepartie une résistance améliorée aux chocs et aux vibrations.

I.2.1.5.2.1 : Résistance en compression :

Avec des granulats légers et une formulation de béton appropriée, il est possible d'obtenir des résistances à la compression comparables à celles obtenues avec du béton traditionnel. L'évolution des connaissances et des technologies du béton ont permis au fil des ans d'améliorer les propriétés des bétons, dont celles des bétons légers. Par exemple, l'utilisation d'ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers) et d'adjuvants (agents entraîneurs d'air, AEA, super plastifiants, SP, agents réducteurs d'eau, WR et accélérateurs de prise) ont donné la possibilité notamment de diminuer le rapport E/L tout en conservant une bonne maniabilité. Des résistances en compression de 100 MPa ont même été obtenues et sont présentées

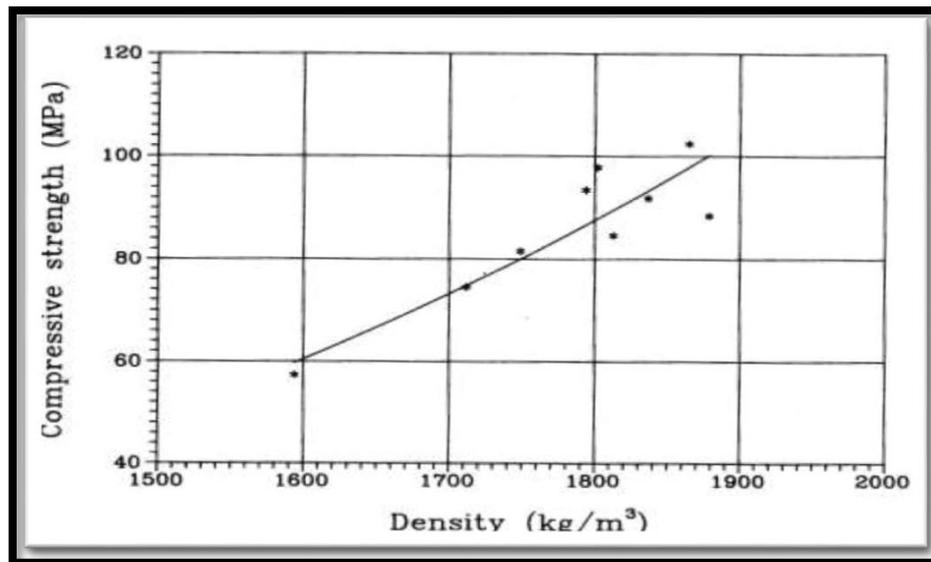


Figure I.6: Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers [25]

I.2.1.5.2.2 : Résistance à la traction :

De même que pour les bétons ordinaires, les bétons légers présentent une résistance à la traction assez faible. Ceci est d'autant plus vrai pour les bétons légers, puisque la propagation des fissures peut s'effectuer au travers des granulats. Des résistances à la traction par fendage de 3,3 à 4,2 Mpa pour des bétons d'une masse volumique de 1940 kg/m³, ou de 3,5 à 5,6 Mpa pour des bétons, dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m³, ont par exemple été rapportées. [25]

I.2.1.5.3 : Propriétés thermiques :

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique λ . Cette dernière est définie comme le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Plus le matériau est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. On considère que généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau. 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 intra-particule (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 $0,60 \text{ W/(m.K)}$

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

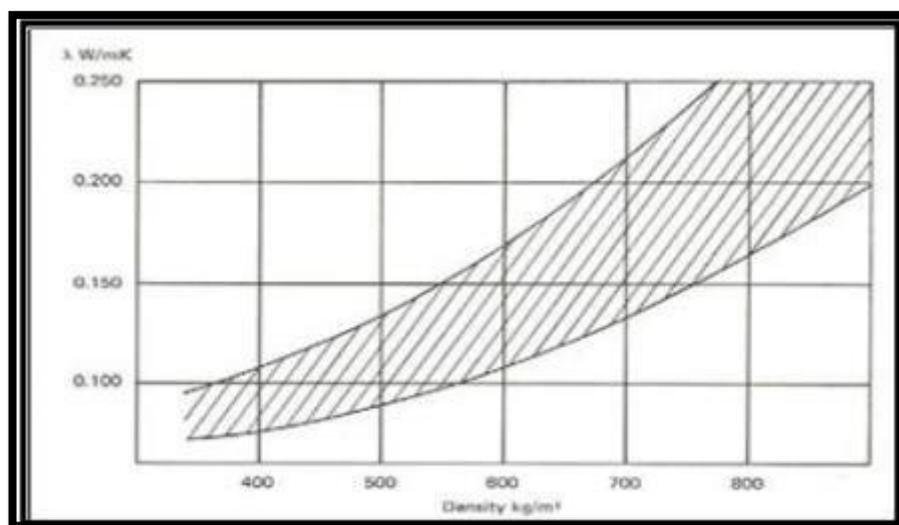


Figure I.7 : Conductivité thermique λ en fonction de la Masse volumique sèche du béton cellulaire [26]

I.2.2 : Fabrication et utilisation des bétons légers :

I.2.2.1 : Fabrication :

Avant la réalisation de ce type de béton, il est important de tenir compte de certains aspects. En effet, il faut se dire que lorsque le béton s'assèche, sa densité doit être relativement élevée.

Dans ce contexte, pour faire le mélange des différents composants, il faut être rigoureux sur le respect des dosages.

Pour la réalisation du béton ordinaire, on a besoin d'eau, de ciment, de granulats, etc., ce qui n'est pas le cas pour le béton léger. En lieu et place des granulats, on utilise des matériaux légers.

En fonction de votre préférence, vous pouvez vous faire livrer des billes de schiste expansé, du chanvre, de l'argile, du liège, des billes de polystyrène, des fibres de bois, des billes d'argiles, etc.

Une fois que ces différents composants sont à votre disposition, vous procédez comme suit :

- ✓ Débarrassez la surface de toute salissure avant la pose du béton.
- ✓ Insérez les zones d'air à l'intérieur du béton.
- ✓ Mettez-y en plus et de manière progressive des adjuvants spécifiques comme le ciment, l'eau, etc.
- ✓ Versez le béton sur la surface prévue pour l'accueillir.
- ✓ Malaxez le tout pendant environ 10 minutes.
- ✓ Laissez sécher le tout. [27]

I.2.2.2 : Utilisation :

I.2.2.2.1 : Bâtiment :

***Fondation :** Puisque les portées seront plus longues et plus larges, les charges sur les fondations seront moins importantes (moins de sollicitation), et de ce fait les fondations pourront être de structure plus simple et économique dans leur dimensionnement.

***Dalle :** Allège le poids propre de la dalle, ce qui entraîne une augmentation de la portée entre poutres de cette dernière.

***Éléments préfabriqué** : Grâce à son poids plus léger, la mise en place et le levage de l'élément préfabriqué seront facilités.

***Rénovation** : La particularité de légèreté de ce béton nous permet de l'utiliser lors de rénovation sans renforcer la structure porteuse existante qu'engendreraient les surcharges d'un béton normal.

***Isolant** : Béton pour mur monolithique, parois et dalle. Il a l'avantage d'être isolant phoniquement et thermiquement. Il est souvent utilisé pour éviter les ponts thermiques dans une construction.

***Chape** : Le béton léger peut être utilisé pour la création de chape sèche.

I.2.2.2.2 : Génie-civil :

***Ouvrage d'art** : Il allège le poids propre de la dalle, ce qui entraîne une augmentation de la portée, autant en longueur qu'en largeur.

***Remblai** : Les granulats d'argiles expansées permettent de remblayer sur des ouvrages (ex. parking souterrain) sans alourdir les charges sur ce dernier, ce qui nous permet d'économiser des surépaisseurs de dalles. Nous pouvons aussi les utiliser remblayés derrière un mur de soutènement afin de réduire les poussées sur la construction. Il est aussi employé pour des remblais routiers, autoroutiers et ferroviaires. Ces différents remblais réduisent les tassements différentiels à long terme. Les granulats d'argiles expansées ont aussi des propriétés drainantes.

***Remplissage** : Pour le remplissage d'ouvrage, le béton léger est une bonne solution sans alourdir la charge existante sur les fondations.

I.2.2.2.3 : Divers :

***Structure maritime** : Le béton léger à la propriété de « flotter » si ce dernier est totalement ou partiellement immergé. Nous pouvons l'utiliser pour des plates-formes, des quais, etc. [28]

I.2.2.3 : Avantages et inconvénients :**I.2.2.3.1 : Avantages :**

Le béton assume beaucoup d'avantages lors de son utilisation. Par son poids, il permet une grande flexibilité, ce qui facilite sa mise en œuvre. La faible densité du béton permet également de conserver la structure porteuse, même lorsque celle-ci est en rénovation.

Autres avantages, le produit :

- ✓ Épouse toutes les formes de coffrages et de supports.
- ✓ Est plus facile à manutention qu'un béton classique (distance et hauteur).
- ✓ Permet de gagner en performance par la réalisation d'économie de poids pouvant atteindre 75 % comparativement à un béton traditionnel.
- ✓ Limite la charge sur les fondations, de même que les structures porteuses du bâtiment.
- ✓ Dispose d'excellentes propriétés thermiques, ce qui réduit la consommation d'énergie (pour le chauffage et la ventilation).
- ✓ Offre de très bonnes performances acoustiques pour l'ensemble du bâtiment.
- ✓ Est résistant aux flammes et imputrescible.
- ✓ Permet une accessibilité rapide sur le chantier après le coulage (de l'ordre de 24 à 48 heures)

I.2.2.3.2 : Inconvénients :

- ✓ Compte tenu de sa faible résistance, le béton allégé ne peut faire l'objet d'utilisation sur toutes les composantes structurelles du bâtiment. Sa densité étant trop basse, il est le plus souvent utilisé comme béton de remplissage.
- ✓ Il est impératif, selon les règlements des documents techniques unifiés (DTU), de recouvrir le béton léger d'une chape de mortier de 5 cm d'épaisseur. Seul le béton allégé composé de billes de polystyrène fait exception à cette règle. [29]

I.3 : Travaux récents sur les bétons légers :

Pour développer le béton léger, deux éléments doivent être pris en considération : les concepts liés à la formulation des bétons légers et l'utilisation de granulats légers. Par ailleurs, il devient de plus en plus intéressant d'évaluer le potentiel des matériaux légers comme source de matières premières.

1^{er} étude : élaboration d'un béton léger à partir des matériaux locaux

L'objectif principal de cette est d'étudier les caractéristiques physico mécaniques des granulats à base de déchets de brique, ainsi que les propriétés des bétons à base de ces granulats, afin de pouvoir les utiliser, dans certains domaines de la construction, comme granulats artificiels plus légers que les granulats courants.

Les résultats de cette étude ont montré qu'il est possible de fabriquer des bétons à base de déchets de brique malgré la défaillance mécanique de ces granulats. La résistance à la compression de ces bétons est acceptable et comparable à celle du béton ordinaire avec réduction en poids du béton appréciable. [30]

Les résultats sont résumées au tableau

	Béton Ordinaire	Béton (type-1)	Béton (type-2)	Béton (type-3)	Béton (type-4)
Affaissement	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm
Masse volumique (Kg/m³)	2285	1800	1676	1632	1558
Absorption %	23	35	40	43	44
Résistance à la compression MPa	30.32	13.83	13.31	14.33	19.45

Tableau I.5 : Les résultats d'essais [30]

2^{ème} étude : « Formulation et caractérisation d'un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage des boues de barrage. »

Ce travail vise principalement la récupération de la boue des barrages pour l'élaboration de granulats destinés aux bétons légers. Après traitement de la vase et obtention des granulats, ces derniers sont incorporés dans le béton à différentes teneurs en substitution des granulats naturels

Les résultats obtenus montrent que la méthode et les conditions de préparation des granulats légers a été efficace et elle donne des caractéristiques intéressantes de point de vue masse volumique, résistance mécanique et conductivité thermique. [31]

Les résultats sont résumés au tableau suivant :

	Témoïn	50 % GL	100 % GL
Affaissement cm	1.20	1.40	1.40
Masse volumique Kg/m³	2540	2430	2300
Absorption %	4.00	4.55	5.00
Résistance à la compression MPa	39.2	41.0	38.5
Résistance à la flexion MPa	6.8	7.3	5.6
Conductivité thermique W/m. °c	2.032	1.768	1.450

Tableau I.6 : Les résultats d'essais [31]

3^{ème} étude : « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers. »

Pour cette étude on a choisi les bétons légers confectionnés à partir de granulats légers artificiels, pour apporter notre contribution dans la recherche sur les différents granulats légers et visant la réduction de la consommation des granulats usuels et la conservation des ressources naturelles.

La formulation des séries de Bétons de Granulats Légers au Polystyrène Expandé (BGLPSE) a été faite suivant un plan d'expérience bien déterminé, permettant la caractérisation du béton de polystyrène, et les principaux facteurs influant sur son comportement rhéologique et mécanique tels que : la matrice cimentaire, le pourcentage du granulat léger, les particularités en matière de formulation des bétons légers, et le rapport Eau/Ciment (E/C). [32]

Les résultats sont résumés au tableau suivant :

	Béton Polystyrène 350	Béton Ordinaire 350	Béton Polystyrène 400	Béton Ordinaire 400
Masse volumique (g)	692,3	773,1	773,1	884,3
Résistance à la compression MPa	20,50	25,50	23,80	26,80

Tableau I.7: Les résultats d'essais [32]

4^{ème} étude : « étude des performances mécaniques et thermiques des bétons légers »

Dans cette étude, ont formulé des bétons légers à base des granulats légers (polystyrène, liège et rachie de palmier dattier), pour contribuer à l'isolation thermique et la réduction de la consommation des granulats traditionnels. Pour mesurer la conductivité thermique des différents types de béton léger on utilise le CT-Mètre.

Les résultats expérimentaux de cette étude démontrent la possibilité se réduire la conductivité thermique de béton en utilisant des matériaux léger locaux tout en gardant des propriétés mécaniques acceptable. [33]

Les résultats sont résumés au tableau suivant :

	Béton témoin	Béton de polystyrène	Béton de liège	Béton de rachie
Affaissement Cm	5.5	4	4.5	5
Masse volumique Kg/m³	2382	1781	1874	1918
Résistance à la compression MPa	39.4	4.45	10.6	11.00
Résistance à la flexion MPa	13.5	3.13	5.1	6.22
conductivité thermique (m².K/W)	1.414	1.058	1.224	1.010

Tableau I.8 : Les résultats d'essais [33]

Conclusion :

Dans ce premier chapitre de la synthèse bibliographique, nous avons traité plusieurs points qu'on peut résumer comme suit :

- ✓ Il existe dans le monde trois types des bétons légers (le béton cellulaire, le béton caverneux et le béton de granulats légers), qui sont utilisés comme :
béton léger structural et béton léger architectural (remplissage).
- ✓ D'un point de vue générale et simple, le béton léger est réalisé on diminue la masse volumique par le remplace d'une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :
 - *Dans les granulats.
 - *Dans la pâte de ciment.
 - *Entre les gros granulats par élimination de granulats fins.
- ✓ Il convient de compléter notre bibliographie centrée sur le béton de granulats légers en notant l'importance des propriétés et les caractéristiques de chaque type de granulats. Les caractéristiques des granulats et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.
- ✓ On remarque que le béton léger est très utile et son application est très large.
- ✓ Le béton utilisé dans plusieurs domaines, notamment l'isolation thermique et acoustique, et la résistance à la compression est faible par rapport le béton ordinaire



CHAPITRE II :
Caractéristiques des
matériaux



Introduction :

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation des caractéristiques de matériaux utilisés durant ce projet de recherche, les procédures des malaxages pour confectionner nos mélanges, ainsi que les différents essais expérimentaux pour les caractériser à l'état frais et durci.

II.1 : Matériaux utilisés :**II.1.1 : LIANT « CIMENT PORTLAND COMPOSE CEM II/A-L 42.5»**

Le ciment portland composé est produit en broyant le clinker qui se compose essentiellement de silicate de calcium avec le gypse comme ajout constitué de différentes formes de sulfate de calcium. Tous les bétons ont été fabriqués avec un ciment provenant de la cimenterie d'Ain Touta (wilaya de Batna) à savoir le **CEM II/A-L 42.5**

II.1.1.1 : Composition chimique :

L'analyse chimique du ciment a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Ain-Touta (Batna) selon la norme (NF EN 196-2)

Les résultats sont donnés dans le tableau **II.1**

Elément	Teneur %
SiO₂	20.65
Al₂O₃	4.92
Fe₂ O₃	2.97
CaO	59.4
MgO	1.01
K₂O	0.80
Na₂O	0.19
SO₃	2.75
Cl⁻	0.02
Perte au feu	6.02
Ca O Libre	0.78
Résidus insolubles	0.6
Composition potentiel de Clinker C3A	8.7

Tableau II.1: composition chimique du ciment utilisé [FICHE TECHNIQUE]

II.1.1.2 : Propriétés physiques :

Nomination		CEM II/A-L 42.5
Caractéristiques		
Masse Volumique Apparente (g/cm³)		1.05
Masse volumique Absolue (g/cm³)		3.03
Surface spécifique (BLAINE) (cm²/g)		3495
Temps de prise	Début	02h27
	Fin	03h27

Tableau II.2: Caractéristiques du ciment [FICHE TECHNIQUE].

II.1.1.3 : Caractéristiques Physico-mécaniques :

Désignations		Unités	Garanties	Mesures
Poids Spécifiques		g/cm³	-	3.03
Surface Spécifiques Blaine		Cm²/g	-	3495
Consistance Normale		%H₂O	-	26.04
Temps De Prise	Début	h : min	≥ 1h : 00	2h27
	Fin	h : min	-	3h27
Expansion à Chaud		mm	≤ 10	0.65
Refus sur tamis 45 μm		%	-	10.20
Chaleur d'hydratation	120 heures	j/g	≤270 j/g	LH
Résistance à la flexion	02 jours	MPa	-	5.00
	07 jours	MPa	-	6.77
	28 jours	MPa	-	7.80
Résistance à la compression	02 jours	MPa	≥20.00	23.70
	07 jours	MPa	-	37.03
	28 jours	MPa	≥42.50	47.14

Tableau II.3 : Propriétés du ciment du fiche techniques.

II.1.1.4 : Masse volumique :

Les masses volumiques apparentes et absolues du sable utilisé ont été mesurées d'après la norme [NF P 18-554 et 555]

En utilise dans cette mesure pour détermine la masse volumique absolue, par la méthode du flacon (utilisé s'appelle un pycnomètre). A été réalisé conformément à la norme NF EN 1097-7.

Masse volumique	Valeur en g/cm³
Absolue	2.98
Apparente	1.07

Tableau II.4 : Propriétés du ciment.

II.1.2 : Sable :

Le sable lavé utilisé dans tous les mélanges du béton léger provient de la région de **Lioua** (wilaya de Biskra). Il s'agit d'un sable fin siliceux de granulométrie $\Phi < 5\text{mm}$



Photo II.1: sable 0/5 de Lioua

II.1.2.1 : Masse volumique :

Les masses volumiques apparente et absolue du sable utilisé ont été mesuré d'après la norme [NF P 18-554 et 555]

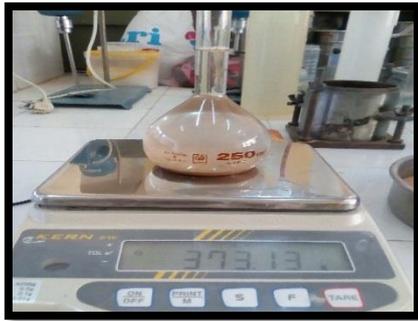


Photo II.2: La masse volumique apparente
de gravier.



Photo II.3: La masse volumique absolue
de gravier.

Masse volumique	Valeur en g/cm ³
Absolue	2.58
Apparente	1.62

Tableau II.5: la masse volumique de sable 0/5 de Lioua.

II.1.2.2 : Equivalent de sable :

L'essai permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans un sable en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés), dans cet essai on a deux valeurs « ESP » la valeur obtenue par le piston et « ESV » la valeur obtenue visuellement. Les valeurs qu'on a obtenues montrent que le sable utilisé est propre. L'équivalent du sable est calculé suivant la formule ci-dessous :

$$E_{SV} = \frac{h'^2}{h_1} \times 100 ; \quad E_{SP} = \frac{h^2}{h_1} \times 100 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

h_1 : Hauteur du sable propre + éléments fins.

h' : Hauteur du sable propre par le piston.

h_2 : Hauteur du sable propre par

E_{SV} : Valeur d'équivalent visuel.

E_{SP} : Valeur d'équivalent par le piston.



Photo II.4 : d'équivalent de sable

- Les résultats de l'essai sur le sable étudié dans le tableau ci-dessous :

Type de sable	ESV%	ESP%
Sable 0<5 se Lioua	77	75

Tableau II.6: Les résultats d'équivalent de sable

L'équivalent de sable $70\% \leq ES \leq 80\%$ car le sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité

II.1.2.3 : Analyse granulométrique :

L'analyse Granulométrique par tamisage est une méthode d'essai qui consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées, de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis. On trace ensuite la Courbe Granulométrique, courbe exprimant les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs

L'analyse a été effectuée conformément à la norme [EN 12620]



Photo II.5 : l'analyse granulométrique de sable 0/5 de lioua

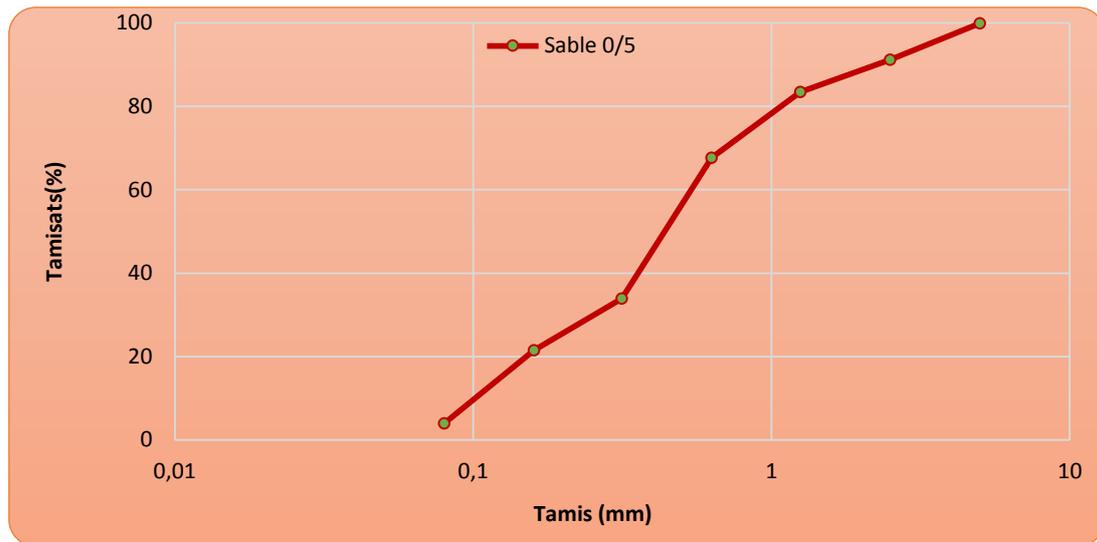


Figure II.1: Courbe granulométrique du sable 0/5

II.1.2.4 : Absorption d'eau :

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant **24 heures** à **22° C** à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme **NF P 18-555**.

Absorption d'eau du sable utilisé (Lioua <5mm) =12% : le sable utilisé est absorbant

II.1.3 : Granulats :

II.1.3.1 : Granulat naturel :

Le Gravier naturel (GN) 7/15 utilisé dans tous les mélanges du béton léger provient de la carrière **d'Ain Touta (wilaya de Batna)**



Photo II.6 : granulat naturel (gravier) 7/15 Ain Touta

II.1.3.1.1 : Masse volumique :

Les masses volumiques apparentes et absolues des Graviers utilisés ont été mesurées d'après la norme [NF P 18-554 et 555]



Photo II.7 : La masse volumique apparente de gravier.



Photo II.8 : La masse volumique absolue de gravier.

Masse volumique	Valeur en g/cm³
Absolue	2.66
Apparente	1.32

Tableau II.7 : La masse volumique du gravier 7/15

II.1.3.1.2 : Analyse granulométrique :



Photo II.9 : l'analyse granulométrique de gravier 7/15

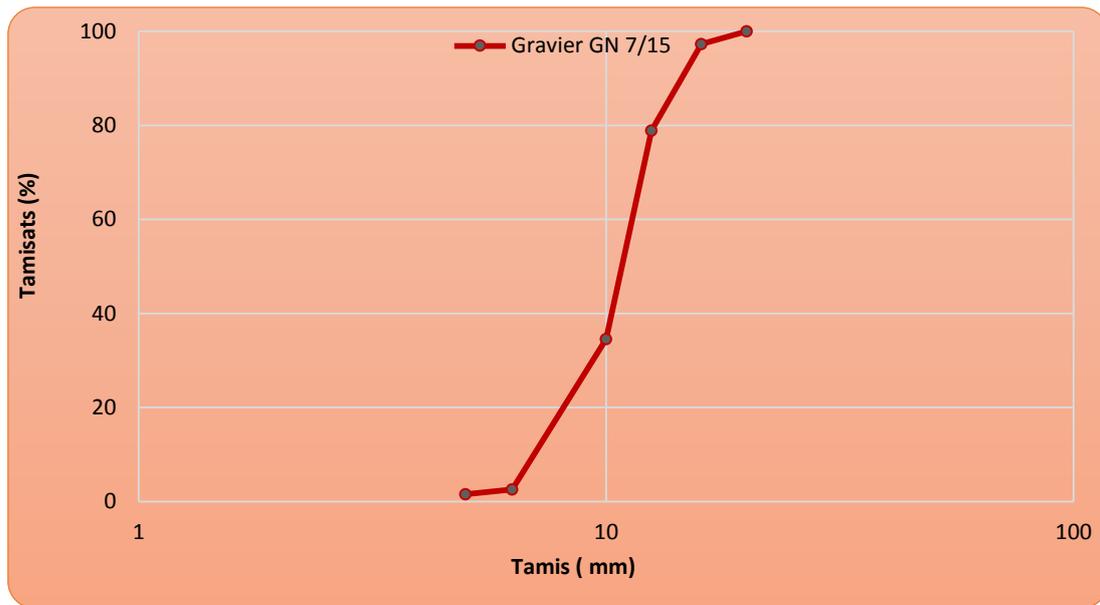


Figure II.2: Courbe granulométrique du granulat naturel(GN) 7/15

II.1.3.1.3 : Essais de Los Angeles :

La dureté des granulats utilisés a été contrôlée par l'essai de Los- Angeles conformément à la norme [NF P 18-573] qui exige la valeur limite de 40 % à ne pas dépasser

Le coefficient L.A est calculé en utilisant la formule :

$$LA = ((m1 - m2) / m1) \times 100 \% \quad (II.2)$$

Avec :

m1 : la masse de la quantité de gravier avant l'essai [g].

m2 : la masse du refus à 1.6mm [g]

$$LA = (5000 - 3770) / 5000 = 25\%$$

20% ≤ LA ≤ 30% → gravier assez dur.



Photo II.10 : Essais de Los Angeles

II.1.3.2 : Granulat légers :

II.1.3.2.1 : Polystyrène :



Photo II.11 : Granulats de polystyrène

***Composition et origine:** La matière première servant à la formation de Polystyrène est constitué de granules de polystyrène non expansé renfermant un pyrogène.

***Méthode de fabrication:** Le pyrogène, sous l'action de la chaleur, passe à l'état gazeux, ce qui provoque l'expansion. Une fois expansées les perles peuvent avoir atteint plusieurs fois leur diamètre initial, de 0,4 à 2mm (Cormon, 1973). Le polystyrène présente une masse volumique parmi les plus faibles (10 à 40 kg/m³) en considération aux autres matériaux étudiés (ACI, 1986).

***Propriétés du béton:** Les bétons confectionnés à partir de polystyrène ont une masse volumique aussi faible que 550 à 800 kg/m³ selon que l'on emploie une portion de sable ou non. Ces bétons offrent de piètres performances mécaniques : une résistance à la compression de l'ordre de 2,0 à 4,0 MPa en fonction du pourcentage de sable utilisé. Il a été montré que la masse volumique de ces perles n'ont aucun apport quant aux caractéristiques mécaniques de ces bétons [5]. Les autres propriétés du béton contenant des billes de polystyrène sont présentées dans le

	ρ kg/m ³	f_c (Mpa)	Traction (Mpa)	E (GPa)	Retrait (mm/m)	Dilatation (mm/m)	λ . (kcal/mh°C)
polystyrène	300à 1000	1 à 10	0.3 à 1.5	2	0.1 à 2.0	10×10^{-6}	0.05 à 0.25

Tableau II.8: Propriétés du béton léger confectionné à partir de polystyrène [35]

II.1.3.2.1.1 : -Masse volumique :

Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats de polystyrène utilisés ont été mesurés d'après la norme [NF P 18-554 et 555]

Masse volumique	Valeur en g/cm³
Absolue	0.013
Apparente	0.008

Tableau II.9 : Mesure de masse volumique apparente et absolue du polystyrène

II.1.3.2.1.2 : Absorption d'eau :

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant **24 heures** à **22° C** à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme **NF P 18-555**.

Granulats	Absorption (%)
GP	68.75

Tableau II.10: Résultats d'absorption d'eau pour les granulats étudiés.

L'absorption d'eau pour les granulats substitués en fonction du temps :

D'après les essais d'absorption effectués on remarque que les granulats de substitution utilisés ont une grande absorption d'eau, pour cela on a voulu vérifier la vitesse d'absorption en mesurant l'absorption en fonction du temps. Les résultats sont présentés au tableau (II.11)

granulats	L'absorption d'eau %
temps	GP
15 s	17
30 s	20
1 min	23.8
5 min	26.7
10 min	38.55
15 min	44
30 min	44.65
1 h	50.2
2 h	64.5
6 h	69.2
24 h	69.2

Tableau II.11: L'absorption d'eau en fonction du temps

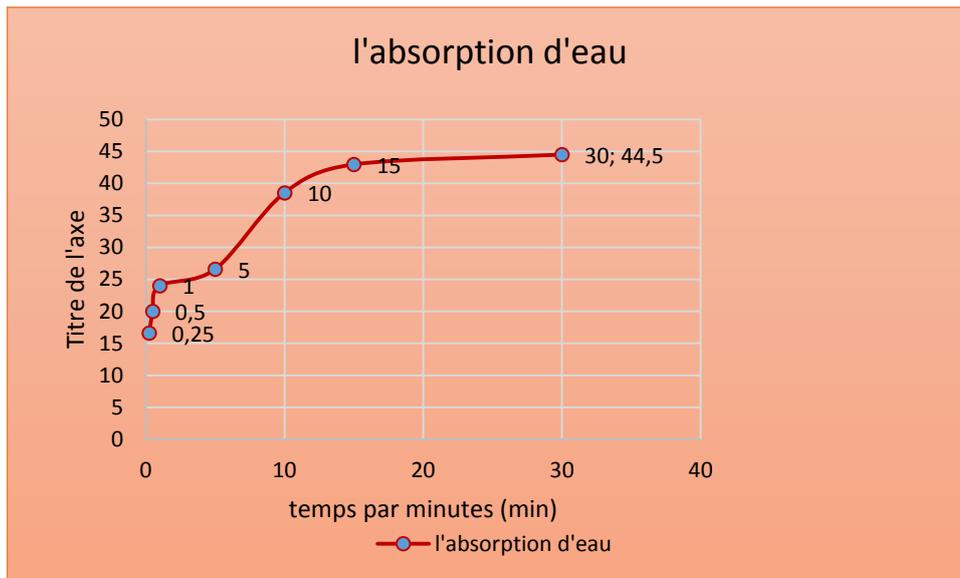


Figure II.3: Absorption d'eau par les granulats du polystyrène pendant 30 minutes

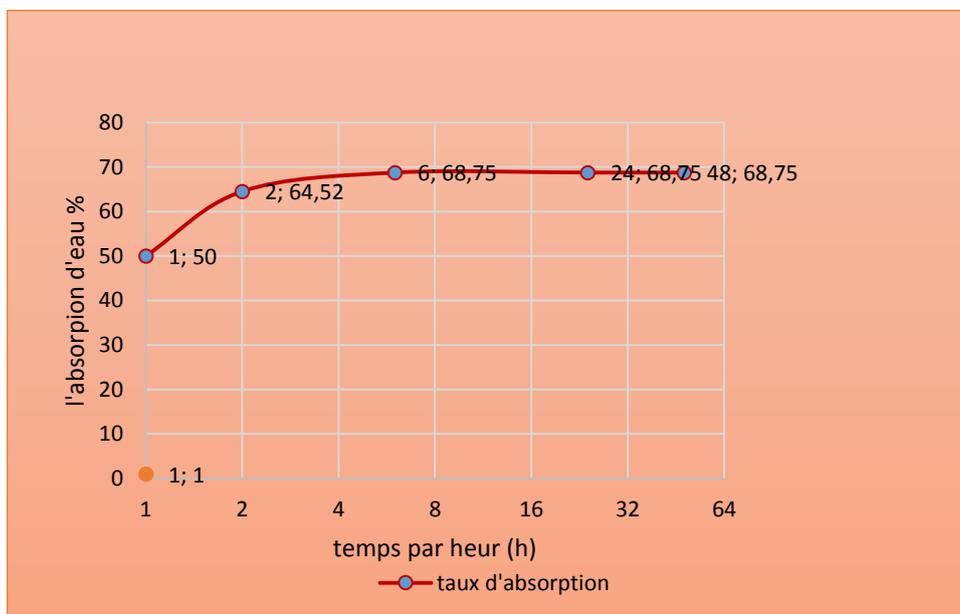


Figure II.4: Absorption d'eau par les granulats du polystyrène pendant 24 heures

II.1.3.2.2 : le liège :



Photo II.12 : Le liège

Le **liège** est un produit agricole et un matériau présent dans l'écorce de quelques arbres, et notamment celle du chêne-liège. Il protège l'arbre des insectes, du froid et des intempéries tout en lui permettant de respirer, par de minces canaux appelés lenticelles (les trous du liège et de certains fruits). L'arbre chêne-liège est un puits de carbone d'autant plus efficace que l'arbre est exploité à produire du liège

II.1.3.2.2.1 : -Masse volumique :

Masse volumique	Valeur en g/cm³
Absolue	0.220
Apparente	0.095

Tableau II.12: Mesure de masse volumique apparente et absolue du liège

II.1.3.2.2.2 : Absorption d'eau :

granulats temps	L'absorption d'eau %
	GL
15 s	1
30 s	6.80
1 min	9
5 min	16
10 min	17.90
15 min	18.88
30 min	20.01
1 h	23.1
2 h	35.24
6 h	43.50
24 h	60.98

Tableau II.13: L'absorption d'eau en fonction du temps

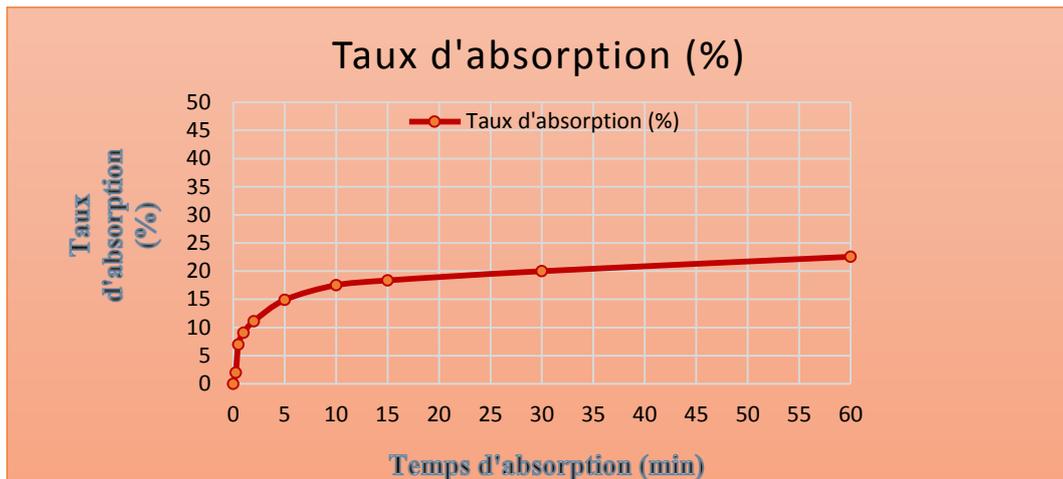


Figure II.5: Absorption d'eau par les granulats du liège pendant 1 heure

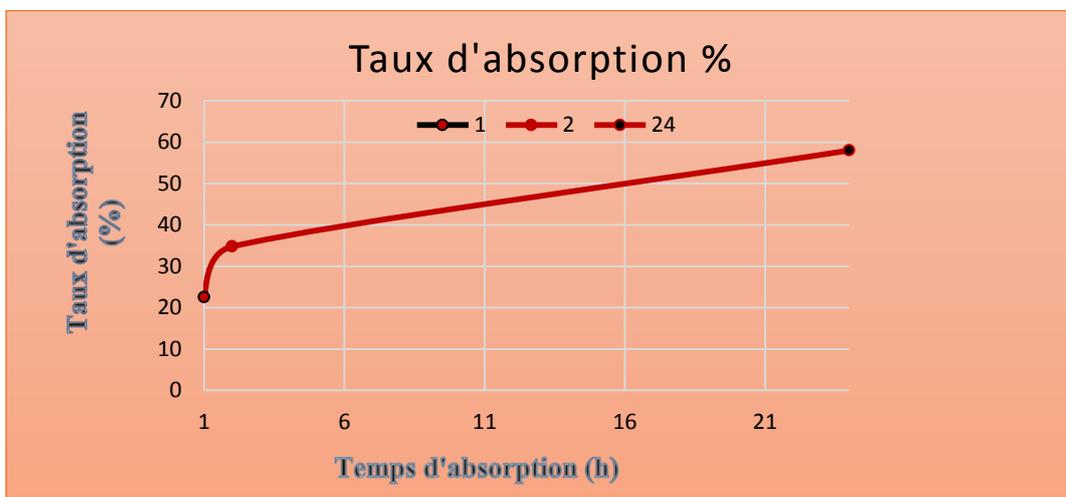


Figure II.6: Absorption d'eau par les granulats du liège pendant 24 heures

II.1.4 : Poudre d'aluminium :

La poudre d'aluminium joue un rôle important dans la création des pores dans la masse du béton, par sa réaction avec l'hydroxyde de calcium.

L'utilisation de la poudre d'aluminium comme agent gonflant : après avoir préparé les ingrédients secs, de la poudre d'aluminium et de l'eau étaient ajoutées juste avant de verser le mélange dans le moule ; Le béton peut être comparé à la cuisson d'un pain : la poudre d'aluminium remplit la même fonction que la levure en augmentant le volume du mélange.



Figure II.13: les déchets d'aluminium

II.1.4.1 : La masse volumique :

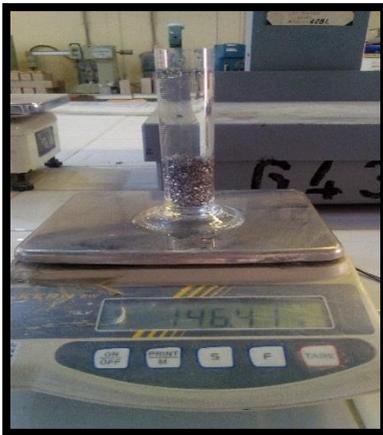


Photo II.14 : la masse volumique absolue et apparente de la poudre d'aluminium

Masse volumique	Valeur en g/cm³
Absolute	0.189
Apparente	0.554

Tableau II.14: Mesure de masse volumique apparente et absolue de la poudre d'aluminium

II.1.5 : Chaux :



Photo II.15 : la chaux

Dans le domaine des bâtiments, les matériaux utilisés sont nombreux : certains ayant des propriétés spécifiques, d'autres étant polyvalents. La chaux est justement considérée comme un matériau polyvalent. En effet, elle peut être utilisée autant sur un site de construction que sur un site désaffecté. L'utilisation de la chaux s'étend aussi dans le domaine de la décoration. A noter que la chaux provient de la cuisson de pierres calcaires

La chaux est adaptée à toute construction avec des matières naturelles. Selon le type de pierre avec laquelle elle est extraite, il existe deux types de chaux : celle qui ne présente pas de matériaux hydrauliques, issue de pierres fines cuites et concassées et celle qui présente des éléments hydrauliques, issue de pierre plus grossière. On parle respectivement de chaux aérienne et de chaux hydraulique.

II.1.5.1 : La masse volumique :

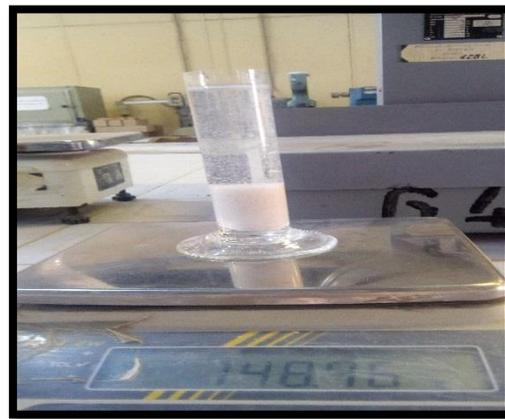


Photo II.16 : la masse volumique absolue et apparente de la chaux

Masse volumique	Valeur en g/cm³
Absolue	1.79
Apparente	1.05

Tableau II.15: Mesure de masse volumique apparente et absolue de la chaux

II.1.6 : Gypse :



Photo II.17 : le gypse

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate di hydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois un corps chimique composé minéral naturel et une roche évaporite majeure

II.1.6.1 : La masse volumique :

Masse volumique	Valeur en g/cm^3
Absolute	1.42
Apparente	1.07

Tableau II.16: Mesure de masse volumique apparente et absolue du gypse

Conclusion :

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des bétons qui seront étudiés au chapitre suivant à l'état frais et à l'état durci.. La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux



CHAPITRE III :

Formulation et essais des bétons



Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différents mélanges de béton et les quantités de matériaux utilisés.

Il y'a plusieurs méthodes de composition de béton qui sont proposées par des spécialistes tels que BOLOMEY, FAURY, VALLETTE, DREUX–GORISSE, SCRAMTAIEV... etc. quelle que soit la méthode utilisée, la composition du mélange calculée ne peut pas correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision la composition du béton, ceci peut-être dû à la qualité des constituants qui influent sur la qualité du béton : forme, angularité, porosité, type de granulats, finesse de mouture et classe vraie de résistance, etc.

Pour notre étude on a choisi la méthode de Scramtaiev comme une méthode de formulation, notons que le calcul de la composition du béton a été fait par la méthode des « volumes absolus » élaborée par le professeur B. Scramtaïv.

III.1 : La formulation des bétons :

III.1.1 : Méthode de SCRAMTAIEV :

Cette méthode repose sur le fait qu'un béton lourd, damé à l'état frais, se rapproche de la compacité absolue, ce que signifie que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un m³ est égale au volume de la composition du béton damé.

La composition du béton est tout d'abord établie approximativement par calcul, ensuite elle est précisée par la méthode des essais de dosage expérimentaux de mélange de béton.

Le matériau	La formule du calcul de la quantité
Sable	$S = \left[1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{PC}{\rho_{pc}} \right) \right] \times \rho_s, \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Eau	$E = \frac{E}{C} \times C, \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Pierre concassé (Gravier)	$Pc = \frac{1000}{V_{vol\ pc} \frac{\alpha}{\rho_{pc}} + \frac{1}{\rho_{pc}}}, \text{ (kg/m}^3\text{)}$ $V = 1 - \frac{\alpha}{\gamma}$

Tableau III.1: Méthode de calcul des quantités de matériau (méthode de Scramtaïv)

Les valeurs α en fonction: $\frac{E}{C}$						Quantité de ciment (kg/m ³)
0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	
1,3	1,32	1,26	-	-	-	250
-	1,42	1,38	1,30	-	-	300
-	-	1,44	1,38	1,32	-	350
-	-	-	1,46	1,40	1,31	400
-	-	-	1,56	1,52	1,44	500
-	-	-	-	1,56	1,52	600

Tableau III.2 : valeurs de α en fonction: $\frac{E}{C}$

III.1.1.1 : Les différents mélanges des bétons :

Sept types de béton ont été formulés :

- un béton à base de granulats naturels (béton témoin). **BT**
- un béton mixte (granulats naturels + granulats de polystyrène). **BP**
- un béton mixte (granulats naturels + granulats de liège) **BL**
- un béton caverneux **BV** avec 3 mélange (**BV1, BV2 et BV3**).
- un béton cellulaire **BC**

Les mélanges de béton ont été réalisés avec un rapport Eau/ Ciment constant égale à **0.6** (valeur moyenne pour tous les mélanges) pour pouvoir faire une étude comparative sur la résistance et la conductivité thermique.

La quantité de ciment utilisée pour tous les mélanges est constante, égale à 350 kg /m³

III.1.1.2 : Le calcul des quantités des bétons :

III.1.1.2.1 : Béton ordinaire :

- On a choisir pour le rapport Eau /Ciment **E/C = 0,6**, et pour le dosage de ciment

$$C = 350 \text{ kg /m}^3$$

- Quantité d'eau :

$$E = \frac{E}{C} \times C \longrightarrow E = 350 \times 0,6 = 210 \text{ kg /m}^3 \longrightarrow E = 210 \text{ kg /m}^3$$

- Quantité du pierres concassés :

$$V = 1 - \frac{\alpha}{\gamma} \longrightarrow V = 1 - \frac{1,32}{2,66} \longrightarrow V = 0.504$$

$$Pc = \frac{1000}{V \frac{\alpha}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_{pc}}} \longrightarrow Pc = \frac{1000}{0.504 \cdot \frac{1,44}{1,32} + \frac{1}{2,66}} \longrightarrow Pc = 1080.19 \text{ kg/m}^3$$

- Quantité de sable:

$$S = [1000 - (\frac{C}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{PC}{\rho_{pc}})] \times \rho_s \longrightarrow S = [1000 - (\frac{350}{2,98} + \frac{210}{1} + \frac{1080.19}{2,66})] \times 2.58$$

$$S = 687.48 \text{ Kg/m}^3.$$

III.1.1.2.2 : Béton léger à base de polystyrène :

Pour la substitution de 50 % de volume de béton on a pris la composition suivant :

La quantité de pierres concassées (GN) est : $P_c = 1080.19 \text{ Kg}$.

La masse volumique apparente de gravier est : 1320 Kg/m^3

$1320 \text{ Kg} \longrightarrow 1 \text{ m}^3$

$1080.19 \text{ Kg} \longrightarrow V$

$$V = (1080.19 \times 1) / 1320 = \mathbf{0.818 \text{ m}^3}$$

On fait le contraire pour trouver la quantité de polystyrène :

La masse volumique apparente de polystyrène est : 8 Kg/m^3

$1 \text{ m}^3 \longrightarrow 8 \text{ Kg}$

$0.409 \text{ m}^3 \longrightarrow Q_{\text{Polys}}$

$$Q_{\text{Polys}} = (0.409 \times 8) / 1 = 3.27 \text{ Kg}.$$

$1 \text{ m}^3 \longrightarrow 1320 \text{ Kg}$

$0.409 \text{ m}^3 \longrightarrow Q_{\text{GN}}$

$$Q_{\text{GN}} = (0.409 \times 1320) / 1 = 539.88 \text{ kg}.$$

III.1.1.2.3 : Béton léger à base de liège :

Pour la substitution de 50 % de volume de béton on a pris la composition suivant :

La quantité de pierres concassées (GN) est : $P_c = 1060.69 \text{ Kg}$.

La masse volumique apparente de gravier est : 1300 Kg/m^3

$1320 \text{ Kg} \longrightarrow 1 \text{ m}^3$

$1080.19 \text{ Kg} \longrightarrow V$

$$V = (1080.19 \times 1) / 1320 = \mathbf{0.818 \text{ m}^3}$$

On fait le contraire pour trouver la quantité de liège :

La masse volumique apparente liège de est : 95 Kg/m^3

$1 \text{ m}^3 \longrightarrow 95 \text{ Kg}$

$0.409 \text{ m}^3 \longrightarrow Q_{\text{liège}}$

$$Q_{\text{liège}} = (0.409 \times 95) / 1 = \mathbf{38.85 \text{ Kg}}.$$

$1 \text{ m}^3 \longrightarrow 1320 \text{ Kg}$

$0.409 \text{ m}^3 \longrightarrow Q_{\text{GN}}$

$$Q_{\text{GN}} = (0.409 \times 1320) / 1 = \mathbf{539.88 \text{ kg}}.$$

III.1.1.2.4 : Béton caverneux :

On calcul les quantités des matériaux par rapport le béton ordinaire.

Le taux de substitution des granulats fins (sable) par le béton caverneux 01 est de 20%

Le taux de substitution des granulats fins (sable) par le béton caverneux 02 est de 10%

Le taux de substitution des granulats fins (sable) par le béton caverneux 03 est de 0%

Quantité de sable: $S = 687.48 \text{Kg/m}^3$.

***Pour BV1:** 20% \longrightarrow $S = 137.49 \text{Kg/m}^3$

***Pour BV2 :** 10% \longrightarrow $S = 68.75 \text{Kg/m}^3$

***Pour BV3 :** $S = 0 \text{Kg/m}^3$

III.1.1.2.5 : Béton cellulaire :

On a choisir pour le rapport Eau /Ciment $E/C = 0,6$

$E = 210 \text{Kg/m}^3$

Ciment: 20% \longrightarrow $C = 423.5 \text{Kg/m}^3$

Sable: 65% \longrightarrow $S = 1376.4 \text{Kg/m}^3$

Chaux: 15% \longrightarrow $Ch = 317.6 \text{Kg/m}^3$

Poudre d'aluminium: 0.05% \longrightarrow $P_{al} = 1.05 \text{Kg/m}^3$

Gypse: 1% \longrightarrow $Gyp = 21.17 \text{Kg/m}^3$

Les bétons	Les quantités des matériaux (kg/m ³)				
	Eau Kg/m ³	Ciment Kg/m ³	Graviers Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Granulats légers Kg/m ³
BT	210	350	1080.19	687.48	-----
BP	210	350	1080.19	539.88	3.27
BL	210	350	1080.19	539.88	38.85
BV01	210	350	1080.19	137.49	-----
BV 02	210	350	1080.19	68.75	-----
BV 03	210	350	1080.19	0	-----

Tableau III-3: Composition des mélanges de béton pour 1m³

Béton	Eau Kg/m ³	Ciment Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Chaux Kg/m ³	Poudre d'aluminium Kg/m ³	Gypse Kg/m ³
BC	210	423.5	1376.4	317.6	1.05	21.17

Tableau III.4: Composition de mélange de béton cellulaire pour 1m³

III.1.2 : Préparation des éprouvettes :

III.1.2.1 : Mélange de béton :

Pour le béton ordinaire, le malaxage se fait suivant la norme. Lorsqu'il s'agit de béton qui contient des matériaux légers comme le liège, le malaxage est fait manuellement pour préserver et protéger les matériaux légers et leurs propriétés.

III.1.2.2 : Remplissage et vibration :

Le béton ordinaire est mis dans les moules adéquats aux essais projetés et soumis à deux série de vibration afin d'homogénéiser les constituants du mélange. Lorsqu'il s'agit de béton léger, on vibre légèrement le mélange pour éviter le flottement des matériaux légers sur la face supérieur de l'éprouvette.

III.1.2.3 : Type d'éprouvette :

Nous avons utilisé 2 types de moules pour la confection de trois types d'éprouvettes



**Photo III.1: moule pour éprouvette
Cubique (10×10×10)**



**Photo III.2: moule pour éprouvette
prismatique (10×10×40)**

III.1.3 : Programme des essais :**III.1.3.1 : Ouvrabilité :**

L'ouvrabilité a été mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams (Slump-test), conformément à la norme NF P 18-451. Le béton témoin et le béton léger à base de granulats légers a été fabriqué avec le même rapport E/C=0.6.



Photo III.3 : Essai du shamp-test

III.1.3.2 : Mesures de la résistance à la compression:

Cet essai a été effectué sur une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et cela conformément à la norme (NF P 18- 406)

Pour les différents mélanges de béton, trois cubes de $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ par échéance ont été utilisés pour effectuer l'essai, soit après 7 et 28 jours.



**Photo III.4: Machine Essai de
Compression**



**Photo III.5 : Éprouvettes cubiques
(10x10x10) cm³**

III.1.3.3 : Mesures de la résistance à la flexion :

L'essai consiste à placer les éprouvettes prismatiques de dimensions $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$ mûries à l'eau dans la machine de flexion. La résistance à la flexion est calculée à partir de l'effort maximum donnée par l'appareil. L'essai est effectué à 7 jours et 28 jours et on prend la moyenne des résultats sur trois éprouvettes de béton pour chaque formulation.



Photo III.6 : Éprouvettes prismatique (40 x 10 x 10) cm³



Photo III.7: Machine d'essai de flexion.

III.1.3.4 : Mesure de la conductivité thermique :

L'expérience de la conductivité thermique a été réalisée sur des plaques de dimensions (27-13-4). la sonde de mesure est mise entre deux plaques et l'organe de commande est configuré pour mesurer la conductivité thermique. Après 400 secondes, le Ct mètre donne les résultats.

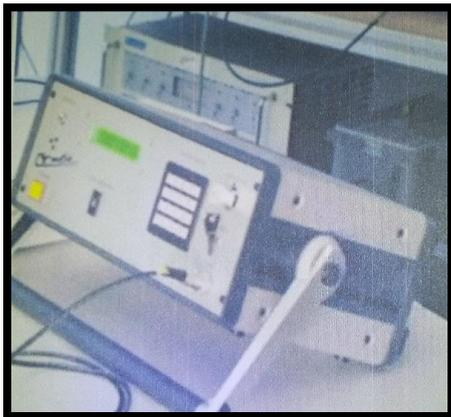


Photo III.8: appareil de CT-Mètre



Photo III.9: Eprouvette (27-13-4)

Conclusion :

La composition des mélanges et les procédures expérimentales vont nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de la différence entre les types de bétons légers.



CHAPITRE IV : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS



Introduction :

Dans le présent chapitre, sont exposés les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les bétons, conformément aux modes opératoires mentionnés au **chapitre III**. Une analyse et une discussion des résultats, suivis d'une comparaison avec ceux reproduits dans la littérature, seront également présentées dans ce chapitre.

IV.1 : Comportement des bétons frais :**IV.1.1 : Affaissement des bétons :**

On a rassemblé tous les résultats d'affaissement pour les matériaux utilisés dans le tableau suivant :

Type de Béton	E/C	Ciment Kg/m³	L'eau Kg/m³	Affaissement Cm
BT	0.6	350	210	6.0
BP	0.6	350	210	4.7
BL	0.6	350	210	5.0
BV01	0.6	350	210	0.5
BV 02	0.6	350	210	0.6
BV 03	0.6	350	210	0.6
BC	0.6	350	210	0.4

Tableau IV.01 : Valeur d'affaissement pour tous les différents mélanges de béton

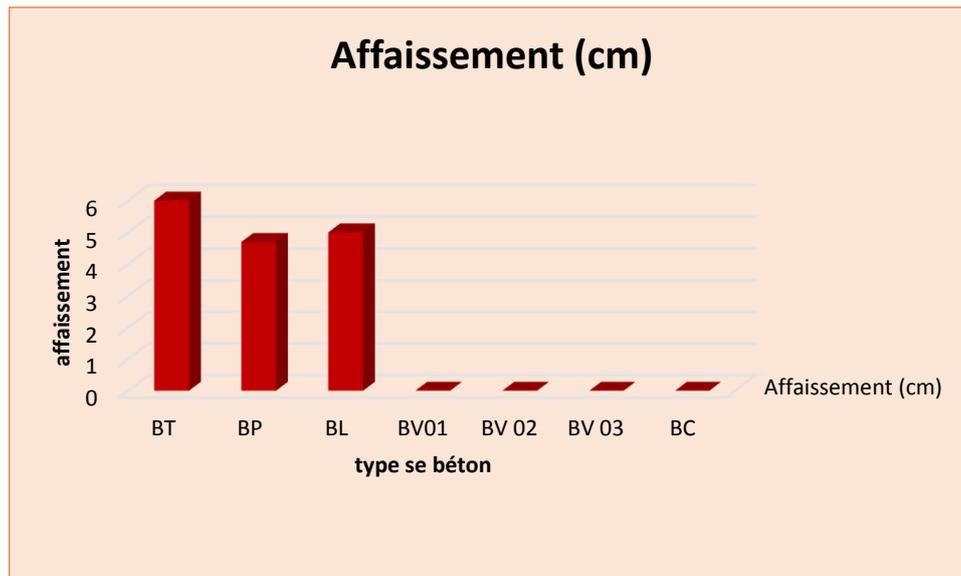


Figure IV.01 : Valeur d'affaissement pour tous les différents mélanges de béton

On remarque que :

L'affaissement du béton témoin est plus élevé que celui du béton léger, cela est dû aux granulats légers qui sont caractérisé par une forte absorption d'eau et une plasticité plus faible et donc un affaissement plus faible.

L'affaissement de bétons caverneux et cellulaire est presque nul, ce qui résulte que ces derniers ce sont des bétons fermes, secs et peu maniable.

IV.2 : Propriétés physique des bétons durcis :

IV.2.1 : Masse volumique :

L'introduction des matériaux légers dans la composition du béton entraîne une diminution de la masse volumique du béton durci qui varie en fonction de la fraction de matériau léger. Le tableau suivant (tableau IV-02) résume les différentes valeurs de la masse volumique des bétons.

Type de Béton	Masse volumique du béton Kg/m ³
BT	2304.2
BP	1660.7
BL	1804.5
BV01	1781.1
BV 02	1750.4
BV 03	1743.3
BC	756.9

Tableau IV.02 : masse volumique des bétons en Kg/m³.

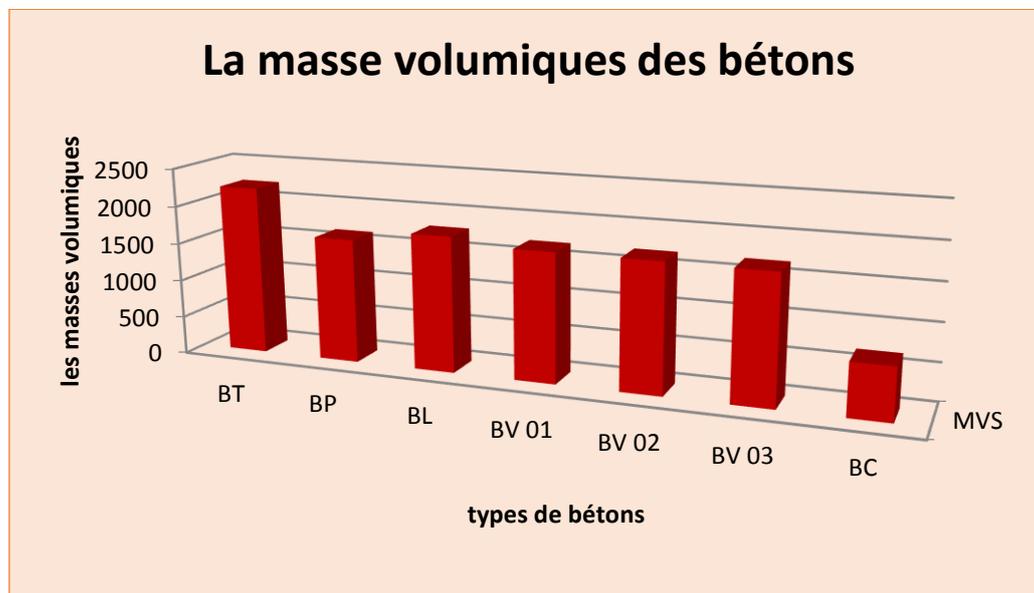


Figure IV.02 : masse volumique des bétons en Kg/m³.

On remarque :

Une diminution de la masse volumique des bétons légers par rapport au béton témoin.

La diminution est entre 27% et 38% pour les bétons de granulats légers, entre 29% et 32% pour le béton caverneux et de plus élevée pour le béton caverneux.

Cette diminution est due à la faible masse volumique des granulats légers incorporés par substitution par rapport à celle du gravier 7/15. (Bétons de granulats légers), la faible quantité des granulats fins dans le béton caverneux et l'absence des granulats dans le béton cellulaire.

IV.2.2 : Absorption d'eau pendant la phase de la cure :

Cet essai permet d'évaluer la quantité d'eau absorbée pendant la phase de la cure humide, ceci consiste à mesurer la masse d'une éprouvette de béton après le démoulage puis en l'immergeant dans l'eau pendant 07 jours et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage. Cet essai n'est pas normalisé, il permet cependant d'avoir une idée sur l'absorption des bétons légers. Le tableau regroupe les valeurs du coefficient d'absorption en fonction du type de béton.

L'absorption d'eau est donnée par la relation suivante :

$$Abs(\%) = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} 100\% \quad (\text{IV.1})$$

M_{sat} : la masse d'éprouvette après 7

jours d'immersion dans l'eau

M_{sec} : la masse d'éprouvette sèche avant l'immersion dans l'eau

Les éprouvettes utilisées sont cubiques de dimensions (10×10×10 cm³) et sont conservées dans l'eau (T = 22°C). Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction du type de béton sont données dans le (tableau V-03)

Tableau IV.03 : l'absorption d'eau par l'éprouvette

Type de bétons	Pourcentage d'absorption %
BT	1.2
BP	5.1
BL	2.6
BV01	6.0
BV 02	6.2
BV 03	6.8
BC	3.1

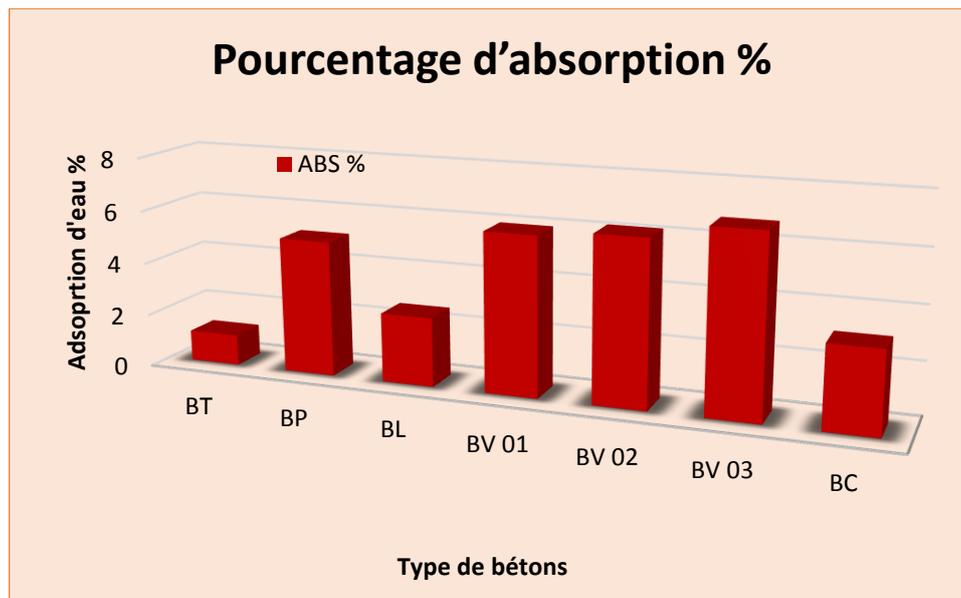


Figure IV.03 : L'absorption d'eau du type de béton

On remarque :

Une augmentation de l'absorption des bétons légers par rapport au béton témoin.

L'augmentation est entre 2% et 6% pour les bétons de granulats légers, entre 5% et 7% pour le béton caverneux et de plus de 3% pour le béton caverneux.

Cette augmentation est due à l'augmentation de la porosité des deux bétons et qui due à la porosité importante des granulats légers incorporés par substitution par rapport à celle du gravier 7/15 (Bétons de granulats légers), la forte porosité qui caractérise le béton caverneux et la structure cellulaire de béton et donc automatiquement le taux d'absorption d'eau augmente en fonction du taux de granulats légers.

IV.3 : Propriétés mécanique des bétons durcis :

IV.3.1 : Résistance à la compression :

^ La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté, elle est estimée soit à court terme ou à long terme.

Le (tableau regroupe les résultats de la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les différents mélanges.

Type de béton	E/C	Résistance à la compression MPa	
		7j	28j
BT	0.6	24.2	35.4
BP	0.6	2.9	4.4
BL	0.6	6.1	10.5
BV01	0.6	4.5	8.9
BV 02	0.6	5.2	9.3
BV 03	0.6	6.5	10.7
BC	0.6	4.8	5.9

Tableau IV.04 : Résistance à la compression des bétons

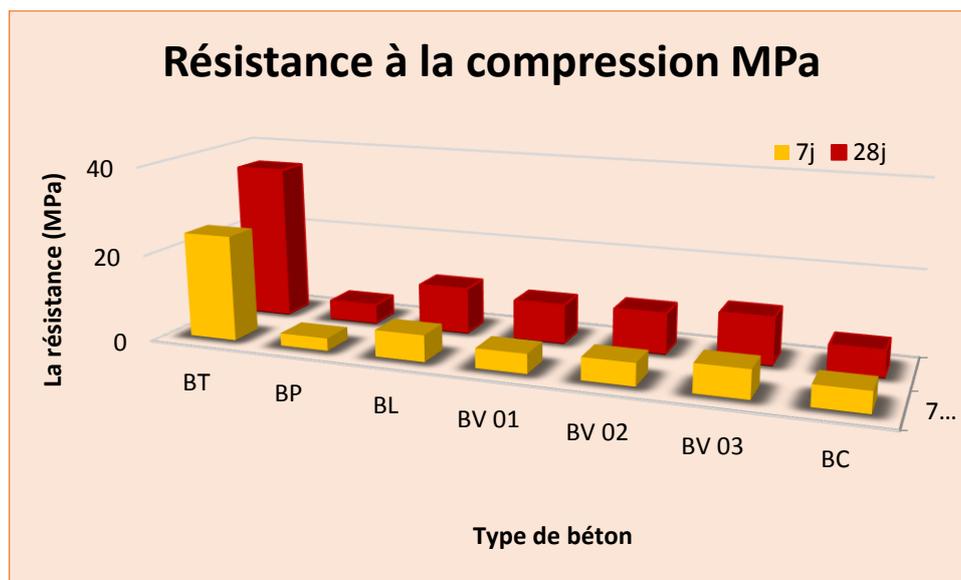


Figure IV.04: Résistances à la compression des bétons.

On remarque :

La résistance à la compression du béton témoin est la plus grande par rapport aux bétons légers, ceci est vrai aussi bien à 7 jours que 28 jours.

La résistance à la compression du béton de granulats légers (liège) est élevée par rapport aux autres types de bétons légers, ceci est vrai aussi bien à 7 jours que 28 jours.

La diminution de la quantité de sable peut augmenter la résistance mécanique du béton caverneux.

La résistance de béton cellulaire est la plus faible à cause de l'absence de granulats.

IV.3.2 : Résistance à la flexion :

Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus lorsque on a appliqué l'essai de la flexion sur l'éprouvette (10x10x40) cm

Type de béton	E/C	Résistance à la flexion MPa	
		7j	28j
BT	0.6	10.7	12.2
BP	0.6	1.8	3
BL	0.6	3.8	5.4
BV01	0.6	1.4	2.7
BV 02	0.6	1.5	2.7
BV 03	0.6	1.9	3.2
BC	0.6	0.9	1.2

Tableau IV.05 : Résistance à la flexion des bétons

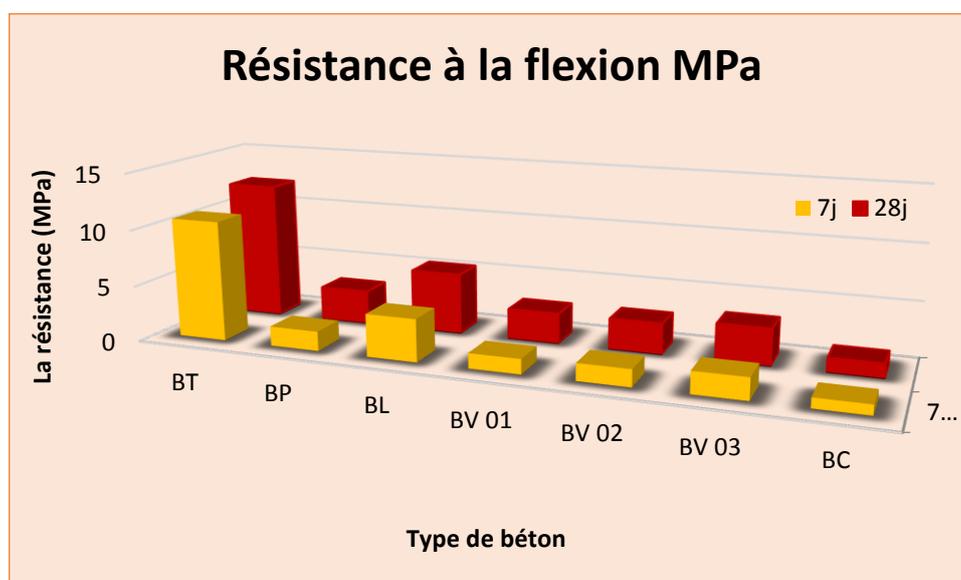


Figure IV.05 : Résistances à la flexion des bétons

On remarque :

La résistance à la flexion est généralement tributaire de la résistance à la compression.

La résistance à la flexion du béton témoin est la plus grande par rapport aux bétons légers, ceci est vrai aussi bien à 7 jours que 28 jours.

La résistance à la flexion des bétons légers est la dixième du béton témoin.

La résistance à la flexion du béton de liège est plus grande que de polystyrène pour les bétons de granulats légers.

Le béton de liège est le plus béton légers qui résiste à la flexion par rapport aux autres bétons légers.

IV.4 : La conductivité thermique :

On a comparé entre les résultats des années précédentes :

	BT	BP	BL	BV	BC
Conductivité λ (W/mK).	1.414	1.058	1.224	0.700	1.585

Tableau IV.04 : La conductivité thermique [33]

Conductivité thermique du béton caverneux [34]

Conductivité thermique du béton cellulaire [35]

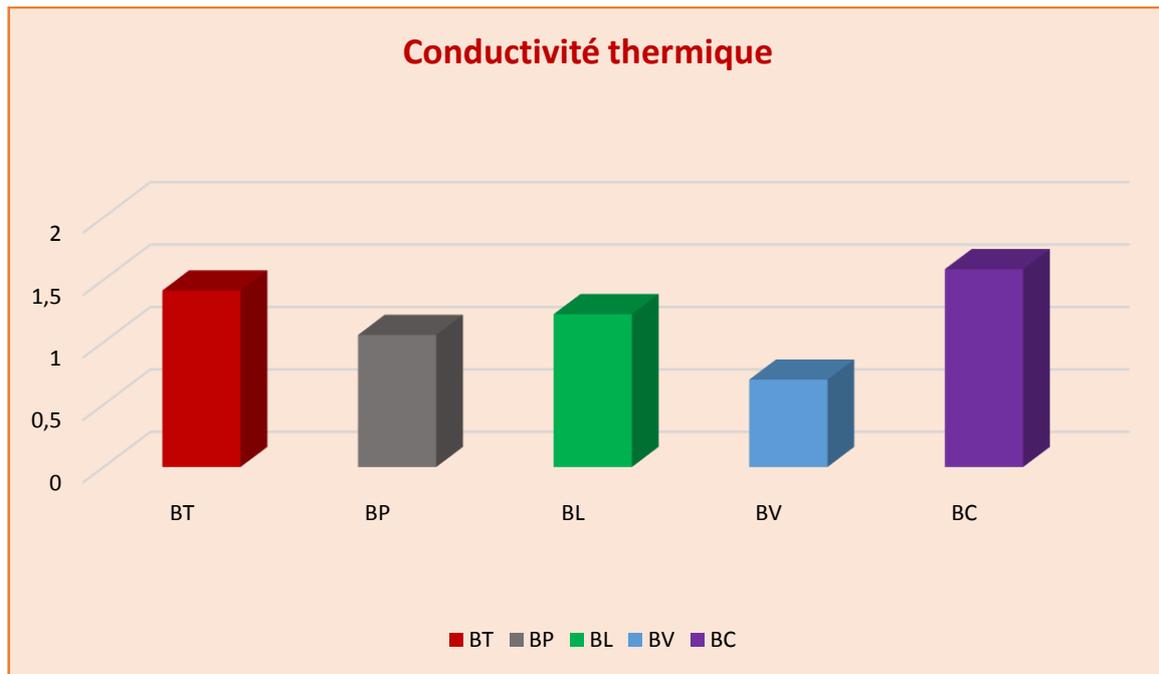


Figure IV.06 ; La conductivité thermique

On remarque :

La conductivité thermique des bétons des granulats légers est diminuée de 33% pour le polystyrène de 15% pour le liège par rapport au béton témoin, la masse volumique importante de graviers par rapport aux granulats légers influence la conductivité thermique dans le béton.

La conductivité thermique est augmentée du béton cellulaire 12% par rapport au béton témoin.

Le béton caverneux a une faible conductivité thermique.

On peut dire que la présence de granulats diminue la conductivité thermique des bétons légers (**relation inverse**), la quantité des granulats est importante la conductivité thermique est faible.



Conclusion générale



Conclusion générale

L'objectif de notre étude de comparer entre les différentes types de béton légers et analyser le comportement mécaniques et physiques des bétons légers

Pour atteindre cet objectif, l'étude est organisée en quatre chapitres :

***Chapitre I** est consacrée à une synthèse bibliographique.

* **Chapitre II** représente les matériaux utilisés durant notre étude

* **Chapitre III** représente les procédures de confection des mélanges, ainsi que les différents essais effectués.

* **Chapitre IV** contient les résultats de l'étude expérimentale : caractérisation physique et mécanique et des différents bétons, ainsi que l'analyse et la discussion de ces résultats.

On utilise la méthode de SCRAMTAIEV pour les différents mélanges un seul dosage du ciment avec un rapport E/C=0.6, sable de 0/5 et des granulats naturels 7/15.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ L'affaissement du béton témoin est plus élevé que celui du béton léger.
- ✓ Les bétons légers sont fermes, secs et peu maniable.
- ✓ La faible masse volumique des graviers légers incorporés par substitution par rapport à celle du gravier 7/15. (Bétons de granulats légers), la faible quantité des granulats fins dans le béton caverneux et l'absence des granulats naturels dans le béton cellulaire sont diminuées la masse volumique des bétons léger par rapport le béton ordinaire.
- ✓ La porosité importante des bétons légers est augmentée leur absorption d'eau.
- ✓ L'utilisation de liège augmente la résistance mécanique des bétons des granulats légers plus que de polystyrène.
- ✓ La diminution de la quantité de sable peut augmenter la résistance mécanique du béton caverneux.
- ✓ La résistance mécanique de béton cellulaire est la plus faible à cause de l'absence de granulats.
- ✓ Cette diminution de résistance mécanique due probablement au plus de porosité représentée cette composition par rapport au béton témoin et bétons légers.
- ✓ La conductivité thermique varie en fonction de la quantité utilisée dans le béton.

Conclusion générale



Bibliographique



Références Bibliographiques

[1] Madani BEDERINA, " Caractérisation Mécanique Et Physique Des Bétons De Sables A Base De Déchets De Bois", Thèse De Doctorat En Génie Civil, De L'université De Laghouat, 25 Avril 2007

[2] matériaux de construction d'après-guerre dans l'habitation à bruxelles 1945-1975

[3] NEVILLE : «*Propriétés des bétons*». Eyrolles. Paris, 2000

[4] M.CONTANT : «*Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux*». Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Édition. Montréal 14 Avril 2000

[5] G. DREUX & J. FESTA : «*Nouveau guide du béton et de ses constituants*». 8ème Édition. Eyrolles. Mai 1998

[6] www.infociments.fr/béton/types/autres-bétons/béton-leger.

[7] M.SHINK «*Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers*». Université Laval Québec Avril 2003

[8] Livre de : Construire des matériaux : www.GCAlgerie.com

[9] Daniel Montharry (Auteur), Michel Platzer, La technique du bâtiment tous corps d'état Relié, Éditions du Moniteur, 2014

[10] Jean-Michel Torrenti , Laetitia D'Aloia-Schwartzentruber, Le grand livre des bétons, Connaissances et pratiques - Avancées environnementales - Réglementation et cadre normatif, Éditions du Moniteur, 2014

[11] Chapes et bétons non structurels allégés « Later mix cem classic ».

[12] « Report on Pervious Concrete » [archive], American Concrete Institute, 2010 (ISBN 9780870313646) Report No. 522R-10.

[13] <https://blog.teralta-crh.com/beton-drainant-reunion>

[14] [Pervious Concrete Pavement An Overview \[archive\]](#)

[15] SOTEHI. N, Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation, mémoire de thèse, université Constantine, 2010

[16] NF EN ISO 9229 Septembre 2007, Isolation thermique - Vocabulaire

[17] NF EN 206 Novembre 2014, Béton - Spécification, performances, production et conformité

[18] https://fr.wikipedia.org/wiki/Béton_de_granulats_légers

[19] <https://maconnerie.bilp.fr/guide-general/part-1-generalites/materiel-materiaux/beton/granulats-legers>

[20] JOHN L, CLARKE: «Structural lightweight aggregate Concrete »Edited by chief structural

- [21] **CEREZO.V:** «Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales». Thèse de doctorat en Génie civil. Université Lyon. 2005
- [22] **Yang KE:** «Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites». Thèse de doctorat en Génie civil. Université Cergy-Pontoise. 2008
- [23] **BEDERINA M,:** Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons de sable à base de déchets de bois -Thèse de doctorat ENP Alger (2007)
- [24] **NEVILLE.A :** «Propriétés des bétons». Eyrolles. Paris, 2000
- [25] **THOMAS.C:** « propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger»,-Thèse de doctorat UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC 2013
- [26] **Bentchikou, M** Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique: Cas de béton de fibres de papiers recyclés ; thèse de doctorat 2008
- [27] <https://pavex.be/beton-leger/>
- [28] **TECHNI.CH** Un forum d'échanges pour les professionnels de la construction
Un site à l'usage des conducteurs de travaux
Une plateforme d'informations techniques
- [29] <https://www.ideal-decor.fr/beton-leger/>
- [30] **DJAKAM Imane** « élaboration d'un béton léger à partir des matériaux locaux »
université Mohamed Boudiaf –M'sila 2015/2016
- [31] **AGOUMIMELCHA Ahmed ETOUANNOUGHI Billal** « Formulation et caractérisation d'un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage des boues de barrage »
Université de M'hamed Bougara –Boumerdes 2016/2017
- [32] **HERIHIRI OUIDED** « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers. »
université Mohamed Kheider –BISKRA 2010
- [33] **MEGHAZZI HABELLAH AKRAM** « étude des performances mécaniques et thermiques des bétons légers »
Université Mohamed Kheider Biskra 2017
- [34] <https://bilans-thermiques.fr/economies/conductivite-thermique-materiaux>
- [35] **SAITI ISSAM** « étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de ghardaia »
Universite Kasdi Merbah –Ouargla 2014

Références Normatives

NF P 18- 406, la norme a pour objet de définir l'essai de rupture par compression

NF P 18-451, la norme a pour objet de définir un essai des bétons frais dit « essai d'affaissement ».

NF P 18-555, la norme a pour objet de définir les modes opératoires pour mesure le coefficient d'absorption du granulat.

NF P 18-554 et 555, la norme a pour objet de définir les modes opératoires pour mesure la masse volumique du granulat.

NF P 18-573, la norme a pour objet de définir pour la détermination de la résistance la fragmentation d'un granulat grossier : l'essai Los Angeles

NF P18 – 598, la norme a pour objet de définir une caractéristique des sables intitulée «équivalent de sable».

NF EN 1097-2, la norme a pour objet de définir pour la détermination de la résistance la fragmentation d'un granulat grossier : l'essai Los Angeles

EN 12620, la norme a pour objet de définir analyse granulométrique



Annexe



ANNEXES



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
GROUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE
SOCIETE DES CIMENTS DE AÏN TOUTA
 « **S.C.I.M.A.T.** »

S.P.A. au capital social de : 2.250.000.000,00 D.A. : في ذمته رأسمالها الاجتماعي
 N° Identification Fiscale : 09980502221068 - N° Article d'Imposition : 05010212640 - N° Registre de Commerce : 0222106/B/98

FICHE DE QUALITE

Produit
Ciment CPJ- CEM II/A 42.5

Mois
Novembre/ 2014

Conformément à la norme NA442 édition 2000

Caractéristiques Physico - Mécaniques				Composition Chimique		
Designations	Unités	Garanties NA.442	Mesures	Eléments	Garanties NA.442	Teneur %
Poids Spécifique	G/cm ³	-	3.03	SiO ₂	-	25.13
Surface Spécifique Blaine (NA 231)	cm ² /g	-	4215	Al ₂ O ₃	-	4.49
Consistance Normale (NA 229)	%H ₂ O	-	27.86	Fe ₂ O ₃	-	3.49
Temps De Prise (NA 230)	Début	h : min	>1h :00	CaO	-	55.05
	Fin	h : min	-	MgO	-	1.09
Expansion à Chaud (NA 232)	mm	<10	0.97	K ₂ O	-	0.88
Retrait (28 jours) (NA 440)	μm/m	<1000	616	Na ₂ O	-	0.38
Gonflement (28 jours) (NA 440)	μm/m	-	0.00	SO ₃	<3.5	2.54
Refus sur tamis 45 μm	%	-	14.43	Cl	<0.1%	0.021
Résistance à la Flexion (NA 234)	02 jours	MPa	-	P.A.F 1000°C	-	5.68
	07 jours	MPa	-	CaO Libre	-	0.76
	28 jours	MPa	-	Résidus Insolubles	-	8.69
Résistance à la Compression (NA 234)	02 jours	MPa	≥12,5			
	07 jours	MPa				
	28 jours	MPa	≥42.50 < 62.5			

Le Chef Service Contrôle Qualité



SIEGE SOCIAL : 75 RUE DE LA REPUBLIQUE - ALGER - ALGERIE

TEL : 21301140100 - 21301140101 - 21301140102 - 21301140103 - 21301140104

ALGERIE - Aïn Touda - Algérie - BP 36 Aïn Touda - W. Boudia - Algérie

TEL : 21301140105 - 21301140106 - 21301140107 - 21301140108 - 21301140109 - 21301140110

