REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Elaboration D'un Béton Cellulaire

Présenté par

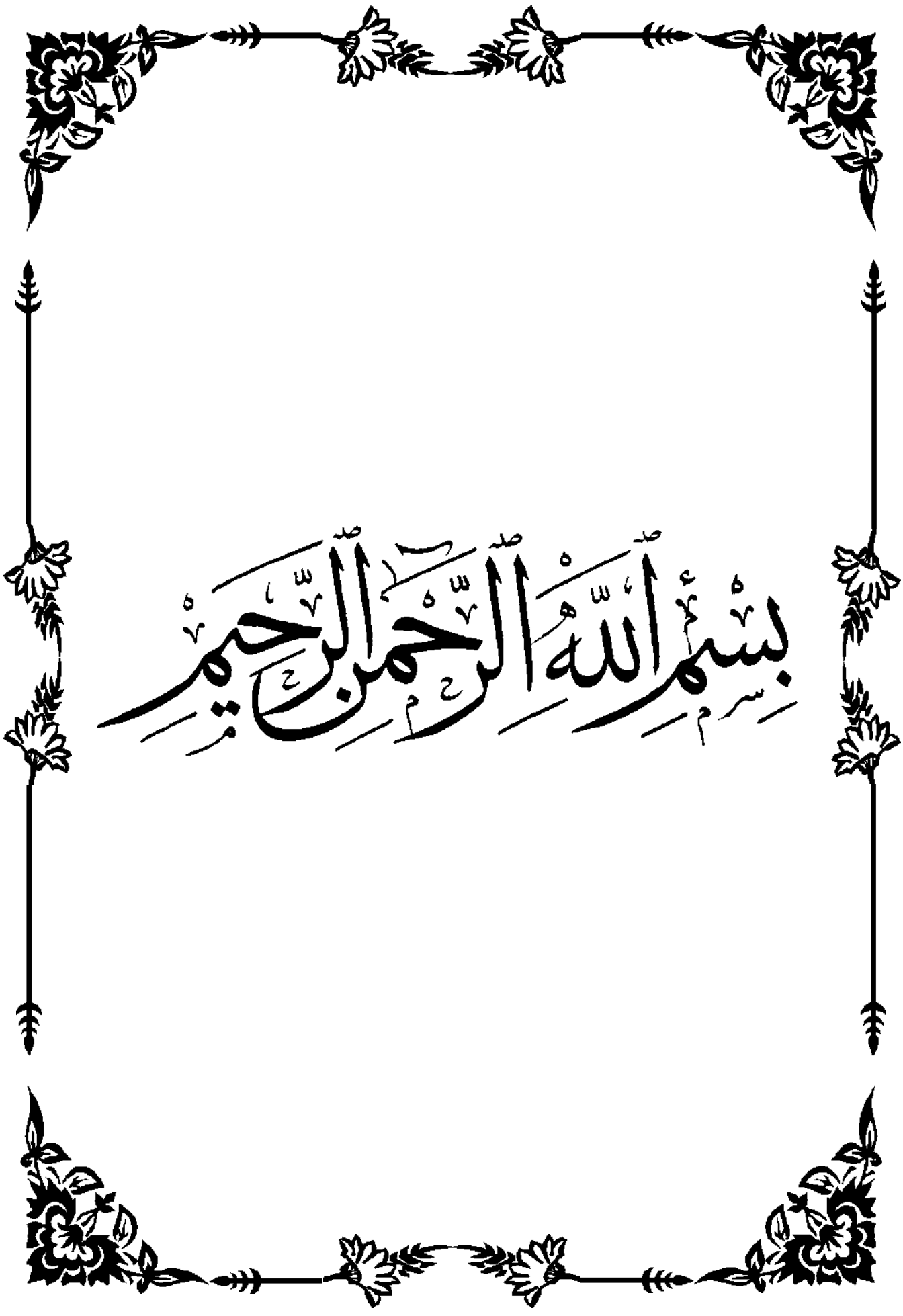
BARKI. Halima

OUARED Nedjoua

Proposé et Dirigé par

M^m^ HERIHIRI.O

Promotion Juin 2020


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

*Nous tenons d'abord à remercier **ALLAH** pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice **HERIHIRI OUIDED** pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'elle nous a accordée*

Nous tenons aussi à remercier cordialement et sincèrement Nos chers parents et nos chères familles

Nous tenons à remercier : le président et les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Remerciement spécial à notre co-promoteur Dr OULD KHAOUA Younes pour leur aide appréciable, leur disponibilité, et leurs conseils.

Nous remercions également les responsables du Laboratoire de génie civil pour leur aide

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que Je dédie ce Travail a ceux qui me témoignent chaque jour que dieu fait un Amour inconditionnel Que Dieu les protège

À qui Je porte fièrement son nom, L'homme idéal dans ma Vie A mon père qui a sacrifie toute sa vie afin de me voir Devenir ce que je suis aujourd'hui

A qui a veillé sur moi jour et nuit depuis mon enfance, à qui Me Donne l'amour la gentillesse le respect qui me donne toujours Courage volonté et force pour réussir c'est la reine de mon Cœur à ma mère

A mes sœurs Et Mes frères qui je l'aime trop A toute ma famille sans exception.

A mon binôme NEDJOUA pour sa participation vive Durant l'élaboration de ce travail et sa famille

A mes très chers amies Imen, Fella, Chaima, Meriem A mon cher ami proche A .R

A tous mes amis d'étude depuis l'école Primaire Jusqu'à l'université.

HALIMA

Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que Je dédie ce Travail a ceux qui me témoignent chaque jour que dieu fait un Amour inconditionnel Que Dieu les protège

À la mémoire de mon très cher père, Que dieu le garde dans son vaste paradis.

À ma mère,

Pour sa tendresse, ses sacrifices et pour ses précieux conseils. Pour son soutien dans les moments difficiles. Sache que tu es extraordinaire et que, grâce à toi, je suis ou j'en suis. Avec ma profonde affection.

A mas sœur Et Mon frère qui je l'aime trop
A toute ma famille sans exception.

Ma binôme « BARKI HALIMA » qui je souhaite tout le bonheur et la belle vie.

Toutes mes amies intimes et Sur tout Kawther ouakrif

A tout ce qui ont m'aidés de loin ou de près pour la réalisation de ce mémoire.

Toute la promotion 2020 *Nedjoua*

ملخــص

حاليا ، يرتبط التطور التكنولوجي في صناعة البناء ، كما هو الحال في أي قطاع آخر ، بثلاثة عوامل أساسية للابتكار: الاقتصاد والراحة والبيئة. بهذا الارتباط مشروعنا البحثي معني ، لأن استخدام الخرسانة الخلوية يرضي العوامل الثلاثة للابتكار .الخرسانة الخلوية هي نوع من الخرسانة الخفيفة الوزن ، وهي تأتي من مزيج من الماء والرمل والأسمنت وعامل النفخ والهواء. وبالتالي ، وفقًا لجرعة مضبوطة ، يشكل هذا الخليط حبيبات دقيقة من الخرسانة مفصولة بجدران رفيعة لتخفيف الخليط.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تطوير مركب خلوي يعتمد على استغلال المواد المحلية. كعامل النفخ استخدمنا مسحوق الألمنيوم الناتج من تقطيع رقائق الألومنيوم. بدأنا بإعداد ملاط التحكم (s / c = 3) المطابق لجرعة صفرية من مسحوق الألمنيوم مع جرعة من الأسمنت 500 كجم / م 3، من أجل الحصول على الخليط مرن، يتم الاحتفاظ بنسبة W / C ثابتة تساوي 0.6. بعد ذلك ، يضاف مسحوق الألمنيوم تدريجيًا إلى محتويات الكتلة التي تتراوح من 0.2 ؛ 0.4 ؛ 0.6 ؛ 0.8 تصل إلى 1٪. يظهر التحليل التجريبي أن إدخال مسحوق الألمنيوم في خليط الأسمنت هو عملية فعالة للتخفيف من وزن مركب الأسمنت. وبالتالي، تظهر نتائج التوصيف الفيزيائي الميكانيكي والحراري للمركبات المنتجة اهتمامًا مفيدًا على وجه الخصوص لتصنيع عناصر العزل والعزل وبذات الوقت حاملة.

الكلمات المفتاحية: خرسانة خلوية ، كتلة حجمية ، مسحوق الامنيوم ، العزل الحراري

Abstract

Currently, technological development in the construction industry, as in any other sector, is linked by three essential factors of innovation: economy, comfort and the environment. In this sense, our research project is involved, because the use of aerated concrete satisfies the three factors of innovation. Aerated concrete is a type of lightweight concrete, it comes from the combination of water, sand, cement, a blowing agent and air. Thus, according to a skilful dosage, this mixture forms closed microcells of concrete separated by thin walls to lighten the combination.

The main objective of this work is the development of a cellular composite based on the exploitation of local materials. As the blowing agent we used aluminum powder from the shredding of aluminum foil. We started with the preparation of the control mortar (s / c = 3) corresponding to a zero dosage of aluminum powder with a dosage of cement 500 kg / m3. Thus, in order to have the handy composites, the W / C ratio is kept constant equal to 0.6. Then, the aluminum powder is gradually added to mass contents ranging from 0.2; 0.4; 0.6; 0.8 up to 1%.

Experimental analysis shows that the introduction of aluminum powder into a cement mixture is a process for lightening a cement composite. Thus, the results of physical-mechanical and thermal characterization of the composites produced show a beneficial interest in particular for the manufacture of insulating and insulating building elements.

Key words: Aerated Concrete, Density, Aluminum Powder, Thermal Insulation.

Résumé

Actuellement, le développement technologique dans le domaine de la construction, comme dans tout autre secteur, est lié par trois facteurs essentiels d'innovation : l'économie, le confort et l'environnement. Dans ce sens, notre projet de recherche est impliqué, car l'utilisation du béton cellulaire satisfaire les trois facteurs de l'innovation. Le béton cellulaire est un type du béton léger, il vient de la combinaison d'eau, de sable, de ciment, un agent d'expansion et d'air. Ainsi, suivant un savant dosage, ce mélange forme des microcellules de béton fermées et séparées par de fines parois pour alléger la combinaison.

L'objectif principal du présent travail est l'élaboration d'un composite cellulaire en basant sur l'exploitation des matériaux locaux. Comme agent d'expansion nous avons utilisé la poudre d'aluminium issue du broyage des papiers d'aluminium. Nous avons commencé par la préparation du mortier témoin (s/c=3) correspondant à un dosage nul en poudre d'aluminium avec un dosage en ciment 500 kg/m^3. Ainsi, afin d'avoir les composites maniables, rapport E/C est maintenu constant égale 0,6. Ensuite, la poudre d'aluminium est ajoutée graduellement à des teneurs massiques allant de 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 jusqu'a 1%.

L'analyse expérimentale montre que l'introduction de la poudre d'aluminium dans un mélange cimentaire, est un procédé d'allégement d'un composite cimentaire. Ainsi, les résultats de caractérisation physico-mécanique et thermique des composites élaborés montrent un intérêt bénéfique notamment pour la fabrication des éléments de construction isolants et isolants porteurs.

Mots clés: béton cellulaire, masse volumique, la poudre d'aluminium, l'isolation thermique.

Sommaire

SOMMAIRE

Dédicaces

Remerciements

الملخص

Abstract

Résumé

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE

PARTIER I : REVUE DE DOCUMENTATION

Chapitre I : Connaissances sur bétons légers

I.1 INTRODUCTION …… 01

I.1.1.Bétons légers…….. 01

I.1.2.Définition …….. 01

I.1.3.Les différents types de béton léger……. 02

I.1.4.CLASSIFICATION DU BETON LEGERS…….. 03

I.1.5 Formulation des bétons légers…… 06

I.1.6 Composition des bétons légers…….. 07

I.1.7 Propriétés principales Béton Léger……. 15

1. Légèreté…… 15

2. Performances mécaniques……. 16

A. Résistance en compression…….. 16

B. Résistance à la traction…….. 21

C. Module élastique…….. 22

D. L'absorption……. 23

E. La porosité……. 25

F. Retrait..... 26

3. propriétés thermiques …….. 27

A. La conductivité thermique…….. 27
B. Chaleur spécifique……. 28
I.1.8 LES AVANTAGES DES BETONS LEGERS…… 29
I.1.9 UTILISATION…….. 31
Conclusion…….. 34

Chapitre II: Les bétons cellulaires

II.1 INTRODUCTION …….. 35
II.2 Historique ……. 35
II.3 Définition…… 36
II.4. La composition…… 37
II.5.Fabrication…… 38
II.6 Classification de béton cellulaire……. 40
II.7 Les propriétés de béton cellulaire…… 41
II.7.1 Les propriétés physiques et mécaniques……... 41
A. La densité……... 41
B. La résistance à la compression du béton…….. 43
C. Module d'élasticité (E)……. 44
D. Porosité……. 45
E. Le retrait…….. 46
F. l'absorptivité…… 47
G .Aspect et structure du béton cellulaire à l'échèle macro et microscopique 49
II.7.2 Les propriétés thermiques …….. 51
II.8. Utilisation du béton cellulaire…… 52
II.9 Les avantages et les inconvénients du béton cellulaire…….. 56
II.9.1 Les avantages ……. 56
II.9.2 les inconvénients …….. 57
I.2.10 Recyclage …… 58
II.11.Qualité de vie …… 58
II.12 Impact environnementale et économique du béton cellulaire …… 58

Conclusion……. 61

Orientation de l'étude…… 61

PARTIER II: ETUDE EXPERIMENTAL

Chapitre III: Matériaux, Mélanges Et Procédure

III.1. Introduction……... 61

III.2.. Matériaux utilisées…….. 61

III.2.1.. Le ciment……... 61

III.2.2. Le sable…….. 62

III.2.3. Agent d'expansion ……. 64

III.2.4. L'eau de Gâchage…… 64

III.3. MELANGES …….. 64

III.3.1. Codification des mélanges……... 64

III.3.2. composition des mélanges…… 65

III.3.3. Procédure de malaxage…… 66

III.3.4. Préparation et conservation des éprouvettes…… 66

III.4. PROTOCOLE EXPERIMENTAL……. 66

III.4.1. ESSAIS EFFECTUES SUR LES MORTIER CELLULAIRES A L'ETAT FRA 67

III.4.1.1. Maniabilimètre (LCPC) …… 67

III.4.1.2. La masse volumique …… 69

III.4.2. Essais effectués sur les mélanges à l'état durci …….. 69

III.4.2.1 Essai de traction par flexion …….. 70

III.4.2.2. Résistance à la compression ……. 70

III.4.2.3. Vitesse ultrasonique ……. 71

III.4.2.4. L'essai de la conductivité thermique…….. 71

III.4.2.5. La porosité totale……. 72

III.4.2.6. Essai d'absorption d'eau par capillarité …….. 72

III.3.conclusion…… 72

Chapitre IV: Présentation & discussion des résultats

IV.1Introduction…… 74

IV.1-La maniabilité……. 74

IV.2-la Densité apparent…….. 75

IV.3- la résistance à la compression……. 76

IV.4-la résistance à la traction…… 77

IV.5- de la porosité …… 78

IV. 6- la conductivité thermique ……. 80

IV. 7-.l'absorption capillaire ……... 80

IV - 8- l'absorption par immersion totale ……..……... 80

IV- 9 : Étude comparative des résultats……. 81

Conclusion …… 84

CONCLUSION GENERALE…… 85

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Connaissances sur bétons légers

Tableau I.1 Classification des bétons légers selon la masse volumique…….. 4

Tableau I.2 Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité…… 4

Tableau I.3 Classification Des Bétons Légers En Fonction De La de masse volumiques 5

Tableau I.4 Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction…… 6

Tableau I.5. Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre >2 μm 24

Chapitre II: Les bétons cellulaires

Tableau II.1. Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression…….. 41

Tableau II. 2 Quelques exemples d'habitations construites en béton cellulaire…… 56

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Connaissances sur bétons léger

Figure I.1 Représentation schématique des différents types de béton léger, d'après short et kinniburgh……. 3

Figure I.2 Structure des bétons légers……... 3

Figure I.3 Différents granulats légers naturels……. 3

Figure I.4 Différents granulats légers artificiel…… 11

Figure I.5 Four âtres haute température à 1250°C, GEM, France…… 12

Figure I.6. Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves …… 13

Figure I.7 Schéma de principe de la zone d'adsorption empêchée…….. 14

Figure I.8 Masses Volumiques des Bétons Durcis en (kg/m3)…… 15

Figure I.9 Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège……. 16

Figure I.10 Evolution de la résistance à la compression à 28j en fonction de la teneur en polystyrène pour E/C= 0.45&0.5…….. 17

Figure I.11 Résultats des efforts maximaux de compression uniaxiale pour Éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées…….. 18

Figure I.12 Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment…… 18

Figure I.13 Résistance à la compression (Mpa) en fanction des jours avec le dosage du ciment C= 500 kg et 1% plastifian)…… 19

Figure I.14 Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers……. 20

Figure I.15 Évolution de la résistance à la compression de chaque type de béton étudiée en fonction de température…… 21

Figure I.16 Evolution de la résistance à la traction à 28 jours en fonction de rapport VL/VS…… 21

Figure I.17 Résistance à la traction (Mpa) en fanction des jours avec le dosage C= 450 kg et 0.5% plastifiant…… 22

Figure I.8 Masses Volumiques des Bétons Durcis en (kg/m3)……. 23

Figure I.19 Absorption D'eaux par Capillarité des bétons en grammes……... 24

Figure I.20 Variation de la porosité en fonction de la composition de béton…… 25

Figure I.21 Variation de la porosité en fonction de la composition de béton…….. 2**6**

Figure I.22 Retrait endogène en fonction du temps…….. 27

Figure I.23 Variation de la conductivité thermique en fonction de la composition du béton…….. 28

Figure I.24 la variation de la chaleur spécifique en fonction depourcentage de deux granulats…….. 29

Figure I.25 Les travaux de construction de la fondation flottante…… 32

Figure I.26 Pont ferry des perroquets…… 33

Figure I.27 Le Berkeley Bike Bridge…… 33

Chapitre II : Les bétons cellulaires

Figure II.1 Le béton cellulaire…….. 37

Figure II.2 composition de béton cellulaire…….. 39

Figure II.3 Fabrication de béton cellulaire des éléments en BC…… 41

Figure II.4 Variation de la densité apparente en fonction du dosage d'Aluminium……. 42

Figure II.5 L'évolution de la densité apparente en fonction du dosage en poudre d'aluminium…… 42

Figure II.6 L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en poudre d'aluminium……. 44

Figure II.7 Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage d'Aluminium …… 45

Figure II.8 Module d'élasticité en fonction du taux d'humidité dans Le matériau…….. 46

Figure II.9 L'évolution de la porosité introduite en fonction du dosage en poudre d'Aluminium…….. 46

Figure II.10 Variation de la porosité en fonction du dosage d'Aluminium…….. 47

Figure II.11 Evolution du retrait en fonction du béton (BC10)……. 48

Figure II.12volution du r l'âge du béton (BC10)…….. 48

Figure II.13 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC15)…….. 48

Figure II.4 Variation de la densité apparente en fonction du dosage d'Aluminium……. 48

Figure II.15 Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BCr)……. 49

Figure II.16 Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire ……. 50

Figure II.17 Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire …… 51

Figure II.18 Répartition des cellules en fonction de leur .diamètre……..... 51

FigureII.19 a) Microcellule b) Microcellules……. 52

Figure II.20 Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage d'Aluminium…… 53

Figure II.21 Evolution de la conductivité thermique en fonction du dosage en agent 54

expansif……

Figure II.22 Dalles de bardage ……... 54

Figure II.23 Panneaux de façade……. 55

Figure II.24 Dalles de plancher …….. 55

Figure II.25 Recyclage du béton cellulaire…… 59

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

RC	Résistance en compression
RT	Résistance on traction
C/S	Ciment/Sable
S	Sable
CEM I	Ciment Portland
CEM II/B	Ciment Portland Composé
H2O	Eau
OH	Hydroxyde
Ca	Calcium
AL	Aluminiums
H2	Hydrogène
ε(%)	Porosité
Sw	Sorptivité
T	temps de mesure
Λ	Conductivité thermique
Papp	masse volumique apparente
Pabs	masse volumique absolue
M	Masse du matériau.
P	Porosité
Esp	équivalent de sable au piston
ESv	équivalent de sable visuel
Mf	module de finesse
BCR	Béton cellulaire
BC10	Béton cellulaire contenant 10% de fines d'argile calcinée substituées dans le ciment.
BC15	Béton cellulaire contenant 15% de fines d'argile calcinée substituées dans le ciment
BC15S	Béton cellulaire contenant 15% de fines d'argile calcinée substituées dans le sable de dune

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Il existe en Algérie plusieurs régions géographiques, montre une diversité fascinante. Au nord, des montagnes de l'Atlas et des hauts plateaux entre les deux chaînes de l'Atlas, les zones sahariennes couvrent près de 90 % du territoire dans le sud du pays. Cette diversité connaît d'importantes variations de température du climat extérieur, tant journalières que saisonnières. Devant cette richesse des ressources naturelles et pour un développement durable, nous devons mettre sur pied des stratégies pour que nos citoyens connaissent un niveau de bien-être meilleur.

Le chef de département bâtiment de l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie, a indiqué que le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie en Algérie, il absorbe 41% de la consommation totale d'énergie finale. Dans ce contexte, il n’est pas étonnant que les éco-innovations figurent dans les domaines de construction.

Le présent travail entre dans le concept de l’innovation et le développement de matériaux de construction thermiquement isolants. En effet notre but est articulé sur trois piliers: la protection de l’environnement, la conservation de matériaux de construction et l’économie de l’énergie de chauffage et de refroidissement des locaux construites en béton.

L’objectif de ce travail est d’étudier et mieux comprendre les différentes compositions de béton cellulaire ainsi de présenter les principaux paramètres de formulation, L’étude consiste aussi à l’évaluation expérimentale de l’influence des pourcentages de la poudre d’aluminium sur les caractéristiques physico –mécaniques et thermique du béton cellulaire, afin de répondre à la question est ce que le béton cellulaire répond aux exigences de développement durable?.

Outre l’introduction générale ce mémoire est structuré en quatre chapitres:

Les chapitres 1 et 2 constituent la première partie qui est consacrée à la revue de la documentation. Le chapitre 1 donne un aperçu général sur les bétons légers, ses principaux caractéristiques, ses types et classes. Le chapitre 2 est consacré à l’étude du béton cellulaire, son historique et fabrication, les caractéristiques et les différentes utilisations.

Les chapitres 3 et 4 constituent la deuxième partie qui est consacrée à l’étude expérimentale.

Le chapitre 3 présente les caractéristiques des matériaux utilisés, les mélanges préparés et les procédures à suivre.

Le chapitre 4 présente l'étude expérimentale qui porte sur l'interprétation et l'analyse des résultats obtenus.

Enfin, la conclusion générale propose une synthèse des résultats trouvés.

PARTIER I

REVUE DE DOCUMENTATION

Chapitre 1 : Connaissances sur bétons légers

Chapitre 2 : Les bétons cellulaires

Chapitre 1

Connaissances sur bétons légers

I.1.1 Introduction

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 nouvelle application, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique.

L'objectif de cette partie est de donner une revue bibliographique sur le contexte général du béton léger, ainsi les connaissances nécessaires de ses caractéristiques physico-mécaniques et thermiques à travers diverses recherches.

I.1.1.Bétons légers

Le béton léger offre comme avantages sa faible densité et son pouvoir isolant élevé et comme inconvénients sa plus faible résistance et son coût plus élevé. Grâce au développement de la production industrielle des granulats légers, on a pu améliorer ces propriétés fondamentales, notamment l'important rapport résistance/densité. Aujourd'hui, les bétons légers conservent un très bon pouvoir isolant en ayant malgré cela des résistances appréciables.

Si pour des objets déterminés, on examine les quatre propriétés déjà mentionnées, à savoir : résistance, densité, pouvoir isolant et coût, on constate bien souvent qu'il y a avantage

à utiliser le béton léger comme béton de construction. Ce qui est déterminant dans cette étude, c'est surtout la diminution du poids propre des éléments de construction, ainsi que les simplifications qui résultent du fait que la construction comporte en elle-même une excellente isolation. Les granulats légers artificiels modernes sont fabriqués à partir de grains de schiste ou d'argile plastique. Soumis à la chaleur, ces matériaux gonflent, ce qui leur confère une structure fortement poreuse. Dans cet état, ils sont soumis à une cuisson qui les solidifie. C'est pourquoi ces matériaux légers sont désignés après leur traitement par schistes expansés et argiles expansées.

I.1.2.Définition

CORMON (1973) appelle béton léger un béton dont la masse volumique apparente à 28j inférieure à 1800 Kg/m3 (1973) dans les conditions normales de conservation (température de 20°C et 65% d'humidité relative). 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/m^3. [2]

Cette diminution de masse volumique est due à la création des pores à l'intérieur du béton, suivant le mode de création de la porosité artificielle les bétons légers se subdivisent selon les groupes suivants: bétons légers à agrégats légers et poreux ; bétons à gros pores (sans sable), préparés avec un gros agrégat compact ou poreux d'une seule fraction sans sable ; bétons cellulaire dont la structure est représentée par des cellules crées artificiellement et remplaçant les grains des agrégats.

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.1.3 Les différents types de béton léger

Au total, trois types de béton léger sont disponibles pour les constructions d'ouvrage.

- **Le béton cellulaire :** ce type de béton se distingue en deux sous-types, à savoir le béton gaz et le béton mousse. Généralement, le béton cellulaire désigne un béton léger comportant un grand nombre de petites alvéoles remplies d'air. Dans le cas du béton gaz, les alvéoles sont réalisées grâce à un agent gonflant réactif. Le béton mousse quant à lui est réalisé par l'utilisation de tensioactifs (composé qui modifie la tension superficielle entre deux surfaces) et de malaxage juste. La masse volumique de ces deux bétons varie entre 90 et 550 kg/m3 pour le béton gaz et entre 400 et 2000 kg/m3 pour le béton mousse.
- **Le béton caverneux :** ce type de béton allégé dispose d'une structure poreuse formée par les vides qu'il contient. Il est composé de ciment, de granulats grossiers et d'eau. La résistance de ce mélange est renforcée par l'ajout d'une petite quantité de sable. Après adhésion de l'ensemble, les vides créés par les granulats grossiers ont une ouverture pouvant atteindre 30 mm. Cette caractéristique lui donne ainsi une forte perméabilité à l'eau. Sa masse volumique varie entre 800 et 1000 kg/m3.

- **Le béton de granulats légers :** ce type de béton allégé contient une grande proportion de granulats légers. Les granulats qui interviennent dans la fabrication de ce type de béton sont les granulats à faible masse volumique. Il s'agit

essentiellement de l'argile expansée, du schiste expansé, de la pierre ponce, du polystyrène expansé, de la vermiculite ou du liège. Comme tout béton allégé, ce béton a une conductivité thermique faible. Sa masse volumique est comprise entre 800 et 2100 kg/m3. [3]

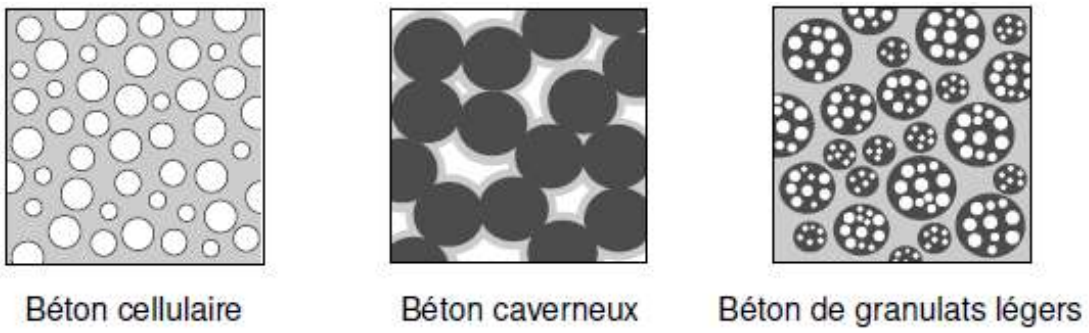


Figure I.1: Représentation schématique des différents types de béton léger, d'après short et kinniburgh [4]

La figure I.2, illustre quelques exemples de structures de bétons légers appartenant aux différentes catégories des bétons légers **[5]**

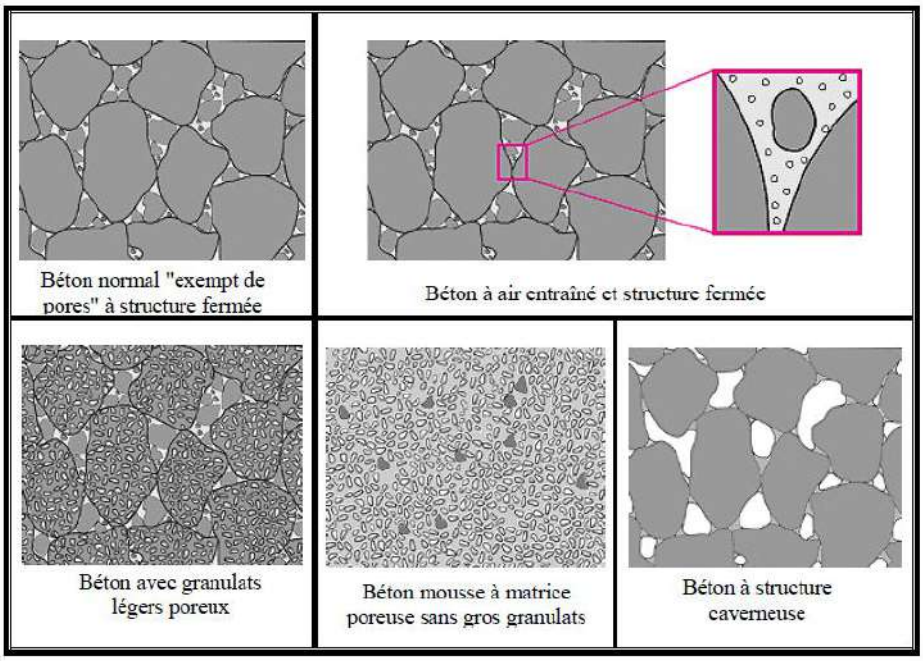


Figure I.2. Structure des bétons légers. **[5]**.

I.1.4.CLASSIFICATION DU BETON LEGERS

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 ;

— de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci, comme l'indique le **tableau I.1**. **[6]**

Tableau I.1. Classification des bétons légers selon la masse volumique **[6]**

Classification	ρ (kg/m³)	Rc (MPa)
Béton de faible résistance	300-800	< 7
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton léger de structure	1350-1900	> 17

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, En fonction de leur masse en Kg/m3

Tableau I.2 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité [7]

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

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

Tableau I.3 : Classification Des Bétons Légers En Fonction De La de masse volumiques [7]

Classes de masses volumique	LC 1.0	LC 1.2	LC 1.4	LC 1.6	LC 1.8	LC 2.0
Kg/m3	>800 et ≤1000	>1000 et ≤1200	>1200 et ≤1400	>1400 et ≤1600	>1600 et ≤1800	>1800 et ≤2100

En Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction Cette classification a été recommandée par la suite par les RILEM **[6]**, selon le **tableau I.4** :

Tableau I.4. Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction **[6]**

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

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

• **Des bétons légers 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.

• **Des bétons légers 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 légers 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.

I.1.5 Formulation des bétons légers

1. Principe de base

Les constituants d'un béton léger sont les mêmes que ceux d'un béton traditionnel à l'exception des granulats légers. Cependant, dans le cas des bétons légers, l'absorption des granulats légers doit faire l'objet d'une attention particulière. À l'étape du malaxage, lorsqu'une certaine quantité d'eau est ajoutée, la quantité disponible pour humidifier le ciment et permettre sa réaction dépend de la quantité d'eau absorbée par les granulats légers. Cette quantité d'eau peut être très importante. Cette particularité confère à chaque béton léger un caractère unique. [8]

Dès lors, il n'existe pas de règle absolue dans la formulation d'un béton léger. Dans certains cas, les granulats légers sont utilisés secs, dans d'autres, complètement saturés, selon les objectifs visés. G. Coquillat a notamment mené des travaux sur l'effet de ce paramètre avec des résultats assez étonnants. Par exemple, l'utilisation de granulats secs améliorait la résistance en compression pour un type de granulats légers. Cependant, la maniabilité diminuait. [8]

En pratique, les auteurs semblent s'accorder sur le point suivant : dans le cas où les granulats légers sont humidifiés avant d'être utilisés pour la fabrication de béton, des distinctions doivent être effectuées dans la description des quantités d'eau en jeu. En effet, deux quantités d'eau sont à prendre en compte : d'une part, l'eau absorbée ou eau interne qui n'est pas considérée dans l'eau de gâchage, d'autre part l'eau adsorbée à la surface des granulats légers ou eau superficielle qui elle fait partie de l'eau de gâchage. [8; 9].

2 Approche de Holm

L'approche proposée par Holm [9] Concrètement, elle vise à estimer la quantité d'eau en provenance de granulats légers humidifiés ou saturés qui va intervenir dans l'eau de gâchage d'un béton léger. L'hypothèse formulée par Holm est la suivante : seule l'eau adsorbée à la surface des granulats légers se retrouve dans l'eau de gâchage et influe sur le rapport E/L1. Dès lors, un protocole a été mis en place pour estimer cette quantité d'eau. Il s'articule autour

de deux mesures de teneur en eau des granulats légers afin d'arriver à l'estimation finale suivante :

$$MAD=MT-MAB$$

Où :

- **MAD** = Eau libre comptée dans le rapport E/L (% masse) ;
- **MT** = Teneur en eau effective des granulats au moment de la fabrication du béton léger (% masse), selon la norme ASTM C566-97 ;
- **MAB** = Teneur en eau des granulats légers selon la norme ASTM C566-97, après que la surface ait été séchée avec une serviette.

Cette hypothèse va être éprouvée dans le cadre du présent projet. L'objectif est, d'une part, de vérifier si elle est pertinente avec différents granulats légers et, d'autre part, d'obtenir un rapport E/L effectif le plus proche possible de celui souhaité. Les notations ci-dessus seront également conservées pour les teneurs en eau et valeurs d'absorption en jeu.

I.1.6 Composition des bétons légers

Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la **composition** (bétons caverneux) ou sur l'emploi de **granulats allégés** (des billes de schiste expansé, d'argile expansée ou de polystyrène, voire des particules de liège ou de bois remplacent les gravillons habituels). **Des adjuvants** comme les entraîneurs d'air peuvent aussi être ajoutés pour un allègement maximum. On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux : c'est le cas du **béton cellulaire.**

D'une façon générale, le principe de la détermination des proportions du mélange pour confectionner des bétons de granulats légers est pratiquement le même que celui concernant les bétons traditionnels ; toutefois un paramètre nouveau, la densité souhaitée, appareil dans l'énoncé du problème et c'est pourquoi nous avants étudié une méthode de composition prenant en compte ce paramètre.

Le calcul des quantités de granulats s'effectue en volume absolu, mais le dosage pondéral nécessite la connaissance de la masse spécifique des granulats prémouillés qui, en général, n'est pas connue avec une très grande précision. Ces granulats présentent presque tous, en

effet, une tendance très marquée à l'absorption d'eau. Par exemple, pour un granulat d'argile expansée 10/20 mm l'absorption en poids est indiquée en valeurs moyennes, Par imbibition sous vide, l'absorption peut dépasser 75% pour les plus gros granulats. Cette tendance est due à la porosité << ouverte des granulats et elle est moins marquée lorsque ceux-ci sont superficiellement comme « vitrifiés ». C'est-à-dire, présentent une surface lisse peu « ouverte ». De plus, selon le degré d'imbibition le foisonnement peut prendre une valeur importante surtout pour les éléments fins comme les sables concassés de granulats légers.

Il en résulte essentiellement deux conséquences :

- Le dosage pondéral des granulats est délicat et peut être source d'erreur selon le degré d'imbibition ; il est préférable, en générale, de prévoir un dosage volumétrique à moins de pouvoir contrôler efficacement le pourcentage d'eau absorbée et d'en tenir compte en majorant d'autant le poids des granulats supposés secs dans la formule de dosage.
- L'absorption importante qui se manifeste dès le début du gâchage diminue progressivement et rapidement le dosage en eau inter granulaire et de ce fait la plasticité du béton. Il est donc conseillé d'humidifier préalablement ces matériaux de façon a ralentir cette absorption d'eau et de stabiliser à peu près la plasticité du matériau au moins pendant sa période d'emploi que l'on s'efforcer de rendre aussi courte que possible : certains professionnels préconisent. Pour l'argile expansée un premouillage entrainant une absorption d'eau de l'ordre de 10 à 15% en poids. D'autres sont partisans d'employer des granulats saturés égouttés. Cependant. Ces matériaux sont trop différents de l'un à l'autre pour qu'une règle commune puisse leur être appliquée et une fois rapidement déterminée u une formule de dosage approximativement valable. L'expérimentation par des essais d'étude prend alors une part encore plus importante et nécessaire que pour les bétons classiques de granulats denses**.** Absorption d'eau en poids par immersion pour un granulat léger (eau totale retenue absorbée et adsorbée). Ces valeurs sont données à titre indicatif car elles varient sensiblement d'un granulat à l'autre et selon que le granulat est plus au moins égoutté.

1. La pâte de ciment

Le béton, sous sa forme générale, est constitué d'une matrice (pâte de ciment) qui relie les granulats entre eux (sable, gravillons et/ou graviers). Cette pâte résulte de l'hydratation du liant utilisé, le ciment Portland anhydre étant le plus utilisé. Ce dernier est composé de clinker, de gypse et d'ajouts éventuels (laitiers, cendres volantes, fillers…).

Les constituants principaux du clinker, qui représente à lui seul plus de 90 % du ciment

Portland, sont les suivants :

60 à 65% - **C3S** = Ca.SiO3 - silicate tricalcique

20 à 25% - **C2S** = 2CaO.SiO2 - silicate bicalcique

8 à 12% - **C3A**= 3CaO.Al2O3 - aluminate tricalcique

8 à 10% - **C4AF**=4CaO.Al2O3.Fe2O3 - alumino-ferrite tétracalcique

Ces constituants du ciment présentent des réactions hydrauliques, c'est–à-dire qu'ils se transforment en présence d'eau en hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. On appelle hydratation l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre l'eau et ciment. La prise est un passage entre l'état de suspension à celui du solide. [10]

Les principaux hydrates simples formés sont les suivants : silicate de calcium hydraté CSH, portlandite Ca(OH)2 (ou hydroxyde de calcium), aluminates de calcium hydraté, ettringite, etc. La réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée :

C3S (silicate tricalcique) + H2O → CSH (silicate de calcium hydraté) + Ca(OH)2 (portlandite)

C2S (silicate bicalcique)

Pour un ciment donné, les quantités de CSH et de Ca(OH)2 formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte de ciment durcie ordinaire contient 50-70 % de CSH et 25-27 % de Ca(OH)2. Dans le cas des pâtes de ciment à haute performance, la quantité de phase CSH est encore plus importante. Ceci est favorable à l'augmentation de la résistance. [10]

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 intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant ε1. La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de Ca(OH)2 ou de C-S-H, varie entre 0,01 µm et 5 µm et la taille des pores générés par un entraineur d'air varie entre 5 µm et 1000 µm **[11]**.

2. Les granulats légers

Un granulat léger peut être naturel, artificiel ou recyclé

A. Les granulats légers naturels

Le granulat léger est le composant nécessaire qui constitue le béton, il occupe 60% à 80% du volume total. Il existe trois matériaux primordiaux qui sont l'argile, l'ardoise et le schiste expansé dans la fabrication des granulats légers et qui sont l'origine de l'expansion imposée à la matière première, on peut obtenir cette expansion dans une température élevée (100°c à 1400°c). L'argile et le schiste expansés ont trois composés majoritaires : la silice **(si o_2)**, l'alumine **(Al_2O_3)** et l'hématite **(Fe_2O_3)**. Les granulats doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Ils sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent. Leur utilisation dans le béton est motivée par le faible coût volumique. Les granulats légers peuvent être utilisés comme granulats fins pour la mise en œuvre de la cure interne, alors que les gros granulats sont employés pour des bétons légers de structure.



Pierre ponce OPS Diatomite Laitier volcanique

Figure I.3 : Différents granulats légers naturels

B. Granulats légers artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales

dans certains régions, comme la vase à Taiwan **[WAN06]** et NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en Italie **[GEN05]** ; soit à partir de sous -produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (Polystyrène Expansé) **[LAU05], [SAR05], [MIL04],**

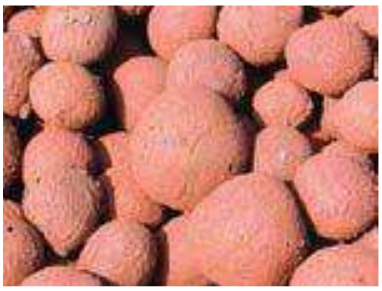
(**Figure I-4**).



Laitier refroidi à l'air



Laitier expansé



Argile expansée



Schiste expansé



Cendre volante



Polystyrène expansé

Figure I.4. Différents granulats légers artificiels

Les granulats légers artificiels fabriqués à partir de matières premières naturelles sont produits en formant tout d'abord une pâte dense par mélange d'une poudre avec de l'eau.

Cette pâte est ensuite fractionnée en petits agrégats de quelques millimètres de taille, puis passée dans un four à très haute température (1000°C à 1250°C environ), (Figure I-5).

L'expansion de l'eau et la vitrification du minéral aboutissent à la formation de granulats plus ou moins sphériques, constitués d'une coque renfermant des bulles gazeuses dispersées dans une matrice. En jouant sur la marche des fours, on favorise plus ou moins l'expansion. Il apparaît alors une corrélation entre la taille moyenne des grains et leur densité absolue, les plus gros étant les moins denses. Les granulats artificiels sont généralement assez ronds ; les argiles expansées sont lisses et les schistes sont parfois plus rugueux. Leur masse volumique en vrac varie entre 300 et 800 kg/m3. [12]



Figure I.5. Four âtres haute température à 1250°C, GEM, France

Les laitiers qui constituent la base d'une autre catégorie de granulats artificiels comprennent les laitiers de haut fourneau, les laitiers d'aciérie et autres laitiers métallurgiques. Les laitiers métallurgiques sont uniquement utilisés comme matériau de remblai pour les routes et comme granulats pour le béton bitumineux. Seuls les laitiers de haut fourneau sont utilisés pour des bétons de structure. Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Il est refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact, connu sous le nom de « laitier refroidi à l'air ». Il peut également être refroidi rapidement et traité au moyen de jet d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de « laitier expansé ». Le laitier expansé doit alors être concassé pour former des granulats. Un autre procédé permet de fabriquer du « laitier expansé bouleté ». Le laitier fondu contenant des bulles de gaz est projeté à travers un jet d'eau pour former des boulettes. Celles-ci sont de forme arrondie et ont un revêtement lisse en surface. Leur masse volumique en vrac est de l'ordre de 850 kg/m 3.

Les cendres volantes qui peuvent également être à la base de granulats légers sont mélangées avec de l'eau et transformées en boulette soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion**.** On a découvert que l'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Par la suite, les boulettes sont frittées dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150°C à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes fusionnent et forment un aggloméré. Ces nodules frittés de forme arrondie, de bonne

résistance et possédant une absorption d'eau modérée constituent de bons granulats. Leur masse volumique en vrac est comprise entre 1000 et 1200 kg/m3. [12]

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée εg, 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. [11]

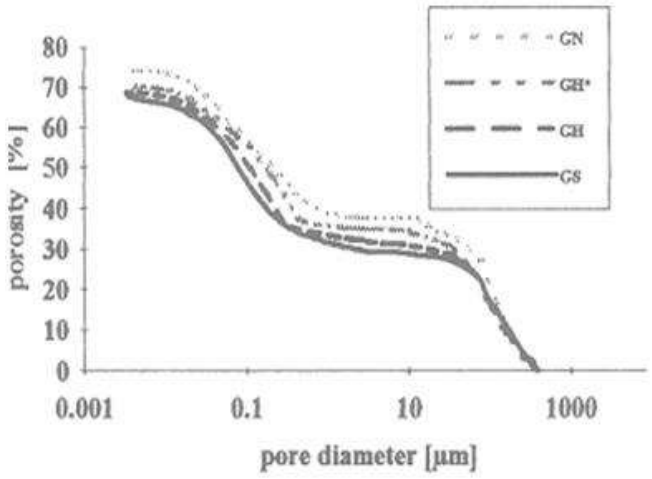


Figure I.6. Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores **[11]**

3. L'eau dans le béton léger

L'eau est une composante essentielle pour la formation de chaque matériau cimentaire. Elle a essentiellement deux fonctions, une fonction chimique en tant que liant de la poudre de ciment, et une fonction physique qui permet, lors du gâchage, d'accroitre la fluidité et la maniabilité facilitant une mise en place plus aisée du matériau. L'eau, présente dans la pâte de ciment, se trouve sous plusieurs formes. [13]

- **L'Eau libre et capillaire**

Elle est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux dans les zones qui ne sont pas sous l'influence des forces superficielles. Cette forme d'eau est séparée de la phase gazeuse par des ménisques, elle est la première à s'évacuer ou à s'évaporer lors d'un séchage. [13]

- **L'Eau adsorbée**

Cette forme d'eau est liée à la surface des pores solides sous l'action des formes d'attraction de type Van Der Waals suite à la condensation de la vapeur d'eau présente dans le matériau. Les forces d'adsorption décroissent à mesure que l'on s'éloigne de la surface des éléments solides. Sur la face externe des lamelles de CSH, l'eau est librement adsorbée jusqu'à une épaisseur de 5 molécules. La molécule d'eau a un diamètre d'environ 2.6 Å, ce qui donne une épaisseur de la couche d'adsorption de 13 Å, donc il faudrait que l'espace inter-lamellaire soit de 26 Å pour que l'adsorption physique se déroule de manière libre. Cette espace est en moyenne de 17 Å, l'eau ne peut être adsorbée librement. Cette région est appelée zone d'adsorption empêchée. Dans ces zones, l'eau fortement adsorbée est sous une forte pression de l'ordre de 130 Mpa, dite pression de disjonction. Cette eau est ainsi un élément structurel à part entière du matériau et elle est capable de transmettre localement les contraintes [13]

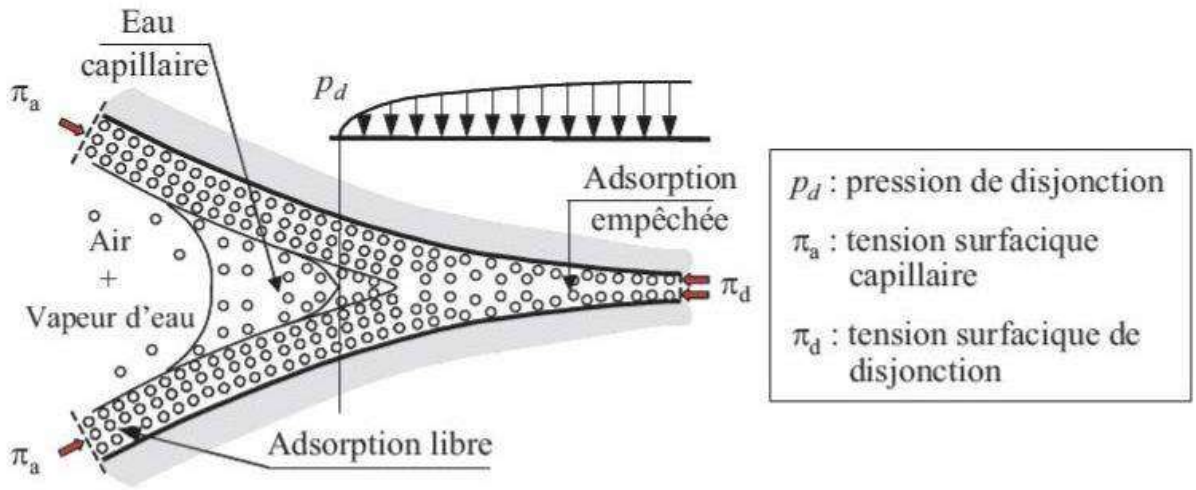


Figure I.7. Schéma de principe de la zone d'adsorption empêchée [13]

- **L'Eau chimiquement liée**

Cette eau s'est combinée avec d'autres espèces durant l'hydratation des grains de ciment pour former les nouveaux éléments tels que le silicate de calcium hydraté et la portlandite. C'est une eau entièrement intégrée à la structure solide des hydrates. [13]

1.1.7 Propriétés principales Béton Léger

Nous nous intéressons maintenant aux propriétés des bétons légers et plus spécifiquement aux propriétés de légèreté, de l'isolation, le taux de porosité et à la résistance mécanique.

1. Légèreté

L'emploi des bétons Légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/ m3 alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/ m3 pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/ m3pour 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.

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans le cadre de la présente recherche. La réduction de la masse volumique est rendue possible en changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants.

Comme nous pouvons voir sur **la figure I.8** l'effet de remplacement des granulats naturels par les granulats légers sur la masse volumique du béton est plus important lorsqu'on y incorpore ces granulats de brique concassée [DJAKAM. I] [14]

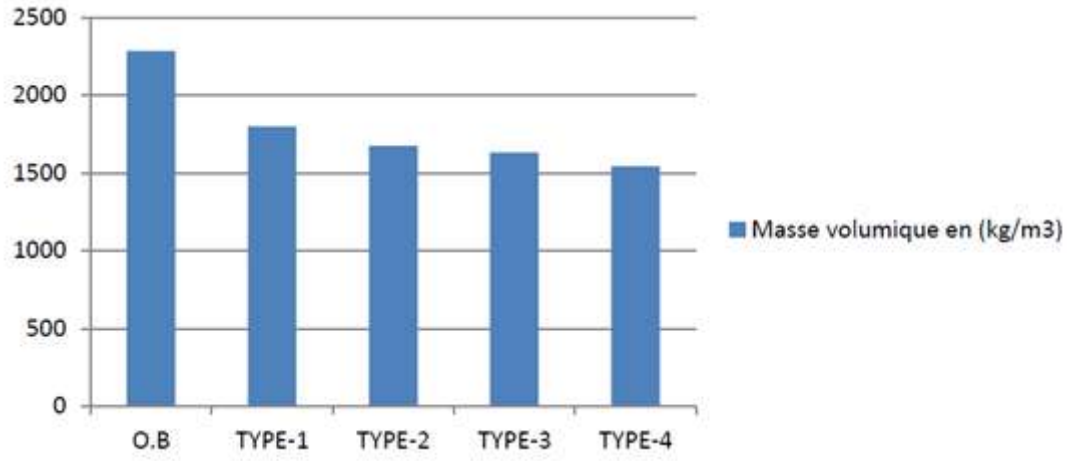


Figure I.8 : Masses Volumiques des Bétons Durcis en (kg/m3**)** [14]

De façon général, l'emploi des bétons légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/ m3 alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/ m3 pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/ m3pour 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. **[11]**

B. LAOUD (2013) a rapporté que l'influence de l'incorporation des granulats de liège présente une diminution de la masse volumique de 50% selon de la substitution (Figure I.9).

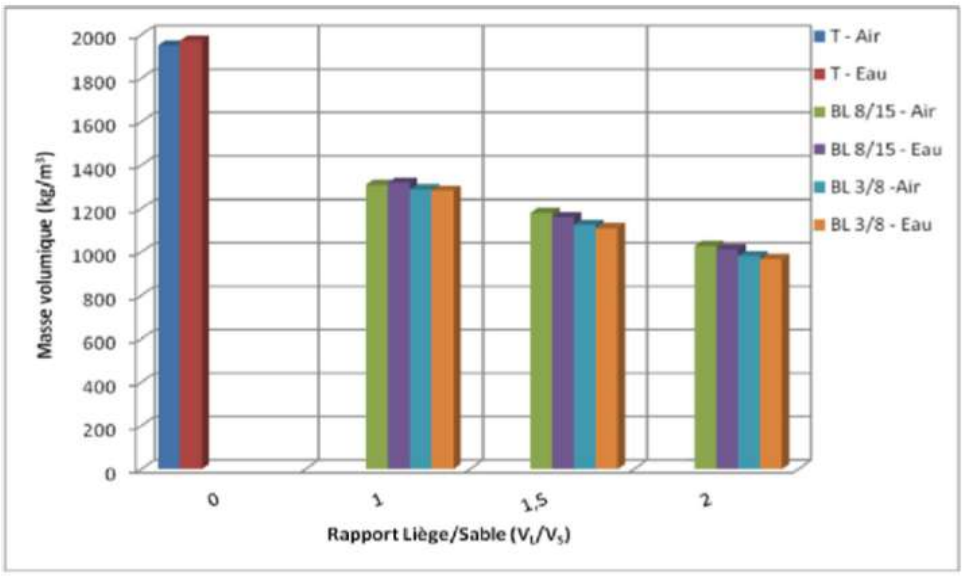


Figure I. 9 Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège**.[15]**

2. Performances mécaniques

A. Résistance en compression

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f c28. La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à

l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cubique de dimensions 10x10x10 cm. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

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

Herihiri.O et al, 2010 ont étudiés les propriétés physico-mécaniques des mortiers à base de polystyrène expansé par la substitution totale et partiels du sable alluvionnaire par le PSE, trouvent que pour une teneur de 100% de PSE, la masse volumique décroit de 60% et la résistance décroit de 48,12%, particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et l'allégement des structures. (Figure I.10). **[4]**

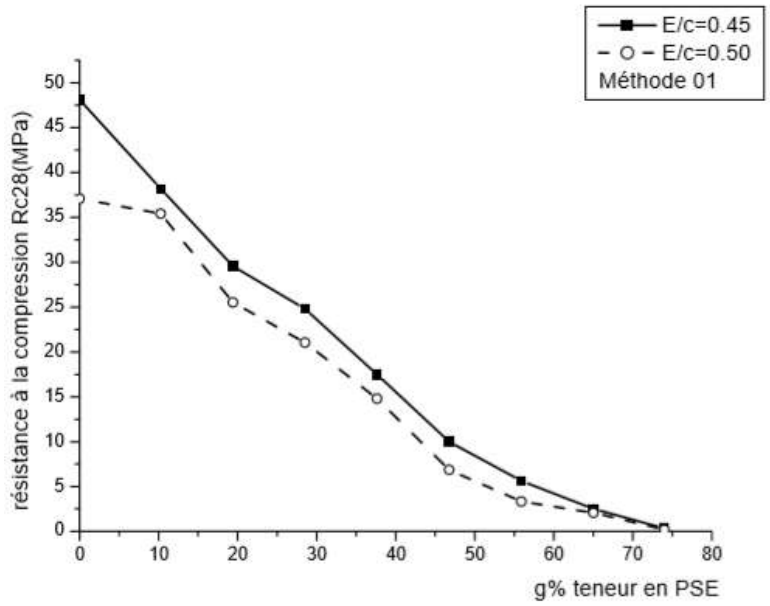


Figure I. 10 Evolution de la résistance à la compression à 28j en fonction de la teneur en polystyrène pour E/C= 0.45&0.5 **[4]**

Mohellebi.S (2014) a fait des recherches sur la formulation du béton allégé par La substitution d'une fraction d'agrégats naturels par des billes de polypropylène enrobées d'une couche céramique ou/ et de marbre, elle a constaté que la perte de résistance et de masse comparativement au béton témoin est respectivement de l'ordre de 38% et 8,5%. **[4]**

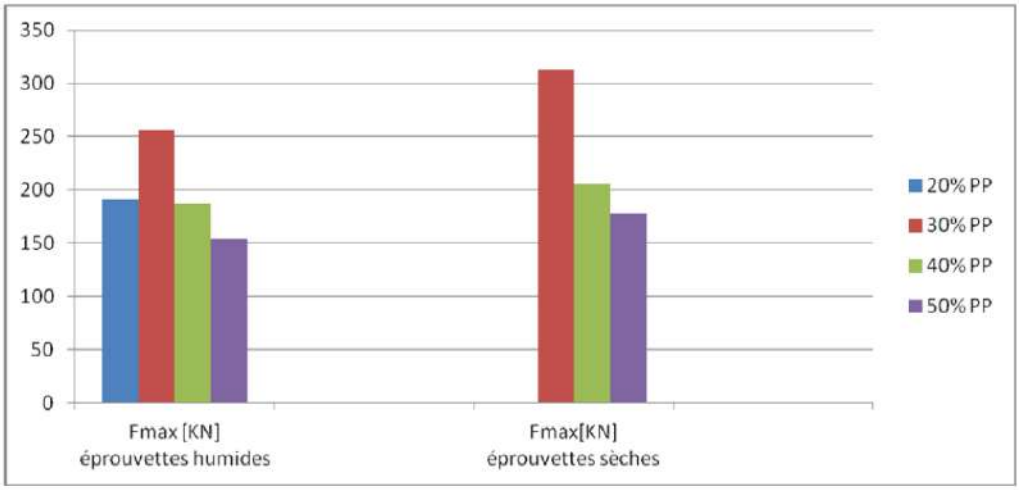


Figure I.11. Résultats des efforts maximaux de compression uniaxiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées. **[4]**

Il existe une relation entre les résistances mécaniques et le dosage en ciment en particulier la résistance à la compression. Le ciment ayant une densité beaucoup plus élevée que celle des granulats légers et de l'eau, pour n'importe quel granulats particulier, la résistance augmente avec l'augmentation de la masse volumique, mais, selon le type de granulat, un béton de 20 MPa peut nécessiter entre 260 et 330 Kg de ciment par mètre cube, alors qu'un béton de 40 MPa en exigera de 420 à 500 kg/m3 . Des résistances à la compression plus élevées exigent des dosages en ciment très élevées par exemple, un dosage en ciment de 630kg/m3 est nécessaire pour obtenir une résistance de 70 MPa. **[1]**.

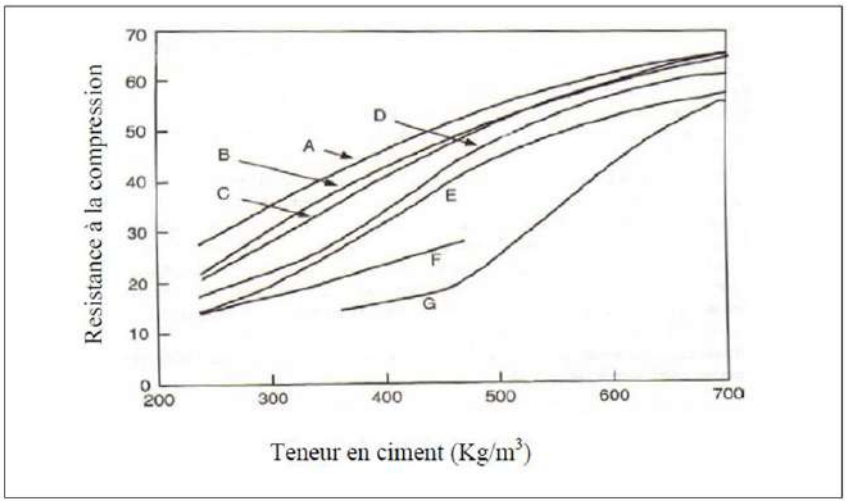


Figure I.12. : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment **[1]**.

De façon générale, pour un béton de même résistance, le dosage en ciment doit être plus élevé dans un béton léger que dans un béton de densité normale ; le dosage supplémentaire en ciment peut dépasser 50% dans le cas des résistances élevées. **[16]**

Comme pour le béton de densité normale, la fumée de silice améliore l'évolution de la résistance du béton léger. D'autres ajouts peuvent être aussi incorporés dans le béton léger. 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 entraineurs 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. L'utilisation du dosage important du liant et les plastifiant augmente la résistance du béton à base de polystyrène (figure I.13).

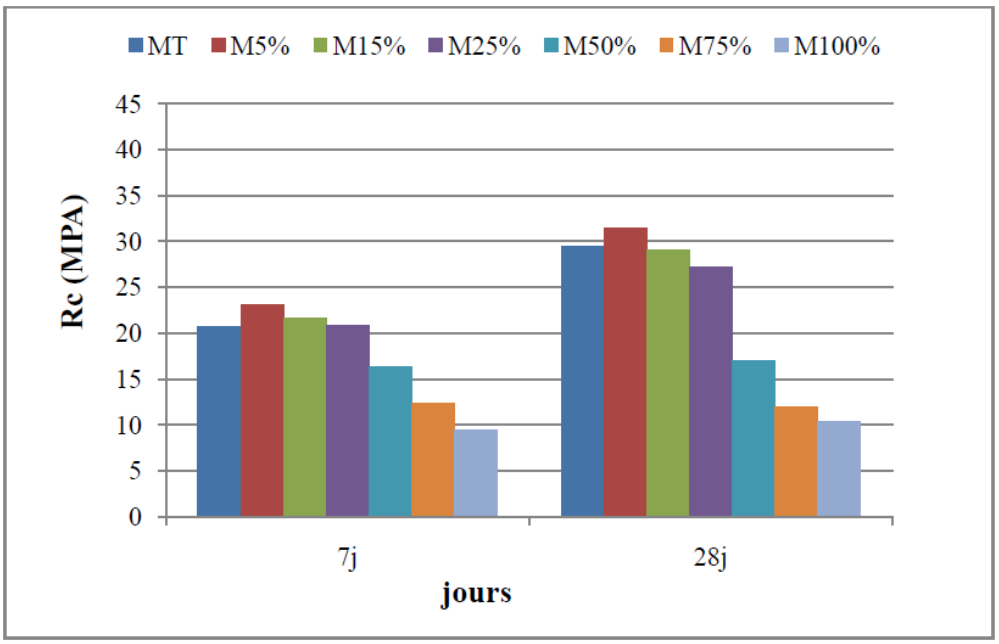


Figure I.13. Résistance à la compression (Mpa) en fonction des jours avec le dosage du ciment C= 500 kg et 1% plastifiant. [17]

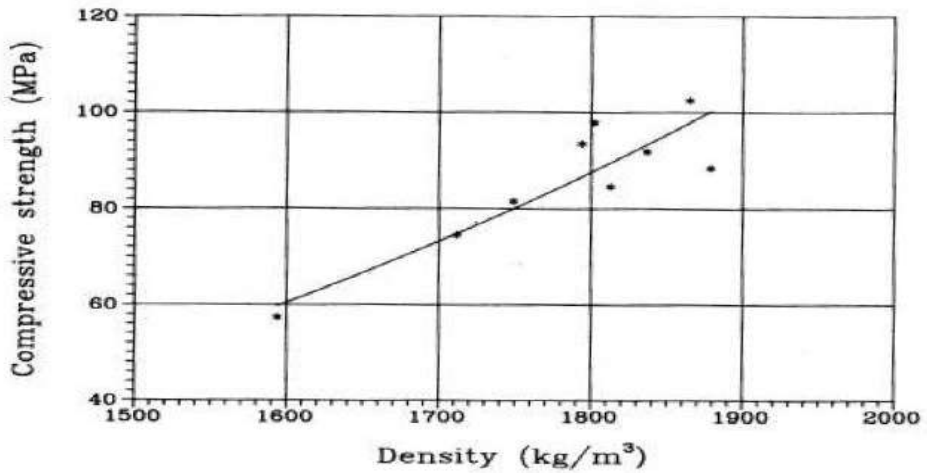


Figure I-14: Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers [ZHA 2, 1991]

La figure I.14 montre clairement que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité du béton, cependant, il y a encore une grande variabilité dans les facteurs déjà discutés. [18]

AIFA et al (2018) ont obtenu des résultats similaires. Ils ont rapporté que l'évolution de la résistance à la compression des différents bétons légers à base de polyester expansé en fonction de la température de chauffe diminue lorsque la teneur en polystyrène augmente et l'augmentation de la température de chauffe ainsi. figure I.15. [19]

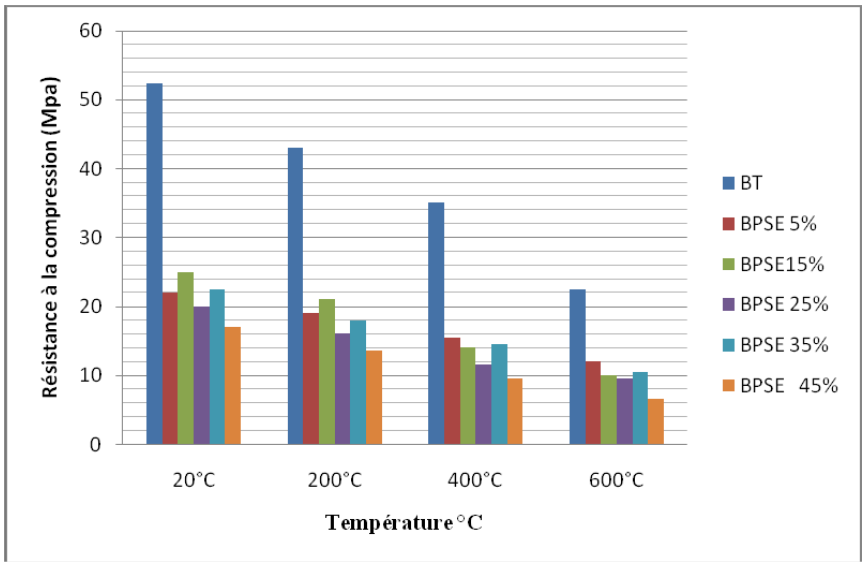


Figure I.15 Évolution de la résistance à la compression de chaque type de béton étudiée en fonction de température. [19]

L'augmentation de la température affecte la résistance en compression des bétons soit ordinaire ou allégé par les billes de PSE. La résistance du béton à base de polystyrène est inférieure à celle du béton témoin pour tous les pourcentages de substitution, cette diminution

de résistance est liée à l'augmentation de la proportion de polystyrène expansé. Pour une teneur en PSE de 45%, la résistance à la compression décroît de 22,5 MPa à 6,5 MPa. Soit une réduction de l'ordre de 71,11% pour les températures allant de 20°C à 600°C respectivement. La diminue est considérable avec l'augmentation de la température de traitement, mais reste dans les valeurs compatibles avec l'utilisation en isolations. [19]

B. Résistance à la traction le même remarque

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 [21], ou de 3,5 à 5,6 MPa pour des bétons, dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m3 [18].

Selon B. Laoud (2013), le béton avec l'ajout de liège, connu une chute très rapide de résistance en traction. Ainsi, l'utilisation des classes de grains de liège faible (3/8) devant les grains (8/15) présente une diminution des valeurs de la résistance en traction

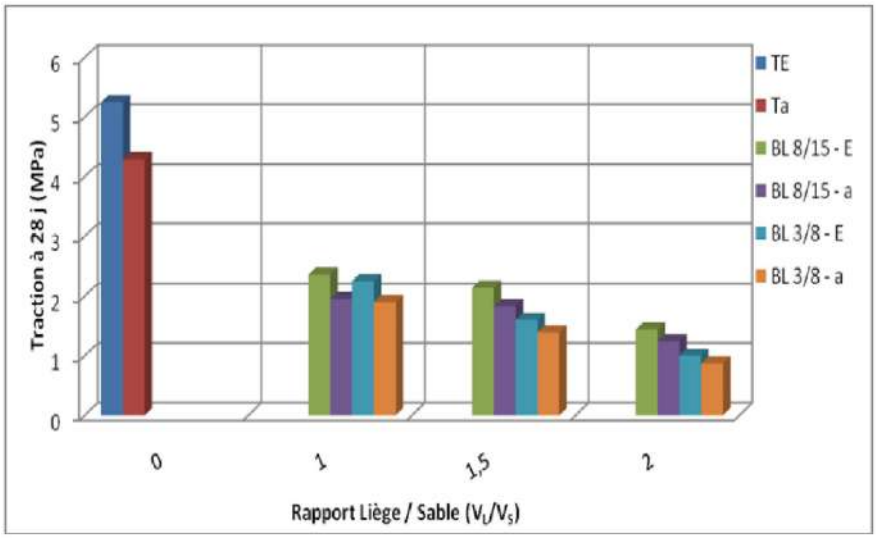


Figure I.16 Evolution de la résistance à la traction à 28 jours en fonction de rapport VL/VS [15]

La mesure de la résistance à la traction est importante surtout pour identifier l'adhérence ciment / grains. L'essai le plus couramment utilisé, il consiste à rompre en flexion (par trois points), une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L .Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 7, 28 jours.

D'après Laidi .W et al (2015) la résistance à la traction de tous les mélanges est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de polystyrène. Cette diminution des résistances est expliqué par le défaut d'adhérence entre le polystyrène et la matrice cimentaire ou à la mauvaise qualité de la zone de transition entre ces deux phases

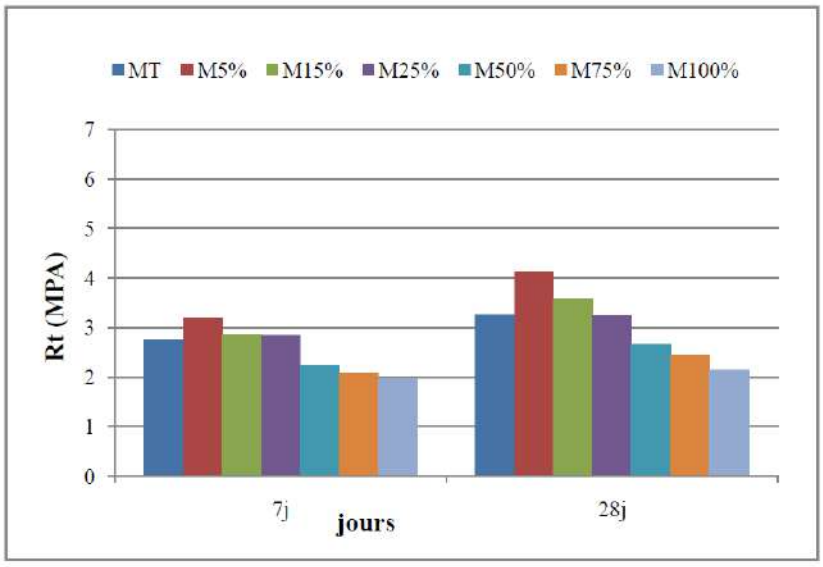


Figure I.17. Résistance à la traction (Mpa) en fanction des jours avec le dosage C= 450 kg et 0.5% plastifiant. [17]

C. Module élastique

Le module élastique d'un béton léger est inférieur à celui d'un béton normal. La cause principale réside dans le module élastique des granulats légers (10 à 20 GPa) qui est très inférieur à celui des granulats de masse volumique usuelle (granite, 10 à 70 GPa, calcaire, 10 à 55 GPa). **La figure I.18**, présente quelques résultats de recherche antérieure sur les bétons légers. Nous constatons que le module élastique est proportionnel à la masse volumique.

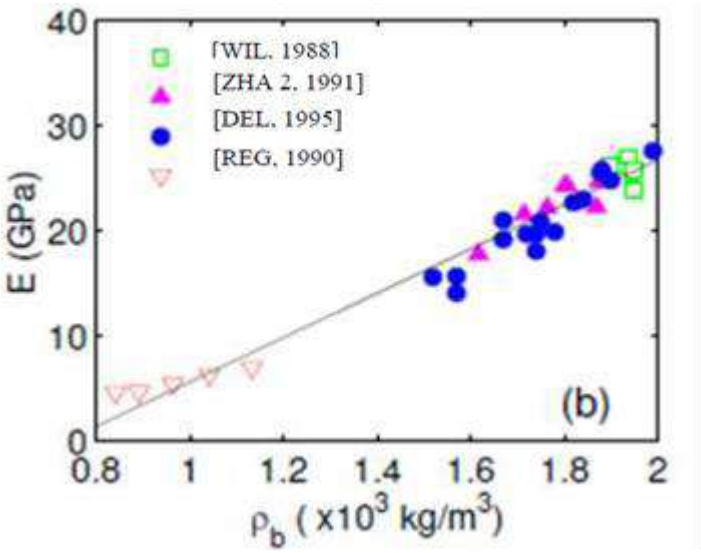


Figure I-18 : Evolution de modules élastiques de bétons légers à 28 j d'après plusieurs auteurs [20]

Le module élastique d'un béton léger est inférieur à celui d'un béton normal. La cause principale réside dans le module élastique des granulats légers (10 à 20 GPa) qui est très inférieur à celui des granulats de masse volumique usuelle (granite, 10 à 70 GPa, calcaire, 10 à 55 GPa). [21]

Selon Gaweska (2004) [22] les variations du module d'élasticité dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment.

D. 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 entraine un gain de masse du matériau. Cependant, 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. Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus. Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption. **[16]**

Une étude expérimentale menée par Vaquier (1986) **[16]** dans a mis en évidence le rôle de la microstructure dans l'absorption en comparant le type et la distribution par taille des pores de quatre granulats Légers et en analysant les conséquences sur I' absorption, Tableau **I.5**

Tableau I.5. Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre >2 µm

	Porosité ouverte (%)	% pores diamètre>2 µm
Ponce	55,0	68,0
Argile expansée	53,9	11,7
Schiste expansé	37,0	34,7
Cendre frittée	37,0	17,6

II constate que la plus grande partie de l'eau est absorbée en quelques minutes et que la quantité d'eau absorbée n'est pas corrélée à la porosité ouverte mais à la porosité ouverte de diamètre supérieur à 2 microns. Ceci est confirmé par la comparaison entre le volume de liquide maximal absorbé par les granulats et le volume total des capillaires de diamètre supérieur à 2 microns qui sont quasiment identiques.

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités. Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée εg, 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. **[11]**

I.DJAKAM (2016) **[14]** dans ses recherches, trouve que le béton formulé avec un sable recyclé est plus absorbant que le béton avec sable naturel. Cette absorption est due à la porosité de la pâte de ciment qui représente la seule phase continue dans le béton. Le béton est plus poreux en présence d'un sable recyclé.

L'absorption capillaire du béton entièrement en brique concassée représente presque le double de celle du béton « témoin».

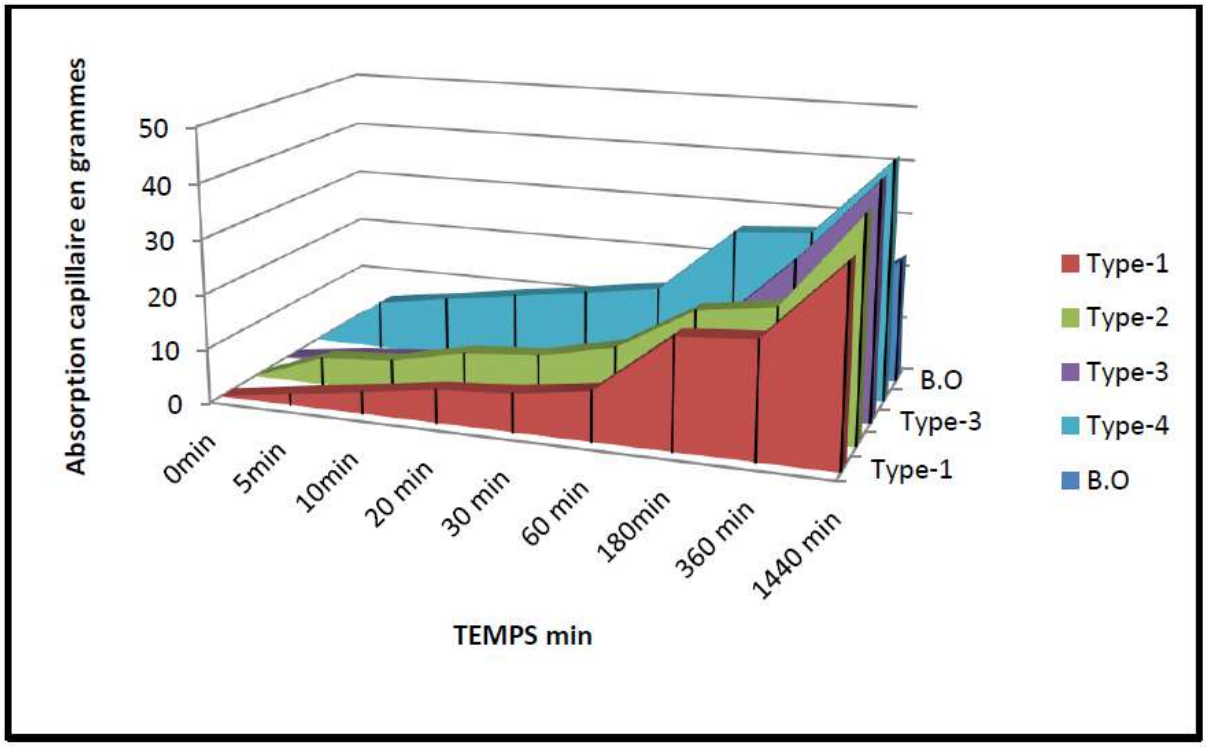


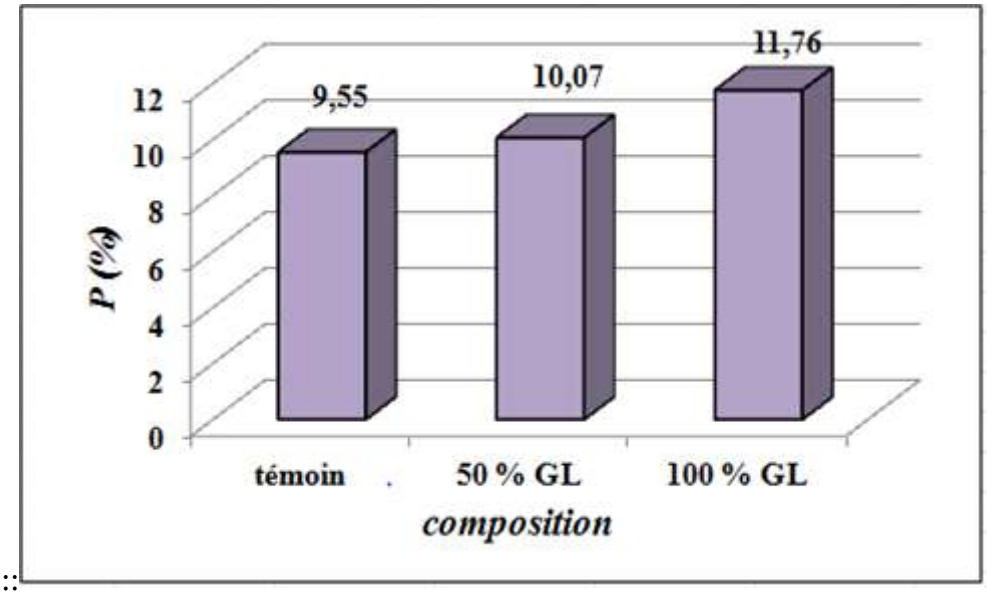
Figure I.19 : Absorption D'eaux par Capillarité des bétons en grammes [14]

E. La porosité

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités. La porosité est une caractéristique très importante car elle influe sur les propriétés physico-mécanique et thermique des bétons, elle provient de la matrice et des granulats.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque a due à la présence de l'air intra-particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique. [23]

La figure I.20 représente les résultats obtenus par Agoumimelcha.A **[24]** sur la variation de la porosité en fonction du dosage en granulat léger obtenu par recyclage des boues de barrage.



::

Figure I. 20 Variation de la porosité en fonction de la composition de béton **[24].**

M.Zitouni et al (2019) ont réalisé des essais sur des bétons légers à base des grains de liège et des billes de polystyrène comme agrégats légers. Une diminution de la porosité des bétons avec 25 et 50% de granulats légers par rapport au béton ordinaire, cette diminution est due aux billes de polystyrènes expansés qui comblent les pores dans le composite et les ferment pour empêcher le passage de l'eau. En revanche, pour les dosages supérieurs à 50%, la porosité augmente. **Figure I.21.**

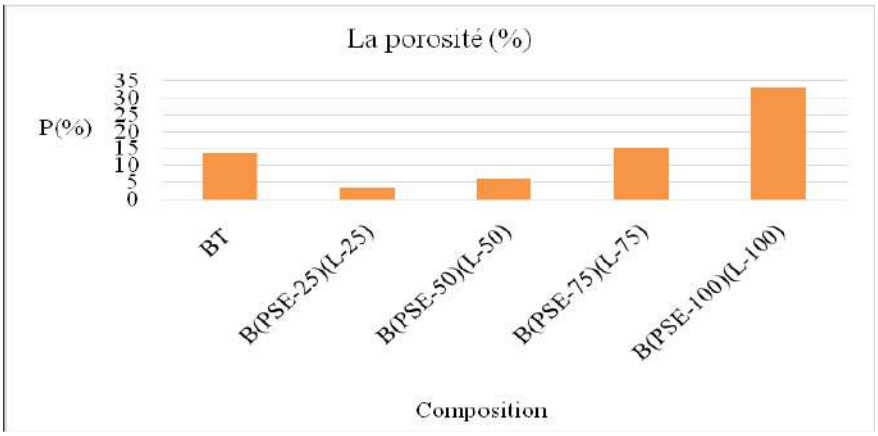


Figure I.21. Variation de la porosité en fonction de la composition de béton. [25]

F. Retrait

Les bétons légers présentent pour la plupart, un retrait plus important que les bétons traditionnels et également plus tardif, car l'eau absorbée par les granulats légers se trouve progressivement restituée par la matrice, retardant ainsi la déshydratation du mortier, cause principale du retrait. Le retrait est évalué en valeur finale selon le dosage en ciment, en eau et la nature des granulats légers utilisés. **La figure I.22** reproduit quelques résultats de [Bentur

& Coll] sur l'efficacité des granulats légers à prévenir les dommages dus au retrait endogène en comparant la déformation d'un béton ordinaire et de deux bétons saturés et partiellement saturés.

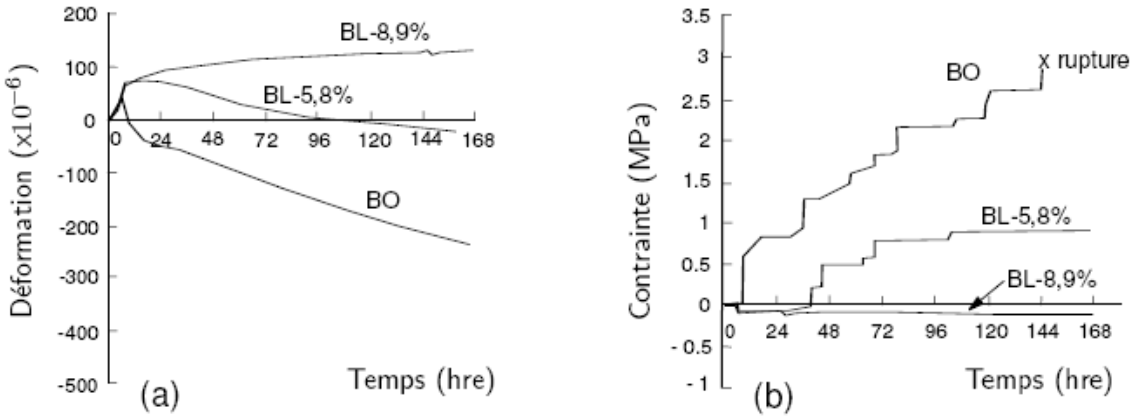


Figure I.22. Retrait endogène en fonction du temps : *déformation libres (a) et contraintes induites par le retrait empêché (b) ; bétons légers avec granulats saturés (BL-8,9%) et partiellement saturés (BL-5,8%) ; bétons de granulats rigides (BO) ; [Bentur &Coll].*

3. propriétés thermiques

Une des propriétés intéressantes des bétons légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Les bétons de polystyrene expansés sont constituent de bons isolations thermiques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0.20, pour des densités de 400 kg/m3 et 0.30 à pour des densités de 800 kg/m3. [**27**].

La demande d'une isolation adaptée s'est considérablement accrue. En effet une bonne isolation thermique est économiquement rentable et les économies d'énergie sont devenues une préoccupation majeure des architectes, des concepteurs et des constructeurs.

Par ailleurs, les bétons légers de polystyrène ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%). Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments [**27**].

A. La conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des caractéristiques importantes des bétons légers. Elle est contrôlée par des paramètres physico-thermiques qui sont : la conductivité thermique λ (W/m.K), la chaleur spécifique c (J/kg.k), la diffusivité thermique a (m^2/s) et l'effusivité thermique b (J/(m^2 . S^2. K)).

Les principaux paramètres influençant l'évolution de la conductivité thermique sont : la teneur en eau, le type de granulats, le degré de saturation en eau liquide, la structure de l'espace poreux et la formulation du béton. À cet égard, de nombreuses études antérieures ont étudié le pouvoir d'isolation des bétons légers.

Zitouni .M et al (2019) **[27]** dans ses résultats, montre que la substitution des granulats usuels par les grains de liège et les billes de polystyrène diminue la conductivité thermique. **figure I.23**.

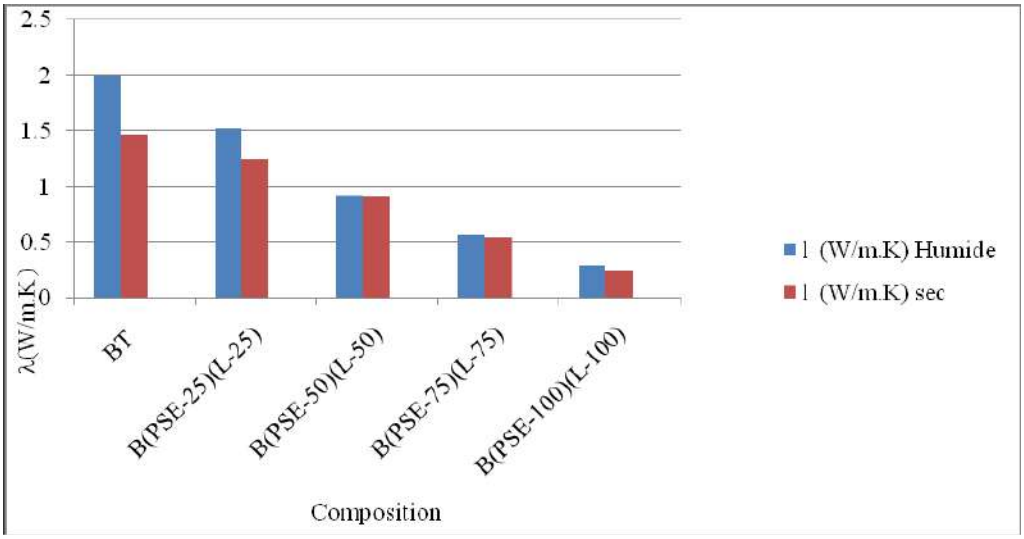


Figure I.23. Variation de la conductivité thermique en fonction de la composition du béton [25]

B. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'une masse unitaire de matière. C'est à dire, c'est la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur. [19]

L'évolution de la chaleur spécifique du béton est principalement reliée à celle de la pâte de ciment et de type de granulats. **[28].** Elle augmente d'une manière générale avec la montée de la température. Cette variation est liée aux différentes réactions endothermiques. En effet,

la chaleur massique du béton est gouvernée significativement par la nature du granulat existant dans la composition du béton.

La figure I.24, représenté la variation de la chaleur spécifique en fonction de pourcentage de deux granulats d'âpres Bennacer .S et al. Ils ont élaboré un béton de plâtre allégé par des déchets industriels en vue de leur utilisation dans l'isolation des bâtiments**.** Les résultats montrent que la chaleur spécifique augmente avec le dosage en granulats légers,

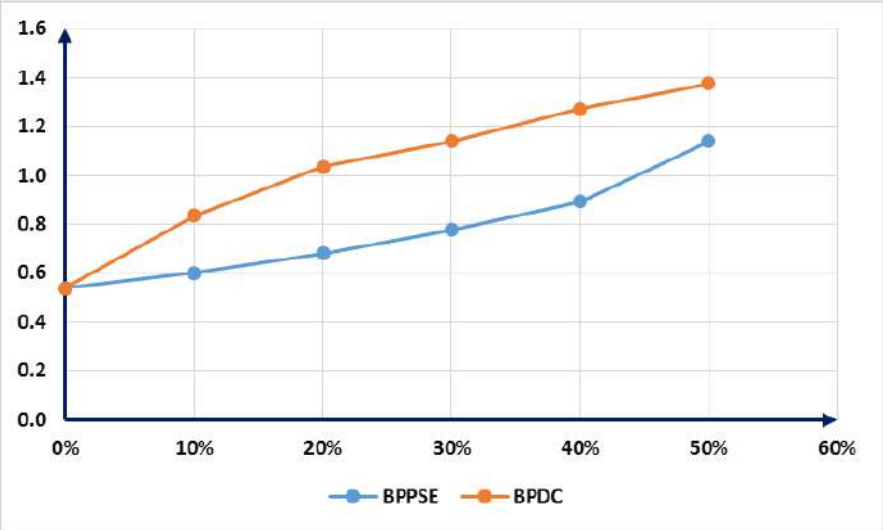


Figure I.24 .la variation de la chaleur spécifique en fonction de Pourcentage de deux granulats [29]

I.1.8 LES AVANTAGES DES BETONS LEGERS

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classés en trois catégories qui sont :

- **Légèreté** : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1 ,2 en comparaison de 2 ,2 à 2,5 pour un béton classique.
- **Isolant** : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique.
- **Non inflammable** : La chape en béton léger est classées M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- **Imputrescible** : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.

- L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger ;

Avantages de Mises En Œuvre

- **Exécution simple et rapide** : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur.
- **Maniabilité** : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- Coffrages plus légers ;
- Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté

Avantages Economiques

- une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations
- Economie sur le ferraillage des éléments ;
- le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de
- ciment par rapport au béton ordinaire ; **[1]**

Les inconvénients du béton allégé

- 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 faible, 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. [3]

I.1.9 UTILISATION

Le béton léger est un matériau composite constitué de différents éléments allégés, d'où son nom. Cette particularité permet une utilisation plus facile contrairement au béton lourd. Le béton léger est divisé en trois domaines d'utilisation ;

- **Des bétons d'isolation pure, non porteurs** leur masse volumique est faible (600 kg/m3) de même que leur résistance à la compression (de 1,5 à 5 MPa). Ces bétons sont utilisés principalement :

- En forme de pente isolante pour toiture-terrasse ;
- En isolation de sols sur terre-plein ;
- La préfabrication des éléments architecturaux ;
- La protection d'étanchéité sur terrasse ;
- chapes, planché, dalles d'isolation ;
- Remplissage de vides et comblement de galeries et de canalisation ;
- Le rattrapage de niveau

- **Des bétons porteurs et isolants** leur masse volumique varie de 1 000 à 1 300 kg/m3 et leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :

- Des murs banchés ou préfabriqués
- Des blocs à maçonner ;
- Blocs, hourdis, panneaux préfabriqués, bardage
- Les planchers des constructions métalliques à grandes surfaces ;
- La protection incendie

- **I.5.3 Des bétons légers de structure** Ils ont une masse volumique de 1 700 à 1 800 kg/m3 et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20 MPa. Les granulats légers doivent répondre à un certain nombre de critères concernant le pourcentage de grains cassés, la masse volumique (en vrac ou des grains), le coefficient d'absorption d'eau, la résistance à la compression des grains, la composition chimique, la propreté, la granularité.

Ces bétons sont utilisés pour :

- Ouvrage ou le poids mort est important par rapport au poids total
- Immeuble de grande hauteur ;
- Portée importantes (poutres, voiles) ;
- Structures marines immeubles ;
- Surélévation d'immeubles existants ;
- Restauration d'anciens immeubles ;

Le béton léger permet de réduire l'armature en acier d'un plancher ou de réhabiliter un sol peu solide. Mais il est recommandé de prendre l'avis d'un maçon professionnel afin d'éviter les erreurs lors du coulage du béton et de son application. En effet, il faut tenir compte du taux d'humidité, des contraintes techniques ou de la chaleur. Le béton est un composite vivant qui réagit avec les conditions extérieures. [30]

Exemple : des ouvrages construis en Béton Léger

1. Floatgen

La première éolienne flottante de France, dans le port de Saint-Nazaire. Son flotteur en béton, léger et résistant, prend la forme d'une bouée carrée.



Figure I.25 Les travaux de construction de la fondation flottante ont eu lieu entre 2016 et 2017 à Saint Nazaire. [31]

2- Pont ferry des perroquets

Columbia, Californie, États-Unis

355pieds de haut / 108 mètres de haut

Envergure de 640 pieds / envergure de 195 mètres 1979



Figure I.26 : Pont ferry des perroquets

Le pont Parrots Ferry enjambe l'extrémité nord du lac New Melones sur la rivière Stanislaus. D'une hauteur d'environ 355 mètres et d'une largeur de 640 pieds, le pont est l'un des plus hauts du genre dans le pays (en fait égal avec le pont Auburn Foresthill en Californie comme le plus haut)

Le pont est une structure gracieuse qui traverse le réservoir, la travée principale est faite de poutres en béton précontraint et est l'une des plus longues du genre aux États-Unis. Construit entre 1976 et 1979, il a également été l'un des premiers ponts construits en béton léger. [32]

3- Berkeley I-80 Bicyclette Et Surpassage Piétons



Figure I.27: Le Berkeley Bike Bridge

Le Berkeley Bike Bridge a été le premier d'un certain nombre de nouveaux projets audacieux de ponts pour vélos et piétons dans la région de la baie. La conception comprend une palette de couleurs choisie pour être adaptée aux couleurs du contexte de la zone humide, une simple courbe circulaire en plan avec deux pylônes stratégiquement placés de telle sorte que les forces exercées sur les pylônes des haubans sont équilibrées. La forme triangulaire des pylônes résiste aux charges sismiques et au vent et se rapporte visuellement aux formes formées par les haubans. La construction a été achevée en 2002 [33]

Conclusion

A travers ce chapitre de recherche bibliographique, nous avons présenté une aperçue globale sur les bétons légers, ses types et classes, ainsi les différentes caractéristiques essentielles d'après les travaux élaborés par plusieurs chercheurs. Le béton cellulaire est parmi les types de béton léger, plusieurs chercheures trouvent que ce type est une richesse pour l'écologie, d'ailleurs notre objectif du chapitre deux est de jauger ce constat.

Chapitre 2

Les bétons cellulaires

II.1 INTRODUCTION

Les bétons cellulaires, produits industrialisés, sont une variété des bétons légers à pores uniformément répartis (jusqu'à 85% du volume total du béton) ; sont constitués de sable siliceux exempt d'argile, de gypse, de chaux et de ciment. Dans ce chapitre, sont principalement exposées les propriétés physico-mécaniques et thermiques de béton cellulaire. Ainsi, un état de connaissance sur l'effet de l'agent de dégagement de gaze qui fait "lever" la pâte.

II.2 Historique

Le béton cellulaire tel que nous le connaissons de nos jours est né de la combinaison de deux inventions antérieures : l'autoclavage du mélange sable/chaux/eau et l'émulsification des mélanges de sable, ciment/ chaux et eau. [36]

La première invention est attribuée en 1880 à W. Michal. Ce dernier a mis en contact un mélange de chaux, sable et 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 chaux réagit avec le sable quartzeux et l'eau. Cette invention est encore et toujours à la base de tous les matériaux de construction durcis à la vapeur d'eau saturée sous haute pression. [36]

La seconde invention concerne l'émulsification des mortiers. En 1889, cette invention a été octroyée à E. Hoffmann. Il a utilisé de la pierre à chaux finement broyée et de l'acide sulfurique pour émulsionner des mortiers à base de ciment et de gypse.

En 1914, J.W. Aylsworth et F.A. Dyer ont breveté un procédé utilisant de la poudre d'aluminium ou de zinc comme émulsifiant. Ces poudres de métal réagissent en milieu alcalin (chaux ou ciment) en dégageant de l'hydrogène. Cette formation de gaz fait lever la masse de béton frais à l'instar de ce qui se produit, lors de la fabrication du pain.

En 1924, le Suédois J.A. Eriksson débute la production de béton cellulaire à base 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'autoclavage, tel que décrit dans le brevet de Michaelis. Après avoir levé et s'être solidifié dans un autoclave à une température d'environ 180°C avec de la vapeur d'eau saturée, sous haute pression, le mélange émulsionné durcit. Parallèlement, un processus à base de sable fin, de ciment et d'eau avec adjonction d'une petite quantité de poudre de métal est développé au début des années trente. K.I.A. Eklund a fait breveter ce procédé en 1939. La principale avancée par rapport au béton cellulaire de la période antérieure est le durcissement à la vapeur d'eau saturée sous haute

pression permettant de réduire très nettement le retrait dû au séchage. Enfin, une troisième étape s'imposait pour arriver au béton cellulaire, tel que nous le connaissons aujourd'hui : la fabrication en série de petits et de grands formats, d'éléments armés ou non avec un degré de précision suffisant. Pour ce faire, une méthode de production a été développée après 1945 [35]. Les produits sont découpés aux dimensions souhaitées au moyen de fins fils d'acier très tendus ce qui permet d'obtenir des produits finis de grande précision.

En 1953, la Belgique a commencé à produire des blocs de béton cellulaire. Le marché y a vu un intéressant complément aux produits de construction traditionnels. Suite au franc succès du produit, la production a été étendue, dès 1957, à celle d'éléments armés en béton cellulaire. Un développement important car des éléments de grandes dimensions pouvaient désormais être réalisés. Ces éléments sont principalement utilisés dans la construction industrielle. [4]

C'est en Suède, patrie d'Eriksson, que les premières usines ont vu le jour. C'est également de ce pays que le matériau a été diffusé et produit dans le monde entier. De nos jours le processus de production du béton cellulaire est le plus novateur dans le domaine des matériaux de construction pierreux. Il est entièrement automatisé [36]

II.3 DEFINITION

Les bétons légers cellulaires sont une variété des bétons légers à pores uniformément répartis, ils sont obtenus par durcissement d'un mélange préalablement gonflé par un agent d'expansion. Ils ont destiné au gros œuvre. Fabriqué exclusivement à partir de matières premières naturelles, il résulte d'un savant dosage d'eau, de sable, de ciment, de poudre d'aluminium ou de pâte d'aluminium, et d'air [36]. La poudre d'aluminium réagit comme suit :

$2\ Al + 3\ Ca(OH)_2 + 6\ H_2O \longrightarrow 3\ CaO + Al_2O_3 + 6\ H_2O + 3H_2$ [34]

L'hydrogène libéré crée des cellules. En cours de durcissement de la pâte, celui-ci se libère et les cellules se remplissent d'air. C'est la présence de nombreuses cellules minuscules qui détermine la structure du béton cellulaire. Il est fabriqué en différentes masses volumiques pouvant varier entre 300 et 800 kg/m3 (béton ordinaire : 2400 kg/m3). [34]



Figure II.1 Le béton cellulaire

II.4. La composition

Les matières premières principales pour fabrication du béton cellulaire sont le sable, la chaux, le ciment et l'eau. Toutes ces matières premières sont présentes en abondance dans la naturel. [35]

- Sable : Le sable est un élément naturel provenant du quartz et du silex. Il est constitué de grains assez fins, avec une dimension variant entre 0,15 mm à 4,76 mm. Son nom varie selon sa taille (sable fin, gros sable et sable graveleux). Il existe deux types de sable et différentes utilisations dans la construction. (Les sables naturels, Les sables artificiels) [53]. dans le béton cellulaire en utilisant le sable de dune est un sable fin présentant une granulométrie serrée de diamètre maximal 0.63 mm [37]

- Eau : L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences aux normes en vigueur. Les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, les eaux d'origine souterraine, les eaux de rejet industriel, l'eau de mer et les eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire (essais chimiques, physiques, etc.) [50] L'eau utilisée pour la confection des mortiers est de l'eau potable du réseau sans aucun traitement supplémentaire. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5. [37]
- Agent expensive : est un produit particulièrement efficace pour la démolition des édifices en ciment, en béton, des murs de contention, des terrassements ainsi que pour des travaux sur le réseau routier ou à l'intérieur des grottes. Dans le béton cellulaire la poudre d'Aluminium pure à 99%, de granulométrie d'environ 75µm, fabriqué par la société Allemande SIGMA-ALDRICH. [37]
- La chaux : est un produit naturel résultant de la cuisine d'un calcaire plus ou moins pur déférentes types de chaux prouvent être obtenu en fonction de la composition chimique de la roche d'origine

- Le ciment : Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau ; il forme une pâte faisant prise qui durci progressivement Grâce à ses caractéristiques, cet élément permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide [41] ; les types de ciment :

1. CEM I Ciment Portland Artificiel (CPA) ;
2. CEM II Ciment Portland Composé (CPJ) ;
3. CEM III Ciment de Haut Fourneau (CHF) ;
4. CEM IV Ciment Pouzzolanique ;
5. CEM V Ciment aux Laitiers et aux Cendre

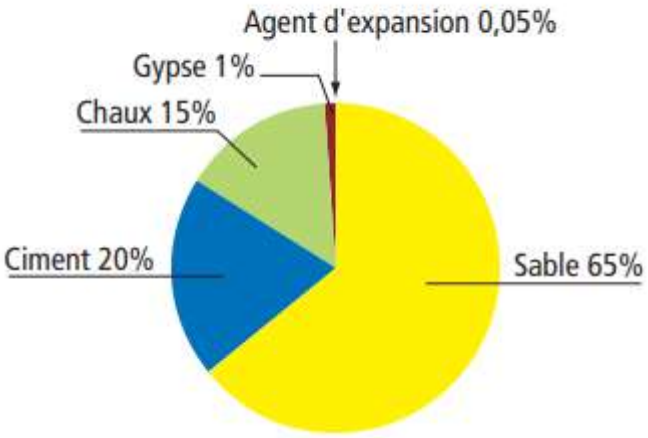


Figure II.2 composition de béton cellulaire

II.5.Fabrication

Les produits en béton cellulaire sont fabriqués dans des unités de production hautement industrialisées. L'emploi de matières premières stables, l'automatisation de la fabrication ainsi que le contrôle permanent, tant interne qu'externe, sont les garants d'une qualité de produits constante et de haut niveau**.** [39]

Les phases importantes de la fabrication sont :

La préparation, le dosage et le malaxage des matières premières (sable, chaux, ciment, poudre ou pâte d'aluminium et eau) ;

- La préparation des moules ;
- La coulée, la levée et le durcissement de la pâte ;
- Le découpage et le profilage des produits ;
- Le passage en autoclave sous une pression d'environ 10 bars ainsi qu'à 180° C pendant 10 à 12h ;

- La palettisation et le houssage plastique.

Le mode de fabrication en autoclave correspond à l'industrialisation d'un processus qui aboutit, à l'état naturel, à la création d'un minéral à la structure moléculaire analogue : la tobermorite, silicate de calcium hydraté. Le processus consiste par conséquent à imiter ce matériau existant à l'état naturel. [36]

La structure alvéolaire est reproduite grâce à la poudre ou pâte d'aluminium qui en présence des autres composants lors de la fabrication agit comme agent d'expansion .Ce mode de fabrication facilite le fonctionnement des usines en cycle fermé : elles ne rejettent aucune substance liquide ou solide susceptible de polluer eaux ou sols, et les déchets issus de cette phase de production, peu importants et complètement inertes, sont valorisés à 90 %. Dans l'atmosphère, l'unique gaz libéré est de la vapeur d'eau. [36]

La fabrication du béton cellulaire nécessite en outre peu d'énergie, dont une partie se trouve, d'autre part, recyclée pour chauffer les bureaux attenants aux sites de production et l'eau indispensable à ce processus peut aussi être réutilisée. [36]

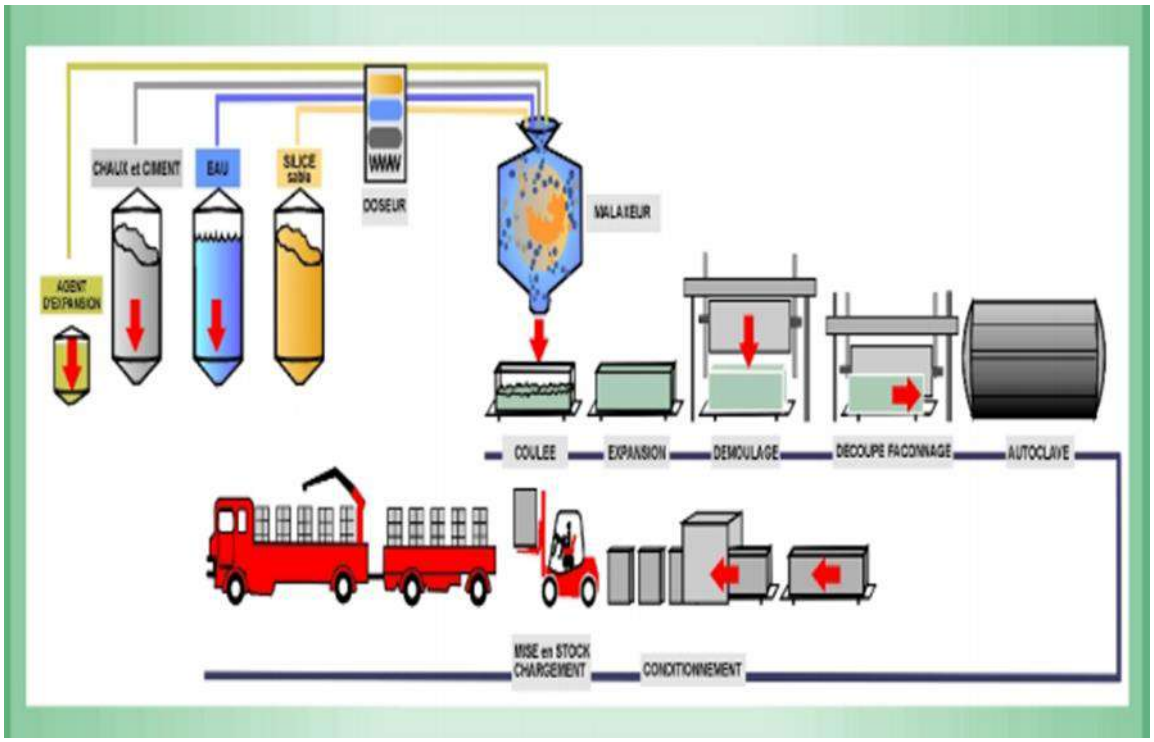
Les réactions chimiques simplifiées, depuis le mélange des matières premières jusqu'à l'obtention du produit fini, sont les suivantes :

$$\mathbf{CaO + H2O \rightarrow Ca(OH)2 + 65.2\ kJ/mol}$$

$$\mathbf{3\ Ca(OH)2 + 2\ Al + 6\ H2O \rightarrow Ca3(Al(OH)6)2 + 3\ H2}$$

$$\mathbf{6\ SiO2 + 5\ Ca(OH)2 \rightarrow 5\ CaO \cdot 6\ SiO2 \cdot 5\ H2O} = \textit{T obermorite (silicate de calcium hydraté)}\ \mathbf{.}$$ [39]

Ca5H2(Si3O9)2 • 4 H2O ou C5S6H5 (appellation industrielle) - que les fines parois cellulaire sont emprunte leur grande solidité. Bien que les composants soient les mêmes, le béton cellulaire est un matériau entièrement diffèrent du béton dans lequel, on le sait, le sable ne participe pas à la réaction chimique et donc à la formation des Cristaux. C'est le traitement thermique en autoclave qui confère au béton cellulaire ses propriétés définitives. La variation des masses volumiques s'obtient en adaptant, de façon minutieuse et rigoureuse, le dosage des matières premières. Chaque catégorie massique, possédant ses caractéristiques spécifiques [36].



Figue II.3 Fabrication de béton cellulaire des éléments en BC

II.6 Classification de béton cellulaire

Basons sur le mode de cure le béton cellulaire peut être non-autoclave (BCNA) ou autoclave (BCA). Les résistances mécaniques, le retrait de séchage, l'absorption etc. dépendent directement du mode et la durée de cure. Le développement des résistances est plutôt lent pour les produits non autoclaves (cure humide). L'autoclavage amorce une réaction entre la chaux et la silice/alumine. Il existe une large variation dans la pression et la durée suggérée par plusieurs auteurs (durée 8-16h et la pression 4-16 MPa) [43]. Les autres variables significatifs sont l'âge et les paramètres du mélange au début du cycle de cure, et le taux de changement de température et pression. L'autoclavage est rapporté pour réduire le retrait de séchage significativement et est essentiel si le béton cellulaire est exigé dans des niveaux acceptables de résistance et retrait [43].

Les normes belges NBN B 21-002 ainsi que les normes européennes EN 771-4 classifient qualitativement le béton cellulaire en catégories en fonction de leur masse volumique sèche apparente (classe ρ) et de leur résistance à la compression (classe f) et la résistance caractéristique à la compression (Rc)

Tableau II.1. Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression. [34]

Classe ρ	Critères ρ (kg/m3)	Classe f	Rc (MPa)
0.4	300 – 400	f 2	Rc ≥ 2
0.5	400 – 500	f 3	Rc ≥ 3
0.6	500 – 600	f 6	Rc ≥ 4
0.7	600 - 700	f7	Rc ≥ 5
0.8	700 – 800	f 8	Rc ≥ 6

II.7 les propriétés de béton cellulaire

II7.1 Les propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés physiques et mécaniques du béton cellulaire déterminent le domaine de leur application. Plusieurs études menées dans le cadre de recherche, nous allons établir dans ce qui suit quelques propriétés.

A. La densité

Le béton cellulaire dépend de la densité (300-1800 kg/m3) [34], il est essentiel que ses propriétés soient qualifié avec la densité. En spécifiant la densité, les conditions d'humidité, (c'est-à-dire, séchage a l'étuve ou a l'air libre) doivent être indiqué. Le béton cellulaire avec une vaste gamme de densité pour des applications spécifique peut être fabriqué avec la variation de la composition qui à son tour influe sur la structure, la taille et la distribution des pores. Une structure cellulaire stable et de préférence sphérique est nécessaire pour des propriétés structurelles et fonctionnelles optimums [34]

Z. Damene [37] a trouvé que le pourcentage d'aluminium (allant de 0.2% à 1%), qui jeu le rôle d'un agent de gonflement, a mené la masse volumique des bétons cellulaire oscille entre 1600 et 1800 kg/m^3.

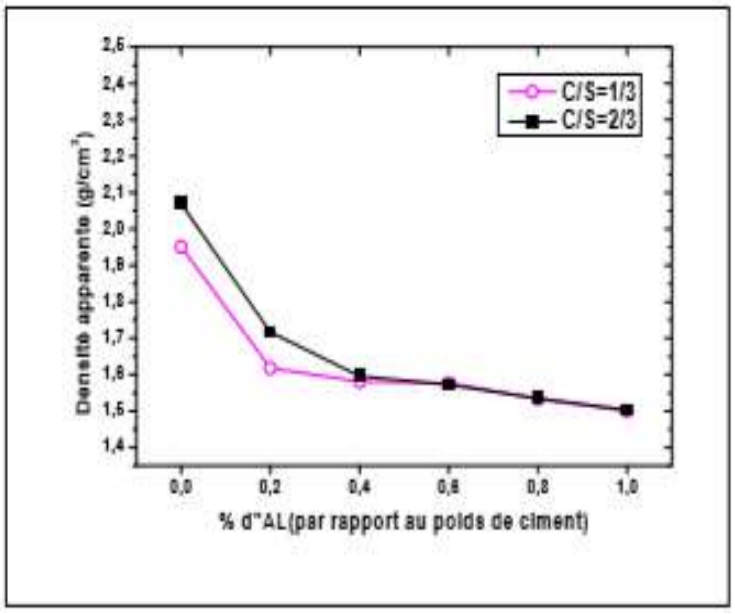


Figure II.4 Variation de la densité apparente en fonction du dosage d'Aluminium. [37]

Selon **la figure II.4**, quel que soit le rapport Ciment/Sable, la densité diminuée très rapidement pour les pourcentages inférieurs à 0.4%, puis ralentie de 0.4 à 1%. Les mêmes constats prouvés par les travaux de Cabrillac Richard [51].

Le dosage en ciment possède un effet bénéfique sur l'allègement pour son rôle dans la réaction entre la poudre d'aluminium et la portlandite (Ca (OH)2) formée au cours de la l'hydratation du ciment. La diminution de densité était de l'ordre de 19% dans la composition 1/3 et de 47% pour la composition 2/3 et ceci par rapport au mortier de référence pour le dosage proche de 0.4% d'Aluminium

En étudiant des éprouvettes (4x4x16 cm) de mortier, SAITI ISSAM [34] a étudié la substitution de fines d'argile calcinée dans le ciment en plusieurs teneurs (10, 15 et 20%). Il constate que la masse volumique apparente du matériau diminue lorsque le pourcentage en aluminium augmente et que les vides crées par l'hydrogène libéré par la réaction de l'aluminium apportent bien un allégement du matériau. La diminution de la masse volumique apparente à l'état sec de l'ordre de 22.7% pour le BCr et de 29.8% pour le BC15S contre 14.3% pour le BC15 et 11.8% pour le BC10 à l'état sec pour un dosage en aluminium égale 0.8%. Alors, il est clairement que les masses volumiques apparentes à l'état sec du BC15S sont inférieures à celles du BC15 et BC10. (**Figure II.5**)

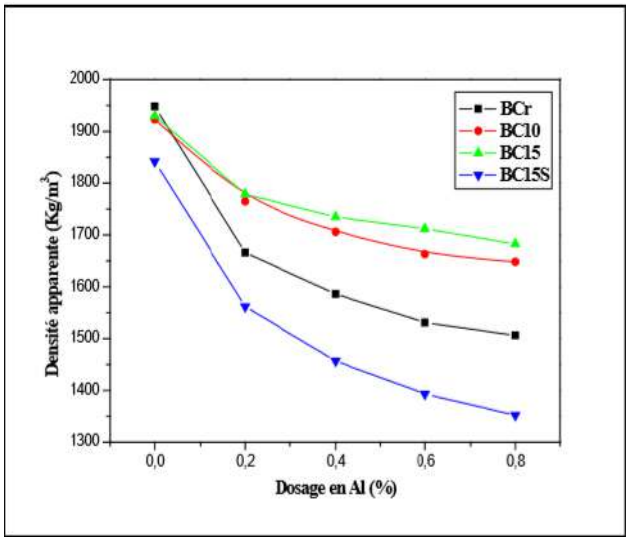


Figure II.5 L'évolution de la densité apparente en fonction du dosage en poudre D'aluminium. [34].

B.la résistance à la compression du béton

L'utilisation de plus en plus répandue des bétons cellulaires dans les constructions et notamment comme éléments porteurs légers suppose l'utilisation de matériaux de plus en plus performants sur le plan mécanique. De façon générale la résistance à la compression du béton cellulaire est comprise entre 2.5 et 20 MPa. [34]

D'après I.SAITI [34] et comme le montre **la figure II.6**, la résistance a la compression des mortiers cellulaires connue une chute remarquable après l'ajout de la poudre d'aluminium. En fait, la même évolution en fonction du dosage en agent expansif (Al) et cela indépendamment de la nature des constituants qui rentrent dans la composition de base [34].

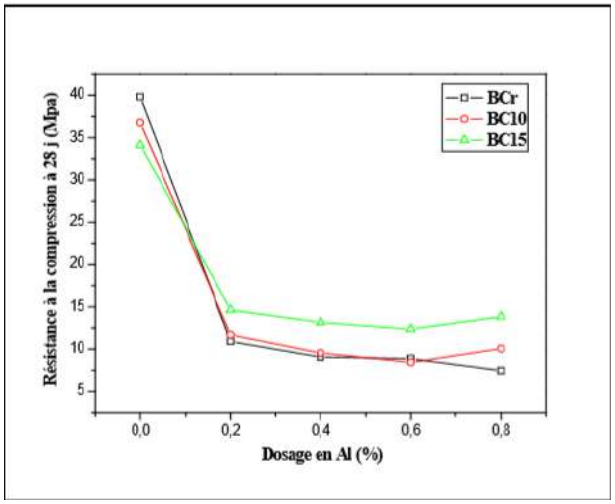


Figure II.6 L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en poudre d'aluminium. [34]

Pour des faibles dosages en en agent expansif dans le mélange nous constatons pour l'ensemble des résistances mesurés des chutes importantes qui atteignent 80% par rapport à celle des matrices de base non expansées ; cette chute des résistances est due essentiellement au développement de la porosité. Pour les dosages en agent expansif supérieurs à 0.4% les valeurs ont tendance à se stabiliser et ne présentent pas de variations importantes, l'ensemble des valeurs s'inscrivant dans un fuseau borné par des résistances de 5 Mpa et 14 Mpa. Les résistances les plus élevées sont obtenues sur des matériaux de composition BC15 avec (85% du Ciment+15% du fines) [34].

Ainsi, selon Z. Damene la résistance à la compression, avec 0.2% d'Al, a diminué de 78.5% et 61%, pour les compositions C/S=1/3 et C/S=2/3 respectivement. (**figure II.7**)

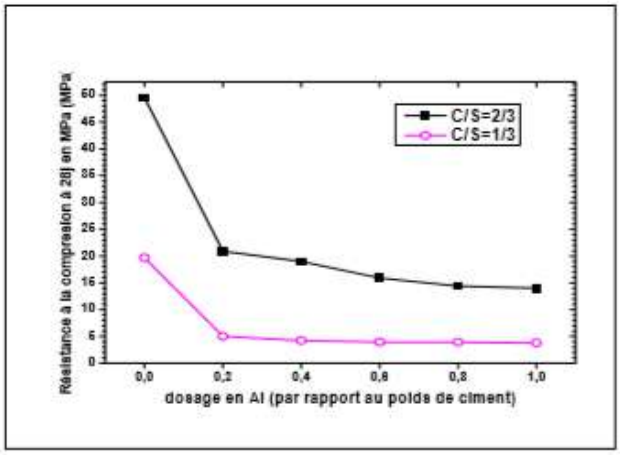


Figure II.7 Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage d'Aluminium des compositions (C/S=1/3 et C/S=2/3). [37].

C. Module d'élasticité (E)

Il existe un certain nombre de formules qui permettent de calculer le module d'élasticité E du matériau. La valeur quasi-statique de ce module est influencée par le pourcentage d'humidité contenu dans le matériau qui a également une influence sur la résistance à la compression. La formule (1) permet de calculer, avec une bonne approximation, la valeur du module d'élasticité d'un béton cellulaire autoclave ayant une masse volumique comprise entre 400 et 700 kg/m3, avec un taux d'humidité compris entre 3 et 10 % [40]

$$E = k\ \rho sec\sqrt{\sigma c} \quad \ldots\ldots(1)$$

E est le module d'élasticité tangent, en MPa, ρ sec est la masse volumique apparente du matériau, en kg/m3, **σ** c'est la résistance à la compression du matériau, en MPa, et k est un coefficient variable entre 1 et 1.5 et dépendant de la masse volumique du matériau et de son

Humidité [40]

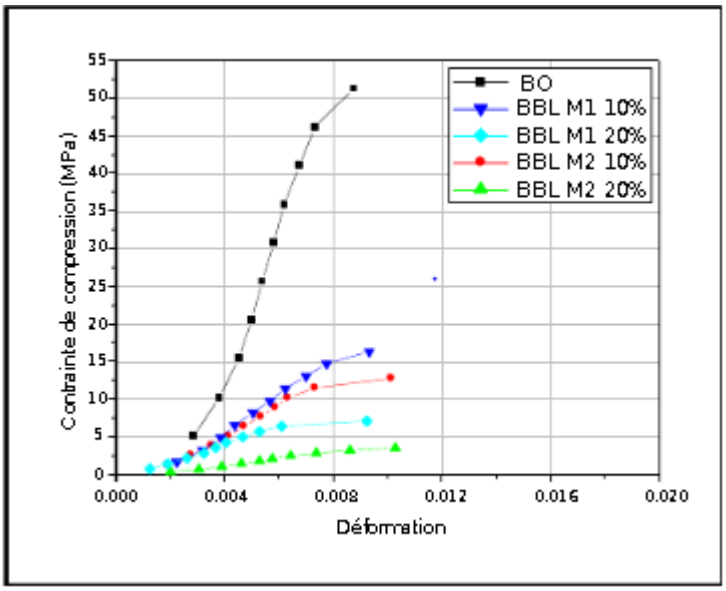


Figure II.8 : Module d'élasticité

D. Porosité

La porosité introduite est reliée à la densité apparente ρ du béton [34] expansé par la relation suivante :

$$\rho i = \frac{\rho - \rho p}{\rho b} \text{ .....(2)}$$

I.SAITI [3] a étudié la porosité du béton cellulaire, la **Figure II.9** présente les résultats trouvés

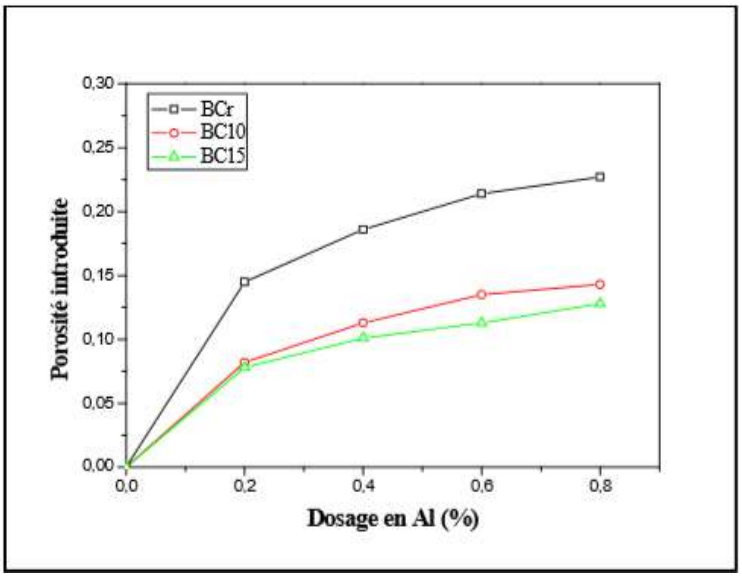


Figure II.9 L'évolution de la porosité introduite en fonction du dosage en poudre d'aluminium. [34]

Notons que les porosités les plus grandes (environ 0.23) sont obtenues avec la composition de mortier (1/3) BCr (100% ciment), et les plus petites avec la composition BC15 (15% fines + 85% ciment). Cette diminution dans la porosité montre que la capacité de réaction de mélange (fines+ciments) avec l'agent expansif est moins importante qu'avec le ciment seul. Selon la référence les propriétés hydrauliques du liant et la rhéologie de pâte dépendent de la quantité d'eau, qui influe considérablement sur la réaction chimique avec le liant et l'agent expansif [34].

D'après Z. Damene [37] et la figure **II.10** indiquent une croissance de la porosité jusqu'au dosage de 0.4% après lequel elle diminue légèrement, ce qui explique la quantité d'Aluminium n'influe plus après ce seuil.

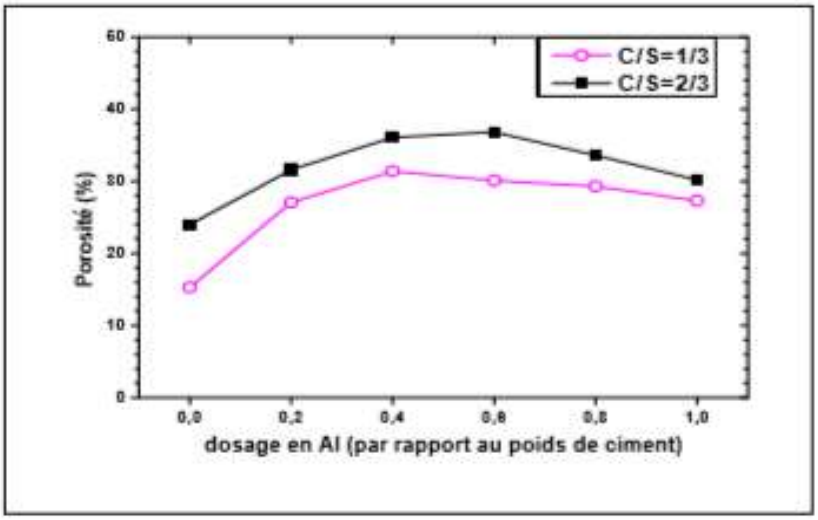


Figure II.10 Variation de la porosité en fonction du dosage d'Aluminium des compositions (C/S=1/3 et C/S=2/3). [37].

E. Le retrait

Le béton possède une structure extrêmement complexe, formée de matériaux de natures minéralogiques différentes et d'une phase liquide dont l'influence est importante. Lorsque l'on observe une pièce de béton aussitôt après gâchage, on constate qu'en l'absence de toute force extérieure, elle change de volume, cette propriété qui a pris le nom de retrait est très souvent à l'origine des fissures que l'on trouve fréquemment dans presque tous les types d'ouvrages en béton. Ces fissures de retrait sont provoquées par la contraction du béton dont les mouvements sont partiellement ou complètement empêchés. La diminution de volume provoque des contraintes internes de traction qui peuvent être à l'origine des fissures de la pâte [34]

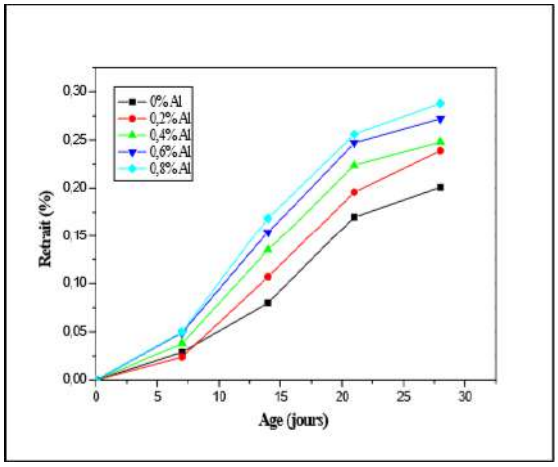


Figure II.11 Evolution du retrait en fonction l'âge du béton (BC10)

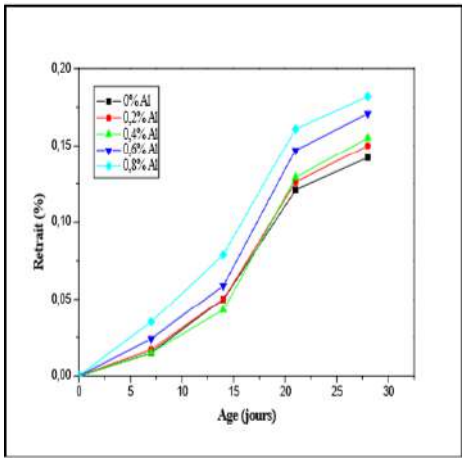


Figure II.12 Evolution du r du béton (BC10)

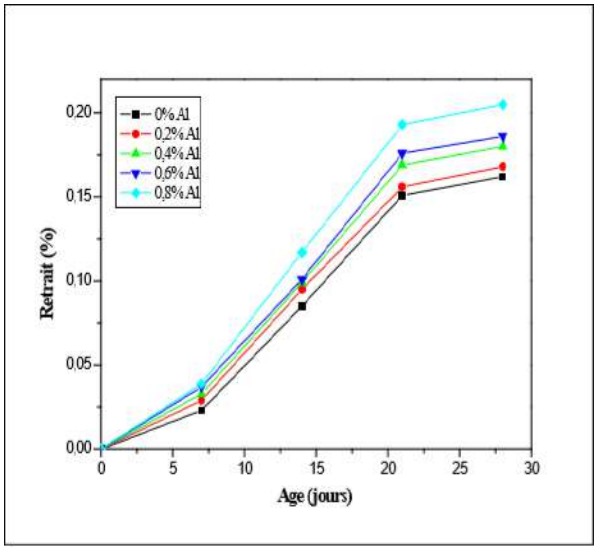


Figure II.12 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC15).

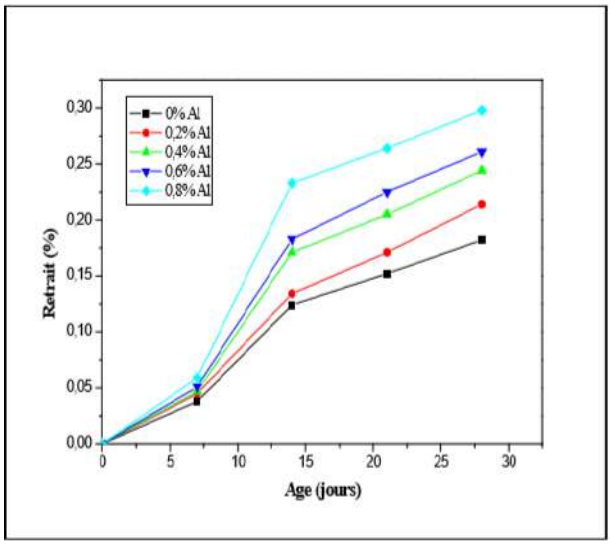


Figure II.13 Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC15S).

Pour le cas des bétons élaborés, on constate pour le BC10 et le BC15 que le retrait évolue rapidement pendant les premiers jours, mais, au-delà du quinzième jour, il commence à évoluer lentement avec une tendance à la stabilisation après le 21ème jour. On remarque que quelque soit le pourcentage d'agent expansif, le retrait est inférieur à celui du béton témoin BCr. La substitution du ciment par les fines (argiles calcinée) diminue le retrait du béton ce qui confirme les résultats faible du retrait par rapport au béton témoin (Liant=100% ciment) **figure II.12**

Le BC15S, nous constatons que le retrait évolue rapidement pendant les premiers jours, mais, au-delà du 10ème jour, il commence à évoluer lentement avec une tendance à la

stabilisation après le 21ème jour, pour les différents pourcentages d'agent expansif (poudre d'Aluminium), nous remarquons que la substitution du 15% de sable de dune par les fines (argiles calcinée) favorise le retrait par rapport au béton témoin.

F. l'absorptivité

L'absorption est la tendance du béton à prendre de l'eau en l'absence d'une pression hydraulique externe. Ceci est censé se produire presque totalement dans les pores capillaires en dehors du gel. L'eau liquide est tirée dans ces pores grâce à la tension superficielle. L'absorption est le mécanisme principal par lequel le béton sec ou partiellement sec prenne l'eau. Si l'eau contient des produits chimiques nocifs, ceux-ci pénétreront également dans le béton. Plus les pores sont petits, plus l'aspiration est grande, ainsi la sportivité et l'absorption d'eau est principalement contrôlée par la porosité capillaire. [34]

La sorptivité est définie par l'équation suivante :

$$M(t) = A \cdot \sqrt{tw}$$

Tel que :

M(t) eau absorbée par unité de surface (kg/m2) pour une période t
A : coefficient d'absorption d'eau (kg/(m2.s 0.5)) .
tw = temps en contact avec l'eau (secondes)

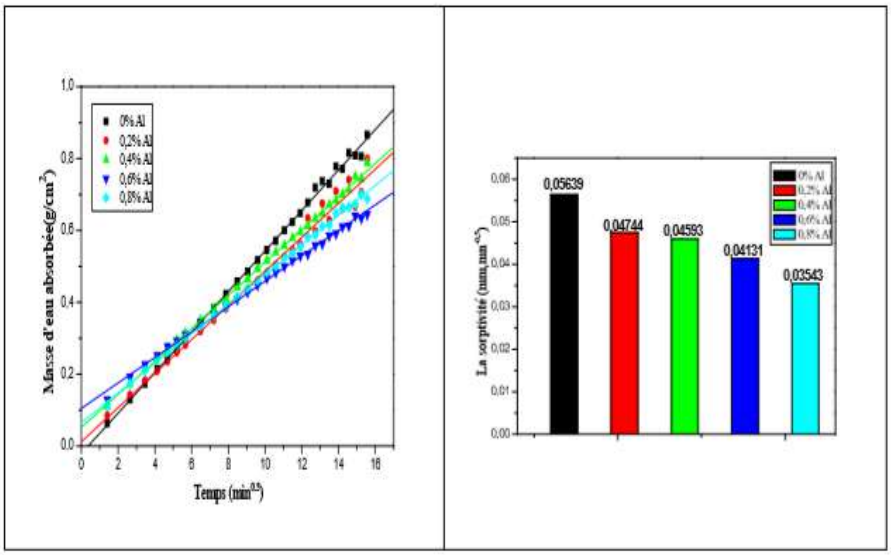


Figure II.14 Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BCr). [34]

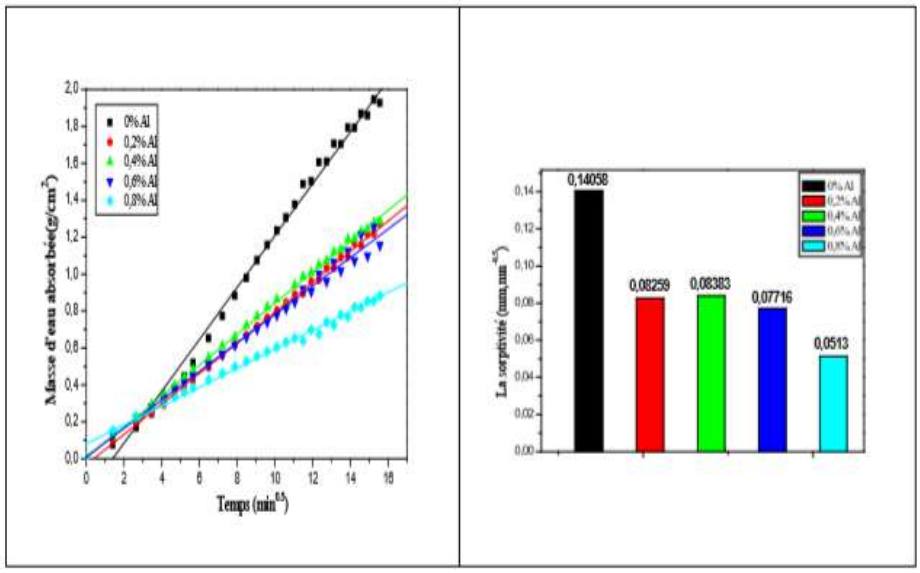


Figure II.15 Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sportivité du béton cellulaire (BC10). [34]

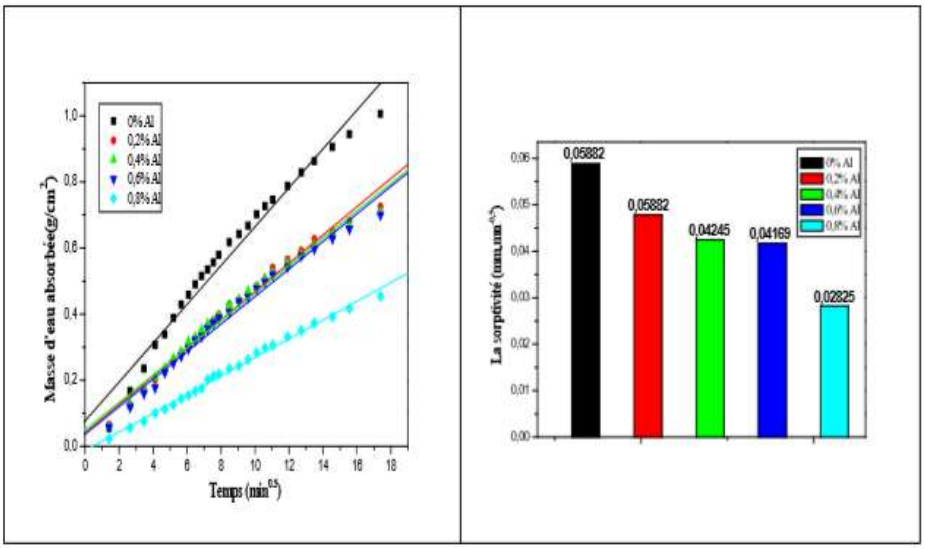


Figure II.16 Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BC15). [34]

Les bétons cellulaires BCr, BC10 et BC15 les valeurs de la sorptivité sont comprises entre 0,028 mm.$min^{-0.5}$. et 0,14 mm. $min^{-0.5}$. En effet, Celle-ci diminue en fonction du dosage en agent expansif jusqu'à la teneur 0.8% Al selon la figure **1I.15** Dans ce contexte**,** les résultats prouvent que les bétons cellulaires élaborés par [34] sont des matériaux peu ou pratiquement non absorptifs, car la sportivité du béton cellulaire est inférieure à celle de béton témoin. Donc, la diminution est en fonction de l'augmentation du contenu d'agent expansif. Ceci peut être dû à la réduction du contenu de pâte. Dans le cas de sportivités, le chemin

tortueux accru pour la migration d'eau conformément à la proportion de vides aériens a tendance à freiner le phénomène de transport aussi [41].

G. Aspect et structure du béton cellulaire à l'échèle macro et microscopique

Le béton cellulaire est caractérisé par un multitude de bulles d'air emprisonnées dans des cellules qui lui confèrent leur légèreté. C'est la présence de nombreuses cellules minuscules qui détermine la structure du béton cellulaire. Il est fabriqué en différentes masses volumiques pouvant varier entre 350 et 650 kg/m3. Les cellules occupent 80% du volume total. On distingue deux sortes de cellules : les microcellules (0,5 - 2 mm) formées lors du dégagement d'hydrogène et les microcellules, de dimension capillaire, formées lors de l'expansion de la masse et réparties dans la partie consistante de cette masse. [36]

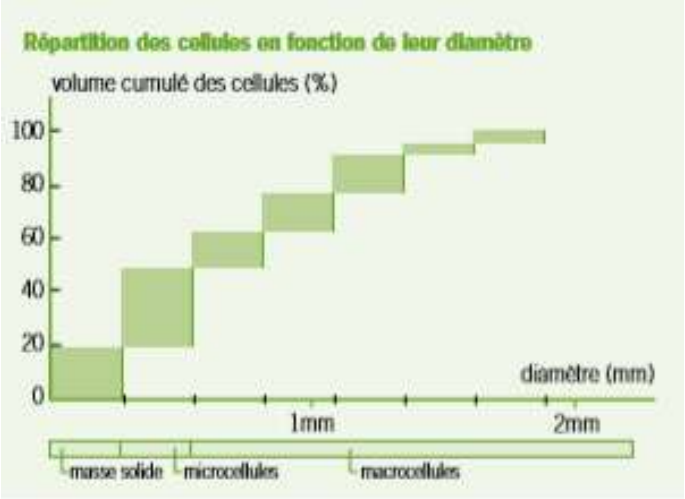


Figure II.17: .Répartition des cellules en fonction de leur diamètre

Pour un béton cellulaire de 450 kg/m3, la répartition en volume des cellules est de :

- Microcellules 50%
- Microcellules capillaires réparties dans la masse solide 30%

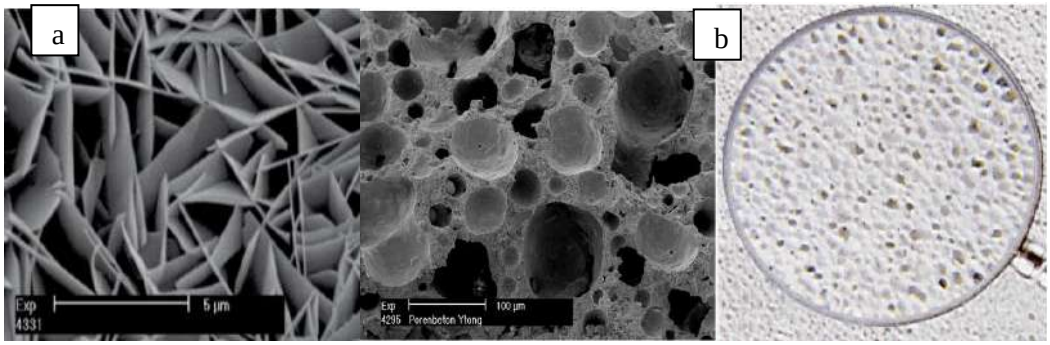


Figure II.18: a) Microcellule[36] b) Microcellules[36]

Comme le montre **la figure II.8,** la structure du matériau se compose de parties pleines et d'une infinité de pores formées par l'hydrogène, l'air et l'eau présents au moment du coulage et de l'expansion. Suivant les dimensions et les caractéristiques physiques des pores, on distingue les micropores et les macro-pores. La structure des pores a une influence sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau. [53]

Au total le volume d'air représente donc 80% du volume du béton cellulaire, tandis que la masse solide est de 20%. 1m 3 de matières premières permet donc de produire 5m 3 de matériau de maçonnerie en béton cellulaire. Cette très grande économie de matières premières est l'un des aspects écologiques du béton cellulaire. A titre d'information, la surface des cellules dans 1 kg de béton cellulaire est de 20 m2. Reportée au m3, elle est de +/- 10.000 m2. [36]

II.7.2 Les propriétés thermiques

Les bétons cellulaires constituant des matériaux de porosité élevée possèdent une faible masse volumique et, partant, se caractérisent par une résistance mécanique relativement basse. Une liaison semblable, mais de nature opposée, existe entre la masse volumique et le coefficient de conductibilité thermique, qui est un indice des bétons cellulaires particulièrement important. [54]

❖ La Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction [42]. Et d'après Z. Damene [62] la conductivité thermique des différentes compositions mesurées dans l'état sec et l'état saturé sont tracés en fonction du dosage d'Aluminium dans la **figure II.19**.

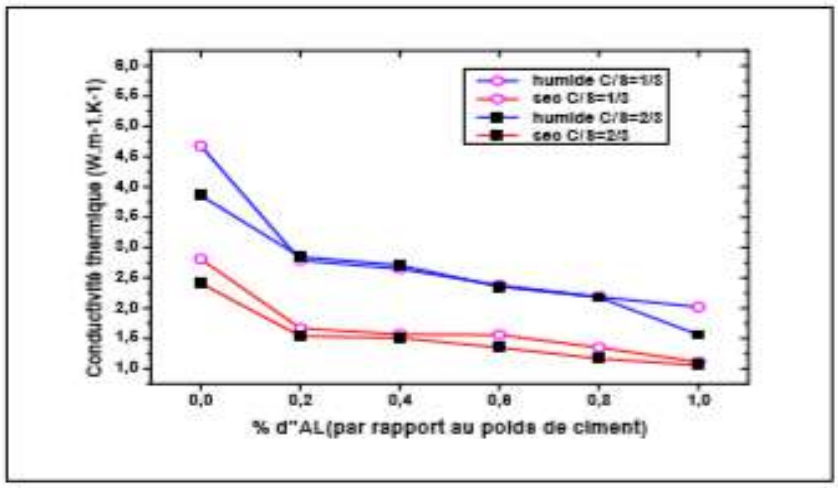


Figure II.19 Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage d'Aluminium des compositions (C/S=1/3 et C/S=2/3). [37]

Nous voyons claire que la conductivité thermique diminue lorsque la teneure massique en poudre d'aluminium augmente. Cette diminution est de l'ordre de 40% et 36% pour les compositions 1/3 et 2/3 à l'état sec respectivement. Concernant l'état humide, l'effet du pourcentage de la poudre d'aluminium sur les composites est le même effet que l'état sec. En revanche, la saturation maximale, mène à l'augmentation de la conductivité thermique pour les quatre compositions. Ceci est dû au remplacement d'une phase moins conductrice (air) par une phase plus conductrice (eau). [37]

Pour la gamme des bétons élaborés par I.SAITI [34], la conductivité thermique est inférieure à 0,60W.m-1.K-1. Une valeur de 0,502 W.m-1.K-1 est enregistrée pour le BC15S pour un dosage en aluminium de 0.8% contre 0,622 W.m-1.K-1 pour le BCr. Donc les valeurs des conductivités thermiques obtenues à sec sont conformes aux recommandations de la RILEM qui préconise un coefficient de conductivité thermique inférieur à 0,75 W.m-1.K-1 pour un béton léger de construction et d'isolation (classe II) et une résistance à la compression supérieur à 3,5 MPa. [34]

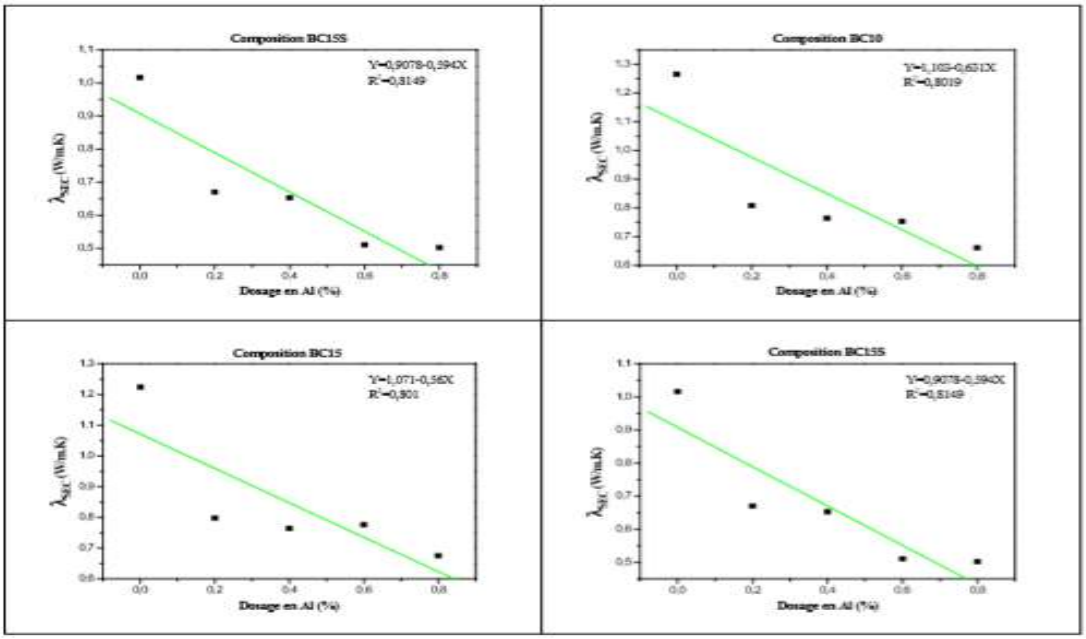


Figure II.20 Evolution de la conductivité thermique en fonction du dosage en agent expansif. [34].

II.8. Utilisation du béton cellulaire

Les produits en béton cellulaire sont indiqués pour tous types de construction : habitations unifamiliales, appartements, bureaux, garages, magasins, écoles, hôpitaux, bâtiments industriels, secteur agricole, etc. Les blocs sont utilisés aussi bien en murs intérieurs qu'extérieurs, portants ou non portants. Les dalles de mur (dalles de bardage) sont principalement utilisées en bâtiments industriels et grandes surfaces commerciales. Les dalles de toiture sont destinées aux constructions industrielles grandes ou petites, mais aussi aux habitations groupées ou unifamiliales, aux bureaux et aux bâtiments d'hébergement. Alors que le béton cellulaire est généralement utilisé pour son excellente isolation thermique, il est particulièrement apprécié pour conserver la fraîcheur des bâtiments en été. La mise en œuvre du béton cellulaire étant plus facile et plus rapide qu'avec des matériaux traditionnels il participe largement à la diminution des coûts de construction. [38]

1. Éléments armés

- **Dalles de bardage (Panneaux de façade) :** Les dalles de mur sont généralement utilisées en combinaison avec une ossature en béton, en acier ou en bois. La mise enouvre peut être horizontale ou verticale. Elles sont placées devant ou entre les colonnes .Elles sont autoportantes et superposables jusqu'à des hauteurs usuelles en

constructions industrielles. Certains éléments peuvent être spécialement renforces pour reprendre des charges particulières (par exemple: allèges, linteaux, frontons, silos a pomme de terre [40]



Figure II.21 Dalles de bardage [40]



Figure II.22 Panneaux de façade [40]

➢ Dalle de plancher

Les dalles de plancher en béton cellulaire armé porteuses et isolantes sont destinées à la réalisation de planchers. Elles sont adaptées à un emploi sur vide sanitaire ou en tant que plancher intermédiaire. Elles rendent inutiles les coffrages et étaiements et diminuent considérablement le volume de béton à couler ; la dalle de compression est, en effet, évitée, et seuls les joints entre dalles sont à claveter. .Les dalles de plancher en béton cellulaire apportent de nombreux avantages : [40]

● Pose directe à sec.
● Rapidité de mise en ouvre (100 m2 en 5 h).
● Praticabilité immédiate.
● Absence de coffrage, de temps de séchage ou d'étai de soutien.
● Excellente isolation thermique.
● Solution idéale pour les chauffages par le sol [53]



Figure II.23 Dalles de plancher [40]

➢ Dale de cloison intérieure :

Il s'agit de panneaux de séparation livrés à hauteur d'étage en épaisseur 70 et 100 mm. Ils conviennent tout particulièrement pour la réalisation des cloisons non portantes en appartements, bureaux, homes… Ce système présente les avantages suivants :

• pose rapide

• finition mince, moins coûteuse

• résistance au feu exceptionnelle Épaisseur 70 mm - EI 180 min Épaisseur 100 mm - EI 180 min [40]



Figure II. 24 : Dalles de cloison intérieure [40]

2. Eléments non armés

➢ Les dalles de mur :

Murs sont destinées à être posées soit horizontalement soit verticalement.

Elles sont utilisées pour la construction de :

• Murs posés contre une ossature métallique, en béton ou en bois dans les bâtiments à caractère industriel ou commercial;

• Murs portants pour la construction de bureaux ou de logements jusqu'à trois niveaux. Dans ce cas, ils sont toujours posés verticalement ;

• Murs coupe-feu, compartimentage.

Les murs en dalles de béton cellulaire sont:

• Économiques et de poses rapides;

• Thermiquement très performants et participent large- ment au confort d'été; • Résistants au feu;

• Idéaux au niveau acoustique (absorption acousti- que). [40]

➢ Dalles de toiture :

Elles sont utilisées dans tous types de bâtiments à toiture plate ou inclinée. Elles sont utilisées principale ment dans la construction de grandes surfaces tels que usines, hangars,

supermarchés, garages, logements collectifs, etc. Elles peuvent aussi prendre place dans des logements individuels conçus à cet effet. Les toitures en béton cellulaire:

• Peuvent participer au contreventement des constructions industrielles;

• Peuvent reprendre des surcharges plus importantes (lestage - toitures vertes);

• Sont thermiquement très performantes;

• Contribuent très largement au confort d'été grâce à la linéarité thermique du béton cellulaire (amortissement et déphasage thermiques…);

• Participent au confort acoustique grâce à son excellent pouvoir d'absorption acoustique. [40]

➢ Dalle de cloison

Les dalles, fournies à hauteur d'étage, conviennent particulièrement aux murs non portants dans de grands immeubles tels que bureaux, hôpitaux, cliniques, écoles, hôtels, magasins, etc. Elles sont également utilisés en logements prévus entièrement en éléments armes. Les murs de cloisonnement en dalles de cloison sont :

• un système de cloisonnement d'exécution rapide et économique ;

• très résistants au feu: Épaisseur 70 mm : EI 180 min Épaisseur 100 mm : EI 180 min • de surfaces suffisamment planes pour permettre des finitions minces ou pelliculaires [34].

Quelques exemples d'habitations construites en béton cellulaire:

Tableau II.2 Quelques exemples d'habitations construites en béton cellulaire:

 Nouvelle maison, gros œuvre	 Intérieur d'une mosquée en béton cellulaire

 BORJ EL ARAB-DUBAI [44]	 Centres commerciaux Belgique [44]
 Bâtiments industriels Belgique [44]	 Immeubles résidentiels –Tunisie [44]

II.9 Les avantages et les inconvénients du béton cellulaire

II 9.1 Les avantage

- 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
- C'est 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). [34]
- C'est 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. [34]
- C'est 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

- C'est 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.
- Ce matériau, à la fois traditionnel et moderne, est adapté à la majorité des constructions, aussi bien pour l'habitat individuel ou collectif que pour les bâtiments industriels [34]
- Le volume d'air représente 80% du volume total du béton cellulaire, tandis que la masse solide est de 20%. 1 m3 de matières premières permet donc de produire 5 m3 de matériau de maçonnerie en béton cellulaire. Cette très grande économie de matières premières est l'un des aspects écologiques du béton cellulaire.
- A titre d'information, la surface des cellules dans 1kg de béton cellulaire est de 20m2 ; reportée au m3. [34]

- Le béton cellulaire permet d'atteindre de bonnes performances en hiver, et c'est surtout son comportement en été qui reste son principal atout dans un contexte de réchauffement climatique. En effet, la bonne inertie thermique du béton cellulaire lui permet d'amortir les pics de températures extérieures. Par exemple, pour un bloc de 30 cm, on obtient un déphasage de 13.5 heures (idéalement au moins 12 heures) et une excellente atténuation des amplitudes thermiques. La chaleur se diffuse donc peu et lentement dans la maison. Bloc béton cellulaire 30 cm, masse volumique de 350 kg/m3, capacité thermique de 1000 J/(kg.K) [46]

II. 9.2 les inconvénients du béton cellulaire

Un matériau fragile

Le béton cellulaire est un matériau léger et simple à utiliser. Revers de la médaille : il est assez fragile et surtout friable, ce qui rend sa pose délicate. Une caractéristique à bien connaître notamment lorsque l'on veut sceller ou fixer des objets dans du béton cellulaire. L'utilisation de chevilles de fixation et de scellement spécifiques est obligatoire pour ce type de matériau, sous peine de le dégrader.

D'autre part, le béton cellulaire est susceptible de se fissurer plus facilement que d'autres matériaux utilisés en construction, comme les briques ou les parpaings par exemple. [47]

Des risques pour la santé ?

Malgré son côté écologique mis en avant, le béton cellulaire est suspecté par certaines études de causer des problèmes de santé graves tels que certains cancers ou la maladie d'Alzheimer. D'autres études viennent cependant contredire ces résultats. [47]

II. 10 Recyclage

En cours de fabrication, les chutes liées au découpage des produits aux dimensions voulues, sont intégralement réintégrées au circuit. Apres l'autoclavage, quelques surplus, limités à quelques pourcentages, sont broyés et récupérés pour d'autres usages. La poudre d'aluminium, utilisée en très faible quantité (0,05%), est elle même un produit de recyclage**.** [40].



Figure II. 25 Recyclage du béton cellulaire

II.11.Qualité de vie

Par ses qualités d'isolation et d'inertie thermiques, le béton cellulaire assure non seulement des économies d'énergie et le respect de l'environnement, mais contribue à un confort de l'habitat tout à fait particulier, tant en été qu'en hiver. Les murs construits uniformément en béton cellulaire ne présentent pas de ponts thermiques et évitent ainsi les condensations et les moisissures qui en résultent. Grace à leur valeur μ de résistance a la diffusion de vapeur d'eau très favorable, Les murs en béton cellulaire respirent bien et contribuent à la qualité de l'air ambiant des locaux [52]

II.12 Impact environnementale et économique du béton cellulaire

Le béton cellulaire à plus d'un titre au respect de l'environnement du fait que son industrie s'engage sur la voie de l'économie des ressources naturelle et de l'énergie, ainsi qu'à l'importance du recyclage et le traitement des déchets de fabrication et de chantier. Ses qualités environnementales ont fait de lui un produit favorable dit « propre » ou « vert » un label décerné par le laboratoire de l'analyse environnementale des matériaux de construction OutriRhin en Allemagne. [34]

- Les matières premières nécessaires à la fabrication de béton cellulaire existent en abondance dans la nature et le béton cellulaire n'en abuse pas, puisque 500 kg à peine suffisent à produire 1m3 de produit fini, soit 1/3 environ de ce qui est nécessaire pour fabriquer d'autres matériaux de gros œuvre.
- Grâce au procédé d'autoclavage utilisé en cours de fabrication, 200 kWh/m3 suffisent à produire 1m3 de béton cellulaire
- Près de 90% de la vapeur d'eau produite pour l'autoclavage est réinjectée dans le circuit.
- Grâce à la légèreté du matériau, le transport est réduit tant pour ce qui concerne les matières premières que pour les livraisons sur le chantier.
- La fabrication du béton cellulaire ne dégage aucun gaz toxique et n'entraîne aucune pollution de l'eau.
- Par ses qualités d'isolation et d'inertie thermiques, le béton cellulaire assure non seulement des économies d'énergie et le respect de l'environnement, mais contribue également à un confort de l'habitat tout à fait particulier, tant en été qu'en hiver

- Le béton cellulaire à faible densité (600 kg/m3) est plus économique que le béton régulier mais celui de moyenne densité (1200 kg/m3) revient à un prix équivalent. Par contre, par sa rapidité et sa facilité de mise en place, le béton cellulaire réduit les coûts de main-d'œuvre grâce à sa légèreté, il réduit ainsi le coût de l'acier d'armature dans les ouvrages de béton armé. [49]

Conclusion

Nous pouvons conclure par la réponse de la question du chapitre précédent, « si le béton cellulaire est une richesse pour l'environnement ? »

D'abord, le béton cellulaire est fabriqué à partir d'un mélange de sable, ciment, chaux et gypse. Une faible quantité d'agent d'expansion est ensuite ajoutée afin de provoquer la réaction chimique qui donnera la texture aérée. De plus, Son pouvoir isolant étant intrinsèque, le béton cellulaire garantit une résistance acceptable pour l'utiliser comme des éléments structuraux.

D'ailleurs, il est utilisé à la fois porteur et isolant. Avec une conductivité thermique λ de 0,09 W/m.K, il est aujourd'hui le composite à isolation répartie le plus performant. Donc va affaiblir le bilan de consommation énergétique. Ainsi, dans le but de conserver les ressources naturelles, il nous ait paru évident d'utiliser ce type de béton car il est relativement faible proportion de matières dans le bloc (80 % d'air).

Orientation de l'étude

Le but de cette étude est de concevoir un béton cellulaire préliminaire à partir de mortier ordinaire en ajoutant de la poudre d'aluminium, par sa réaction avec les composantes de ciment hydraté qui produisent le gaz (H2), et donc le mélange devient cellulaire.

Notre objectif à travers cette étude, c'est d'examiner l'effet du pourcentage de poudre d'aluminium sur le mortier d'une part. D'autre part, les résultats obtenus sont comparés à des recherches utilisant de la chaux, du gypse et de la poudre d'aluminium.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références

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

[2] 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.

[3] https://www.ideal-decor.fr/beton-leger/

[4] MOHELLEBI Samira Thèse doctorat : « Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites» 29 Mai 2014.

[5] Bederina .M: Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de

Déchets de bois. Thèse de doctorat, l'ENP d'Alger (2007).

[6] **RILEM**: Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13 (1970), pp60-69

[7] **Goual M. S** : Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : Caractérisation et comportement thermohydrique; Thèse Doctorat d'état. L'ENP d'Alger (2001)

[8] **COQUILLAT, G.** (1976), "Bétons légers de structure", *Le bâtiment, bâtir*.

[9] **HOLM, T.A., OOI, O.S. and BREMMER, T.W. (2004),** "Moisture Dynamics in Lightweight Aggregate and Concrete", ESCSI Publication # 9340.

[10] **[BOUROUIS MOHAMED],** Etude de l'effet des hautes températures sur l'évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recycles (brique concasse) Université Mohamed khider-Biskra 2013.

[11] JACOBS & MAYER: Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete October 14-16 1992

[12] **GESOGLU M., OZTURAN T., GUNEYISI E.,** Effects of fly ash properties on

Characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates, Construction and Building Materials, 2006.

[13] **[Reynouard et Pijaudier-Cabot]** comportement mécanique du béton, mécanique et ingénierie des matériaux. Série matériaux de construction, hermès science 2005.

[14] DJAKAM .I: *« Elaboration d'un béton léger à partir des Matériaux locaux» 2015/2016*

[15] **LAOUD B** : article « *Caractérisation mécanique et physique d'un béton léger à base de sable calcaire et des granulats de liège»* en 2013.

[16] ARNOULD 86 : granulats de béton légers, Paris (1986).

[17] ***Laidi .W & Ben Yahia .N***: élaboration d'un composite a bas de granulat légers *2014/2015*

[18] [ZHA 2, 1991] ZHANG, M.-H. and GJØRV, O.E. (1991), "Mechanical Properties and High-Strength Lightweight Concrete", *ACI Materials Journal*, 88 (2), 150-158.

[19] **AIFA .S & GHELIAOUI .M** «Etude du comportement des bétons légers à haute température » 2018

[20] **SHINK, M. (2003),** "Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers", Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec

[21] THOMAS CALAIS [PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET DURABILITÉ D'UN BÉTON LÉGER] 2013

[22] **[GAWESKA. H]**. Comportement à haute température des bétons à haute performance. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, école Polytechnique de Cracovie. gradients et des incompatibilités de déformation. 2004.

[23] Thèse *doctorat « caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation »* 2008.

[24] Agoumimelcha.A : *« Formulation et caractérisation d'un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage des boues de barrage»* 2016/2017.

[25] Zitouni .M : *«* Etude des propriétés physico-mécaniques des composites écologiques applications sur les bétons allégés par les billes de PSE et les grains de liège » 2018/2019

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

[27] **[K. MILLED]:** «Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé». Thèse de Doctorat. L'école Nationale Des Ponts Et Chaussées. 21 Novembre 2005.

[28] **[Melle. KAOUANE]** Malika- Mémoire de Magister Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI OUZOU.2011

[29] [**BENNACER .S CHEBABHI .M**] Elaboration d'un béton de plâtre allégé par des

Déchets industriels en vue de leur utilisation dans l'isolation des bâtiments. 2016 /2017

[30] **BOUHADJERA .M** Effet du rajout des fibres en polypropylène sur les caractéristiques mécaniques d'un béton cellulaire ; 2019

[31] https://www.infociments.fr/reduire-les-emissions-de-co2/et-flotte-leolienne-sur-du-beton-leger

[32] http://blogs.esanjoaquin.com/v/30/parrotts-ferry-bridge-a-sagging-story-to-tell/alleytravel/2014/07

[33] http://www.stevengrover.com/97-02-berkeley-i-80-bridge

[34] **SAITI Issam** Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable d'une de la région de GHARDAIA, Mémoire de magister, université d'Ouargla 2014, 90 pages

[35] Collectif syndicat national des fabricants de béton cellulaire, construire en béton cellulaire, Editeur Eyrolles 2011, page 14-15

[36] Le Béton Cellulaire Matériau d'Avenir 119 pages

[37] Z. Damene*, M. S. Goual, I. Saiti, N. Benhassine, A. Ferhat UDY OF THE EFFECT OF ALUMINUM CONTENT AND C / S RATIO ON THE PHYSICO-MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF A LIGHTWEIGHT CONCRETE MADE FROM SAND DUNE

[38] le béton cellulaire matériau d'avenir Febecel 207 pages

[39]Construire en béton cellulaire (SYNDICAT NATIONAL DES FABRICANTS DE BÉTON CELLULAIRE)

[40] Benmalek Med Larbi Construction en béton cellulaire. Avantages et inconvénients 2018 80 pages

[41] M. ABIB Zine Eddine. Formulation et carctriratoin des bétons autoplçant s
[42] www.ciment.wikibis.com

[43] NARAYANAN.N and RAMAMURTHY.K: Structure and proprieties of aerated concrete; a review: cement and concrete research (2000)

[44] EZ-ZAHIA. Blocs Béton cellulaire -Thermopierre- 7 pages

[45] Alex. maçonnerie : construire un mur en béton cellulaire 16 novembre 2011 http://www.dessine-moi-une-maison.fr/2011/3046/maconnerie-siporex-ytong-construire-un-mur-beton-cellulare.html

[46] https://conseils-thermiques.org/contenu/beton-cellulaire.php

[47]http://www.gramme.be/unite9/pmwikiOLD/pmwiki.php?n=PrGC0910.B%E9tonCellulaire

[48] www. conseil thermique béton cellulaire .com

[49] Le béton cellulaire : de multiples applications pour la construction durable

[50] AISSAOUI Walid. : Etude expérimentale des propriétés mécaniques des bétons élaborés à base de granulats en caoutchou .juin2018

[51] R. Cabrillac, B. Fiorio, A. Liss Beaucour, H. Dumontet, S. Ortola. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity. Construction and Building Materials 20 ; 2006 ; 286-295

[52] Jos Cox, Albert Ingelaere, Jacques Sizaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire : Le béton cellulaire matériau d'avenir, Belgique, fédération Belge du béton cellulaire (FeBeCel). Année non notée sur le document

[53]R. Belouettar, J.R. Klepaczko, M.T. Abadlia « Etude du comportement mécanique du béton cellulaire autoclave produit en Algérie ». Sciences & Technologie – N°18, Décembre (2002), pp. 49-54

ANNEXE



50kg

متين
Matine

LAFARGE



Ciment pour béton exigeant

CPJ - CEM II/B 42.5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments.

Matine
CPJ - CEM II/B 42.5 N.

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA 442) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT

- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitants un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable (sec)	Gravillons (sec)	Eau (litres)
Dosage pour béton C25/30	X 1	+ X 2	+ X 3	+ X 4	+ 25 L

Remaque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



LAFARGE ALGÉRIE
Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie
Tél. : 213 (0) 21 98 54 54
Fax : 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com

-Les balances	-Mortiers
	
Malaxeur	**Broyeur**
	

l'essai de conductivité thermique	l'essai ultra son
	