

Ordre ...../F.S.S.A/UAMOB/2021

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA**



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**TALEB Oualid**

**SELLAMI Abdeldjelil**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2** :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

**Thème :**

**Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'un mortier léger.**

**Devant le jury composé de :**

Mr. KENNOUCHE Salim  
Mr. HAMI Brahim  
Mr. ARIBI Chouaib

MCB UAMOB  
MCB UAMOB  
MCB UAMOB

Président  
Encadreur  
Examineur

**Année Universitaire 2020/2021**

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord nous tenons à remercier ALLAH pour nous avoir donné la force et la patience de compléter ce travail.*

*Nous remercions aussi notre promoteur, les membres de jury, le staff du laboratoire des matériaux de notre département, le staff de la société GRANU CENTRE, le staff du laboratoire CNERIB, et toutes les personnes qui nous ont aidés tout au long de la réalisation de ce travail.*

## DÉDICACE

*Je dédie ce travail à ma mère, mon père, mes sœurs, et mes frères.*

**-OUALID**

*Je dédie ce travail à mes parents et ma famille.*

**-ABDOU**

- **Résumé**

Le béton est le matériau de construction le plus produit et utilisé dans le monde, en raison de son utilité et son coût qui n'est pas trop chère. Néanmoins, l'un des inconvénients du béton ordinaire est son poids propre élevé. Le poids propre élevé du béton courant affecte le coût des constructions. Pour diminuer le poids propre du béton, les agrégats grossiers sont remplacés partiellement par des agrégats légers. Ce nouveau matériau est le béton léger qui a une masse volumique réduite, et une isolation thermique améliorée.

Il y'a deux types des agrégats légers : agrégats légers naturels et agrégats légers artificiels. L'un des agrégats légers les plus disponibles est l'agrégat de liège, qui est utilisé dans notre étude pour remplacer le sable. Notre béton léger est élaboré en remplaçant le sable par le liège avec 10%, 20%, 30%, 40%, et 50%.

Différents essais ont été réalisés pour déterminer les propriétés d'isolation thermique et les propriétés physico-mécaniques du mortier léger par rapport au mortier ordinaire.

**Mots clés :** Mortier léger, Liège, Isolation thermique, Propriétés physico-mécaniques.

- **Abstract**

Concrete is the most commonly used and manufactured building material in the world, owing to its usefulness and relatively low cost. Nonetheless one of the disadvantages of conventional concrete is its high self-weight. This heavy self-weight of concrete will result in uneconomical structural material. To decrease the self-weight of concrete, the coarse aggregate is replaced partially by lightweight aggregate. This is known as lightweight concrete, which have reduced density, and improved thermal insulation.

There are two types of lightweight aggregate: natural lightweight aggregate and artificial lightweight aggregate. One of the most commonly available natural lightweight aggregate is cork aggregate, which is used in our study as a replacement for sand. Cork aggregate is used because of its lower density compared to sand, and it is easily available. Our lightweight mortar is prepared by partially replacing the sand with cork aggregate by 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%.

Several tests have been conducted to determine the thermal insulation properties and the physico-mechanical properties of cork lightweight aggregate mortar relative to conventional mortar.

**Key words:** Lightweight mortar, Cork, Thermal insulation, Physico-mechanical properties.

## • ملخص

الخرسانة هي مادة البناء الأكثر استخدامًا وتصنيعًا في العالم نظرًا لفوائدها وتكلفتها المنخفضة نسبيًا. ومع ذلك، فإن أحد عيوب الخرسانة التقليدية هو وزنها الذاتي المرتفع. يؤثر هذا الوزن الثقيل للخرسانة على تكلفة البناء مادة. لتقليل الوزن الذاتي للخرسانة، يتم استبدال الحصى الخشن جزئيًا بالحصى الخفيف الوزن. تُعرف المادة الناتجة باسم الخرسانة خفيفة الوزن، والتي تتميز بكثافة منخفضة وعزل حراري محسن.

هناك نوعان من الحصى خفيف الوزن: الحصى الطبيعي خفيف الوزن والحصى الخفيف الوزن الاصطناعي. حصى الفلين هو ركام طبيعي متوفر بكثرة، وهو الذي استخدمناه في دراستنا كبديل للرمل. يستخدم حصى الفلين بسبب كثافته المنخفضة مقارنة بالرمل، وهو متوفر بسهولة. تم تحضير الملاط خفيف الوزن الخاص بنا عن طريق الاستبدال الجزئي للرمل مع حصى الفلين بنسبة 10% و20% و30% و40% و50%.

تم إجراء العديد من التجارب لتحديد خصائص العزل الحراري والخصائص الفيزيائية والميكانيكية للملاط التقليدي مقارنة بملاط الفلين خفيف الوزن.

**الكلمات المفتاحية:** الملاط خفيف الوزن، الفلين، العزل الحراري، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

## Sommaire

Introduction générale.....	1
Objectif de l'étude.....	1
Organisation de l'étude .....	1
I.Généralités sur le béton léger.....	3
I.1.Introduction.....	3
I.2.Le béton léger .....	3
I.3.Les types des bétons légers .....	3
I.3.1.Béton de granulats légers .....	4
I.3.1.1.Différents types de granulats légers .....	5
I.3.2.Béton caverneux .....	7
I.3.3.Béton cellulaire .....	7
I.4.Classification des bétons légers .....	9
I.4.1.Bétons légers de structure .....	9
I.4.2.Bétons légers de résistance modérée.....	10
I.4.3.Bétons légers de faible résistance .....	10
I.5.Caractéristiques principales des bétons légers .....	10
I.5.1.La masse volumique .....	11
I.5.2.La durabilité .....	11
I.5.3.La rhéologie à l'état frais .....	11
I.5.4.Les propriétés mécaniques .....	11
I.6.Les avantages des bétons légers [14] .....	11
I.6.1.Avantages techniques.....	11
I.6.2.Avantages de mise en œuvre.....	12
I.6.3.Avantages économiques.....	12
I.7.Les inconvénients des bétons légers .....	12
I.8.Différence entre Bétons Ordinaires et Bétons Légers.....	12
I.9.Domaine d'utilisation des bétons légers .....	13
I.9.1.Bétons d'isolation pure, non porteurs .....	13
I.9.2.Bétons porteurs et isolants .....	13
I.9.3.Bétons légers de structure .....	14
I.10.Conclusion .....	14
II.Étude bibliographique.....	15
II.1.Premier article.....	15
II.1.1.Introduction .....	15
II.1.2.Résultats et discussion .....	15
II.1.3.Conclusion .....	17
II.2.Deuxième article.....	18
II.2.1.Introduction .....	18
II.2.2.Importance de la recherche.....	19
II.2.3.Programme expérimental.....	19
II.2.4.Résultats et discussions .....	24
II.2.5.Conclusions .....	31
III.Matériaux et méthodes de caractérisation .....	33
III.1.Introduction .....	33
III.2.Matériaux utilisés .....	33

---

III.2.1.Ciment .....	33
III.2.2.Sable .....	34
III.2.3.Eau de gâchage .....	38
III.2.4.Liège .....	39
III.3.Elaboration des mortiers légers .....	42
III.4.Essais mécaniques .....	42
III.5.Essais thermiques .....	43
IV.Résultats et discussions .....	45
IV.1.Introduction .....	45
IV.2.Essais mécaniques .....	45
IV.2.1.Résistance à la compression.....	45
IV.2.2.Interprétation des résultats de la résistance à la compression .....	46
IV.2.3.Résistance à la flexion.....	46
IV.2.4.Interprétation des résultats de la résistance à la flexion trois point .....	47
IV.3.Essais physiques.....	47
IV.3.1.Absorption d'eau par immersion.....	47
IV.3.2.Interprétation des résultats de l'absorption d'eau par immersion .....	48
IV.3.3.Masse volumique .....	48
IV.3.4.Interprétation des résultats de la masse volumique.....	49
IV.4.Essai thermique .....	49
IV.4.1.Interprétation des résultats de la conductivité thermique.....	50
IV.5.Conclusion .....	50
V.Conclusion générale .....	52
VI.Perspectives.....	52

Liste des figures

<a href="#"><u>Figure I. 1: Classification des bétons légers d’après Lafarge Bétons Granulats</u></a> .....	4
<a href="#"><u>Figure I. 2: Différents granulats légers naturels</u></a> .....	6
<a href="#"><u>Figure I. 3: Différents granulats légers artificiels</u></a> .....	6
<a href="#"><u>Figure I. 4: Retrait du béton cellulaire</u></a> .....	8
<a href="#"><u>Figure I. 5: Fluage du béton cellulaire</u></a> .....	9
<a href="#"><u>Figure I. 6: Représentation schématique des différents types de béton léger d’après SHORT ET KINNIBURGH</u></a> .....	9
<a href="#"><u>Figure II. 1: Comparaison de résistance moyenne à la compression</u></a> .....	15
<a href="#"><u>Figure II. 2: Comparaison de résistance moyenne à la traction</u></a> .....	16
<a href="#"><u>Figure II. 3: Comparaison de résistance moyenne à la flexion</u></a> .....	17
<a href="#"><u>Figure II. 4: Courbes granulométriques des granules de liège minéral et vierge</u></a> .....	20
<a href="#"><u>Figure II. 5: Coupes transversales et verticales de bétons de liège de référence et vierges</u></a> ...	23
<a href="#"><u>Figure II. 6: Détails du conductimètre QUICKLINE-30</u></a> .....	24
<a href="#"><u>Figure II. 7: Maniabilité des différents mélanges</u></a> .....	25
<a href="#"><u>Figure II. 8: Viscosité plastique des composites de référence et de béton de liège vierge</u></a> ....	26
<a href="#"><u>Figure II. 9: Densité des bétons de référence et de liège vierge</u></a> .....	26
<a href="#"><u>Figure II. 10: Relation entre l'UPV et la densité des bétons</u></a> .....	27
<a href="#"><u>Figure II. 11: Porosité accessible à l'eau des différents bétons</u></a> .....	28
<a href="#"><u>Figure II. 12: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps</u></a> .....	28
<a href="#"><u>Figure II. 13: Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression</u></a> .....	29
<a href="#"><u>Figure II. 14: Comparaison entre les résultats obtenus dans ce travail et ceux rapportés par Asadi &amp; al.</u></a> .....	30
<a href="#"><u>Figure II. 15: La conductivité thermique des bétons de liège de référence et vierges</u></a> .....	31
<a href="#"><u>Figure III. 1: Analyse granulométrique</u></a> .....	38
<a href="#"><u>Figure III. 2: Représentation schématique de la structure de la paroi cellulaire du liège</u></a> .....	40
<a href="#"><u>Figure III. 3: Représentation schématique de la disposition cellulaire de liège</u></a> .....	40
<a href="#"><u>Figure III. 4: Confection d'un mortier 30%</u></a> .....	42
<a href="#"><u>Figure III. 5: Avant destruction (flexion)</u></a> .....	43
<a href="#"><u>Figure III. 6: Après destruction (flexion)</u></a> .....	43
<a href="#"><u>Figure III. 7: Avant destruction (compression)</u></a> .....	43
<a href="#"><u>Figure III. 8: Après destruction (compression)</u></a> .....	44
<a href="#"><u>Figure III. 9: Conductimètre</u></a> .....	44
<a href="#"><u>Figure III. 10: Les éprouvettes</u></a> .....	44
<a href="#"><u>Figure IV. 1: Résistance à la compression en MPa</u></a> .....	45
<a href="#"><u>Figure IV. 2: Résistance à la flexion en MPa</u></a> .....	46
<a href="#"><u>Figure IV. 3: Résultats d'essai d'absorption d'eau</u></a> .....	48
<a href="#"><u>Figure IV. 4: Masse volumique</u></a> .....	49
<a href="#"><u>Figure IV. 5: Conductivité thermique</u></a> .....	50

Liste des tableaux

<a href="#"><u>Tableau I. 1: Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87</u></a> .....	10
<a href="#"><u>Tableau II. 1: Proportions de mélange</u></a> .....	15
<a href="#"><u>Tableau II. 2: Résistance à la compression en MPa</u></a> .....	15
<a href="#"><u>Tableau II. 3: Résistance à la traction en MPa</u></a> .....	16
<a href="#"><u>Tableau II. 4: Résistance à la traction en MPa</u></a> .....	17
<a href="#"><u>Tableau II. 5: Propriétés physiques des agrégats minéraux</u></a> .....	19
<a href="#"><u>Tableau II. 6: Propriétés physiques des agrégats de liège vierge</u></a> .....	20
<a href="#"><u>Tableau II. 7: Proportions de mélange pour les bétons de liège vierges étudiés en kg</u></a> .....	21
<a href="#"><u>Tableau III. 1: Composition chimique du ciment CEM II/A 42,5</u></a> .....	33
<a href="#"><u>Tableau III. 2: Composition minéralogique du ciment CEM II/A 42,5</u></a> .....	33
<a href="#"><u>Tableau III. 3: Caractérisations mécaniques du ciment CEM II/A 42,5</u></a> .....	34
<a href="#"><u>Tableau III. 4: Caractérisations physiques du ciment CEM II/A 42,5</u></a> .....	34
<a href="#"><u>Tableau III. 5: Essai équivalent de sable</u></a> .....	35
<a href="#"><u>Tableau III. 6: Analyse granulométrique</u></a> .....	37
<a href="#"><u>Tableau IV. 1: Résistance à la compression en MPa</u></a> .....	45
<a href="#"><u>Tableau IV. 2: Résistance à la flexion en MPa</u></a> .....	46
<a href="#"><u>Tableau IV. 3: Résultats d'essai d'absorption d'eau</u></a> .....	48
<a href="#"><u>Tableau IV. 4: Masse volumique</u></a> .....	49
<a href="#"><u>Tableau IV. 5: Conductivité thermique</u></a> .....	50

### Introduction générale

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée et sable), de ciment et d'eau. Il est très demandé et son utilisation ne cessera de croître au cours ces dernières années.

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers les granulats légers naturels (liège) pour créer de nouvelles ressources de granulats afin de préserver les ressources naturelles. De plus, la confection du béton à base de liège est faite en principe pour introduire plus de légèreté aux certains éléments de construction et parfois pour des considérations purement économiques.

En pratique, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m<sup>3</sup>, en conséquence, le poids propre des éléments de béton est élevé et peut représenter un fort pourcentage de la charge sur la structure. L'utilisation d'un béton de masse volumique plus faible peut donc être bénéfique en termes d'éléments portants de sections plus petites et de la réduction correspondante en fondations. Occasionnellement l'utilisation d'un béton de masse volume plus faible peut permettre de construire sur un sol de faible capacité portante, ainsi avec ces faibles densités les coffrages subissent une pression moindre qu'avec un béton de densité normale. Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Les granulats représentent 75% du volume du béton.

### Objectif de l'étude

Parce que le monde aujourd'hui fait face à plusieurs menaces environnementales, cette étude est réalisée avec un principal objectif qui est la valorisation des déchets de liège et les recycler dans le domaine de la construction comme substitution partielle des granulats pour béton.

### Organisation de l'étude

Ce mémoire est divisé en deux parties :

- Partie théorique.
- Partie Pratique.

Chaque partie contient deux chapitres :

La première partie (théorique) qui contient les deux premiers chapitres, elle concerne l'aspect bibliographique de l'étude ; avec le **Chapitre I : Généralités sur le béton léger** qui concerne le béton léger et ses types et ses caractéristiques ainsi que ses avantages et inconvénients... et le **Chapitre II : Étude bibliographiques** où on a traduit, résumé et analyser deux articles scientifiques des études précédentes qui ont abordé le sujet de béton léger.

La deuxième partie qui contient les deux derniers chapitres concerne l'aspect pratique de cette étude ; avec le **Chapitre III : Matériaux et méthodes de caractérisation** où on a cité les différents matériaux utilisés dans la confection de notre béton ainsi que leurs propriétés et caractéristiques et le **Chapitre IV : Résultats et discussions** qui contient les différents essais qu'on a réalisé sur notre béton, ainsi que les différents résultats obtenus et leurs interprétations scientifiques.

## I. Généralités sur le béton léger

### I.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction composé de ciment, de granulats fins (sable) et de granulats grossiers mélangés à de l'eau et qui durcit avec le temps. Le ciment Portland est le type de ciment couramment utilisé pour la production de béton. La technologie du béton traite de l'étude des propriétés du béton et de ses applications pratiques. Dans une construction de bâtiment, le béton est utilisé pour la construction de fondations, de colonnes, de poutres, de dalles et d'autres éléments porteurs. [1]

Parmi les ingrédients du béton, les agrégats grossiers ; qui confèrent au béton une stabilité et une durabilité accrues.

Plusieurs types de granulats sont utilisés dans la composition du béton dont les granulats légers (la ponce, les granulats d'argile expansée, les granules de liège...).

### I.2. Le béton léger

Le béton léger est composé en majorité de constituants l'allégeant, ce qui le rend bien moins lourd qu'un béton ordinaire et par conséquent, bien plus pratique d'utilisation. Les matériaux lourds qu'on retrouve chez les bétons ordinaires tels que les granulats sont remplacés. Cette caractéristique rend ce béton très utile dans la réalisation de certains types d'ouvrages tels que pour les fondations ou dans l'isolation.

Les bétons légers pourront être utilisés pour la construction de structures résistants (poutres, dalles, poteaux, etc.) mais seront plus particulièrement employés pour la fabrication d'agglomérés. Pour des bétons banchés non porteurs ou faiblement chargés et pour des bétons isolants. L'isolation étant d'autant meilleure que la densité est faible. [2]

La masse volumique apparente des bétons traditionnels fabriqués avec des granulats rigides est comprise entre 2200 et 2600 kg/m<sup>3</sup>. Et la masse volumique apparente sèche des bétons légers est inférieure à 1800 Kg/m<sup>3</sup> [RILEM (1970)]. D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'American Concrete Institute limite la masse volumique apparente des bétons légers entre 1120 Kg/m<sup>3</sup> et 1920 kg/m<sup>3</sup> après séchage à l'air pendant 28 jours.

Enfin 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. [3]

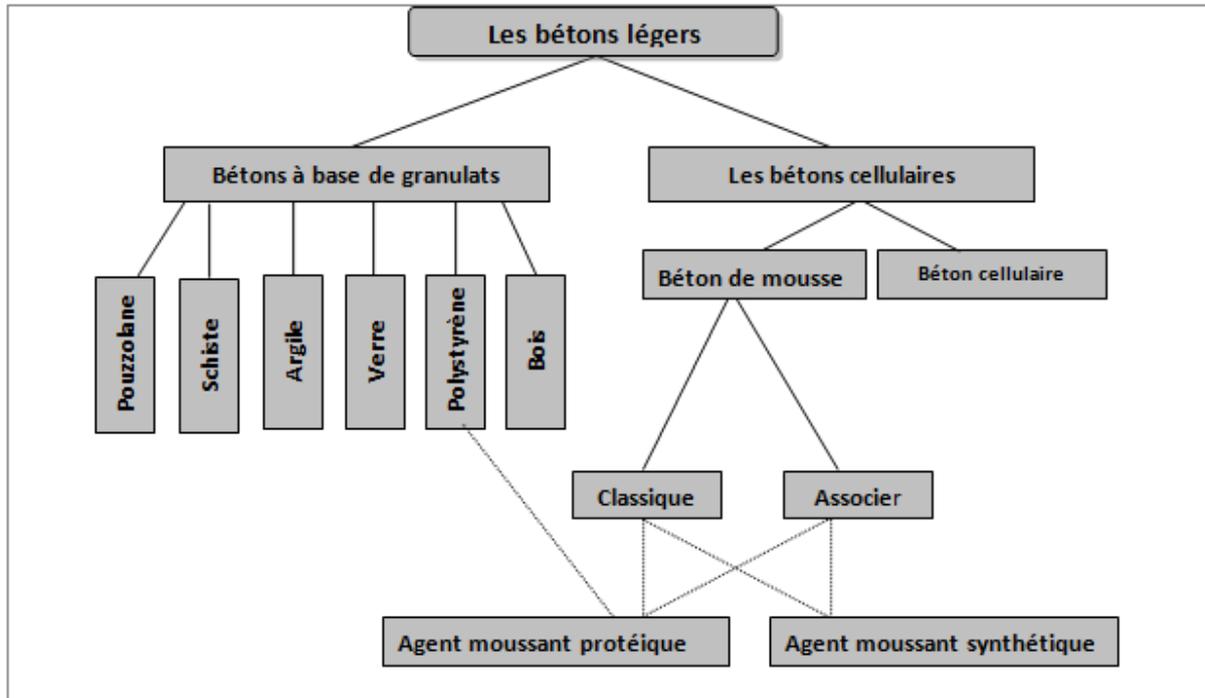
### I.3. Les types des bétons légers

Chaque type de béton léger possédait ses propres ingrédients, même s'il existait des similitudes dans les « recettes de base » pour chaque catégorie ou type de béton léger.

On diminue la masse volumique du béton en substituant une certaine quantité de matériau solide par de l'air.

On note trois dénominations pour ces bétons, soient :

- Béton à agrégats légers
- Béton caverneux
- Béton cellulaire



**Figure I. 1:** Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [4]

### II.3.1. Béton de granulats légers

Le béton de granulat léger (BGL) n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec l'utilisation de BGL. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que : les pouzzolanes, les granulats de diatomite, les granulats de perlite et de vermiculite, l'argile expansée, le schiste expansé, les cendres volantes frittées, les granulats de laitiers bouletés expansés, les granulats de verre expansé, la pierre ponce...etc.[5] Les bétons de granulats légers sont utilisés dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. Ils sont utilisés notamment pour alléger les éléments tels que les poutres, les poteaux, les planchers, les tabliers de ponts etc. Les bétons de granulats légers sont également connus pour améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments ou l'absorption acoustique des écrans acoustiques protégeant les riverains des nuisances sonores. Ils sont utilisés dans les structures préfabriquées ou réalisées sur chantier.

Les bétons légers pour les produits de structure présentent des masses volumiques réelles sèches comprises entre 1200 et 2000 kg/m<sup>3</sup> et des résistances à la compression comprise entre 25 et 80 MPa[6].

#### I.I.3.1.1. Différents types de granulats légers

Selon la norme NF EN 206-1/CN, les granulats utilisés dans le domaine de la construction peuvent être subdivisés en trois catégories [7] :

- Le granulat léger : granulat d'origine minérale ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle inférieure ou égale à 2 000 kg/m<sup>3</sup>
- Le granulat courant : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle comprise entre 2 000 et 3 000 kg/m<sup>3</sup>
- Le granulat lourd : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle supérieure ou égale à 3 000 kg/m<sup>3</sup>.

Dans le cadre de notre étude, il s'agit de béton à granulats légers, d'où nous allons nous limiter à ce type de granulats qui sont des matériaux poreux. Avant de présenter ces matériaux, nous allons définir deux grandeurs qui caractérisent leur légèreté : la masse volumique absolue et la masse volumique réelle. La masse volumique absolue désigne le rapport de la masse de granulat léger sec pour remplir de façon aléatoire un récipient sur le volume du récipient. La masse volumique réelle exprime le rapport d'une masse donnée de granulat léger sec sur le volume qu'elle occupe dans l'eau.

Il existe deux familles de granulats légers :

- Le granulat léger naturel qui ne subit aucune transformation autre que mécanique. C'est par exemple le granulat de pierre ponce, de diatomite de tufs volcaniques etc.
- Le granulat léger artificiel résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autre. C'est par exemple le granulat d'argile expansée, de schiste expansé, de cendre volante frittée etc. [7]

La figure I.2 représente les différents types de granulats naturels.



**Figure I. 2:** Différents granulats légers naturels [4]

La figure I.3 représente les différents types de granulats artificiels.



**Figure I. 3:** Différents granulats légers artificiels [4]

### I.1.3.2. Béton caverneux

Les bétons caverneux sont obtenus en supprimant la totalité ou une partie du sable dans le béton. Un béton ne contenant pas de sable produit une agglomération de gros granulats dont les particules sont recouvertes par un film de pâte de ciment d'une épaisseur de 1 à 3 mm, Cette substitution crée à l'intérieur du béton de larges cavités (pores), responsables de la diminution de la masse volumique et de la baisse de résistance à la compression [8]. Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. Ces bétons ont donc une porosité élevée ; ils sont drainants. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter le lavage de la pâte de ciment sur les granulats [9].

Le béton caverneux est l'un des types de béton léger obtenu quand on ne met pas de granulats fins dans le mélange. Ce béton ne contient que du ciment, de l'eau et de gros granulats. Il existe donc de gros vides au sein de la masse qui sont responsables de sa faible résistance. Toutefois la minuscule dimension de ces vides empêche tout mouvement capillaire de l'eau. La masse volumique du béton caverneux dépend de sa granulométrie [9].

La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 1.5 et 14 MPa. On note une augmentation de la résistance avec l'âge semblable à celle des bétons de densité normale. La résistance en flexion est habituellement égale à 30 % de la résistance en compression, c'est-à-dire supérieure à celle du béton ordinaire. Le retrait du béton caverneux est considérablement plus faible que celui d'un béton de densité normale. Ce béton est très résistant au gel. Sa forte absorption d'eau le rend cependant inutilisable dans les fondations et dans les situations où il peut se saturer en eau [3]. Leur utilisation n'est généralement pas associée à la recherche de la légèreté du produit, mais bien d'avantage pour les particularités économiques occasionnées par la faible teneur en ciment. On les utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure. Ainsi pour des ouvrages requérant des propriétés drainantes, tels les puits de captage des eaux de ruissellement, confection des éléments architecturaux [8].

### I.1.3.3. Béton cellulaire

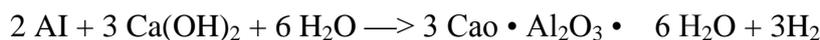
Le béton cellulaire est issu de longues recherches, entamées il y a plus de 150 ans. A cette époque, (Zernikov) a étudié des mortiers à base de chaux vive et de sable portés à haute température [10].

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland.

Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. On cite parmi ces agents, la poudre d'aluminium ou le gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis [10].

Les matières premières nécessaires à la fabrication du béton cellulaire sont le sable blanc très pur (95% de silice), la chaux, le ciment, la poudre d'aluminium et l'eau.

FeBeCel (La Fédération belge de Béton Cellulaire) [11] a noté qu'il s'agit uniquement de matières minérales présentes en abondance dans la nature. En présence d'eau, la chaux réagit avec la silice du sable pour former des silicates de calcium hydratés (tobermorite). La chaux et ciment servent de liants. La poudre d'aluminium extrêmement fine (env. 50  $\mu\text{m}$ ) ; utilisée en très faible quantité (+/- 0,05%), sert de levain, en cours de fabrication, pour faire lever la pâte et créer les cellules. En milieu alcalin, la poudre d'aluminium réagit comme suit :



C'est l'hydrogène libéré qui a créé les cellules. En cours de durcissement de la pâte, l'hydrogène se libère et les cellules se remplissent d'air.[11]

Les produits en béton cellulaire sont généralement des blocs de grandes dimensions : 6,6 à 8 blocs par  $\text{m}^2$  et des blocs de super format : 2 blocs par  $\text{m}^2$  ou des blocs et linteaux en forme de U pour réalisation de poutres de ceinture, linteaux de grande longueur, linteaux à surcharge plus importante que celle admise par les linteaux standards et linteaux porteurs et non-porteurs. Ils peuvent être aussi des éléments armés sous forme de dalle de bardage : (pose horizontale ou verticale), dalles de cloison (hauteur d'étage), dalles de toiture et dalles de plancher. Un exemple de performance du béton cellulaire à l'état durci dans le cas de retrait est donné par la figure I.4 ci-dessous :

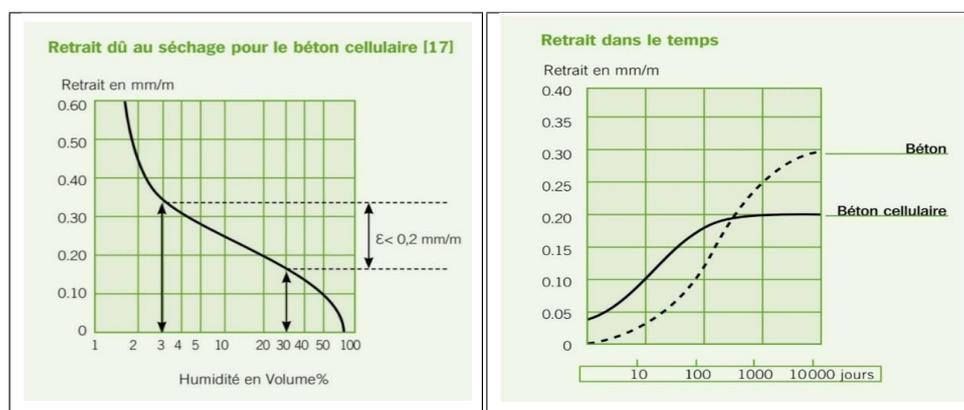
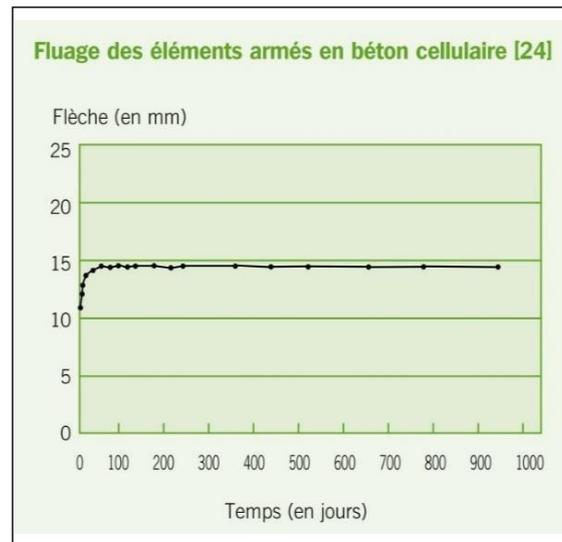


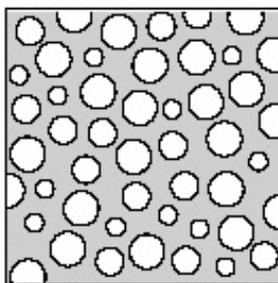
Figure I. 4: Retrait du béton cellulaire [11]

La figure I.5 ci-dessous représente le fluage d'un béton cellulaire.

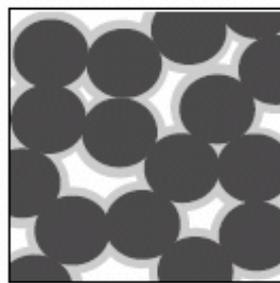


**Figure I. 5:** Fluage du béton cellulaire [11]

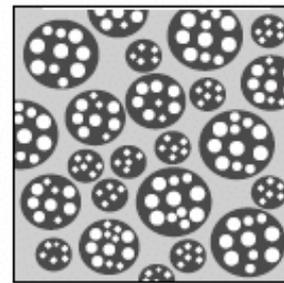
La figure I.6 montre une représentation schématique des différents types de béton léger d'après SHORT ET KINNIBURGH.



Béton cellulaire



Béton caverneux



Béton de granulats légers

**Figure I. 6:** Représentation schématique des différents types de béton léger d'après SHORT ET KINNIBURGH [12]

#### I.4. Classification des bétons légers

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

##### I.1.4.1. Bétons légers de structure

Composés de granulats légers ; ils sont utilisés pour la fabrication d'éléments porteurs avec une masse volumique à 28 jours varie habituellement entre  $1440 \text{ Kg/m}^3$  à  $1850 \text{ Kg/m}^3$  et la résistance à la compression est supérieure à  $17,2 \text{ MPa}$ . Il faut comprendre que cette définition n'est pas une spécification.

Les spécifications de travail peuvent, à certains moments, permettre des masses volumiques plus élevées ( $1900 \text{ Kg/m}^3$ ). Bien que le béton structural d'une masse volumique à sec de  $1450 \text{ Kg/m}^3$  à  $1600 \text{ Kg/m}^3$  est souvent utilisé, la plupart des structures en béton légères pèsent entre  $1600 \text{ Kg/m}^3$  à  $1760 \text{ Kg/m}^3$  [13].

#### I.I.4.2. Bétons légers de résistance modérée

Leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et  $1400 \text{ kg/m}^3$ , leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

#### I.I.4.3. Bétons légers de faible résistance

Ils sont fabriqués avec des granulats ultra légers et très poreux (vermiculite exfoliée, perlite expansée, liège expansé) ou avec une matrice cellulaire. Dans ce dernier cas, l'incorporation de bulles d'air peut être faite par génération de gaz dans le matériau à l'état plastique ou par entrainement d'air au cours du malaxage. Ces bétons sont de très bons isolants thermiques, mais ils doivent bien souvent être traités à l'autoclave pour atteindre une résistance suffisante. D'autres granulats non absorbants et plus résistants sont aussi disponibles (verre et polystyrène expansés).

Le guide ACI 213R-87 [11] distingue alors trois catégories de béton léger, classées selon la masse volumique du matériau durci (**Tableau I.1**).

**Tableau I. 1:** Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87 [13]

Classification	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$R_c$ (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton léger de faible résistance	300-800	< 7

### I.5. Caractéristiques principales des bétons légers

La description des caractéristiques des bétons sera davantage axée sur les éléments suivants :

- La faible masse volumique.
- La durabilité.
- La rhéologie à l'état frais.
- Les propriétés mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité, etc.).

### **I.1.5.1. La masse volumique**

La masse volumique du béton léger 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 granulats (utilisation de granulats de liège) et en faisant varier les proportions des différents constituants.

### **I.1.5.2. La durabilité**

Les conditions d'exposition conditionnent souvent la conception du béton. En effet, les cycles de gel-dégel en présence ou non des sels fondants représentent un aspect critique de la durabilité des bétons légers exposés aux intempéries. Il est important de faire la distinction entre les deux types d'attaque par le gel, avec ou sans sels fondants, puisque les mécanismes de détériorations sont différents. [13]

### **I.1.5.3. La rhéologie à l'état frais**

La rhéologie du béton à l'état Frais définit la relation « contrainte déformation » du matériau en référence à ses propriétés d'élasticité, de plasticité et de viscosité. On qualifie la rhéologie du béton à l'état frais en fonction de l'énergie nécessaire à la mise en place par rapport à la qualité recherchée du fini. En conséquence, les paramètres dont on doit tenir compte lors du dosage relativement à la rhéologie du béton léger à l'état frais sont : les méthodes de moulage et de mise en place, la qualité de la finition et la dimension des granulats et des coffrages [13].

### **I.1.5.4. Les propriétés mécaniques**

Parmi les propriétés mécaniques, on retrouve la résistance à la compression, à la flexion et à la traction. Ces propriétés sont des paramètres secondaires dans la conception d'un béton ultra- léger puisque leur importance est relativement mineure pour ce type de béton. Toutefois, on ne peut pas les négliger puisque tous les bétons, peu importe l'application, nécessitent un minimum de résistance mécanique [13].

## **1.6. Les avantages des bétons légers [14]**

Les bétons légers présentent plusieurs avantages on peut les classés en trois catégories qui sont :

### **I.1.6.1. Avantages techniques**

- **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 classée M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.

- Les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger.

### I.I.6.2. Avantages de mise 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 (transport possible de pièces plus grandes).

### I.I.6.3. Avantages économiques

- 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.
- Économie sur le ferrailage 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.

### I.7. Les inconvénients des bétons légers

Les bétons légers du fait de son poids faible, présentent quelques défaillances techniques :

- Les propriétés mécaniques : la résistance du béton léger, à la compression, est réduite ce qui amenuise son champ d'utilisation.
- Le béton léger présente des insuffisances manutentionnelles (transport par camion tapis ou camion pompe).
- Le pompage est facile à réaliser à cause de la faible masse, mais nécessite l'utilisation de technologies avancées.
- Le module élastique est aussi plus faible, donc la résistance à la déformation, la flèche et le point de rupture du matériau sont plus faibles.
- Il est à noter que pour l'utilisation d'un béton à granulats légers (granulats expansés) le prix des granulats est plus élevé, donc le prix par mètre cube de béton léger est plus élevé que celui des bétons ordinaires.

### I.8. Différence entre Bétons Ordinaires et Bétons Légers

Malgré leurs bonnes qualités, les bétons classiques ont toujours présenté des inconvénients à savoir :[15]

- Le poids propre des éléments de béton très élevés qui peuvent présenter un grand pourcentage de charge de structure.
- Exigence d'un sol de forte capacité de portance.
- Mise en œuvre assez délicate (coffrage et coulage).
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocres.

En revanche l'utilisation d'un béton de faible masse volumique peut être bénéfique en terme :

- D'éléments porteurs de faible section.
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée.
- Permet de construire sur des sols de faible capacité de portance.
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique.

### **I.9. Domaine d'utilisation des bétons légers**

Les domaines d'utilisation préférentiels des bétons légers sont divers, on peut les diviser en trois domaines d'utilisation :

#### **I.I.9.1. Bétons d'isolation pure, non porteurs**

Leur masse volumique est faible ( $600\text{kg/m}^3$ ) 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, plancher, dalles d'isolation.
- Remplissage de vides et comblement de galeries et de canalisation.
- Le rattrapage de niveau.

#### **I.I.9.2. Bétons porteurs et isolants**

Leur masse volumique varie de 1000 à 1300  $\text{kg/m}^3$  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.I.9.3. Bétons légers de structure

Ils ont une masse volumique de 1700 à 1800 kg/m<sup>3</sup> 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 (réelle ou absolue), 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 où le poids mort est important par rapport au poids total (chargement compris).
- Immeuble de grande hauteur.
- Portée importantes (poutres, voiles).
- Structures marines immeubles.
- Surélévation d'immeubles existants.
- Restauration d'anciens immeubles.

### I.10. Conclusion

En résumé, nous avons parlé, à travers ce premier chapitre, d'abord de qu'est-ce qu'un béton léger et nous précisons que :

- Sous l'appellation « béton léger » il existe une grande famille de matériaux très différents.
- D'un point de vue général, le béton léger est réalisé en diminuant la masse volumique du béton en remplaçant une quantité de matériaux par de l'air ; ces vides d'air peuvent être incorporé à trois endroits :
  - ✓ Dans les granulats.
  - ✓ Dans la pâte de ciment.
  - ✓ Entre les gros granulats par élimination de granulats fins.

Nous complétons notre premier chapitre en centrant sur les caractéristiques du béton léger en notant l'importance de ses différentes propriétés. On finissait par dénombrer les avantages du béton léger et on a trouvé la différence entre lui et le béton ordinaire et on a remarqué que le béton léger est très utile car son application est très large.

## II. Étude bibliographique

### II.1. Premier article

#### II.1.1. Introduction

Le premier article qu'on va étudier s'intitule « Investigation expérimentale sur du béton léger additionné de déchets industriels (déchets d'acier) » publié le 24 décembre 2019 dans la revue ScienceDirect par M. Kalpana et Ahoh Tayu du Département de génie civil, Saveetha School of Engineering, Chennai, Tamil Nadu, Inde.

Les chercheurs dans cette étude utilisent un concept de mélange de 2:1:2 avec un rapport de E/C = 0.4, un gel de silice en quantité constante et un super plastifiant SP= 0.8, le tableau II.1 montre les proportions en détail.

**Tableau II. 1:** Proportions de mélange [16]

Mélange	Ciment	Sable	Perlite	DA %	E/C	SP %
<b>BO</b>	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0.4</b>	<b>8</b>
<b>BRDA 0.5</b>	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>8</b>
<b>BRDA 1</b>	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.4</b>	<b>8</b>

#### II.1.2. Résultats et discussion

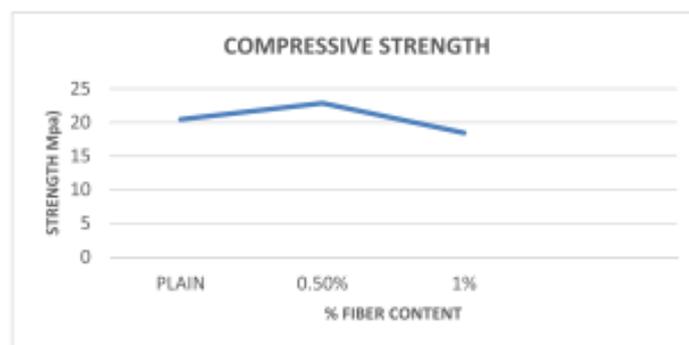
Les chercheurs dans cette étude réalisent trois essais : essai de compression, essai de traction et essai de flexion.

##### II.1.2.1. Résistance à la compression

Tableau II. 2 et Figure II.1 représentent les valeurs des résultats des essais de résistance à la compression du béton léger renforcé de déchets d'acier (BRDA) par rapport au béton témoin.

**Tableau II. 2:** Résistance à la compression en MPa [16]

Échantillon	Béton témoin	BRDA 0.5%	BRDA 1%
<b>A</b>	<b>21.1</b>	<b>23.64</b>	<b>19.4</b>
<b>B</b>	<b>19.3</b>	<b>22.7</b>	<b>18.1</b>
<b>C</b>	<b>20.4</b>	<b>22.2</b>	<b>18.8</b>
<b>Moyenne</b>	<b>20.28</b>	<b>22.84</b>	<b>18.67</b>



**Figure II. 1:** Comparaison de résistance moyenne à la compression [16]

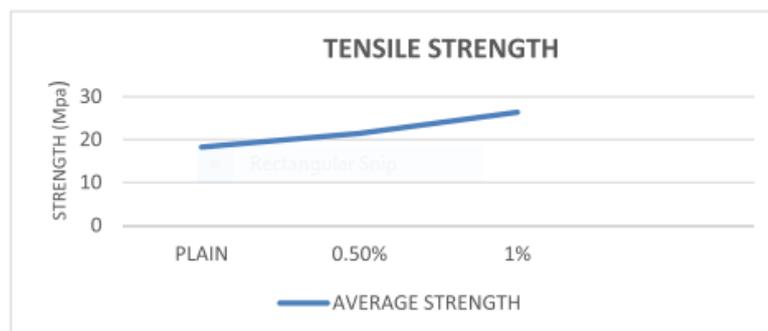
La résistance moyenne à la compression et les densités des échantillons se situent entre 18 et 23 MPa et 1708.5-1800 kg/m<sup>3</sup>, respectivement. Comme il peut être vu de Figure II.1 l'augmentation de la teneur en déchets d'acier de 0% à 0,5%, augmente la résistance à la compression de 13% par rapport au béton témoin. En ajoutant plus de déchets d'acier jusqu'à 1%, la résistance à la compression diminue encore plus bas que le béton témoin (7%). Cette diminution de la résistance à la compression à haute teneur en fibres (1%) pourrait être due à la difficulté de disperser les déchets d'acier dans un mélange léger car sa forme et sa taille sont irrégulières. [16]

### II.1.2.2. Résistance à la traction

Tableau II.3 et figure II.2 montre le résultat de la valeur de résistance à la traction de l'éprouvette de béton lorsque le béton témoin est comparé au BRDA, les résultats des tests montrent que contrairement à la résistance à la compression, la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de la teneur en déchets d'acier à 0,5%, elle est augmentée de 18% et à 1%, c'est 45% de plus que le béton témoin, cela montre que les déchets d'acier ont une très bonne effet à la résistance à la traction du béton. Également sur le béton témoin après test, la fissure est facilement visible par rapport au BRDA, ce qui montre que les déchets d'acier réduisent la fragilité du béton. [16]

**Tableau II. 3:** Résistance à la traction en MPa [16]

Échantillon	Béton témoin	BRDA 0.5%	BRDA 1%
<b>A</b>	<b>19.3</b>	<b>21.6</b>	<b>26.32</b>
<b>B</b>	<b>17.8</b>	<b>21.9</b>	<b>25.9</b>
<b>C</b>	<b>17.6</b>	<b>20.8</b>	<b>26.8</b>
<b>Moyenne</b>	<b>18.23</b>	<b>21.43</b>	<b>26.34</b>



**Figure II. 2:** Comparaison de résistance moyenne à la traction [16]

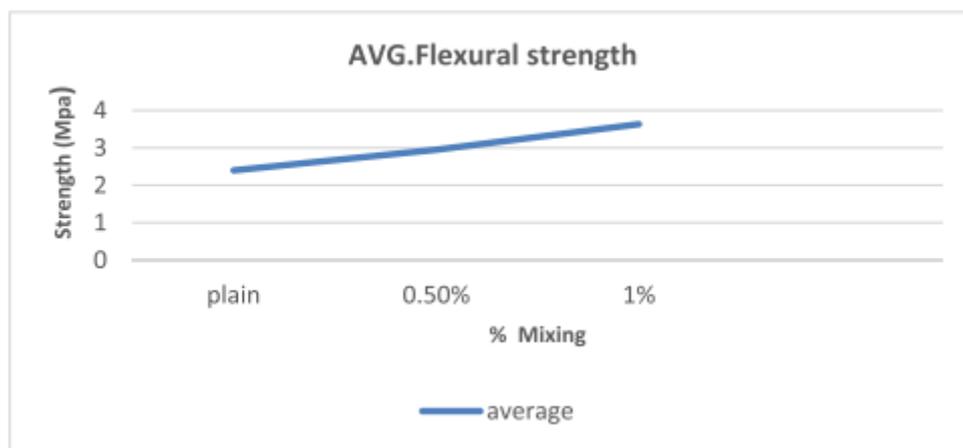
### II.1.2.3. Résistance à la flexion

Le résultat du test de flexion de différents mélanges est montré dans Tableau II.4 et la figure II.3, les résultats montrent que toutes les valeurs de résistance à la première fissuration (rpf) du BRDA sont supérieures à celle du béton témoin.

En général, il a été constaté que la résistance à la flexion du béton léger à la même résistance à la compression est bien inférieure à celle du béton de poids normal. L'inclusion de déchets d'acier dans le béton augmente la résistance à la flexion, donc à 0,5% et à 1% de déchets d'acier, la résistance augmente avec une moyenne de 23% et 52% respectivement de plus que le béton léger normal. [16]

**Tableau II. 4:** Résistance à la traction en MPa [16]

Échantillon	Béton témoin	BRDA 0.5%	BRDA 1%
A	2.68	2.9	3.50
B	2.011	2.85	3.80
C	2.50	3.1	3.60
Moyenne	2.397	2.95	3.63



**Figure II. 3:** Comparaison de résistance moyenne à la flexion [16]

### II.1.3. Conclusion

Grâce à cette enquête expérimentale, le changement des propriétés mécaniques du béton léger dû aux déchets d'acier est étudié, les chercheurs observent que l'ajout de déchets d'acier jusqu'à 0,5% augmente la résistance à la compression de 13% de plus que le béton léger normal, mais diminue lorsque les déchets d'acier sont ajoutés jusqu'à 1% de 7% de moins que le béton léger normal. Le BRDA a une résistance à la traction très élevée que le béton ordinaire, même à faible volume de déchets d'acier, on peut voir que la résistance à la traction augmente de 18% (à 0,5% d'acier) et 45% (à 1% d'acier) cela montre que même une très faible quantité de déchets d'acier empêche la rupture fragile du BRDA.

En ajoutant des déchets d'acier, la résistance à la flexion est augmentée de 23 % (à 0,5 % d'acier) et de 52 % (à 1 % d'acier) de plus que le béton léger normal. On peut conclure que les déchets d'acier augmentent considérablement les propriétés mécaniques du béton léger. Ils ont un effet très significatif sur les propriétés de traction et de flexion par rapport aux propriétés de compression.

Ainsi, en considérant qu'ils sont économiques, ils aident à augmenter les propriétés mécaniques et à réduire la pollution, ils peuvent être un choix raisonnable pour renforcer le béton léger.[16]

## **II.2. Deuxième article**

### **II.2.1. Introduction**

Le deuxième article qu'on va étudier s'intitule « Potentiel d'utilisation du liège vierge comme agrégats dans le développement de nouveaux bétons légers ». Cet article examine le potentiel de développement d'un béton léger pour des applications de construction utilisant des agrégats de liège. L'apport principal du travail proposé est l'utilisation de liège vierge, qui présente, par rapport au liège de reproduction, une structure, une densité et un type de surface différents de sorte qu'il a une qualité insuffisante pour les bouchons en liège. Le travail expérimental a été réalisé en réalisant quatre mélanges de béton contenant, en volume de granulats : 25, 50, 75 et 100 % de granulats de liège vierge. Les bétons de liège ont été évalués et comparés à un béton ordinaire en termes de : maniabilité, viscosité plastique, densité, vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV), porosité, absorption capillaire, propriétés mécaniques, microstructure et conductivité thermique. 3. Remarquablement, en fonction de la quantité de liège vierge, l'augmentation de la porosité du béton variait entre 26 et 470%, par rapport au béton ordinaire. Lors du remplacement de la totalité des granulats minéraux, les bétons ont montré des valeurs de seulement 0,48 et 0,72 MPa pour la résistance à la compression et à la flexion, respectivement. Néanmoins, pour les matériaux non structuraux, ces résistances mécaniques peuvent être considérées comme compétitives. L'étude de la zone de transition interrassiale (ITZ) entre les agrégats de liège et la matrice cimentaire a révélé une couche poreuse d'une épaisseur comprise entre 90 et 150mm. En termes de capacité d'isolation, l'utilisation de liège vierge conduit à améliorer la conductivité thermique du béton de 28 à 98 %, selon le pourcentage de liège.

Les résultats suggèrent que les bétons de liège vierge développés peuvent être utilisés dans plusieurs applications de construction, à savoir, comme blocs de remplissage et chapes isolantes.

### II.2.2. Importance de la recherche

Le travail expérimental présenté ici propose pour la première fois une enquête sur l'élaboration de bétons légers à l'aide de granulés de liège vierge qui, en plus d'avoir des propriétés différentes (nature de surface, microstructure, composition chimique...), ne subissent aucun procédé industriel, par rapport au liège de reproduction utilisé précédemment. Par conséquent, cette étude offre de nouvelles perspectives sur les connaissances sur les composites de liège.

### II.2.3. Programme expérimental

Le programme expérimental a été réalisé à EOLE (Eau et Ouvrages dans Leur Environnement) situé à Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie.

#### II.2.3.1. Matériaux

Des mélanges de béton de liège vierge ont été fabriqués en utilisant :

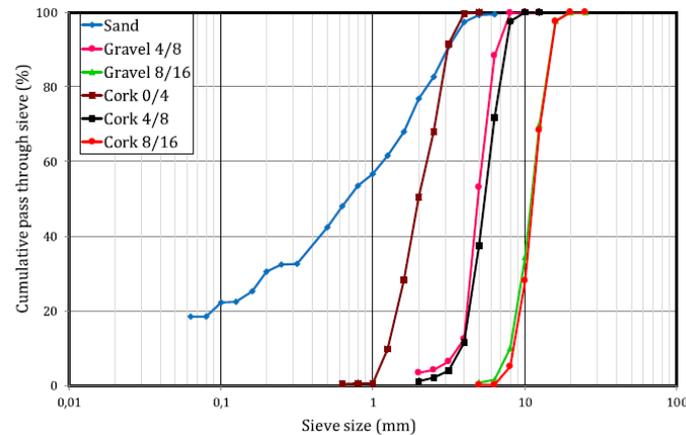
Afin d'examiner la microstructure des agrégats, SEMCiment Portland Composite (CPJ-CEMII/A 42,5 N) qui présente une densité apparente de  $1011 \text{ kg/m}^3$ , densité de particules de  $3024 \text{ kg/m}^3$  et Blaine surface spécifique de  $3142 \text{ cm}^2/\text{g}$ , produit par Beni-Saf Cement Company situé dans l'ouest de l'Algérie. Sable de granulométrie 0–4 mm et gravier de granulométrie 4–8 mm et 8–16 mm, achetés auprès de la société nationale des granulats située à Sidi Abdelli, Tlemcen Algérie. La masse volumique apparente selon BS EN 1097-3 : 2002 [17], densité des particules et absorption d'eau selon BS EN 1097-6 : 2013 [18] et la porosité interparticulaire des granules minéraux sont présentées dans **Tableau II.5** tandis que les analyses granulométriques utilisant la norme BS EN 933-1 : 2012 [19] sont illustrés dans **Figure II.4**. Granulés de liège vierge de granulométrie 0–4 mm, 4–8 mm et 8–16 mm (2) broyé par la société Jijel SIBL (située à Jijel, Algérie) et tamisé dans notre laboratoire. Fig. 1 montre la distribution granulométrique des granulés de liège vierge réalisée conformément à la norme BS EN 933-1 : 2012 [19]. Densité apparente BS EN 1097-3 : 2002 [17], densité des particules BS EN 1097-6:2013 [18].

Superplastifiant réducteur d'eau polycarboxylate modifié qui a une densité de  $1060 \text{ kg/m}^3$ , acheté à la société Orachem Concrete située à Boutlelis, Oran,

**Tableau II. 5:** Propriétés physiques des agrégats minéraux [20].

Agrégat minéral	Densité apparente ( $\text{kg/m}^3$ )	Densité des particules ( $\text{kg/m}^3$ )	Water absorption (%)	Porosité interparticule (%)
Le sable	1636.4	2701.1	1.71	39.4
Gravier 4–8	1310.9	2592.2	1.59	49.4
Gravier 8-16	1179.6	2580	1.22	54.3

La figure II.19 représente les courbes granulométriques des granules de liège minéral et vierge.



**Figure II. 4:** Courbes granulométriques des granules de liège minéral et vierge [20]

### II.2.3.2. Conception du mélange et procédure de mélange

Cinq mélanges de béton ont été préparés. Dans chaque mélange, des pourcentages de sable, de gravier de 4 à 8 mm et de gravier de 8 à 16 mm ont été remplacés, en volume, par leurs équivalents de liège vierge 0–4 mm, 4–8 mm et 8–16 mm, respectivement. Les pourcentages de remplacement utilisés étaient : 0,25, 50, 75 et 100 %. D'après Traoré & al [32], l'humidification des particules végétales est considérée comme un traitement. De plus, en raison de la capacité d'absorption élevée des agrégats de liège vierge (**Tableau II.6**), la prise en compte de leur absorption peut être à la fois source de ségrégation et de difficultés de moulage. Ainsi, des agrégats de liège vierge ont été utilisés à l'état sec et sans tenir compte de leur absorption. Le superplastifiant a été utilisé à raison de 0,5% du poids de ciment. La quantité d'eau efficace a été maintenue constante, tandis que comme seule l'absorption d'agrégats minéraux était considérée, la quantité totale d'eau absorbée diminuait légèrement avec la diminution de la quantité d'agrégats minéraux. Cela conduit à une légère diminution de l'eau réelle en augmentant le pourcentage de liège vierge. Le tableau II.6 représente les propriétés physiques des agrégats de liège vierge.

**Tableau II. 6:** Propriétés physiques des agrégats de liège vierge [20]

Agrégat de liège	Densité apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Densité de particules (kg/m <sup>3</sup> )	Absorption de l'eau (%)	Porosité inter particule (%)
Liège 0-4	88.9	218	168.67	59.2
Liège 4-8	83.8	184	116.78	54.5
Liège 8-16	86	223	68.89	61.4

Le tableau II.7 représente les proportions de mélange pour les bétons de liège vierges étudiés en kg.

**Tableau II. 7:** Proportions de mélange pour les bétons de liège vierges étudiés en kg [20]

Code du béton	Référence	CC 25	CC 50	CC 75	CC 100
Pourcentage de liège (%)	0	25	50	75	100
Ciment	350	350	350	350	350
Eau efficace	157.4	157.4	157.4	157.4	157.4
Eau absorbée	28	21	14	7	-
Eau réelle	185.4	178.4	171.4	164.4	157.4
Super-plastifiant	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
Le sable	780.6	585.5	390.3	195.2	-
Gravier 4-8	348	261	174	87	-
Gravier 8-16	729.3	547	364.7	182.3	-
Gravier 8-16	-	10.6	21.2	31.8	42.4
Liège 4-8	-	5.6	11.1	16.7	22.2
Liège 8-16	-	13.3	26.6	39.9	53.2

### II.2.3.3. Procédures d'essai

#### II.2.3.3.1. Maniabilité

La maniabilité des mélanges de béton de liège vierge développés a été déterminée en utilisant un essai d'affaissement conformément à la norme BS EN 12350-2:2009 [21].

#### II.2.3.3.2. Viscosité plastique

Des essais de viscosité plastique ont été effectués en utilisant un rhéomètre à géométrie à aubes coaxiales. Le rhéomètre est équipé d'un agitateur Heidolph.

Ce type de rhéomètre a été récemment utilisé et validé sur béton ordinaire par Soualhi & al. [22] et le béton autoplaçant de Taleb & al. [23]. Des tests de viscosité plastique ont été effectués 10 min après la fin de la procédure de mélange en utilisant le profil de vitesse approuvé par Soualhi & al. [22]. Les résultats bruts obtenus présentent une relation entre les couples et les vitesses de rotation. En exploitant cette relation, l'évolution de la contrainte de cisaillement ( $s$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $c$ ) fut dessinée. Ainsi, la viscosité plastique ( $l$ ) a été calculée comme la pente de cette évolution après une linéarisation à l'aide

d'Estellé & al [24] modèle (plus de détails sur le modèle utilisé sont décrits dans [24]).

#### II.2.3.3.3. Densité

La densité des mélanges préparés a été réalisée à l'âge de 28 jours sur des éprouvettes cylindriques selon les recommandations de la norme BS EN12390-7 : 2009 [25].

La valeur finale de la densité a été calculée comme la moyenne de trois échantillons différents mesurant 110 mm de diamètre et 220mm de hauteur.

#### II.2.3.4. Vitesse d'impulsion ultrasonique

Le test UPV est une méthode qui représente un moyen utile d'examiner certaines propriétés du béton. Il permet d'indiquer la présence de vides, de déterminer certaines propriétés mécaniques et d'avoir une idée générale sur le béton. Le test a été effectué conformément aux dispositions de la norme BS EN12504-4 : 2004[26] sur des spécimens cylindriques de 110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur, à l'aide d'un instrument de test PunditLab.

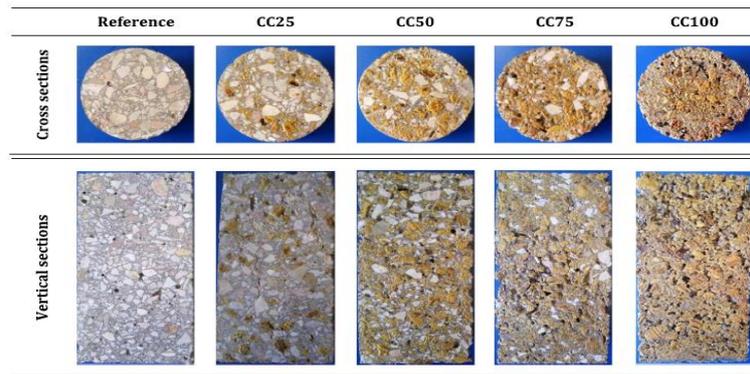
#### II.2.3.4.1. Porosité accessible à l'eau

Des tests de porosité accessible à l'eau ont été réalisés selon l'AFPC-AFREM [27] recommandations standard, sur trois éprouvettes cubiques de 50 mm. Les échantillons ont d'abord été séchés dans une étuve (à une température de 60 C) jusqu'à ce qu'ils atteignent la stabilisation de masse, pour déterminer leur masse sèche ( $M_d$ ). Après dégazage et saturation dans un dessiccateur associé à une pompe à vide, les échantillons ont été pesés à l'air libre ( $M_{air}$ ) puis dans l'eau par pesée hydrostatique ( $M_{dans}$ ). Les calculs de la porosité ( $P$ ) ont été effectués en utilisant l'équation (1) :

$$p = \frac{M_{air} - M_d}{M_{air} - M_{dans}}$$

#### II.2.3.4.2. Absorption capillaire

Le coefficient d'absorption d'eau capillaire a été déterminé selon les recommandations de la norme ASTM C 1585-04 [28] sur des échantillons de 100\*100\*50 mm<sup>3</sup>. Les surfaces latérales des échantillons ont été recouvertes d'un scellant étanche à l'eau et à la vapeur pour assurer un transfert d'eau unidirectionnel. Dans un premier temps, la masse sèche des échantillons a été déterminée. Puis les échantillons ont été pesés après leur immersion à une profondeur de 5 mm +/- 2 mm pendant 5, 10, 20, 30 min, 1, 2, 3, 4, 5, 6 h et une fois par jour jusqu'à 3 jours, suivi de 3 mesures à au moins 24 h d'intervalle pendant les jours 4 à 7.



**Figure II. 5:** Coupes transversales et verticales de bétons de liège de référence et vierges [20]  
Après chaque période, l'absorption d'eau a été calculée comme la moyenne de trois échantillons selon l'équation :

$$I = \frac{M_t - M_d}{A}$$

I : est l'absorption d'eau, exprimée en  $[\text{kg}/\text{m}^2]$

$M_d$  : est la masse sèche d'échantillon  $[\text{kg}]$

$M_t$  : est la masse d'échantillon humide au temps t  $[\text{kg}]$

A : est la surface de l'échantillon en contact avec l'eau  $[\text{m}^2]$ .

#### II.2.3.4.3. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des bétons préparés ont été mesurées à l'âge de 28 jours. Les mesures des résistances à la compression ont été effectuées sur des échantillons cylindriques (110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur) selon la recommandation de la norme BS EN 12390-3:2009[29]. Une fois le test terminé, la machine de test affichait la contrainte maximale ainsi que la courbe force déplacement.

Après avoir tracé la courbe contrainte-déplacement, le module d'élasticité a été calculé comme la pente de la phase linéaire comprise entre 15 et 50% de la contrainte maximale suivant la méthode utilisée par Le & al [30]. Les essais de flexion trois points ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  suivant la norme européenne BS EN 12390-5:2009 [31].

#### II.2.3.4.4. Conductivité thermique

Des essais de conductivité thermique ont été effectués à l'aide d'un QUICKLINE-30 (Figure II.6) appareils de mesure. Cet appareil applique le fil chaud méthode de mesure dynamique [32], qui est basée sur l'analyse de la température du matériau réponse sous flux de chaleur sollicitations. Sur la base de la variation de cette température en fonction du temps, l'appareil calcule et affiche la valeur de la conductivité thermique de l'échantillon à la fin de l'essai.

Afin d'évaluer la conductivité thermique de nos bétons de liège vierges, pour chaque mélange, trois échantillons avec un plan lisse surface de forme carrée de 100\*100 mm<sup>2</sup> et épaisseur de 50 mm ont été utilisés.



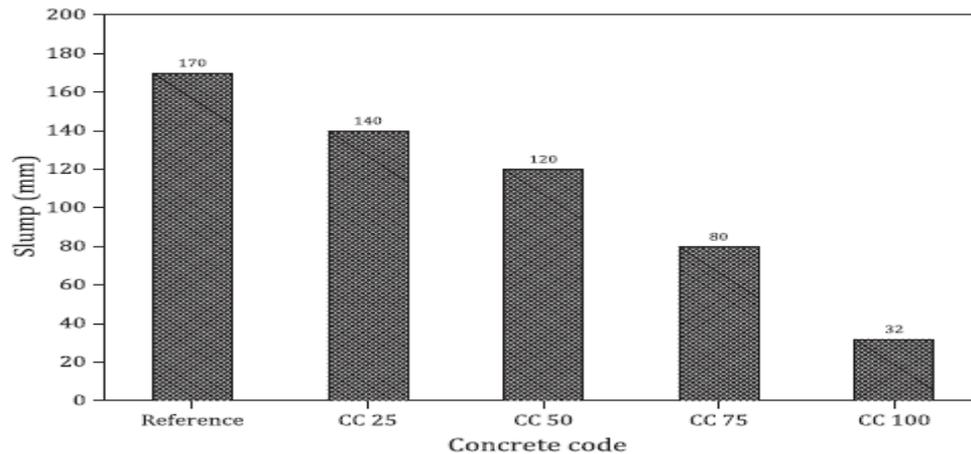
**Figure II. 6:** Détails du conductimètre QUICKLINE-30[20]

## II.2.4. Résultats et discussions

### II.2.4.1. Maniabilité

La figure II.7 montre la variation de l'ouvrabilité des bétons de liège vierge en fonction du pourcentage de liège. Comme on peut le voir, le pourcentage de liège vierge utilisé joue un rôle important dans la maniabilité des mélanges. L'effondrement des mélanges a diminué comme le pourcentage de liège vierge augmenté. Par exemple, l'ouvrabilité du béton de référence (contenant 0 % de liège vierge) était de 170 mm. Cependant, cet affaissement est devenu 32 mm lorsque la quantité de liège vierge a augmenté à 100 %. Le béton est passé d'une consistance très humide à une consistance sèche.

Ceci s'explique en partie par une diminution du volume de pâte (due au remplacement des granulats minéraux contenant une quantité considérable de particules fines (18%), par son équivalent en granulats de liège vierge qui ne contiennent pratiquement pas de fines mais aussi par la forte absorption des granulés de liège.



**Figure II. 7:** Maniabilité des différents mélanges [20]

#### II.2.4.2. Viscosité plastique

La figure II.8 rapporte l'évolution de la viscosité du plastique avec le pourcentage de liège vierge. Les résultats ont indiqué que l'augmentation de la quantité de liège entraîne une diminution de la viscosité plastique des bétons. Il est important de noter que lors des tests, les mélanges ont montré une bonne homogénéité, c'est-à-dire que les signes de ségrégation étaient absents. La pente de la relation régressive était très importante pour les pourcentages de liège inférieurs à 50 % (la viscosité du plastique a diminué de 11,8 Pa.S pour le béton de référence à 1,9 Pa.S pour le CC50, soit une diminution de 75 %). Cependant, pour des pourcentages supérieurs à 50 %, cette pente devenait moins importante et la différence entre les viscosités plastiques n'était que de 7,8 % en passant de 50 à 100 % de quantité de liège.

Ce qui est frappant, c'est le fait qu'au fur et à mesure de la maniabilité, la viscosité du plastique diminue avec l'augmentation de la quantité de liège vierge. Cette diminution peut être, dans un premier cours, associée à la faible densité des granulés de liège, qui permet moins de frottements et moins de résistance à l'écoulement pour le béton. Cela peut également être dû à la réduction du volume de pâte avec l'augmentation de la quantité de liège (comme expliqué dans la section II.4.4.1) et ce qui laisse plus de liberté aux particules de liège pour circuler dans le mélange.

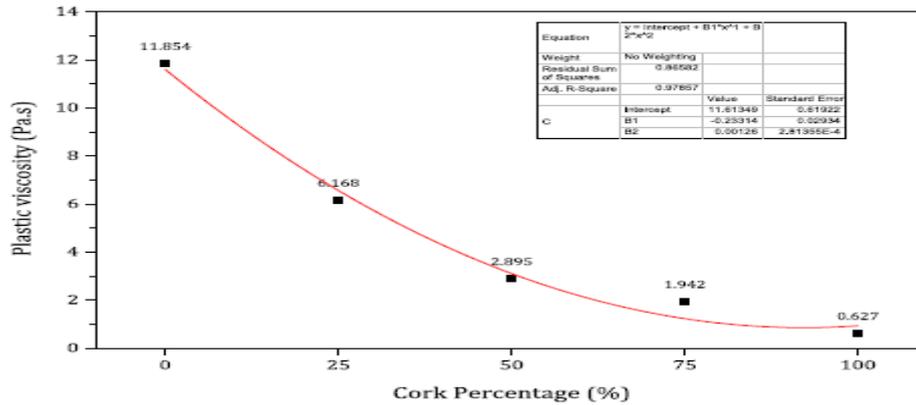


Figure II. 8: Viscosité plastique des composites de référence et de béton de liège vierge [20]

II.2.4.3. Densité

La figure II.9 présente des densités durcies de mélanges de béton de liège vierge en fonction du pourcentage de liège. Les résultats montrent que la densité du béton diminue avec l'augmentation de la quantité de liège vierge. Cette densité a diminué de 2383,7 kg/m<sup>3</sup> pour béton de référence à 716.5 kg/m<sup>3</sup> pour CC100, soit une diminution de 70 %. En introduisant du liège vierge, tous les composites produits ont montré des densités inférieures à 2000 kg/m<sup>3</sup> et appartenaient ainsi à la classe des bétons légers [33].

Il est à noter que le mélange avec 100 % de granulés de liège vierge présentait une densité plus faible que l'eau. Cela lui confère la caractéristique de flottabilité.

Les résultats obtenus peuvent être justifiés par la différence importante entre la densité des agrégats minéraux (environ 1400 kg/m<sup>3</sup>) et celle des agrégats de liège vierge qui tourne autour de 85 kg/m<sup>3</sup> selon nos tests en laboratoire.

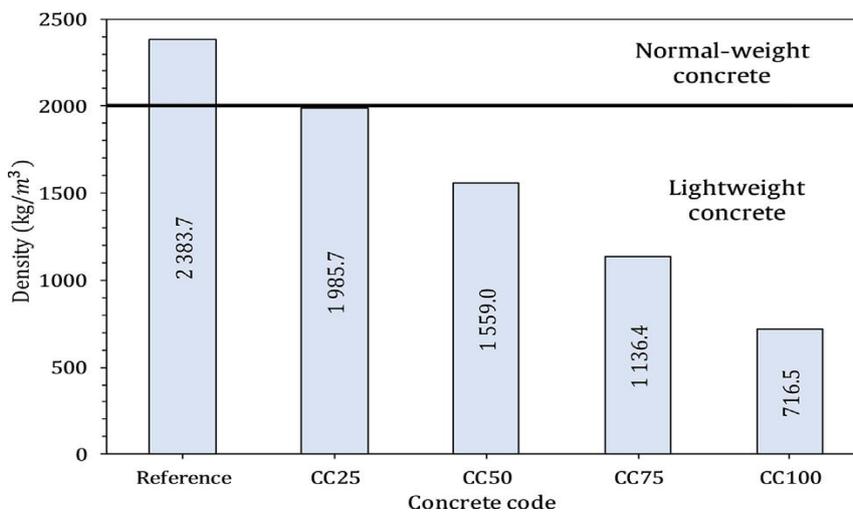
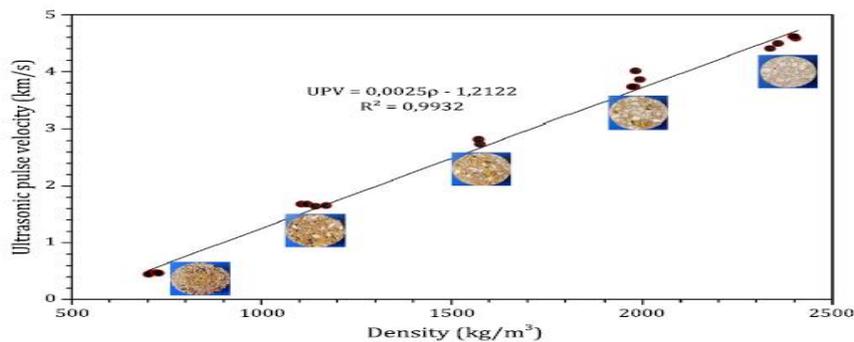


Figure II. 9: Densité des bétons de référence et de liège vierge [20]

#### II.2.4.4. Vitesse d'impulsion ultrasonique

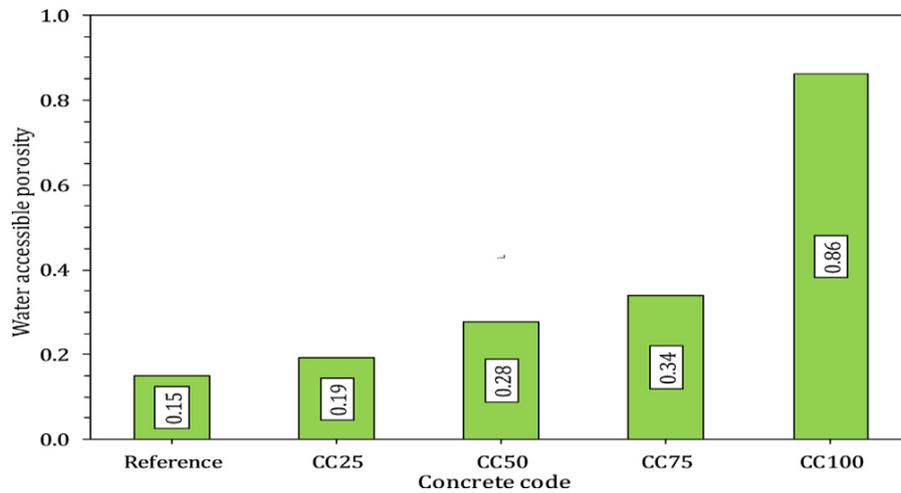
L'évolution de l'UPV avec la densité des bétons de liège vierges (**Figure II.10**) indique l'existence d'une relation linéaire parfaite. Malgré l'absence de valeurs UPV pour le béton de liège dans la littérature, les résultats obtenus semblent en accord avec ceux trouvés pour un autre type de composites. La valeur enregistrée pour le béton de référence était d'environ 4,539 km/s. L'incorporation de liège vierge a montré une diminution de 15,7, 40, 63,6 et 90,2% pour CC25, CC50, CC75 et CC100, respectivement. Les valeurs UPV obtenues indiqueraient que l'incorporation de particules de liège vierge retarde la transmission des ondes sonores à travers le béton, cela implique une augmentation de la quantité de vide et une amélioration des performances acoustiques du béton.



**Figure II. 10:** Relation entre l'UPV et la densité des bétons [20]

#### II.2.4.5. Porosité accessible à l'eau

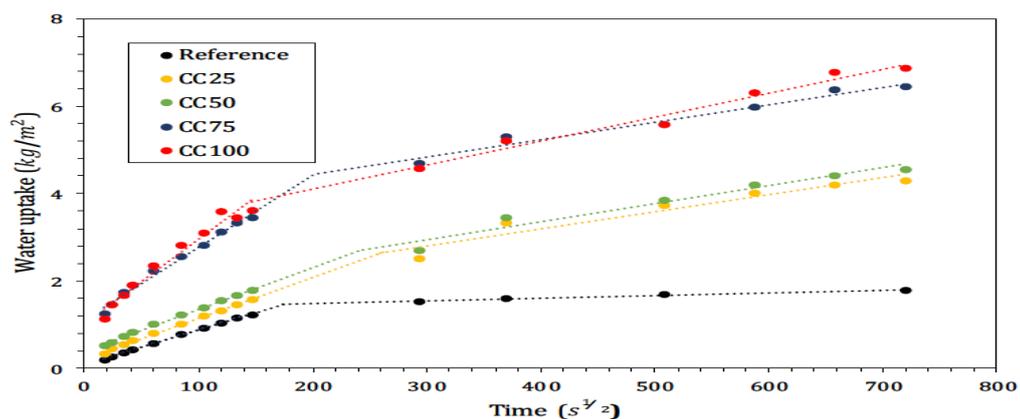
Le graphique mettant en évidence la porosité accessible à l'eau des mélanges en fonction du pourcentage de liège vierge (**figure II.11**) montre que l'incorporation de liège vierge dans le béton augmente fortement sa porosité. Selon le pourcentage de liège vierge, la porosité du béton variait entre 0,15 et 0,86. En remplaçant les granulats minéraux par des granulats de liège, la porosité du béton a augmenté de 26, 84 125 et 470% pour CC25, CC50, CC75 et CC100, respectivement. L'augmentation de la porosité du béton par l'ajout de particules de liège vierge peut être associée à la porosité inter particulaire élevée des granulés de liège vierge (**Tableau II.15**), mais surtout à leur microstructure poreuse. La porosité élevée obtenue pour les bétons de liège vierges peut à terme provoquer la pénétration de gaz et de fluides, affectant ainsi leur durabilité [34].



**Figure II. 11:** Porosité accessible à l'eau des différents bétons [20]

#### II.2.4.6. Absorption d'eau capillaire

La figure II.12 illustre le tracé de l'absorption d'eau des bétons produits en fonction de la racine carrée du temps. Toutes les courbes tracées présentent la spécificité d'être caractérisées par deux droites. La pente de la première ligne constitue le coefficient d'absorption initial, tandis que la pente de la deuxième ligne représente le coefficient d'absorption secondaire. Ce qui est curieux dans les résultats illustrés ici, c'est la similitude entre les courbes de CC25 et CC50 et entre CC75 et CC100. Une explication possible de ceci pourrait être la diminution du volume de pâte avec l'augmentation de la quantité de liège vierge. Cette diminution était remarquable dans CC75 et CC100, par rapport à CC25 et CC50. Néanmoins, il semblerait qu'il y ait un besoin certain de mener une étude plus approfondie en se concentrant davantage sur la caractérisation de la Microstructure liée au phénomène de transfert.



**Figure II. 12:** Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps [20]

### II.2.4.7. Propriétés mécaniques

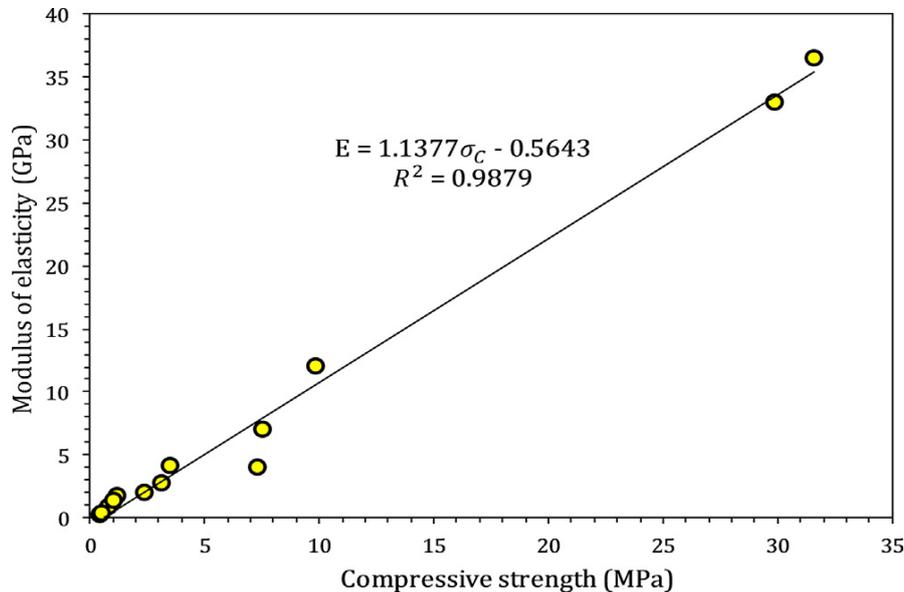
#### II.2.4.7.1. La résistance à la compression et à la flexion

Les résultats obtenus pour les résistances à la compression et à la flexion peuvent être en relation avec la nature poreuse des agrégats de liège vierge qui influe sur la porosité du béton.

Cette dernière provoque une diminution des propriétés mécaniques du béton. Néanmoins, la cause la plus probable des constatations sur propriétés mécaniques est la microstructure des mélanges, en particulier l'ITZ entre le liège vierge et la matrice cimentaire.

#### II.2.4.7.2. Module d'élasticité

Les modules d'élasticité calculés comme la pente de la phase linéaire comprise entre 15 et 50% de la contrainte maximale sont représentés dans la **figure II.13** Les résultats rapportés ont révélé que le module d'élasticité diminué par l'introduction de particules de liège vierge. Le tracé de ce module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression correspondante a montré l'existence d'une bonne relation linéaire. La diminution enregistrée, par rapport au béton de référence (34,72 GPa), est de 77, 9,91, 6, 96,2 et 99 % pour CC25, CC50, CC75 et CC100 respectivement. Malgré ces réductions remarquables, les rigidités (module d'élasticité) des bétons de liège vierge développés restent supérieures à celles trouvées dans la littérature pour les balles de riz et les bétons de chanvre. [14].



**Figure II. 13:** Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression [20]

### II.2.4.8. Microstructure

Afin de bien comprendre les causes à l'origine des résultats présentés ci-dessus, une enquête sur l'ITZ reliant les agrégats et la matrice cimentaire a été réalisée à l'aide d'images MEB à un grossissement de 300 mm. De20, un bon ITZ qui présente une fine couche poreuse d'une épaisseur d'environ 13 mm a été observé entre l'agrégat minéral et la matrice cimentaire. Dans

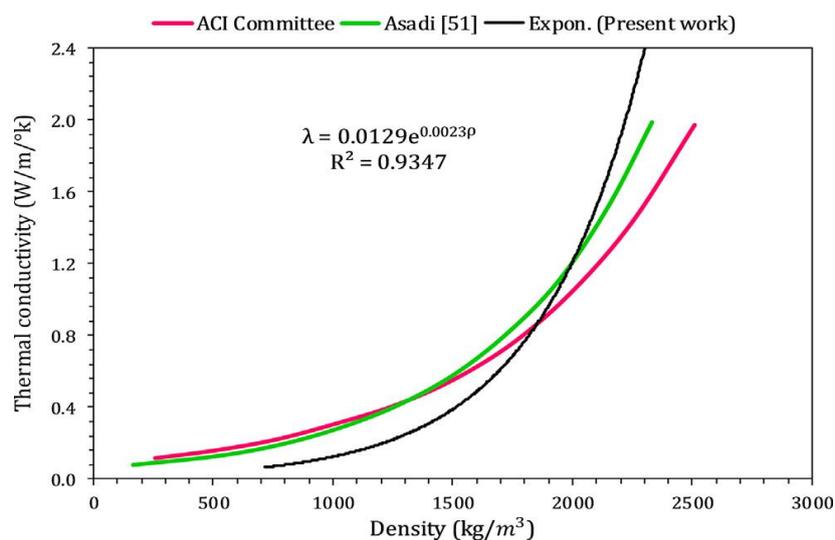
certaines parties, la couche séparant l'agrégat minéral de la matrice cimentaire semble être supprimée. D'autre part, l'image SEM rapportée dans 21 a révélé l'existence d'un ITZ assez poreux et pauvre entre le granulat de liège vierge et la matrice cimentaire. La largeur de cette couche poreuse variait approximativement entre 90 et 150mm.

De plus, l'image SEM a montré un manque de formation de gel CSH à côté de l'agrégat de liège. Cela signifie une inhibition de l'hydratation du ciment et soutient l'idée que l'interface plus faible présente la raison principale des faibles performances mécaniques et de la porosité élevée des bétons de liège vierges par rapport à ceux des bétons de référence. L'inhibition de l'hydratation du ciment après incorporation de granulés de liège vierge peut être associée à la capacité d'absorption élevée de ces derniers, en partie, et à leur libération de composés chimiques dans la matrice cimentaire d'autre part.

#### II.2.4.9. Conductivité thermique

La Figure II.14 présente une variation de la conductivité thermique des bétons préparés par rapport à leur densité. Comme illustré, il a été prouvé qu'une relation exponentielle existe entre la conductivité du béton de liège vierge et sa densité correspondante.

Cette signifie que l'incorporation de liège vierge engendre une diminution exponentielle de la conductivité thermique. Il est important de noter que ce résultat est en bon accord avec ceux proposés par Asadi & al. [20] et le comité ACI213 R-03 cité dans ses travaux pour les bétons légers non structuraux.

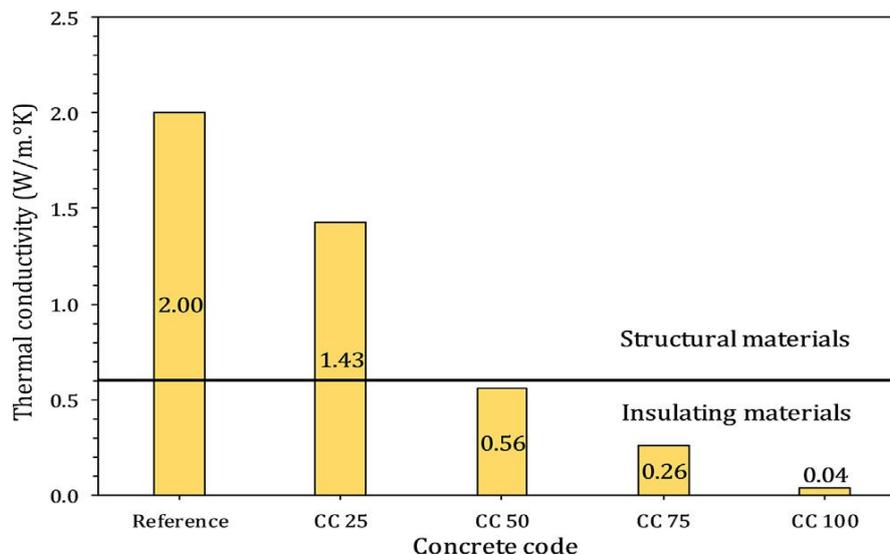


**Figure II. 14:** Comparaison entre les résultats obtenus dans ce travail et ceux rapportés par Asadi & al [20]

La figure II.15 montre les valeurs de conductivité thermique obtenues pour les différents mélanges préparés. A partir de l'histogramme, nous pouvons observer que cette conductivité

thermique varie entre 0,041 et 2,003 W/m. K. Les résultats rapportés ici peuvent être en partie liés à la porosité des mélanges. En fait, l'augmentation de la porosité signifie une augmentation de la quantité de vide qui est le meilleur isolant. Par conséquent, cela engendre une diminution de la conductivité thermique.

Par rapport aux résultats trouvés dans d'autres travaux, y compris le liège expansé et les déchets industriels, l'incorporation de liège vierge a donné des résultats prometteurs. Sur la base de ces résultats, CC50, CC75 et CC100 peuvent être classés comme matériaux isolants, tandis que CC25 reste dans la classe des matériaux de structure.



**Figure II. 15:** La conductivité thermique des bétons de liège de référence et vierges [20]

### II.2.5. Conclusions

Dans ce travail, une enquête expérimentale sur le potentiel d'utilisation du liège vierge pour développer du béton léger destiné à des applications de construction a été menée. Les expériences ont été réalisées sur cinq mélanges contenant, en volume de granulats : 0,25 50, 75 et 100 % de granulés de liège vierge. En résumé, l'étude dévoile ce qui suit :

- 1) A l'état frais, en introduisant du liège vierge dans le béton, l'ouvrabilité et la viscosité plastique ont été remarquablement diminuées.
- 2) Fait intéressant, tous les bétons de liège vierges produits appartiennent à la classe des bétons légers. Celui contenant 100% de liège vierge présentait une densité inférieure à  $720 \text{ kg/m}^3$ .
- 3) En termes de durabilité, bien que l'utilisation de liège vierge augmente la porosité et l'absorption capillaire des bétons, les bétons de liège vierge préparés ont montré des taux d'absorption inférieurs à ceux utilisant du liège expansé.

- 4) Malgré la réduction remarquable des résistances mécaniques par rapport au béton de référence, les composites de liège vierge présentent de bonnes propriétés mécaniques en tant que matériaux non structuraux. Par exemple, la résistance à la compression variait entre 0,48 et 8,35 MPa.
- 5) Les analyses de la microstructure ont montré l'existence d'un ITZ médiocre avec une couche poreuse entre les agrégats de liège vierge et la matrice cimentaire. L'épaisseur de cette couche varie entre 90 et 150mm.
- 6) Pour des quantités élevées de liège vierge (50, 75 et 100%) les bétons produits ont montré des valeurs encourageantes de conductivité thermique comprises entre 0,041 et 0,56 W/m. K.
- 7) Globalement, dans cette première étude sur l'incorporation de liège vierge dans la matrice cimentaire, des bétons ayant l'avantage d'être légers et écologiques et présentant une bonne capacité d'isolation thermique ainsi que des propriétés mécaniques compétitives ont été réalisés. Les résultats de cette étude suggèrent que les mélanges proposés peuvent être utilisés dans plusieurs applications de construction telles que les blocs de remplissage et les chapes isolantes.
- 8) Étant limitée à quelques propriétés, cette étude n'a pas pu donner une description complète des mélanges. Ceci peut être illustré par l'absence de la distribution porale et des paramètres de transfert des bétons. De plus, la faiblesse de la matrice vierge liège-ciment ITZ et la difficulté de trouver la bonne quantité d'eau sont des inconvénients qu'il faut reconnaître.
- 9) En termes de travaux futurs, il serait intéressant de : i) évaluer les propriétés hydriques, les retraits et autres paramètres liés au phénomène de transfert (distribution porale, isothermes...). ii) établir s'il existe une méthode pour améliorer l'ITZ entre le granulats de liège vierge et la matrice cimentaire. iii) tester les performances des bétons de liège vierges proposés à l'échelle réelle, c'est-à-dire dans certaines applications de construction ainsi que par simulation numérique.

### III. Matériaux et méthodes de caractérisation

#### III.1. Introduction

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, permettant de faire un choix répondant à leur destination. Par ailleurs, il est essentiel que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes. Ainsi, pour évaluer ces propriétés, on doit choisir des moyens adéquats afin de parvenir à un meilleur contrôle.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation et la caractérisation des matériaux utilisés durant notre étude.

Les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude sont le ciment, le sable, le liège, ainsi que l'eau de gâchage.

#### III.2. Matériaux utilisés

##### III.2.1. Ciment

Le ciment utilisé de type Portland composé CEM II/A de la classe 42,5 provenant de la cimenterie de Sour El Ghozlane, le ciment CEM II/A 42,5 est conforme à la norme NA 442 éditions 2000.

##### III.2.1.1. Composition chimique

Le tableau III. 1 représente la composition chimique du ciment CEM II/A 42,5.

**Tableau III. 1:** Composition chimique du ciment CEM II/A 42,5 [36]

Élément	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Pourcentage (%)	61.79	17.46	4.41	3.22	2.02	2.12	0.73	0.15

##### III.2.1.2. Composition minéralogique

Le tableau III. 2 représente la composition minéralogique du ciment CEM II/A 42,5.

**Tableau III. 2:** Composition minéralogique du ciment CEM II/A 42,5[36]

Élément	Pourcentage (%)
Silicate tricalcique C <sub>3</sub> S	68.08
Silicate bi calcique C <sub>2</sub> S	12.75
Aluminates tricalciques C <sub>3</sub> A	5.75
Alumino-ferrite titra-calcique C <sub>4</sub> AF	11.66

**III.2.1.3. Caractérisations mécaniques**

Le tableau III. 3 représente les caractérisations mécaniques du ciment CEM II/A 42,5.

**Tableau III. 3:** Caractérisations mécaniques du ciment CEM II/A 42,5[36]

Résistance (MPa)	Age	
	07 jours	28 jours
Compression	30	34
Flexion	4	4.29

**III.2.1.4. Caractérisations physiques**

Le tableau III. 4 représente les caractérisations physiques du ciment CEM II/A 42,5.

**Tableau III. 4:** Caractérisations physiques du ciment CEM II/A 42,5[36]

Désignations		Moyenne	Unités
Surface spécifique (SSB) (NA231)		3961	cm <sup>2</sup> /g
Poids spécifique		3.2	g/cm <sup>3</sup>
Consistance normale (NA 229)		26	% H2O
Temps (NA 230)	Début de prise	150	Min
	Fin de prise	252	Min
Retrait à 28 jours		731	µm/m
Expansion à chaud		0.5	Mm
Refus sur tamis 45 µm		20	%

**III.2.2. Sable**

Le sable utilisé dans notre étude est un sable de classe 0/4 commercialisé au niveau de GRANU CENTRE.

**III.2.2.1. GRANU CENTRE**

(Filiale de Groupe Industriel des Ciments d'Algérie) :

Est une unité de production et de commercialisation d'agrégats et sable concassés.

La politique de qualité de leurs usines exige d'avoir un laboratoire de contrôle qualité pour améliorer et assurer la qualité de leurs produits ainsi que le suivi de production.

Le prélèvement et la division des échantillons s'effectuent par nos mains selon les normes P1&-552, P 18-553 et NF EN 196-7 pour assurer une homogénéité du produit à tester. [35]

### III.2.2.2. Modalités des essais

-L'analyse granulométrique par tamisage a été réalisée selon les modalités de la norme NF EN 933-1 et NF EN 933-10.

-L'équivalent de sable été réalisée selon les modalités de la norme NF EN 933-8.

-L'essai au bleu de méthylène a été réalisée selon les modalités de la norme NF EN 933-9.

-L'essai de los Angeles a été réalisé selon les modalités de la norme NF EN 1097-2.

-L'essai Micro-Deval a été réalisé selon les modalités de la norme NF EN 1097-1.

-Le coefficient d'aplatissement été réalisé selon les modalités de la norme NRN33-3.

-La masse volumique en vrac a été réalisée selon les modalités de la norme NF EN J09753. [35]

### III.2.2.3. Essais au laboratoire

#### III.2.2.3.1. Essai équivalent de sable

Les résultats de l'essai sont représentés dans le Tableau III. 5.

**Tableau III. 5:** Essai équivalent de sable [35]

Code d'échantillon	Première échantillon	Deuxième échantillon
Masse de l'éprouvette (g)	121	121
$h_1$ (mm)	106	104
$h_2$ (mm)	78	76
$100 \times h_2/h_1$	73.6 %	73.1%
Moyenne	<b>ES = 73.3%</b>	

#### III.2.2.3.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique par tamisage du sable 0/4 mm a été réalisée selon les modalités de la norme NF EN 933-1 et NF EN 933-10 et les courbes fait par logiciel LABO-WIN.

<p><b>ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE</b></p> <p>PROCES VERBAL D'ESSAI (NF EN 933-1)</p> <p><b>PRODUIT</b> : 0/4 Béton</p> <p><b>FAMILLE</b>: sables</p> <p><b>SITE</b>: GRANU CENTRE Unité OSB</p> <p><b>NATURE</b>: calcaire</p> <p><b>ELABORATION</b>: concassage + criblage</p>
---

Le tableau suivant représente les informations générales sur l'essai de l'analyse granulométrique.

<b>Informations sur l'essai :</b>			
<p><b>réf. essai</b> :0/4 Fév.. 2021</p> <p><b>Date de l'essai</b> : 11/02/2021</p> <p><b>Observation(s)</b>: 0/4 Fév. 2021</p> <p><b>Préparation Echantillon n°1 :</b></p> <p><b>Masse humide</b>: M1h [g] = 264.9.</p> <p><b>Masse sèche</b>: M1s [g] = 264.5.</p> <p><b>Teneur en eau</b>: W%]= 0.15.</p>	<p><b>Opérateur</b> : CHETAH Med</p> <p><b>Prélevât.</b>: PrH000043 le 0902/2021 par CHETAH M</p> <p><b>Préparation Echantillon n°2 :</b></p> <p><b>Masse humide avant lavage</b>:Mh [al= 264.5</p> <p><b>Masse sèche après lavage</b>:Msi 9= 255.8</p> <p><b>Tamis de lavage [mm]</b>= 0.063</p> <p><b>Masse totale sèche</b>: Ms (g)= 264.1</p>	<p><b>CIS LABORATOIRE</b></p> <p><b>Date</b>: 28/02/2021</p> <p><b>CHETAH Med</b></p>	
<p><b>MF</b>= 3.16      <b>D10</b> =0.10 mm      <b>D60</b> =1.60 mm      <b>Cu 1</b>=6.00</p> <p><b>D30</b>= 0.40 mm      <b>D70</b>= 200 mm      <b>Cc</b> =1.00</p>			

**Tableau III. 6:** Analyse granulométrique [35]

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Masse de refus cu- mulés (g)</b>	<b>passants (%)</b>
<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	<b>100</b>
<b>5.60</b>	<b>0.0</b>	<b>100</b>
<b>4.00</b>	<b>5.2</b>	<b>98</b>
<b>2.50</b>	<b>58.7</b>	<b>77.8</b>
<b>1.25</b>	<b>127.6</b>	<b>51.7</b>
<b>0.63</b>	<b>169.8</b>	<b>35.7</b>
<b>0.315</b>	<b>197.6</b>	<b>25.2</b>
<b>0.125</b>	<b>228.1</b>	<b>13.6</b>
<b>0.063</b>	<b>255.8</b>	<b>3.1</b>
<b>Fond</b>	<b>255.8</b>	<b>0.0</b>

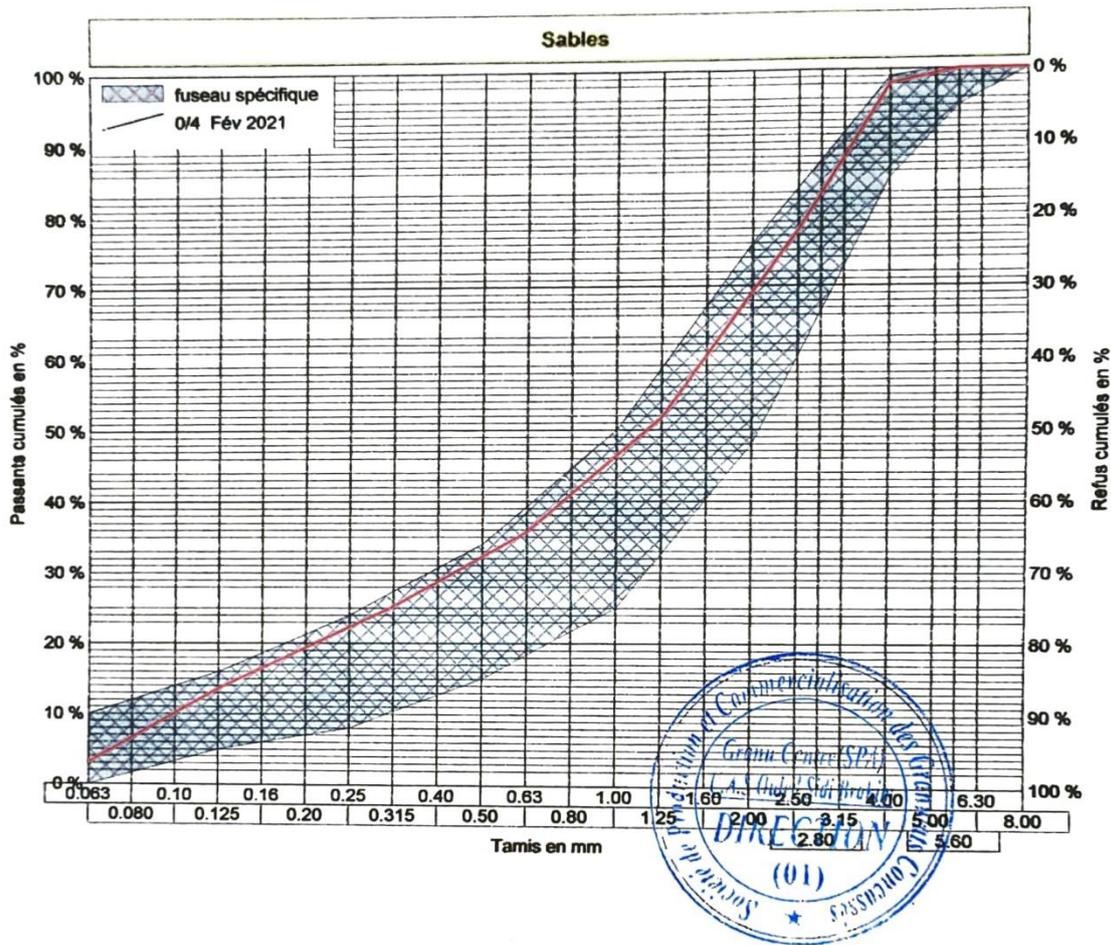


Figure III. 1: Analyse granulométrique [35]

### III.2.3.Eau de gâchage

L'eau de gâchage est la quantité d'eau ajoutée au mélange sec de béton, elle remplit deux fonctions : d'une part elle sert à l'hydratation du liant et d'autre part, elle permet la fluidification du mélange ayant pour but de faciliter la mise en place du béton.

#### III.2.3.1. Caractérisations physiques

L'eau doit être propre, elle ne doit pas contenir des matières en suspension au-delà de :

-2g/l pour les bétons de types A et B.

-5g/l pour les bétons de type C.

Béton A : béton de haute qualité à forte résistance.

Béton B : béton à grande imperméabilité.

Béton C : béton courant peu ou non armé.

### III.2.3.2. Caractérisations chimiques

L'eau ne doit pas contenir de sels dessous au-delà de :

-1.5g/l pour les bétons de types A et B.

-3g/l pour le béton de type C.

### III.2.4. Liège

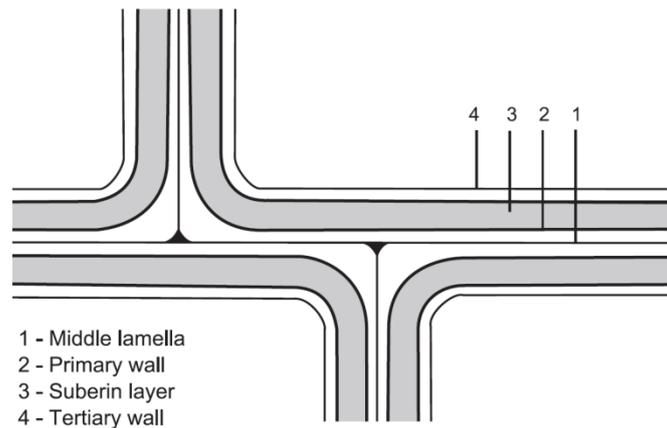
Le liège est un matériau biologique aux propriétés uniques. Il a attiré l'attention de l'homme depuis l'antiquité, grâce à certaines de ses propriétés principales et ses diverses applications. Cette espèce est obtenue à partir de l'écorce externe du chêne-liège. Les couches de liège qui sont produites dans son écorce forment une enveloppe continue avec une épaisseur appréciable autour de la tige et des branches. Cette particule végétale peut être retirée de la tige sans mettre en danger la vitalité de l'arbre, qui reconstruit ensuite une nouvelle couche de liège. C'est la base de la production durable de liège pendant la longue durée de vie du chêne-liège.

La plupart des chênes lièges utilisés dans le monde se trouvent dans les pays d'Europe méridionale que sont le Portugal et l'Espagne, ils sont également exploités en Sardaigne et dans une mesure très limitée dans d'autres régions d'Italie et en France, ainsi qu'au nord de l'Afrique, en l'occurrence, Au Maroc, en Tunisie et en Algérie. Actuellement, dans une mesure limitée, le liège produit, alimente le secteur industriel important qui exporte ses produits dans le monde entier. La recherche est active depuis les années 1990 et de nombreuses publications internationales ont élargi le corpus de connaissances sur le liège et le chêne-liège.

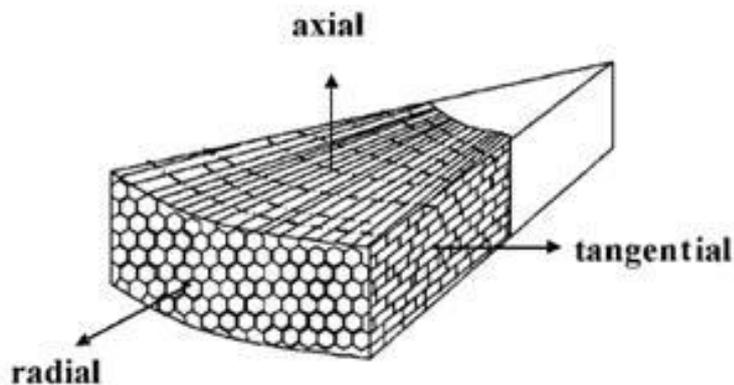
#### III.2.4.1. Morphologie de liège

La structure cellulaire du liège est bien connue et leur tissu a conservé une place particulière dans l'histoire de l'anatomie des plantes **Figure III. 2**. Le liège peut être décrit comme un tissu homogène de cellules à parois minces, régulièrement disposées sans espace intercellulaire. Le liège révèle une structure alvéolaire, analogue à celle d'un nid d'abeille **Figure III.3**, sans espace vide entre les cellules contiguës, qui sont donc des unités fermées.

Le liège orienté peut être considéré, en première approximation, comme un matériau isotrope transversalement, ce qui implique que toutes les directions perpendiculaires à la direction radiale (c'est-à-dire les directions axiale et tangentielle) sont presque équivalentes.



**Figure III. 2:** Représentation schématique de la structure de la paroi cellulaire du liège [36]



**Figure III. 3:** Représentation schématique de la disposition cellulaire de liège [37]

#### III.2.4.2. Composition chimique du liège

Les propriétés d'un matériau dépendent des caractéristiques chimiques de ses composants, de leur quantité relative et de leur répartition dans le solide. Dans le liège, comme dans d'autres matériaux cellulaires, les composants chimiques sont situés dans les faces et les bords des cellules. La composition du liège diffère de celle des autres tissus végétaux, notamment du bois. Cette différence est variée selon des facteurs de croissance, de climat et même il diffère d'un arbre à autre. [38]

La paroi cellulaire du liège est composée chimiquement de deux types de paroi. En ce qui concerne la première, elle contient des composants structuraux qui sont des macromolécules de nature polymérique, constituant la paroi cellulaire et en définissent la structure ; elles sont insolubles et ne peuvent pas être retirés de la paroi cellulaire sans affecter profondément la structure et les propriétés de la cellule. En outre, la deuxième contient des composants non structuraux ; il s'agit de composés organiques de faible poids moléculaire qui peuvent être solubilisés par des procédés appropriés (solvants, appelés extractifs).

Ainsi, le liège comprend à la fois des composants structurels, une forme complexe, ainsi que des composants non structurels. Il se compose principalement de subérine qui est responsable de la compressibilité et de l'élasticité du liège. Aussi, les parois cellulaires du liège sont riches en lignine, et polysaccharides offrant à la structure du liège sa rigidité et sa forme, et on y trouve aussi les cires qui repoussent l'eau et contribuent à son imperméabilité. De plus, les tanins donnent au liège sa couleur, et jouent le rôle de protection et conservation du matériau.

[36]

La composition chimique du liège comprend plusieurs types de composés, traditionnellement divisés en cinq groupes, à savoir : Subérine (45%), Lignine (27%), Polysaccharides (12%), Cire (6%), Tanins (6%) et Cendre (4%). [36]

#### **III.2.4.2.1. Propriétés de liège**

##### **III.2.4.2.1.1. Propriétés mécaniques**

Le liège présente des propriétés mécaniques plutôt particulières. La nomenclature utilisée pour les directions et les sections en liège est celle qui est généralement utilisée dans la description du bois, selon la nomenclature utilisée dans la littérature et dans la section III.2.4.1. (Morphologie du liège), ils seront désignés par radiale (R) ou non radiale (NR) ; cette dernière correspondant à la direction tangentielle ou axiale.

En général, le liège présente un comportement différent en traction et en compression. [39] Rosa et Fortes, 1991 ont signalé que le module d'Young en compression est sensiblement plus petit par rapport à la traction. Le plus grand module en traction s'explique par la rigidité des plaques ondulées (parois cellulaires), qui augmentent à mesure que l'amplitude des ondulations diminue. En effet, la compression augmente l'amplitude, alors que la traction la diminue. [36]

##### **III.2.4.2.1.2. Propriétés physiques**

L'étude des autres propriétés que mécaniques n'a pas été considérable, bien qu'elles soient clairement importantes pour les nombreuses applications actuelles du liège.

- **La masse volumique et la transition thermique**

Le liège est caractérisé par une faible masse volumique, cette faiblesse est due principalement à la forte teneur en air des petites cellules. La teneur en air et la taille de la cellule expliquent la mauvaise propriété de transfert de chaleur du liège. La chaleur peut être transmise par conduction (qui dépend de la quantité de solide dans la structure), convection (qui est significative uniquement pour les grands volumes de gaz) et le rayonnement (qui devient moins efficace avec la diminution de la taille de la cellule). Dans le liège, seule la conduction a une im-

portance pour le transfert de chaleur. [36] La conductivité thermique des parois des cellules de liège sera légèrement supérieure à celui du gaz contenu dans les cellules.

- **Transmission du son**

De même, la transmission du son est très faible en raison de la faible masse volumique et de la grande porosité du liège ; la plupart des ondes sonores incidentes sont absorbées et transformées en énergie thermique, ce qui réduit la réverbération, particulièrement significative pour les panneaux de liège expansé.

### III.3. Elaboration des mortiers légers

Dans le cadre de notre étude nous avons élaboré six variantes de mortier léger (témoin, 10%, 20%, 30%, 40% et 50%).

La figure ci-dessous représente le mortier élaboré.



**Figure III. 4:** Confection d'un mortier 30%

### III.4. Essais mécaniques

Des essais mécaniques de compression et de flexion trois points ont été réalisés au niveau de laboratoire pédagogique de département de Génie Civil de l'université de Bouira.

Les figures III. (5, 6, 7, 8) représentent les essais mécaniques de flexion trois points et de compression réalisés sur des éprouvettes  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$  d'un mortier léger.

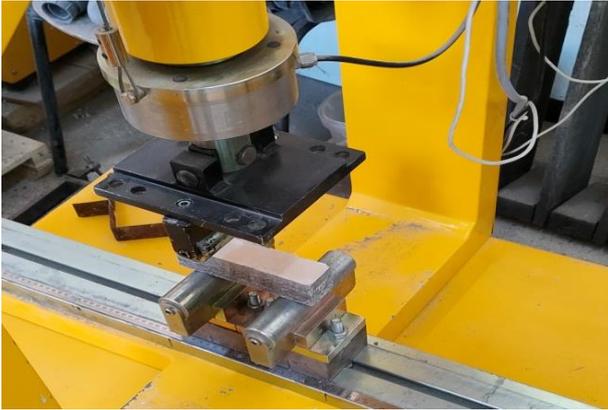


Figure III. 5: Avant destruction (flexion)



Figure III. 6: Après destruction (flexion)



Figure III. 7: Avant destruction (compression)



**Figure III. 8:** Après destruction (compression)

### III.5. Essais thermiques

Des essais thermiques sur la conductivité thermique des différents mortiers élaborés ont été effectués au niveau du Centre National d'études et de recherches intégrés du bâtiment (CNE-RIB).

Les figures III.9 et III.10 Représentent l'appareil de mesure de la conductivité thermique et les éprouvettes (10x10x4) cm<sup>3</sup>.



**Figure III. 9:** Conductimètre



**Figure III. 10:** Les éprouvettes

## IV. Résultats et discussions

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes observations et remarques obtenues à partir des différents essais réalisés sur notre béton, ainsi que les différentes interprétations scientifiques sur chaque résultat.

### IV.2. Essais mécaniques

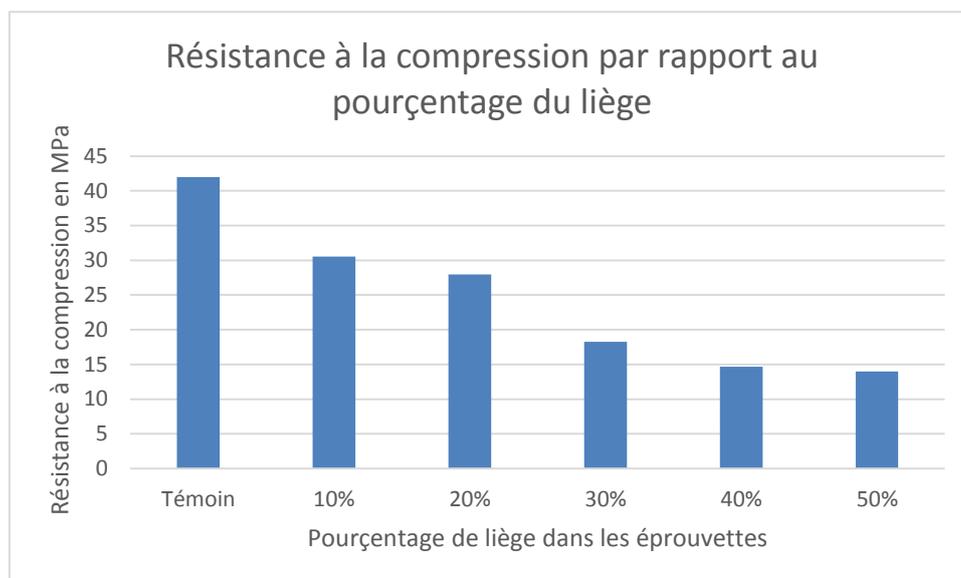
Dans cette étude, on a réalisé deux essais mécaniques sur des éprouvettes de  $(4 \times 4 \times 16)$  cm<sup>3</sup>: l'essai de résistance à la compression et l'essai de résistance à la flexion.

#### IV.2.1. Résistance à la compression

Tableau IV. 1 et Figure IV. 1 représentent les valeurs des résultats des essais de résistance à la compression du béton léger de liège par rapport au béton témoin.

**Tableau IV. 1:** Résistance à la compression en MPa

Éprouvette	Masse (g)	Résistance (MPa)
Témoin	606	42
10%	555	30,53
20%	546	27,97
30%	505	18,27
40%	470,67	14,65
50%	452,67	14



**Figure IV. 1:** Résistance à la compression en MPa

### IV.2.2. Interprétation des résultats de la résistance à la compression

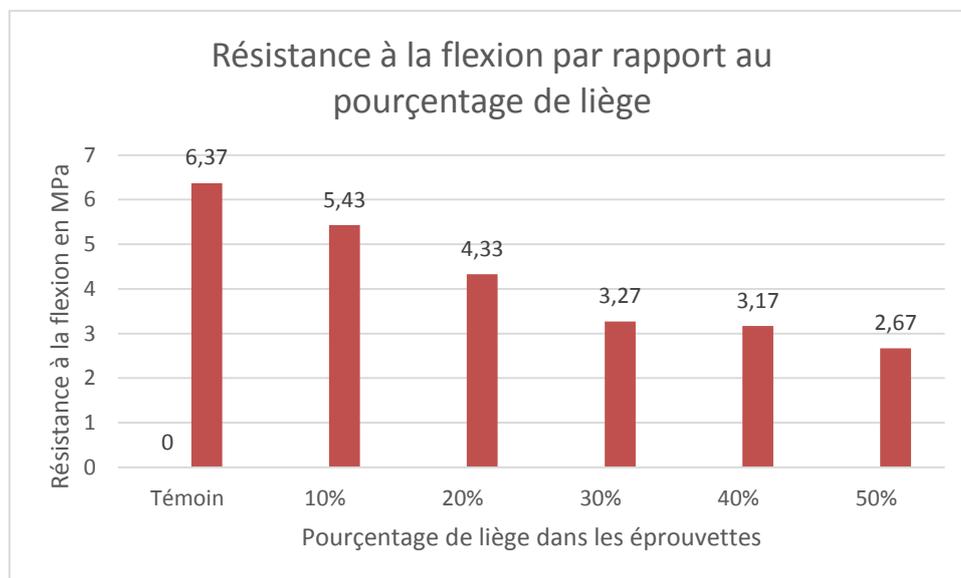
Comme il peut être vu dans le Tableau IV. 1 les masses des échantillons et ses résistances à la compression se situent entre 606 – 452,67 g et 42 – 14 MPa respectivement, on note aussi que l'addition de liège dans les échantillons de 0% à 50% réduit la masse de 18.9% par rapport au béton témoin, cette légèreté est due à la faible densité de liège, tandis que la résistance à la compression est inversement proportionnelle avec le pourcentage de liège ajouté dans le béton, ça peut être expliqué par les caractéristiques mécaniques de lièges qui ne sont pas très forts à cause de sa microstructure qui est poreuse.

### IV.2.3. Résistance à la flexion

Tableau IV. 2 et Figure IV. 2 représentent les valeurs des résultats des essais de résistance à la flexion du béton léger de liège par rapport au béton témoin.

**Tableau IV. 2:** Résistance à la flexion en MPa

Éprouvette	Masse (g)	Résistance (MPa)
<b>Témoin</b>	<b>606</b>	<b>6,37</b>
<b>10%</b>	<b>555</b>	<b>5,43</b>
<b>20%</b>	<b>546</b>	<b>4,33</b>
<b>30%</b>	<b>505</b>	<b>3,27</b>
<b>40%</b>	<b>470,67</b>	<b>3,17</b>
<b>50%</b>	<b>452,67</b>	<b>2,67</b>



**Figure IV. 2:** Résistance à la flexion en MPa

#### IV.2.4. Interprétation des résultats de la résistance à la flexion trois point

Similairement aux résultats d'essai de compression, le Tableau IV. 2 montre que les masses des échantillons et ses résistances à la flexion se situent entre 606 – 452,67 g et 6,37 – 2,67 MPa respectivement, on note aussi que l'addition de liège dans les échantillons de 0% à 50% réduit la masse de 18.9% par rapport au béton témoin, cette légèreté est due à la faible densité de liège, tandis que la résistance à la flexion est inversement proportionnelle avec le pourcentage de liège ajouté dans le béton, ça peut être expliqué par les caractéristiques mécaniques de lièges qui ne sont pas très forts à cause de sa nature poreuse.

#### IV.3. Essais physiques

Les deux essais physiques qu'on a réalisés dans cette étude sont l'essai d'absorption d'eau par immersion et l'essai de la masse volumique.

##### IV.3.1. Absorption d'eau par immersion

Le béton est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. L'absorption d'eau par immersion est le résultat des mouvements capillaires dans les pores du béton qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion d'une éprouvette de béton dans l'eau jusqu'à masse constante et en mesurant l'augmentation de masse. Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'éprouvette. Etant une image de la porosité, l'absorption d'eau est utilisée comme un indicateur de la qualité du béton.

L'absorption d'eau est déterminée par la formule suivante :

$$Abs = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Avec :

Abs : Absorption. (%)

Mh : Masse humide. (g)

Ms : Masse sèche. (g)

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes de (30x30x2) cm<sup>3</sup> et les résultats sont exprimés dans le Tableau IV. 3 et la Figure IV. 3 ci-dessous :

Tableau IV. 3: Résultats d'essai d'absorption d'eau

Éprouvette	Masse sèche (g)	Masse humide (g)	Absorption (%)
Témoin	4439	4582.5	3,23
10%	3886,5	4075	4,85
20%	3654	3862	5,69
30%	3513	3724	6,00
40%	3253	3477	6,88
50%	3017	3236,5	7,27

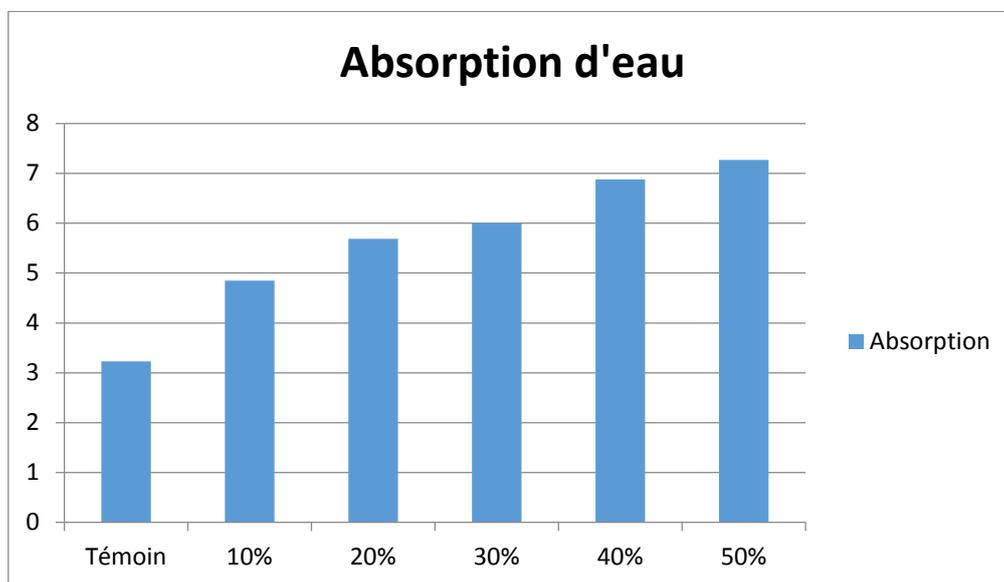


Figure IV. 3: Résultats d'essai d'absorption d'eau

#### IV.3.2. Interprétation des résultats de l'absorption d'eau par immersion

Les résultats de l'essai d'absorption par immersion qui sont résumés dans le Tableau IV. 3 et la Figure IV. 3 montrent que l'absorption augmente avec l'augmentation de pourcentage de liège dans le béton, avec une absorption égale à 3,23% pour le béton témoin jusqu'à une absorption de 7,27% pour un béton qui contient 50% de liège ; cette augmentation peut être expliquée par les caractéristiques de liège qui est un matériau plus poreux que le béton et aussi par les pores existants dans le béton lui-même à cause de présence de liège dans ce dernier.

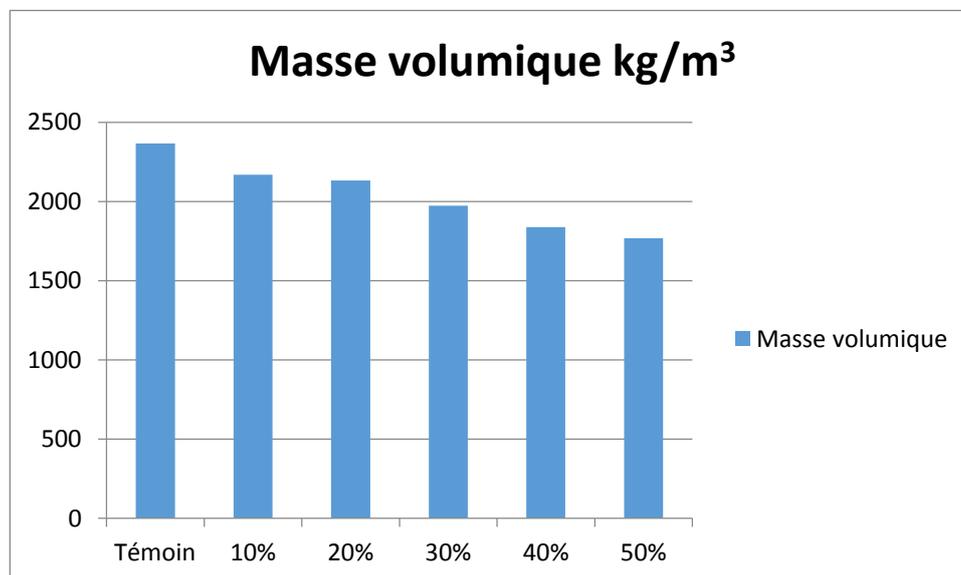
#### IV.3.3. Masse volumique

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 faisant varier les proportions des différents constituants (liège et sable).

Le Tableau IV. 4 représente les valeurs des masses et des masses volumiques des différents échantillons, sachant que l'essai a été réalisé sur des éprouvettes de  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$  ça-veut-dire un volume constant égal à  $2,56 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ .

**Tableau IV. 4:** Masse volumique

Éprouvette	Masse (kg)	Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )
Témoin	0,606	2367
10%	0,555	2168
20%	0,546	2133
30%	0,505	1973
40%	0,47	1839
50%	0,452	1768



**Figure IV. 4:** Masse volumique

#### IV.3.4. Interprétation des résultats de la masse volumique

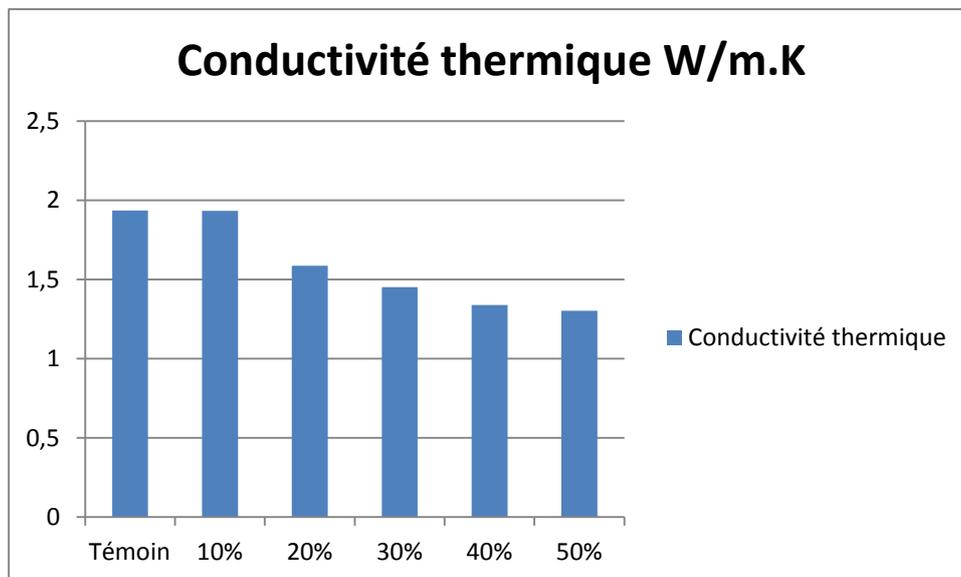
La figure IV. 4 représente les différentes masses volumiques des différents échantillons selon le pourcentage de liège contenu dans chaque échantillon, on voit que les masses volumiques diminuent significativement du béton témoin jusqu'au béton qui contient 50% de liège, cette diminution de densité a une relation directe avec le liège qui est un matériau léger ; alors, plus qu'il y a de liège dans le béton plus ce béton devient plus léger.

#### IV.4. Essai thermique

Dans notre étude le seul essai thermique qu'on a réalisé est l'essai de la conductivité thermique, cet essai a été réalisé sur des éprouvettes de  $(10 \times 10 \times 4) \text{ cm}^3$  et les résultats obtenus sont mentionnés dans le Tableau IV. 5 ci-dessous.

**Tableau IV. 5:** Conductivité thermique

Éprouvette	Conductivité thermique (W/m.K)
Témoin	1,936
10%	1,933
20%	1,586
30%	1,451
40%	1,338
50%	1,302

**Figure IV. 5:** Conductivité thermique

#### IV.4.1. Interprétation des résultats de la conductivité thermique

La figure IV. 5 ci-dessus nous donne une image claire sur la conductivité de notre mortier élaboré, cette conductivité qui va de 1,936 W/m.K pour le béton témoin à 1,302 W/m.K pour le béton qui contient 50% de liège; ces résultats nous indiquent que l'isolation thermique de notre mortier augmente proportionnellement avec l'augmentation de quantité du liège incorporée, cette augmentation est due aux bonnes propriétés d'isolation du matériau liège.

#### IV.5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre dédié aux résultats et discussions, on a décrit les différents essais qu'on a réalisés sur notre béton, on a commencé par les essais mécaniques avec la résistance à la compression et la résistance à la flexion, puis on a passé aux essais physiques avec l'absorption d'eau et la masse volumique, finalement nous avons terminé par l'essai de conductivité thermique.

Les résultats de ces essais n'étaient pas toujours satisfaisants à notre étude ; par exemple dans l'essai de la masse volumique les deux seules catégories de béton qui tombent dans la plage du béton léger sont le béton de 40% ( $1839 \text{ Kg/m}^3$ ) et le béton de 50% ( $1768 \text{ Kg/m}^3$ ). Les résultats de l'essai de la conductivité thermique montrent que l'isolation thermique des mortiers élaborés augmente avec l'augmentation de la quantité de liège incorporé dans ces derniers.

### V. Conclusion générale

En conclusion, nous avons couvert à travers cette étude le sujet d'élaboration d'un béton léger à base de liège. Les résultats obtenus dans notre étude nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de résistance mécanique à la compression et à la flexion trois points sont inversement proportionnelle avec le pourcentage du liège ajouté dans le béton, ça peut être expliqué par les faibles caractéristiques mécaniques de lièges à cause de sa microstructure qui est poreuse.
- Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion montrent que l'augmentation de la teneur en liège dans les mortiers élaborés provoque une absorption plus élevée de ces derniers, ça peut être expliquée par les caractéristiques de liège qui est un matériau plus poreux que le béton et aussi par les pores existants entre les grains de liège et le mortier.
- Les résultats de l'essai de la masse volumique indiquent une diminution de densité, cette dernière a une relation directe avec le liège qui est un matériau léger ; alors, plus qu'il y a de liège dans le mortier plus il devient plus léger.
- Les résultats de l'essai de la conductivité thermique illustrent une diminution de la conductivité thermique des mortiers confectionnés avec l'augmentation de la quantité de liège additionnée. Cette augmentation de l'isolation thermique est due aux bonnes propriétés d'isolation du matériau liège.

### VI. Perspectives

- Nous recommandons aux promotions à venir d'élaborer des mortiers légers et isolants contenant un pourcentage d'incorporation du liège au minimum 40%, pour avoir des résultats satisfaisants en termes d'isolation et de légèreté.
- Il est important d'étudier d'autres matériaux isolants, dans un souci de préserver l'environnement, on conseil de valoriser par exemple les grignons d'olives

- **Références bibliographiques**

- [1] Site web <https://theconstructor.org/concrete/> consulté en ligne le 14 Juillet 2021
- [2] Georges DREUX, Jean FESTA « *Nouveau guide du béton et de ses constituants* », EYROLLES, Paris, huitième édition 1998.
- [3] A. Neville : « propriétés des bétons », Eyrolles. Paris, 2000.
- [4] Yang.k (2008) ; caractérisation mécanique des bétons de granulats légers, expérience et modélisation ,thèse de doctorat de l'université de Cergy –pontoise.
- [5] JOHN L.CLARKE, 1993, «Structural lightweight Aggregate Concrete» Edited by Chief Structural Engineer British Cement Association Crowthorne First Edition 1993
- [6] Mme. MOHELLEBI Samira : « Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hydro mécaniques d'un béton léger à base granulats composites », Thèse de Doctorat Génie Civil, Tizi-Ouzou 2014
- [7] Latifou Bello : Méthodologie de formulation des bétons auto plaçants légers, Rapport d'études et recherches, Septembre 2015.
- [8] M. Constant, «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.
- [9] M.SHINK, «Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers». Université Laval Québec Avril 2003.
- [10] SFBC. «Mémento du béton cellulaire » Eyrolles juin 2005 France.
- [11] J. Cox, Jacques Sizaireir. Pascal Meuldersir. Elly Van Overmeireir. Albert Ingelaere "Le Béton Cellulaire" article réalisé par La Fédération belge de Béton Cellulaire,
- [12] Short, A., &Kinniburgh, W. LightweightConcrete, 1978.
- [13] ACI, B. (1999). 213R-87, guide for structural lightweight aggregate concrete. American Concrete Institute International.
- [14] 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.
- [15] DJAKAM Imane « élaboration d'un béton léger à partir des matériaux locaux ». Mémoire de master université Mohammed Boudiaf m'sila 2016.

- [16] « *Experimental investigation on lightweight concrete added with industrial waste (steel waste)* » par M. Kalpana et AhohTayu du Département de génie civil, Saveetha School of Engineering, Chennai, Tamil Nadu, Inde.
- [17] BS EN 1097-3, Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 3: Determination of loose bulk density and voids, 1998.
- [18] BS EN 1097-6, Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption, 2013.
- [19] BS EN 933-1, Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method, 2012.
- [20] I. Asadi, P. Shafigh, Z.F. Bin Abu Hassan, N.B. Mahyuddin, Thermal conductivity of concrete – A review, *J. Build. Eng.* 20 (2018) 81–93, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>.
- [21] H. Soualhi, E.H. Kadri, T.T. Ngo, A. Bouvet, F. Cussigh, B. Benabed, Rheology of ordinary and low-impact environmental concretes, *J. Adhes. Sci. Technol.* 29 (2015) 2160–2175, <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1059641>.
- [22] O. Taleb, F. Ghomari, M.A. Boukli Hacene, E.H. Kadri, H. Soualhi, Formulation and rheology of eco-self-compacting concrete (Eco-SCC), *J. Adhes. Sci. Technol.* 31 (2017) 272–296, <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1215010>.
- [23] P. Estellé, C. Lanos, A. Perrot, Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation, *J. Nonnewton. Fluid Mech.* (2008), <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.01.006>.
- [24] BS EN 12390-7, Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete, 2009.
- [25] BS EN 12504-4, Testing concrete — Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, 2004.
- [26] AFPC-AFREM, Durabilité des bétons : Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, 2007.
- [27] ASTM C 1585-04, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, *Am. Soc. Test. Mater.* (2004) 1–6.
- [28] BS EN 12390-3, Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens, 2009.
- [29] A.T. Le, A. Gacoin, A. Li, T.H. Mai, M. Rebay, Y. Delmas, Experimental investigation on the mechanical performance of starch – hemp composite materials

- [30] BS EN 12390-5, Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens, 2009.
- [31] M.E. Orakoglu, J. Liu, F. Niu, Experimental and modeling investigation of the thermal conductivity of fiber-reinforced soil subjected to freeze-thaw cycles, *Appl. Therm. Eng.* 108 (2016) 824–832, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.112>.
- [32] J.K. Prusty, S.K. Patro, Properties of fresh and hardened concrete using agrowaste as partial replacement of coarse aggregate - A review, *Constr. Build. Mater.* 82 (2015) 101–113, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.063>.
- [33] K. Gunasekaran, R. Annadurai, P.S. Kumar, Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 208–215, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.08.072>.
- [34] M. Chabannes, J.C. Bénézet, L. Clerc, E. Garcia-Diaz, Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application, *Constr. Build. Mater.*
- [35] Rapport d'analyse des granulats (GRANU CENTRE).
- [36] Gil, L. (2009). Cork Composites: A Review. *Materials*, 2(3), 776-789. doi:10.3390/ma2030776
- [37] Silva, S. P., Sabino, M. A., Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Boesel, L. F., & Reis, R. L. (2005). Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*, 50(6), 345-365. doi: 10.1179/174328005x41168
- [38] Gil, L. (2015). New Cork-Based Materials and Applications. [Review]. *Materials (Basel)*, 8(2), 625-637. doi: 10.3390/ma8020625
- [39] Rosa, M. E., Fortes, M. A. (1991). *J. Mater. Sci.* 26, 341–348.