

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université A/Mira de Béjaïa**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**



## **PROJET DE FIN DE CYCLE**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en génie civil

Option : Structures

**Thème :**

Elaboration de mortier allégé avec du liège

**Réalisé par :**

**Mesbah Ludmila**

**Arat Amel**

**Encadré par :**

**Dr Bouzidi Mohamed Amin**

**Jury:**

**Monsieur Ramadani**

**Madame Souidi**

**2023/2024**

# *Remerciements*

Nos vifs et sincères remerciements vont à notre directeur de recherche Monsieur Bouzidi Mohamed Amin, pour son encadrement et son dévouement dans le suivi de ce présent travail. On tient à témoigner de son professionnalisme ainsi que de sa grande générosité scientifique et humaine. Son approche et ses directives pertinentes nous ont été des atouts inestimables pour l'aboutissement de ce mémoire.

On remercie notre chef de département Monsieur Lilouche, pour son appui institutionnel, ainsi que pour l'environnement favorable qu'il a su mettre à notre disposition.

On souhaite exprimer notre reconnaissance envers les doctorants Si Ahmed Chabane et Oueld Amer Ahmed pour leurs assistances techniques et leurs encouragements.

Un grand merci à l'équipe du laboratoire LGCA, en particulier Madame Bouzeroura pour sa gentillesse et son aide tout au long de notre parcours.

On tient à remercier chaleureusement le directeur du centre de recherches CRAPC, Monsieur Ait Merzeg pour son soutien et les ressources mises à notre disposition.

On adresse notre remerciement, au technicien du laboratoire de Génie civil Monsieur Zoubiri ainsi qu'à Madame saci pour leur disponibilité et leur aide au sein du laboratoire.

Enfin, on souhaite exprimer notre gratitude à tous nos enseignants qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours, et qui ont veillés à nous transmettre leurs savoir.

*Ludmila et Amel*

# Dedications

In memory of my beloved grand-mother whose love and wisdom continue to  
guide me every day.

In your presence, as well as in your absence, your beautiful soul has been a  
constant source of inspiration, may it rest in peace.

I dedicate this work to my parents mom and pa who made our education and  
knowledge their top priority, and whose unwavering support and guidance  
have been my foundation.

To my two brothers and two sisters whom I cherish a lot, thank you for being  
there and lifting my spirits.

For my lovely baby niece EVA, I hope this work will serve you as a source of  
inspiration someday in the future.

To the real friends who became family, this journey was really fun and worth  
living with you.

Lastly, to myself who believed, when the other me doubted we finally made it.

With a heartfelt gratitude,

ЛЮДМИЛА  


## *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce mémoire à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.*

*À moi-même, pour ma persévérance, mon dévouement et mon travail acharné qui ont rendu possible l'aboutissement de ce projet.*

*À ma binôme, pour son partenariat précieux, son soutien et son engagement tout au long de ce projet.*

*À ma famille, pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.*

*À mes amis et collègues, pour leurs conseils avisés, les discussions enrichissantes et les moments de détente qui ont été essentiels tout au long de ce parcours.*

*À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, je vous exprime ma plus profonde gratitude.*

*Amel*

## Table de matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Etude bibliographique</b>	
Introduction.....	3
Première partie : Les mortiers	
I.1.Définition.....	4
I.2.Les éléments constitutifs d'un mortier .....	4
I.2.1.La matrice (Binding material).....	4
I.2.1.1.Fabrication du clinker.....	5
I.2.1.2.L'hydratation du ciment.....	6
I.2.2.Le sable.....	7
I.2.2.1.Rôle du sable dans le mortier.....	7
I.2.3.L'eau de gâchage.....	8
I.2.4. Les adjuvants.....	8
I.2.5.Les ajouts.....	9
I.3.Les différents types de mortiers.....	9
I.3.1.Mortier de ciment.....	9
I.3.2.Mortier de chaux.....	9
I.3.3.Mortier bâtard.....	9
I.3.4.Mortier réfractaire.....	9
I.3.5.Mortier rapide.....	9
I.3.6.Mortier industriel.....	10
I.3.7.Mortier allégé.....	10
I.4.Les classifications des mortiers.....	10
I.5.Les caractéristiques des mortiers.....	11
I.5.1.Ouvrabilité.....	11
I.5.2.Prise.....	11
I.5.3.Résistance mécanique.....	12
I.5.4.Retraits et gonflements.....	12
I.5.5.Masse volumique apparente.....	12
I.5.6.Masse volumique absolue.....	13

I.5.7.Porosité et compacité.....	13
I.5.8.Conductivité thermique.....	13
I.6.Applications des mortiers.....	14
Deuxième partie : Le liège	
I.1.Origine.....	15
I.2. Taxonomie de l'espèce.....	16
I.3. Répartition géographique.....	16
I.4. Procédés d'extraction.....	17
I.5.Structure.....	18
I.6.Composition.....	20
I.7.Propriétés.....	20
I.8. Types des produits à base de liège.....	22
I.9.La filière liège et ses applications.....	22
Etat de l'art.....	24
Conclusion.....	27

## **Chapitre II : Matériels et Méthodes**

### Introduction

II.1.Matériaux.....	28
II.1.1.Ciment.....	28
II.1.2.Le sable.....	30
II.1.3.Le liège.....	30
II.1.3.1.Characteristiques techniques du liège.....	30
II.1.3.2.Characteristiques physiques du liège.....	32
II.1.3.2.1.Mesure de la masse volumique.....	32
II.1.4.L'eau de gâchage.....	33
II.2.Confection des corps d'éprouve.....	33
II.3.Méthodologie d'étude.....	37
II.4.Dispositif de mesure des propriétés à l'état frais du ciment.....	38
II.4.1.Essai de consistance du ciment.....	38
II.4.2.Essai de prise du ciment.....	39
II.5. Dispositif de mesure des propriétés à l'état durci.....	40
II.5.1.Mesure des propriétés physiques.....	40

II.5.1.1.Pesée hydrostatique.....	40
II.5.1.2.Conductivité thermique.....	41
II.5.2.Mesure des propriétés mécaniques.....	42
II.5.2.1. La résistance à la flexion et à la compression.....	42
II.5.2.2.Auscultation sonique.....	43
II.5.3.Mesure des propriétés physico-chimiques.....	44
II.5.3.1.Analyse minéralogique par la diffraction des rayons X.....	44
II.5.3.2.Spectrométrie de fluorescence X.....	45
II.5.3.3.ATG / ATD / DSC.....	46
II.5.3.4.Spectroscopie par infrarouge (IRTF).....	47
Conclusion.....	48

### **Chapitre III : Résultats et discussion**

Introduction.....	49
III.1. Résultats de caractérisation physique du liège.....	50
III.1.1.Masse volumique absolue.....	50
III.1.2.Masse volumique apparente.....	51
III.2.Résultats de mesure de propriétés à l'état frais.....	52
III.2.1.Essai de prise de la pâte de ciment.....	52
III.2.2.Essai de consistance de la pâte de ciment.....	52
III.3.Resultats de mesure de propriétés à l'état durci.....	53
III.3.1.Résultats de mesure des propriétés physiques.....	53
III.3.1.1.La porosité.....	53
III.3.1.2.Absorption de l'eau.....	54
III.3.1.3.Conductivité thermique.....	56
III.3.2.Résultats de mesure des propriétés mécaniques.....	57
III.3.2.1. La résistance à la flexion et à la compression.....	57
III.3.2.2.Auscultation sonique.....	62
III.3.3.Resultats de mesure des propriétés physico-chimiques.....	63
III.3.3.1.Résultats de l'analyse minéralogique par la diffraction des rayons X.....	63
III.3.3.2.Spectrométrie de fluorescence X.....	64
III.3.3.3.Résultats de l'analyse thermogravimétrique ATG .....	65
III.3.3.4.Résultats de la spectroscopie par infrarouge (IRTF).....	67

Conclusion .....	71
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>72</b>



## Liste des tableaux

### Chapitre I : Etude bibliographique

Tableau I.1	Phases du clinker	5
Tableau I.2	Production mondiale du liège (Cork Quality Council)	17
Tableau I.3	Composants du liège	20
Tableau I.4	Propriétés physiques du liège	21

### Chapitre II : Matériels et Méthodes

Tableau II.1	Composition chimique du ciment	29
Tableau II.2	Composition potentielle du clinker	29
Tableau II.3	Caractéristiques mécaniques	29
Tableau II.4	Composition des différentes formulations du mortier	34
Tableau II.5	Essais et Analyses effectués sur les échantillons	37

### Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.1	Résultats de la masse volumique absolue	50
Tableau III.2	Résultats de la masse volumique apparente	51
Tableau III.3	Le temps de début et fin de prise de la pâte de ciment	52
Tableau III.4	Consistance normale de la pâte de ciment	52
Tableau III.5	Résultats de spectroscopie par fluorescence	64
Tableau III.6	Liaisons et provenance des pics du spectre FTIR (liège : 0% ciment : 400g)	67
Tableau III.7	Liaisons et provenance des pics du spectre FTIR (liège : 2% ciment : 400g)	68
Tableau III.8	Liaisons et provenance des pics du spectre FTIR (liège : 1% ciment : 450g)	69
Tableau III.9	Liaisons et provenance des pics du spectre FTIR de liège	70

## Liste de figures

### Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I.1	Etapas de différentes voies de fabrication du clinker	5
Figure I.2	Différentes applications des mortiers	14
Figure I.3	Arbre du chêne-liège	15
Figure I.4	Ecorce et glands du chêne liège	15
Figure I.5	Carte représentant la répartition géographique de l'essence du Quercus suber en méditerranée	17
Figure I.6	Extraction de l'écorce externe du chêne-liège	18
Figure I.7	La disposition et la forme des cellules de liège (a) et une cellule ondulée (b)	19
Figure I.8	Représentation schématique du tronc du chêne-liège (a) et de la microstructure en nid d'abeille du liège avec son repère matériel (b)	19
Figure I.9	Structure du liège observée par microscopie électronique à balayage section radiale (a), axiale (b) et tangentielle (c)	20
Figure I.10	Schématisme des produits en liège	22
Figure I.11	Vue d'ensemble de la filière du liège de reproduction et la répartition de la production	23

### Chapitre II : Matériels et Méthodes

Figure II.1	Le ciment	28
Figure II.2	Le sable	30
Figure II.3	Granulats de liège de diamètre 0,5mm	31
Figure II.4	Granulats de liège de diamètre 1,5mm	31
Figure II.5	Granulats de liège de diamètre 2mm	31
Figure II.6	Mesure de la masse volumique absolue et apparente	32
Figure II.7	Eau potable	33
Figure II.8	Malaxage	35
Figure II.9	Moulage	35
Figure II.10	Démoulage	36
Figure II.11	Conservation des échantillons dans l'eau	36
Figure II.12	Essai de consistance par l'appareil de Vicat.	38
Figure II.13	Essai de prise avec l'appareil de Vicat automatique	39
Figure II.14	Pesée hydrostatique	40
Figure II.15	Mesure de la conductivité thermique.	41
Figure II.16	Presse mécanique	42
Figure II.17	Test ultrasonique	43
Figure II.18	Diffractomètre	44
Figure II.19	Spectroscope	45
Figure II.20	Analyseur thermique (ATG, ATD, DSC)	46
Figure II.21	Pastille	47
Figure II.22	Spectrophotomètre IRAffinity-1	47

### Chapitre III : Résultats et Discussions

Figure III.1	Courbe de la masse volumique absolue	50
Figure III.2	Courbe de la masse volumique apparente	51
Figure III.3	Courbe 3D de la porosité	53
Figure III.4	Courbe 3D de l'absorption d'eau	54
Figure III.5	Courbe 3D de la conductivité thermique	56
Figure III.6	Courbe 3D de la résistance à la compression	57
Figure III.7	Ecrasement de deux demi échantillons sous l'effet de la compression	58
Figure III.8	Courbe 3D de la résistance à la flexion	59
Figure III.9	Echantillons en deux moitiés après flexion	60
Figure III.10	Structure interne des deux moitiés de l'échantillon	60
Figure III.11	Mortier de liège de 2mm	61
Figure III.12	Mortier de liège de 1,5mm	61
Figure III.13	Mortier de liège de 0,5mm	61
Figure III.14	Courbe 3D de la résistance à la flexion par la méthode ultrason	62
Figure III.15	Spectre de l'analyse minéralogique par la diffraction des rayons X	63
Figure III.16	Courbes de l'analyse thermogravimétrique (ATG)	65
Figure III.17	Spectre FTIR d'un mortier témoin (liège : 0% ciment : 400g)	67
Figure III.18	Spectre FTIR d'un mortier (liège : 2% ciment : 400g)	68
Figure III.19	Spectre FTIR d'un mortier (liège : 1% ciment : 400g)	69
Figure III.20	Spectre FTIR de liège	70

## LISTE D'ABREVIATIONS ET NOTATIONS

**A** : L'absorption d'eau (%)

**AL** : Aluminium

**APG III** : Angiosperm Phylogeny Group

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Alumine

**Al-O** : liaison ionique (oxyde d'aluminium)

**ATD** : Analyse thermique différentielle

**ATG** : Analyse thermogravimétrique

**Be** : Béryllium

**Ca** : Calcium

**CaO** : Oxyde de calcium

**C-N** : Liaison covalente simple (carbone et azote)

**C-O** : Liaison covalente simple (carbone et oxygène)

**C-OH** : Liaison covalente simple (groupe hydroxyle OH et carbone)

**C=C** : Liaison covalente double (carbone)

**C=O** : Liaison covalente double (carbone et oxygène)

**C3S** : Alite

**C2S** : Bélite

**C3A** : Aluminate

**C2A<sub>p</sub> F1- $\rho$**  : Alumino-ferrite

**C-S-H** : Silicate de calcium hydraté

**CPC** : Ciment Portland au calcaire

**D** : la distance de l'émetteur au récepteur

**DRX** : La diffraction des rayons X

**DSC** : Analyse de calorimétrie différentielle à balayage

**d** : La distance séparent l'extrémité de la sonde et la plaque de base

**E/C** : Rapport eau sur ciment

**E.L** : Eléments légers

**E** : ettringite

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Oxyde de fer

**Fe** : Fer

**FRX** : La spectrométrie de fluorescence X

**FTIR** : La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

**GICA** : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie

**H-O-H** : Liaison covalente (Eau)

**K<sub>2</sub>O** : Oxyde de potassium

**KBr** : Bromure de potassium

**MA** : Masse de l'ajout

**MgO** : Oxyde de magnésium

**Na<sub>2</sub>O** : Oxyde de sodium

**OH** : Hydroxyle

**P** : portlandite

**Q** : quartz

**PPM** : Parties par million

**R<sub>c</sub>** : Résistance à la compression

**Si** : Silicon

**SiO<sub>2</sub>** : Silice

**Si-O-Si** : Liaison covalente (silicium et oxygène)

**Si-O** : Liaison covalente (silicium et oxygène)

**SO<sub>3</sub>** : Trioxyde de soufre

**T** : le temps de propagation des ondes ultrasonores

**U** : Uranium

**V** : La vitesse du son dans le mortier

**ρ<sub>abs</sub>** : La masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)

**ρ<sub>app</sub>** : La masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le secteur de la construction est fortement impliqué dans l'impact du changement climatique, les émissions de gaz à effet de serre (GES) représentent environ 40 % du total des émissions mondiales de (GES), soit 12 gigatonnes (GT) par an. De plus, il représente 34 % de la consommation énergétique mondiale et 37 % des émissions de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) [1]. Le consensus général est que la production d'une tonne de ciment entraîne une tonne de  $CO_2$  [2]. Plus précisément, la production de ciment est responsable à elle seule d'environ 7 % de toutes les émissions de  $CO_2$  [3]. Pour s'aligner sur les objectifs définis dans l'Accord de Paris et atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, la planification méticuleuse des bâtiments économes en énergie doit être une préoccupation primordiale.

En outre, l'extraction intensive de matériaux de construction, notamment de sable, entraîne un épuisement rapide des réserves existantes, ce qui souligne l'importance de remplacer ces agrégats lourds par des matériaux naturels dans la construction afin de réduire l'impact environnemental et de promouvoir une utilisation durable des ressources. Le mortier à granulats légers constitue un exemple remarquable de matériau qui combine des caractéristiques de résistance et d'isolation thermique en remplaçant les agrégats de poids traditionnels par des agrégats légers, partiellement ou entièrement [4]. Dans ce contexte particulier, l'intégration du liège dans les mortiers constitue une avancée prometteuse. Le liège, en tant que substance renouvelable et naturelle, présente des caractéristiques remarquables telles que sa légèreté, ses capacités d'isolation thermique et acoustique, ainsi que sa résistance à la compression.

Ce mémoire se propose d'étudier l'influence de l'incorporation du liège sur les propriétés du mortier. La recherche est structurée autour de trois chapitres clés, chacun contribuant de manière significative à la compréhension et à l'évaluation des mortiers légers contenant du liège.

### Chapitre 1 : Étude Bibliographique

Le premier chapitre est consacré à un examen approfondi de la littérature existante concernant les mortiers légers et l'utilisation de matériaux alternatifs tels que le liège. Cette revue de la littérature explore les différents types de mortiers et leurs applications. En outre, il examine les attributs du liège et son rôle dans les matériaux de construction, en se concentrant sur des études antérieures et les conclusions d'autres chercheurs. Ce segment permet de situer nos recherches dans le contexte scientifique actuel, en soulignant l'importance et le caractère unique de notre méthodologie.

## **Chapitre 2 : Matériaux et méthodes**

Le deuxième chapitre décrit les matériaux et les techniques utilisés pour produire et analyser des mortiers légers à base de liège. Il décrit les composants fondamentaux, les proportions utilisées, le processus de fabrication des échantillons et les méthodologies d'analyse et de test mises en œuvre. Cette section s'efforce de fournir un compte rendu précis des procédures expérimentales utilisées.

## **Chapitre 3 : Résultats et Discussions**

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux et leur discussion ultérieure. Les propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques des mortiers légers contenant du liège sont juxtaposées à celles des mortiers traditionnels. Les résultats de l'analyse sont interprétés pour déterminer les phases constitutives et comprendre les interactions entre le liège et les autres composants du mortier. Cette section évalue également l'impact de l'intégration du liège sur la durabilité et l'efficacité générale des mortiers. Les résultats sont délibérés conformément aux objectifs de recherche et aux données de la littérature existante, ce qui permet de déduire l'efficacité et les promesses des mortiers légers à base de liège.

En conclusion ce mémoire vise à apporter une contribution à l'avancement des connaissances dans le domaine des matériaux de construction durables, ainsi qu'à la promotion d'une utilisation innovante des ressources naturelles comme le liège à des fins pragmatiques et respectueuses de l'environnement dans le domaine du génie civil.



# Chapitre I

## Introduction

Le mortier joue un rôle déterminant en tant qu'agent liant qui maintient et renforce les différents éléments d'une construction en génie civil. Il s'agit d'un mélange malléable formé en introduisant de l'eau dans une combinaison de matériaux liants et d'agréats fins.

De dissemblables compositions de mortier peuvent être formées, chacune est adaptée à des fins de construction spécifiques, ces mortiers sont obtenus en modifiant les différents paramètres tels que le liant (type et dosage), les adjuvants et les ajouts, ainsi que le dosage en eau, conduisant ainsi à la formation d'un mortier plus adéquat.

Des mortiers légers innovants ont été conçus pour réduire le poids, la densité et l'impact environnemental associés aux mélanges classiques à base de ciment. Souvent, ces mortiers renferment des agrégats légers divers comme l'alfa, le polystyrène et le liège. L'incorporation de ce dernier entraîne une réduction de la densité et une amélioration des performances d'isolation thermique [5], bien que la résistance mécanique diminue avec l'augmentation de la teneur en liège. Ces mortiers restent performants, ce qui les rend adaptés à différentes applications allant de la récupération structurale à des fins légères et isolantes. [6]

Il est plausible de valoriser le liège comme ressource renouvelable, recyclable et écologique dans les mortiers tout en intégrant des propriétés souhaitées telles que la légèreté et la durabilité, sans compromettre les performances mécaniques ainsi que l'isolation thermique.

Dans l'ensemble, les mortiers légers à base de liège constituent une alternative prometteuse pour la formulation des matériaux de construction écologiques et très performants, dotés de caractéristiques améliorées qui font évoluer le modèle économique linéaire existant vers une approche circulaire et plaident en faveur d'un secteur plus durable.

Dans ce premier chapitre, nous présenterons deux parties d'études principales à savoir :

1 ère partie : Les mortiers

2 ème partie : Le liège

## Première Partie : Les mortiers

### I.1.Définition :

Le mortier est un matériau de construction qui, dans son essence, est une combinaison de trois constituants principaux : un liant, des agrégats, de l'eau, et éventuellement des ajouts. Il est utilisé dans la construction comme élément de liaison, de scellement ou enduit, assurant ainsi l'intégrité structurale des bâtiments.[5]

### I.2.Les éléments constitutifs d'un mortier :

#### I.2.1. La matrice (Binding material) :

La matrice est le composant liant du mortier, généralement, du ciment : substance inorganique finement pulvérisée qui, en l'associant à de l'eau ou une solution saline, forme une pâte plastique liante. Cette dernière est capable d'agglomérer différentes substances et durcit au fil du temps suite aux réactions du processus d'hydratation. La composition fondamentale des ciments Portland consiste en un mélange de silicates de calcium et d'aluminates formés par la réaction de chaux ( $\text{CaO}$ ), avec de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), et de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Cette composition élémentaire de ciment provient du clinker, son principal composant. [7]

La norme (EN 197-1) classe le ciment en cinq types principaux :

- **Ciment portland (CEM I)** : fabriqué principalement à partir du clinker, ciment portland et de petites quantités de gypse.
- **Ciment portland composé (CEM II)** : contient du clinker de ciment portland mélangé à des ajouts tels que les cendres volantes, laitier, fumées de silice ou pouzzolane.
- **Ciment haut fourneau (CEM III)** : contient un pourcentage élevé de laitier de haut fourneau granulaire en plus du clinker du ciment portland.
- **Ciment pouzzolanique (CEM IV)** : intègre des matériaux pouzzolaniques qui réagissent avec la chaux pour former des composés cimentaires.
- **Ciment composé (CEM V)** : combine le clinker du ciment portland de haut fourneau et matériaux pouzzolanique.

**I.2.1.1. Fabrication du clinker :**

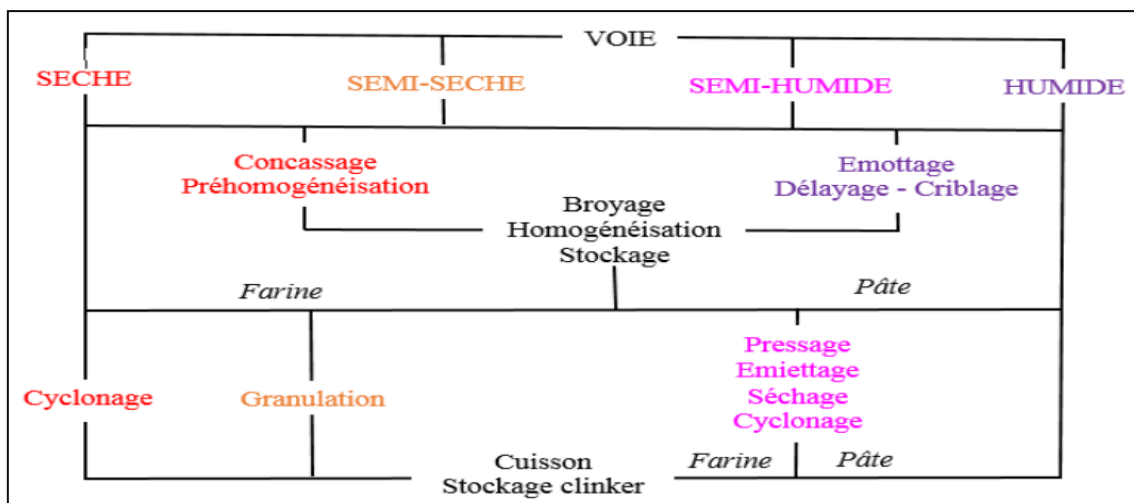
Le clinker est principalement composé de quatre phases décrites dans le **Tableau I.1** fourni. Les minéraux présents dans le clinker sont constitués de quatre oxydes primaires, à savoir CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, qui représentent collectivement environ 95 % de sa composition.[8]

**Tableau I.1 : Phases du clinker [8]**

Désignation des minéraux purs	Formules	Abréviations	Désignation du minéral présent dans le clinker
Silicate tricalcique	3CaO. SiO <sub>2</sub>	C3S	Alite
Silicate calcique	2CaO. SiO <sub>2</sub>	C2S	Bélite
Aluminate tricalcique	3CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C3A	Aluminate
Alumino-ferrite de calcium	2CaO. ρAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .(1-ρ)Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C2Aρ F1-ρ	Alumino-ferrite

Dans la production du clinker, les roches calcaires fournissent la chaux nécessaire, tandis que les argiles fournissent de l'alumine, de la silice et de l'oxyde de fer. La fabrication du clinker peut être réalisée par quatre méthodes distinctes : le procédé sec, le procédé humide, le procédé semi-sec et le procédé semi-humide, les deux derniers servant d'approches intermédiaires.

Une représentation visuelle des itinéraires de fabrication est illustrée à la **Figure I.1**. Actuellement, la méthode sèche est le choix préféré en raison de sa rentabilité supérieure et de sa capacité à faciliter la production.



**Figure I.1 : Etapes de différentes voies de fabrication du clinker [7]**

Par conséquent, dans le processus de fabrication du clinker, 80 % des calcaires et 20 % des argiles sont généralement obtenus à partir des carrières, puis broyés et mélangés pour former ce que l'on appelle le « cru ». Cette matière première est ensuite chauffée à une température de 1450°C pendant environ une heure dans un four rotatif. Le processus de calcination comporte plusieurs phases au cours desquelles des transformations chimiques complexes se produisent. [7]

#### I.2.1.2. L'hydratation du ciment :

Les constituants du ciment présentent des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils génèrent des hydrates qui précipitent en présence d'eau pour former une matrice structurellement robuste. L'hydratation du ciment englobe l'ensemble des processus chimiques qui se déroulent entre le ciment et l'eau, et qui commencent immédiatement après leur contact. Peu de temps après le mélange, la substance se durcit : elle passe rapidement d'un état suspendu à une forme solide.[9]

Sur le plan cinétique, le processus d'hydratation se déroule en cinq étapes [7] :

- ❖ Période de gâchage : C'est la première étape de dissolution des composants du ciment. Elle est extrêmement rapide et énergique. L'eau réagit immédiatement avec le C3S et le C3A des grains de ciment, créant ainsi de l'ettringite et des C-S-H (métastables).
- ❖ La période dormante : Elle dure quelques heures et le niveau de chaleur est limité. Il n'y a pas d'évolution de la pâte, mais les réactions chimiques ont commencé : des ions sont solubles dans l'eau pendant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). L'augmentation du pH de la solution ralentit la dissolution des composants du ciment. Ainsi, les C-S-H et l'ettringite se forment lentement et la phase aqueuse est sursaturée en chaux.
- ❖ Période de la prise ou d'accélération : cette période commence lorsque la teneur en ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  dans la solution atteint un niveau critique. La sursaturation entraîne la formation de précipitations de portlandite qui absorbe ces ions. En diminuant la quantité de  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  dans l'eau de gâchage, tous les composants du ciment se dissolvent plus rapidement. Les différentes phases subissent ensuite des processus de dissolution, de nucléation et de précipitation, ce qui permet la formation d'hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Ce processus chimique produit une grande quantité de chaleur.

Les hydrates créés commencent à se regrouper et la pâte devient de plus en plus solide. En fin de période de prise, on observe une augmentation de l'hydratation.

- ❖ La période de durcissement : elle se caractérise par le développement des résistances mécaniques et la porosité se remplit progressivement avec des C-S-H. Afin de maintenir l'hydratation, il est nécessaire que l'eau circule à travers les pores de gel de C-S-H. La production de chaleur diminue. Le gypse est déchargé, le C3A restant se réunit avec l'ettringite pour créer du calcium mono-sulfo-aluminate.
- ❖ La période de ralentissement : elle se caractérise par une diminution de la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle des grains de ciment, ce qui limite les réactions d'hydratation.

### I.2.2. Le sable :

Le sable est un matériau granulaire constitué principalement de particules de roches (quartz, calcite, micas, feldspaths), et de minéraux très finement fragmentés. Il s'agit d'un matériau dont les grains ont un diamètre maximal inférieur à 4 mm, et dont le passant à  $80\mu m$  n'excède pas 30%.

- **Sable d'origine naturelle** : issu de roches meubles ou massives et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (sable de concassage, sable de mer, sable d'Oued).
- **Sable d'origine artificielle** : originaire du concassage de roches naturelles telles que le calcaire ou artificielles telles que la pouzzolane, également appelée sable concassé, et qui se distingue par une meilleure adhérence entre l'agrégat et le liant. [10]

#### I.2.2.1. Rôle du sable dans le mortier :

Le rôle du sable dans les mortiers est essentiel car il constitue un agrégat fin qui contribue de manière significative aux caractéristiques générales du mélange en comblant les espaces vides. Il améliore la résistance mécanique du mortier en conférant stabilité et cohésion à la structure.[4] De plus, le mortier contenant du sable présente des capacités d'imperméabilisation améliorées, ce qui entraîne une capacité d'absorption réduite par rapport au mortier sans sable, améliorant ainsi sa durabilité. Le remplacement du sable par de la chaux peut modifier les propriétés du mortier, le sable améliore la résistance au gel par rapport à la chaux contenue dans

les mortiers, ce qui souligne l'importance du composant sable dans le mélange. La présence de sable a un impact notable sur la résistance au gel des mortiers, les variations de porosité influent sur des propriétés telles que la résistance à la compression et l'absorption d'eau [11]. Essentiellement, le sable est important pour garantir l'intégrité structurale, la durabilité et les performances des mortiers dans un large éventail d'applications.

### **I.2.3. L'eau de gâchage :**

L'eau de gâchage est l'une des constituants de la pâte cimentaire, en effet, l'eau introduite dans le mortier lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une, physique, qui confère au mortier frais les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une autre, chimique, qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. [9]

L'incorporation d'eau dans les mortiers joue un rôle essentiel dans la détermination des caractéristiques de la substance finale. De plus, la teneur en humidité des mortiers affecte de manière significative leurs caractéristiques mécaniques. Une consommation d'eau excessive ou insuffisante a un impact sur la résistance du matériau. En conclusion, la teneur en eau utilisée pour mélanger les mortiers est un élément crucial qui influe sur leurs performances et leurs propriétés. [5]

### **I.2.4. Les adjuvants :[12]**

Il s'agit d'un additif qui est ajouté en petite quantité aux bétons, mortiers ou coulis, avant ou pendant le processus de malaxage.

En général, la quantité d'adjuvant ne dépasse pas 5 % du poids du ciment.

Il s'agit d'améliorer certaines caractéristiques du béton, que ce soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement, ou à long terme.

Les adjuvants sont toujours incorporés dans la masse du béton frais et leur mode d'action est soit :

- Mécanique : en modifiant la consistance du mélange.
- Physique : en agissant sur la tension superficielle des composants.
- Chimique : en modifiant la vitesse de prise et la réaction d'hydratation du ciment.

D'une manière générale, les adjuvants utilisés dans les mortiers se classifient en :

- Plastifiants (réducteurs d'eau)
- Agents entraîneurs d'air
- Modificateurs de processus de prise (retardateurs, accélérateurs)
- Hydrofuges

**I.2.5. Les ajouts :[13]**

Les additifs contenus dans les mortiers font référence aux substances ajoutées pour améliorer diverses propriétés du mortier. Ces derniers peuvent améliorer des caractéristiques telles que la maniabilité, l'adhérence, la résistance et la durabilité du mortier.

Parmi ces ajouts utilisés dans le mortier, on peut citer :

- Les sous-produits biosourcés (le biochar, la fumée de silice, la moelle de noix de coco)
- Les fibres de différentes natures (végétales, animales...)
- Les colorants (naturels ou synthétiques)
- Les polymères

**I.3. Les différents types de mortiers :****I.3.1. Mortier de ciment :[14]**

Fabriqué à partir du ciment (Portland gris ou blanc), il est extrêmement résistant et prend rapidement. Sa richesse en ciment le rend peu perméable à la vapeur d'eau.

**I.3.2. Mortier de chaux :[14]**

Constitué de sable et de chaux, le mortier de chaux est un mortier gras, très souple et qui laisse circuler la vapeur d'eau. Il durcit plus lentement que le mortier de ciment.

**I.3.3. Mortier bâtard :[14]**

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, cependant, on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre, suivant l'usage et la qualité recherchés.

**I.3.4. Mortier réfractaire :[10]**

Il est fabriqué avec du ciment fondu qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues.

**I.3.5. Mortier rapide :[10]**

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.



### **I.3.6. Mortier industriel :[10]**

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs bien sélectionnés, conditionnés en sacs, prêts à l'emploi, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins.

### **I.3.7. Mortier allégé :**

Les mortiers allégés, également appelés mortiers légers, sont des formulations utilisées dans l'industrie de la construction, avec une densité réduite par rapport aux mortiers classiques. Ces mortiers sont généralement constitués de composants légers tels que certains agrégats ou additifs, ce qui permet de réduire le poids sans compromettre leurs caractéristiques mécaniques adaptées à divers objectifs de construction. Ces derniers offrent la possibilité de réduire la charge structurelle, d'améliorer l'efficacité thermique ou de simplifier l'installation sur des structures désignées avec des restrictions de poids.

## **I.4. Les classifications des mortiers :[10]**

Les mortiers peuvent être classés selon le domaine d'utilisation ou la nature du liant.

### **❖ Classification selon leur domaine d'utilisation :**

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, on distingue :

- Le mortier de pose
- Le mortier de joints
- Le mortier pour crépis
- Le mortier pour les sols
- Le mortier pour les stucs
- Les pierres artificielles
- Le support pour les peintures murales
- Le mortier d'injection
- Le mortier pour les mosaïques
- Le mortier de réparation pour pierres

### ❖ Classification selon la nature du liant :

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en :

- Mortier de ciment portland
- Mortier de chaux
- Mortier bâtard
- Mortier à base de ciment de maçonnerie

## I.5. Les caractéristiques des mortiers :

### I.5.1. Ouvrabilité :

L'ouvrabilité est un concept général couramment utilisé pour la description des propriétés du béton frais. Il est souvent défini comme étant la quantité du travail mécanique requis pour compacter le béton de manière adéquate tout en empêchant la ségrégation. Une telle délimitation s'avère utile car la durabilité ultime du béton est largement dictée par le degré de compactage. Une légère augmentation de la présence de vides résultant d'une consolidation inadéquate peut entraîner une baisse importante de la résistance.[15]

Une variété d'instruments est utilisée pour évaluer l'ouvrabilité d'un mortier. Les plus célèbres sont :

- La table à secousses.
- Le maniabilimètre du LCPC.
- Le cône.

### I.5.2. Prise :

L'objectif du test de prise est d'identifier le début et la fin du durcissement de la pâte à ciment. Il est impératif de comprendre ces valeurs pour déterminer la durée requise pour une installation précise des mortiers et la fabrication du béton.[7]

On évalue généralement le temps de prise sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau), et en respectant la norme en question (avec l'appareil de Vicat).

Le début de la prise correspond à l'arrêt de l'aiguille à  $5 \pm 1$  mm du fond (taille des plus gros grains de sable), et la fin de la prise correspond à l'arrêt de l'aiguille à 0,5 mm du haut.

**I.5.3. Résistance mécanique :**

La résistance joue un rôle crucial dans le domaine de la construction car elle englobe la capacité du mortier à résister à diverses charges et contraintes.

Les tests sont fréquemment réalisés sur des échantillons prismatiques de (4x4x16) cm, et qui sont conservés dans l'eau à une température de 20°C. Les échantillons sont fragmentés par traction, puis, par flexion et compression. Les résistances à la traction par flexion et à la compression augmentent avec le temps (entre 1 et 28 jours). Les résistances des mortiers sont influencées par de nombreux éléments :

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Énergie de malaxage et conditions de mise en œuvre.
- Protection des premiers jours.

**I.5.4. Retraits et gonflements :**

Le retrait est un phénomène dû au départ de l'eau retenue par tension superficielle dans les pores capillaires du ciment hydraté et la perte de l'eau physiquement absorbée des C-S-H. [3] La mesure des retraits est effectuée sur des prismes de (4 x 4 x 16) cm, avec des plots à leurs extrémités, et conservés après démoulage dans une enceinte à une température de 20 °C et une humidité relative de 90 %. Ce retrait évolue environ de manière logarithmique entre 1 et 28 jours.

Le gonflement des mortiers (qui se produit lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) est mesuré sur les mêmes éprouvettes de (4 x 4 x 16) cm, conservés dans l'eau à 20 °C. En règle générale, ils sont plutôt faibles (dans le cas du ciment stable avec une expansion inférieure aux aiguilles de Châtelier sur une pâte pure à 10 mm).

**I.5.5. Masse volumique apparente :**

Il s'agit de la masse d'un corps par unité de volume apparent brut (incluant les vides et les capillaires). On peut la mesurer en (g/cm<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup> ou t/m<sup>3</sup>).

**I.5.6. Masse volumique absolue : [10]**

La masse volumique d'un corps est calculée en fonction du volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans prendre en compte les vides et les pores). On peut la mesurer en (g/cm<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup> ou t/m<sup>3</sup>).

**I.5.7. Porosité et compacité :**

- **La porosité :**

La porosité, paramètre physique fondamental, est rigoureusement définie comme le quotient entre le volume des espaces vides au sein d'un matériau poreux et le volume total occupé par ce matériau. Sa valeur se situe généralement dans la plage de 0 à 1, mais elle est également exprimée en pourcentage variant de 0 à 100 %.

La porosité des matériaux à base de ciment est cruciale pour leur durabilité car elle permet de contrôler l'entrée d'agents agressifs. Elle est influencée par la taille, la distribution et la connectivité des pores.[16]

Les caractéristiques poreuses du mortier jouent un rôle crucial en raison de leur corrélation directe avec la résistance. En général, une porosité plus élevée du mortier entraîne une perméabilité accrue et une résistance réduite à la compression.

- **La compacité :**

La compacité des mortiers joue un rôle crucial dans la détermination de leurs caractéristiques mécaniques et de leurs performances globales car elle a un impact direct sur l'intégrité structurale du matériau. Cette propriété concerne spécifiquement la concentration de particules dans la matrice. Les mortiers présentant une compacité plus élevée présentent une porosité réduite, ce qui se traduit par une meilleure résistance mécanique.

**I.5.8. Conductivité thermique :[17]**

Le concept de conductivité thermique fait référence à un paramètre thermo-physique qui définit la capacité d'une substance à conduire la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transmise dans une région isothermique spécifique pendant une durée donnée par rapport à un gradient de température défini. La conductivité thermique est notamment une caractéristique intrinsèque du matériau considéré, elle dépend à la fois de la température et de la pression appliquée pour la mesure.

## I.6. Application des mortiers : [18]

Les mortiers jouent un rôle crucial dans divers secteurs de la construction et peuvent être classés en fonction de quatre applications principales, comme l'illustre la **Figure. I.2**.

- Façades : application d'enduits dans les nouvelles constructions, rénovation de structures existantes et fourniture d'une isolation thermique extérieure.
- Carrelages : colles à carrelage, mortiers de joints, étanchéité, assurance de l'imperméabilisation et l'incorporation d'une isolation acoustique sous carrelage.
- Sols : mortiers de chapes, enduits de lissage, ajout de finitions au revêtement de sols.
- Mortiers spéciaux : grandes œuvres, projets d'assainissement et initiatives d'imperméabilisation, réparation, scellement et voiries.



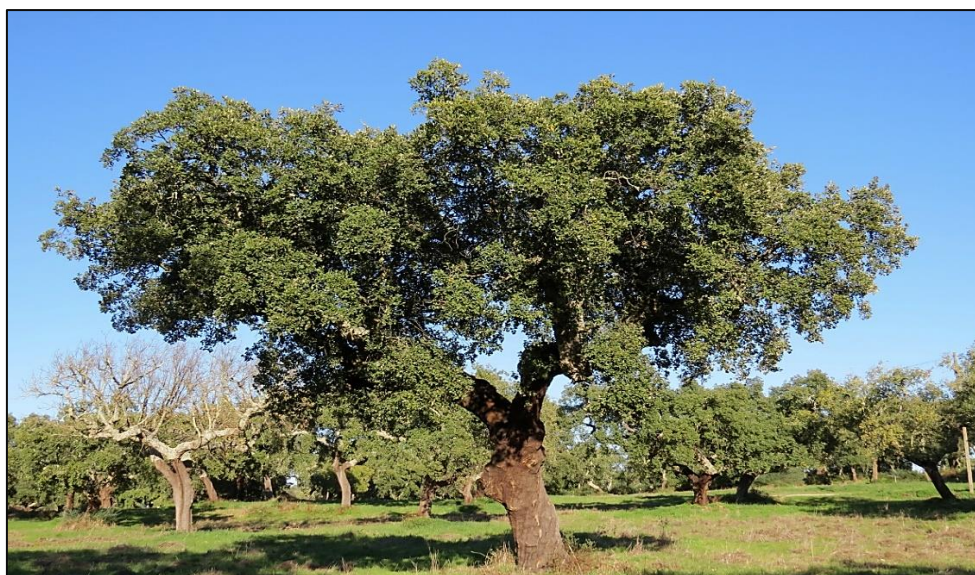


## Deuxième partie : le liège

### I.1. Origine :

Le liège, est un matériau biodégradable d'origine naturelle, dérivé du règne végétal provenant de l'écorce externe des arbres du chêne-liège dont l'appellation botanique est « *Quercus Suber L* » [19]. La découverte de ces arbres portant des glands, a été attribuée au célèbre botaniste suédois Linné en 1753.

Le chêne-liège présente une taille variable, allant généralement de 10 à 15 m, avec la possibilité d'atteindre une hauteur de 20 à 25 m en groupes denses. Cette espèce a la capacité de survivre jusqu'à 500 ans.



**Figure. I.3 :** Arbre du chêne-liège.[20]



**Figure. I.4 :** Ecorce et glands du chêne liège.[20]

## I.2. Taxonomie de l'espèce : [21]

Selon la troisième version de classification botanique des Angiospermes établie par Angiosperm Phylogeny Group (APG III), *Quercus suber* L. présente la taxonomie suivante :

- Règne : végétal
- Embranchement : Trachéophytes
- Sous-embranchement : Ptéropsidés
- Classe : Angiospermes
- Sous classe : Dicotylédones
- Ordre : Fagales
- Famille : Fagacées
- Genre : *Quercus*
- Espèce : *Suber* L.

Le chêne liège est reconnu en Algérie selon les noms vernaculaires suivants :

- Ballot El felline : Cette dénomination est probablement d'origine grecque (Phellodrus : Phellos/liège).
- Akhnache (liège) dans la région de petite Kabylie.
- Aqchouch (liège) dans la région de Grande Kabylie.

## I.3. Répartition géographique :

Les chênes colonisent des milieux extrêmement diversifiés allant des régions arides telles que l'Afrique du Nord et la Californie aux zones tropicales humides comme la Colombie et l'Amérique centrale, et s'étendant aux zones tempérées d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie centrale.

Les chênes évoluent essentiellement dans le bassin méditerranéen (**Figure I.5**), couvrant de vastes zones boisées sous-éaies. [19]

Les subéraies de méditerranée représentent 80% de la production mondiale de liège, principalement concentrée dans sept pays (**Tableau I.2**). Ce revêtement externe est collecté dans un premier temps, lorsque l'arbre atteint une épaisseur de 3 cm, puis, tous les 9 à 12 ans, cette procédure est répétée. [19][22]



Figure I.5 : carte représentant la répartition géographique de l’essence du Quercus suber en méditerranée [23]

Tableau I.2 : production mondiale du liège (Cork Quality Council) [24]

Pays	Superficie forestière (hectares)	% de la superficie forestière mondiale	Production (tonne)	production %
Portugal	737000	34%	100	50%
Espagne	574000	27 %	62	31%
Maroc	383000	18%	12	6%
Algérie	230000	11%	10	5%
Tunisie	86000	4%	7	3%
Italie	65000	3%	5	3%
France	65000	3%	5	3%

**I.4. Procédés d’extraction :**

L'extraction du liège, également appelée élimination du bouchon, est effectuée manuellement, comme le montre la **Figure I.6**. Dans un premier temps, l'écorce est découpée en grandes planches rectangulaires à l'aide d'une hache puis, elle peut se détacher de l'arbre.



L'extraction initiale, connue sous le nom du premier périderme, a généralement lieu environ 9 ans après le début de la vie de l'arbre, aboutissant à la production de liège « vierge ».

Après le retrait initial du bouchon, une nouvelle couche de périderme est susceptible de se former. Par la suite, après une période de neuf ans, il devient possible d'extraire une deuxième couche de liège. Généralement, au cours du deuxième processus d'extraction, des fissures importantes apparaissent, ce qui rend le bouchon adapté uniquement à des fins de broyage. Le périderme suivant, ainsi que toutes les couches ultérieures susceptibles de se développer, contiennent le bouchon appelé « reproduction ».[25]



**Figure I.6** : extraction de l'écorce externe du chêne-liège [25]

### **I.5.Structure :**

Le liège résulte de la segmentation de cellules phellogènes, et les transferts d'eau et de gaz s'effectuent principalement par les lenticelles qui sont des canaux ouverts, de forme plus ou moins cylindrique. [26] Sa structure cellulaire étant une matière biologique morte, a été observée pour la première fois au microscope optique par Robert Hook en 1665 [22]. Elle consiste en une structure alvéolaire de microcellules hexagonales dont la largeur moyenne est d'environ  $30\mu m$ , soit environ 100 millions de cellules par centimètre cube. [19]

Ces dernières présentent une forme de tétrakaidécaèdre reliées par des capillaires contenant un volume rempli de gaz à 90% conférant ainsi au liège sa légèreté et sa flottabilité. [4]

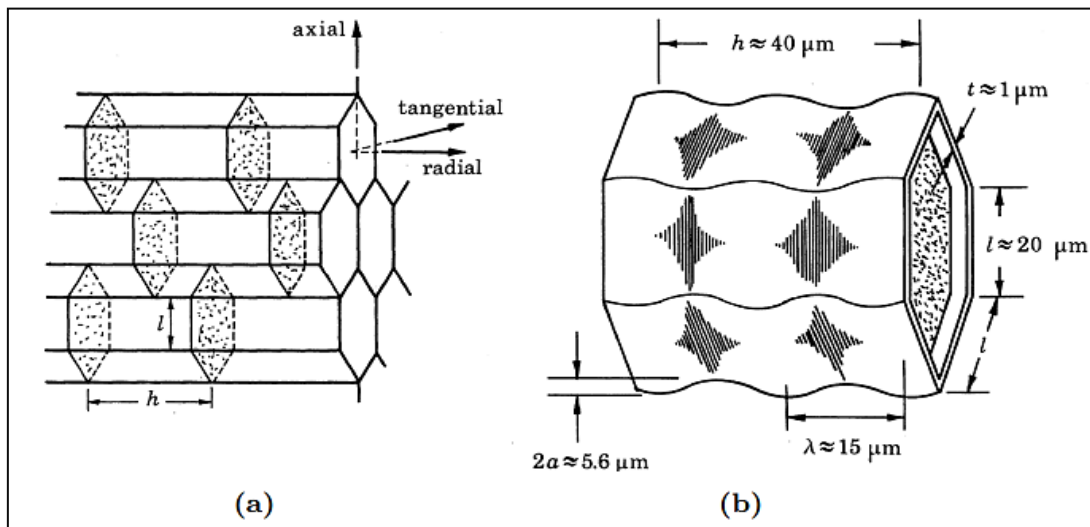


Figure I.7 : La disposition et la forme des cellules de liège (a) et une cellule ondulée (b) [25]

Cette structure susmentionnée est similaire à celle d'un nid d'abeilles en plan radial et présente un aspect d'une paroi de briques creuses en plans axial ou tangential, cette particularité contribue à la nature anisotrope du liège. [11]

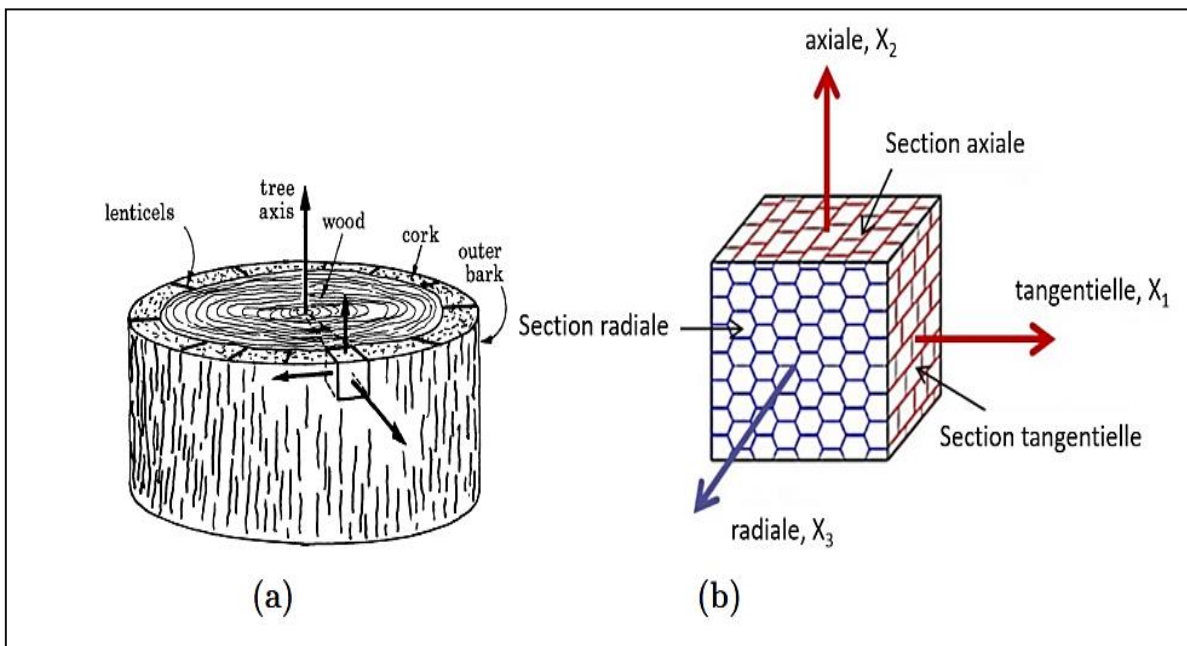
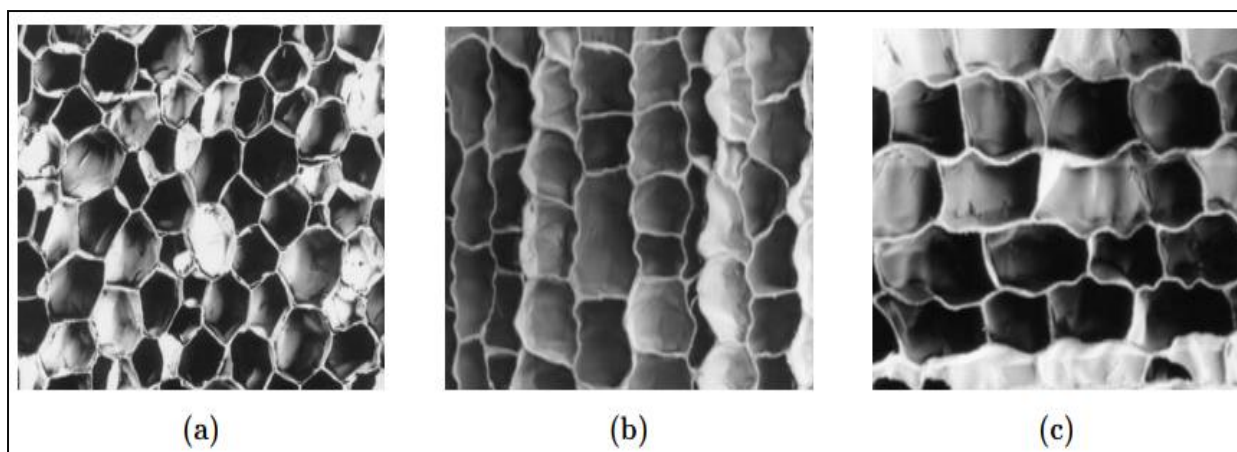


Figure I.8 : Représentation schématique du tronc du chêne-liège (a) et de la microstructure en nid d'abeille du liège avec son repère matériel (b) [25]



**Figure I.9** : Structure du liège observée par microscopie électronique à balayage section radiale (a), axiale (b) et tangentielle (c) [25]

### I.6. Composition :

Le liège est principalement constitué de subérine (composant majoritaire), de lignine, cellulose et polysaccharides, ainsi que de minéraux tels que le tanin, le potassium et le sodium [4][27]. La composition du liège peut fluctuer en fonction de l'âge, de l'origine géographique et génétique de l'arbre, ainsi que du climat et de la composition du sol.[22]

**Tableau I.3** : composants du liège.

Référence	Subérine	Lignine	Cellulose, hémicellulose et polysaccharides
[4]	33-62%	13-27%	6-26%
[5] [26]	53%	26%	11%
[28]	37.8-42.8 %	20.7-22%	15.7-21.3%
[22]	41%	23%	16%

### I.7. Propriétés :

- **Souplesse et légèreté** : Le liège possède des caractéristiques distinctives en raison de sa composition chimique et de sa structure. Il présente une nature légère avec une densité qui se situe généralement dans la plage de 120-240 Kg/m<sup>3</sup>, ce qui le rend approprié pour diverses utilisations légères [27].

- **Imperméabilité aux gaz et aux liquides** : sa composition chimique le rend imperméable aux gaz et aux liquides tout en offrant des propriétés d'isolation acoustique et thermique exceptionnelles [25] ainsi que des capacités d'amortissement efficaces lorsqu'il est intégré dans des matériaux composites.

- **Conductivité thermique** :

Ses microcellules remplies de gaz lui confèrent un poids spécifique allant de 190 à 250 Kg/m<sup>3</sup> et un coefficient de conductivité thermique de 0.037 à 0.040 W/mK [4][5], améliorant ainsi ses caractéristiques isolantes. Le liège a la capacité de réduire la densité du composite, améliorer les propriétés d'isolation thermique et influencer la résistance mécanique, qui dépend du ratio de liège utilisé et des dimensions des particules dans le mélange,[5] et abonner l'efficacité en matière de dissipation d'énergie [29].

- **Isolation phonique** :

Le liège est insonorisant et la décélération des ondes sonores dans le matériau en liège réduit de manière significative les niveaux du bruit ambiant. Plus précisément, la vitesse du son dans le liège mesure 450 mètres par seconde, contrastant avec la plage de 2 500 à 2 800 mètres par seconde observée dans le béton armé.

**Tableau I.4** : propriétés physiques du liège

Propriété	Valeur	Référence
Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	[120-240] (120-180 reproduction) (160-240 vierge)	[25]
Conductivité thermique [mol/(m.s.Pa)]	0.045 : liège 0.025 : air 0.2 : parois cellulaires	[25]
Coefficient de frottement	0.97(direction radiale) 0.77 (direction non-radiale)	[28]
Coefficient de perte a 0.01 Hz	[0.1-0.3]	[25]
Conductivité électrique [S/m]	1.26*10 <sup>-10</sup> (25°C) 1.67*10 <sup>-13</sup> (50°C)	[25][30]
Résistivité acoustique [kg/( m <sup>2</sup> .s)]	1.2*10 <sup>5</sup>	[25][30]
Chaleur spécifique [J/ (kg.K)]	350	[25][30]
Perméabilité [mol/(m.s.Pa)]	280.5*10 <sup>-3</sup> (eau liquide) 110.1*10 <sup>-13</sup> (vapeur d'eau)	[30]



### I.8. Types des produits à base de liège : [25]

Les produits en liège peuvent être classés en deux groupes principaux : les produits en liège naturel et les agglomérats de liège. Le premier groupe n'implique aucune procédure supplémentaire au-delà de la préparation, de la découpe et de la finalisation du liège naturel. À l'inverse, les agglomérats de liège sont dérivés de sous-produits de l'industrie du liège. L'écorce de liège inutilisable, et les bouchons de liège précédemment utilisés sont employés pour la fabrication de granulés de liège. Ces derniers sont ensuite séparés et classés en fonction de leur densité et de leur taille, ce qui facilite la production de deux variantes d'agglomérat distinctes.

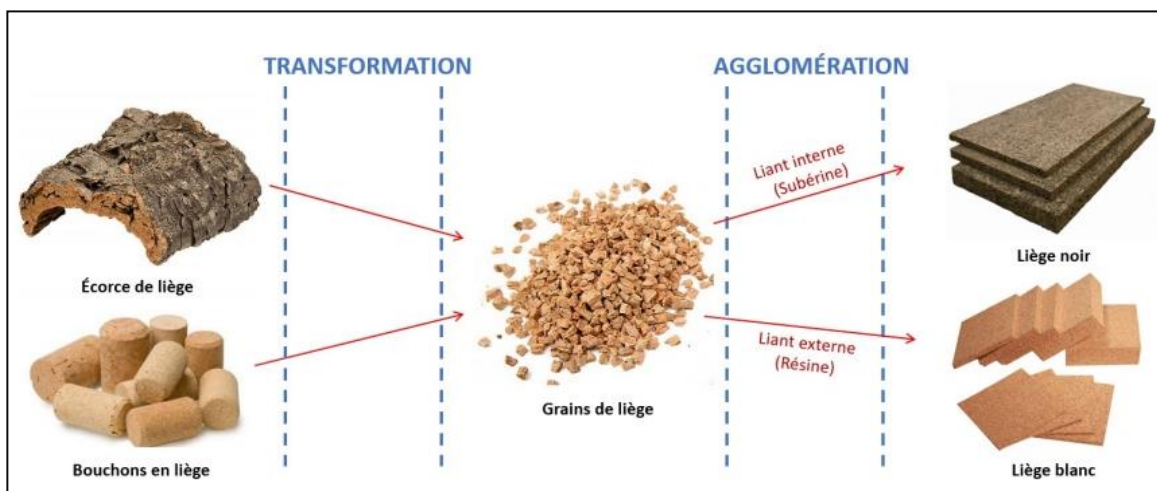


Figure I.10 : schématisation des produits en liège [25]

### I.9. La filière liège et ses applications : [22]

En l'an 300 avant J.-C, Théophraste, un botaniste grec, a fait une découverte importante concernant les capacités régénératrices du chêne-liège lorsqu'il est utilisé pour sceller des amphores et des barils. Des siècles plus tard, aux XVIIe et XVIIIe siècles, le moine Dom Pérignon, a incorporé le liège comme matériau pour les bouteilles en verre, une pratique largement adoptée à l'ère de l'industrialisation européenne. À l'heure actuelle, le liège demeure un choix privilégié dans l'industrie vinicole et trouve une utilité dans les applications de construction telles que l'isolation des murs, des sols et des tuyaux, ainsi que l'insonorisation, et comme alternative aux matériaux de carrelage traditionnels. Il convient de noter qu'à peine 10% de la production de liège est du liège naturel, 55 % étant du liège aggloméré principalement utilisé à des fins de bouchage ou dans des projets de construction, tandis que les 35 % restants sont utilisés comme combustibles dans le processus de production d'énergie.

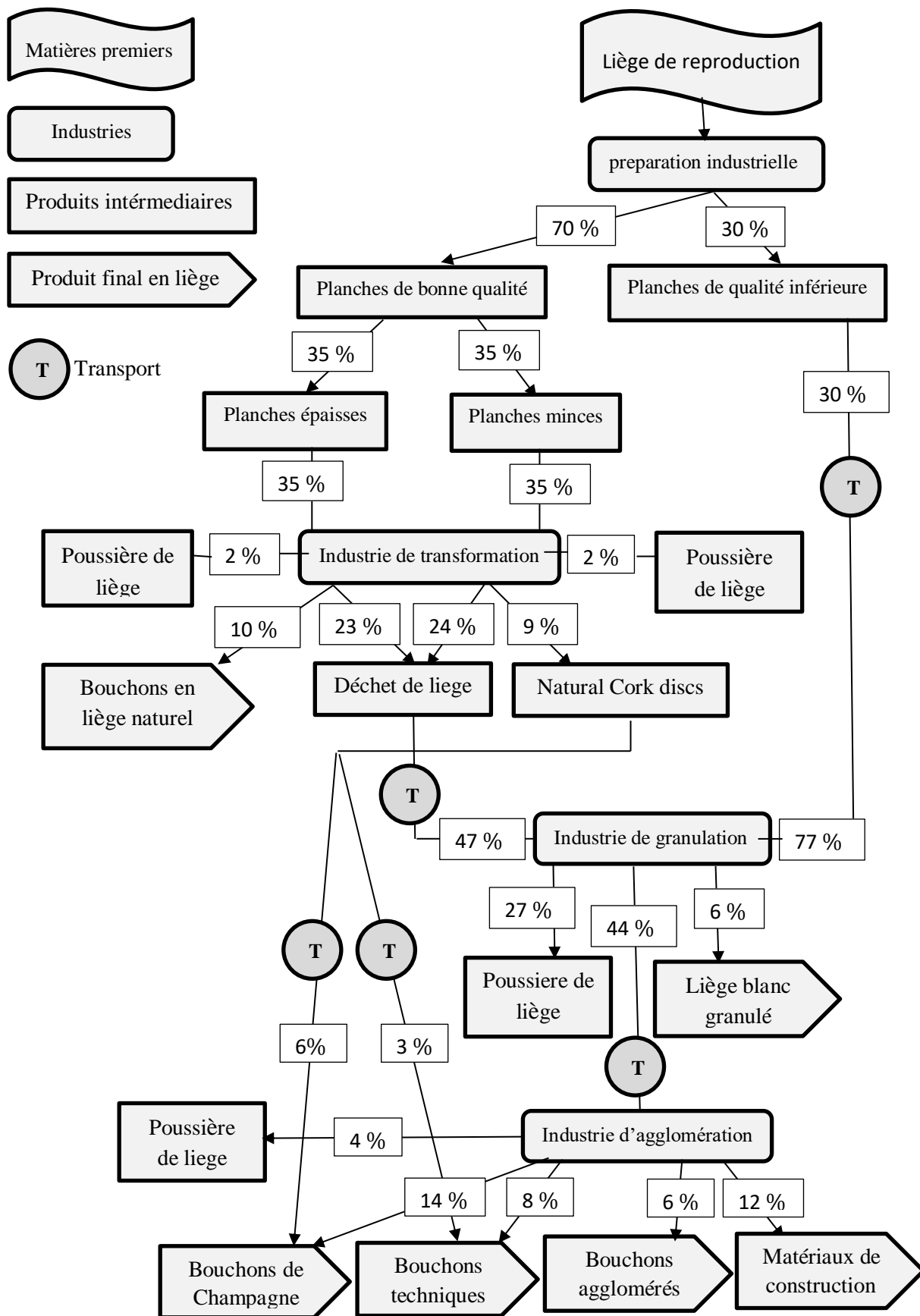


Figure I.11 : Vue d'ensemble de la filière du liège de reproduction et la répartition de la production.[31]

## L'état de l'art

Au fil des années plusieurs études ont été menées sur les mortiers allégés avec de multiples et différents ajouts tel que le liège qui fait l'objet de notre étude.

L'état actuel de la recherche sur le mortier de liège est axé sur le développement de nouvelles techniques visant à améliorer la durabilité et à réduire l'impact écologique des matériaux de construction. Ce domaine d'étude est essentiel pour aborder les problèmes contemporains liés à la rareté des ressources et à la lutte contre le changement climatique.

**(Barnat-Hunek et al., 2017)** : lors de leur étude menée sur les propriétés des mortiers légers hydrofugés avec du liège expansé, ils ont examiné des propriétés telles que la résistance au gel, les propriétés adhésives, la conductivité thermique, la résistance à la flexion et à la compression, ainsi que l'impact du sable et de la chaux sur la résistance, en concluant que cette dernière est réduite par le liège expansé, qui, en même temps augmente la porosité, absorbe l'eau. Ils affirment que l'hydrophobisation améliore l'absorbance et les propriétés adhésives des mortiers. Quant à la résistance au gel, ils ont constaté qu'elle est meilleure en utilisant le sable plutôt que la chaux.

**(Wilton & Barnett Howland, 2020)** : Leur recherche se concentre sur l'aspect durable du liège en tant que matériau bio-renouvelable en mettant l'accent sur son potentiel dans la conception architecturale moderne. Ces architectes ont développé un système de construction solide en liège expansé, qui a conduit à la création de l'innovante'' Cork House'' en 2019, conçue d'un kit de 1268 pièces de liège assemblé à la main sans aucun mortier ni colle, elle a été évaluée négative en carbone à la fin de sa conception et avec seulement 618 kg de  $Co_2 e/m^2$  sur une durée de vie de 60 ans, le plus bas seuil pour tout bâtiment évalué par **Sturgis Carbon Profiling**.

**(Lakreb et al., 2022)** : Lors de leur étude de faisabilité sur les propriétés des mortiers écologiques produits par remplacement partiel du ciment par des particules de liège, des mortiers aux propriétés d'isolation thermiques améliorées ont été produits avec une densité qui a diminué jusqu'à 8% , et une conductivité thermique réduite jusqu'à 61% avec l'ajout du liège, ainsi qu'une bonne adhérence observée entre les particules de liège et de ciment en SEM (Scanning Electron Microscopy).

**(Malchiodi et al., 2022)** : L'étude propose une solution durable pour gérer les déchets de liège provenant de la fabrication des capsules de bouteilles, en les utilisant comme matière de remplissage dans des matériaux de construction tel que le mortier à base de chaux et de polyuréthane. Les résultats ont montré que l'ajout de déchets de liège n'a pas affecté de manière significative la résistance à la compression et à la flexion des matériaux de construction, et ces déchets, composés de liège, d'adhésif polyuréthane et de paraffine, avaient une faible densité apparente et une absorption d'eau élevée. Cette étude préliminaire a permis d'identifier des solutions alternatives pour la valorisation des déchets de liège.

**(Delucia, 2022)** : cette étude se concentre sur la détermination des propriétés thermoélastiques efficaces des agglomérats à base de liège par homogénéisation. Il s'agit d'étudier la variabilité des propriétés mécaniques du liège naturel et son influence sur les propriétés finales de l'agglomérat grâce à une approche d'homogénéisation stochastique. Le modèle numérique a montré que les propriétés thermomécaniques des composites à base de liège sont influencées par la fraction volumique des phases constitutives et la variabilité de la taille des particules. L'efficacité de la stratégie de modélisation a été validée par des tests numériques et une comparaison avec des résultats expérimentaux mettant en évidence l'impact de la fraction volumique des phases constitutives et de la variabilité de la taille des particules sur les propriétés du composite.

**(Belkhir et al., 2022)** : L'étude vise à améliorer la résistance à la corrosion de l'acier d'armature et à valoriser les déchets de liège pour protéger l'environnement, sans effet néfaste sur les propriétés mécaniques du mortier. Des tests électrochimiques ont été réalisés pour évaluer la résistance à la corrosion de l'acier dans du mortier contaminé par des ions chlorure. L'ajout de déchets de liège dans le mortier a considérablement amélioré la résistance à la corrosion des barres d'armature en acier, réduisant la densité du courant de corrosion et déplaçant le potentiel de corrosion vers des valeurs nobles.

**(Ortega et al., 2023)** : Ils ont étudié le comportement à long terme (tests à 28 jours et 1 an) lié à l'infiltration d'eau dans les mortiers combinant des granulats légers de liège expansé et naturel, et des ciments écologiques en faisant une comparaison des mortiers avec le liège naturel, le liège expansé et l'argile expansée. Après obtention des résultats, ils ont constaté que les mortiers contenant du liège naturel absorbaient moins d'eau et présentaient des pores perméables, par contre, les mortiers contenant du liège expansé avaient une absorption d'eau



plus élevée à long terme. Ils concluent alors qu'un agrégat de liège naturel léger est recommandé pour la protection contre les infiltrations d'eau.

**(Parracha et al., 2023)** : cette étude évalue les performances thermo-physiques et mécaniques de trois mortiers thermiques légers disponibles commercialement et de cinq mortiers expérimentaux conçus avec divers agrégats (polystyrène expansé, liège expansé, argile expansée et aérogel de silice), remplaçant le sable à différents pourcentages, et les mortiers sont étudiés à l'état frais et durci. Les résultats ont démontré que les mortiers appliqués sur un mur prototype présentaient de meilleures propriétés mécaniques et une légère augmentation de la conductivité thermique par rapport à ceux appliqués sur des échantillons de substrat en brique.

**(Faustino et al., 2023)** : Dans cette approche cellulaire et moléculaire du chêne-liège, les chercheurs ont analysé l'ultra-structure et la composition de la subérine dans les tissus du chêne-liège ainsi que son périderme et ses caractéristiques uniques. Les résultats confirment que les propriétés physiques et mécaniques du liège, tels que son faible coefficient thermique et sa faible élasticité. Ces propriétés sont attribuées à sa structure cellulaire en nid d'abeilles ou en forme de mur de briques, avec de la subérine, de la lignine, de la cellulose et de l'hémicellulose comme composants principaux.

**(Garrido et al., 2023)** : Dans la présente étude du développement de composites polymères de liège expansé biosourcés (ECPC), avec polyacide lactique (PLA), des analyses thermogravimétriques pour mesurer les températures de dégradation du PLA et de l'EMS (expandable micro-structures) ont été effectuées ainsi qu'une caractérisation chimique et thermique avec TGA, DSC et FTIR-ATR. Le liège et l'EMS ont permis de créer des composites avec une densité inférieure de 8 %, et la présence du liège a abaissé la température de cristallisation à froid de près de 13 °C. Des études morphologiques ont montré une structure alvéolaire retrouvée pour les cellules de liège, et l'EMS a permis l'expansion de ces alvéoles lors du processus de moulage par injection.

**(Rangel et al., 2024)** : L'étude se concentre sur l'impression 3D de mortiers légers avec du liège pour améliorer l'efficacité thermique dans les bâtiments. Les chercheurs ont testé la résistance mécanique, la conductivité thermique et l'anisotropie des mortiers imprimés, ils ont découvert que les mortiers en liège améliorent l'isolation, réduisent la limite d'élasticité et maintiennent la conductivité thermique tout en présentant une résistance mécanique et un

comportement isotrope satisfaisants. Pour ce qui est de l'impression 3D, ils ont confirmé qu'elle réduit les macrospores au cœur de l'échantillon, améliorant ainsi le confort thermique.

### **Conclusion :**

Afin d'atténuer les dépenses associées à la production du mortier de ciment et de réduire son empreinte environnementale, on recourt de plus en plus à l'utilisation de composants alternatifs caractérisés par des besoins énergétiques minimaux. Une grande partie de ces matériaux de substitution est constituée de sous-produits, et leur intégration dans les mortiers améliore leur qualité tout en atténuant les effets néfastes de leur accumulation.

Dans cette section de revue de la littérature, un exposé sur les constituants d'un mortier, la chimie du ciment, la production de clinker et ses éléments principaux a été présenté. De plus, de la présentation du liège et ses remarquables propriétés d'isolation acoustique et thermique liées à sa structure intrinsèque et à sa composition chimique.

Les divers travaux de recherche antérieurs portant sur l'impact de l'incorporation d'agrégats de liège sur les propriétés physicomécaniques des mortiers ont également été examinés. Il est indéniable que ces recherches sont de plus en plus nombreuses, ce qui souligne l'importance accordée au liège en tant que matériau additif et les retombées de son intégration dans les mortiers.

Il est évident que le liège a la capacité de réduire la densité des mortiers, d'abonner les caractéristiques d'isolation thermique et d'influencer la résistance mécanique. Néanmoins, l'ampleur de cette influence dépend de la proportion de liège utilisée et des dimensions des particules présentes dans le mélange.

# Chapitre II

**Introduction :**

L'objectif principal de cette recherche est de caractériser les mortiers composites utilisant des agrégats de liège. Plus précisément, l'accent est mis sur la réalisation d'essais en laboratoire pour évaluer le niveau, les propriétés physico-mécaniques et thermiques des mortiers produits. Ces essais sont conçus pour déterminer le ratio optimal de liège à incorporer dans le mortier et pour évaluer l'adhérence aux exigences thermiques, physiques et mécaniques des mortiers récemment développés.

Dans ce second chapitre, la présentation couvre l'assortiment de matériaux utilisés au cours de notre étude, ainsi que les techniques et analyses appliquées pour évaluer les attributs physicomécaniques et le comportement thermique des mortiers développés.

**II.1. Matériaux :****II.1.1. Le ciment :**

Le ciment utilisé dans cette étude est un **CEM II/A-L 42,5 R** de la société GICA (Groupe Industriel des Ciments d'Algérie) qui est un ciment Portland au calcaire (CPC), certifié selon les exigences et les normes en vigueur. (Voir l'annexe A)



**Figure II.1 :** Le ciment

La composition chimique et minéralogique du ciment est donnée dans le **Tableau II-1** et le **Tableau II-2** respectivement.

Les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le **Tableau II-3**.

- **Composition chimique :**

**Tableau II-1 : Composition chimique du ciment (EN 196-2)**

Oxydes (% massique)	CEM II/A-L 42,5 R
SiO <sub>2</sub> -T	21 ,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,16
CaO-T	62,36
MgO	1,21
SO <sub>3</sub>	2,15 ≤ 4%
K <sub>2</sub> O	0,33
Na <sub>2</sub> O	0,13
Cl	0,02 ≤ 0,1%
P.A.F	3,69
CaO libre (PT207 CERILH 1970)	1,06
R.Insoluble	2,12

- **Composition minéralogique :**

**Tableau II-2 : Composition potentielle du clinker.**

Minéraux (%)	CEMII/A-L 42.5 R
C3S	55.46
C2S	18.85
C3A	8.56
C4AF	12.43

- **Caractéristiques mécaniques :**

**Tableau II-3 : Caractéristiques mécaniques.**

Norme (NF EN 196-1 : 2016) [31]			
<b>R Flexion</b> <b>MPA</b>	02 Jours	/	5,1
	28 Jours	/	8,8
<b>R</b> <b>Compression</b> <b>MPA</b>	02 Jours	Li ≤ 20.0	22,6
	28 Jours	Li ≤ 42,5	58,7

### II.1.2 Le sable :

Le sable utilisé est un sable normal, disponible localement et suivant les exigences et les normes en vigueur.



Figure II.2 : Le sable.

### II.1.3 Le liège :

#### II.1.3.1. Caractéristiques techniques du liège :

- **Masse volumique (moyenne)** : Elle se situe entre 67 et 75 kg/m<sup>3</sup>.
- **Coefficient de conductivité thermique** : Le liège possède un coefficient de conductivité thermique de 0.037 à 0.040 W/mK.
- **Isolation phonique et thermique et absorption acoustique** : Le liège offre une très bonne isolation thermique et phonique, Plus précisément, la vitesse du son dans le liège mesure 450 mètres par seconde.
- **Imperméabilité aux liquides et aux gaz** : Le liège est imperméable et présente des propriétés barrières aux liquides et aux gaz.
- **Souplesse et légèreté** : Le liège est souple et léger, ce qui le rend facile à manipuler, avec une densité qui se situe généralement dans la plage de 120-240 Kg/m<sup>3</sup>.

Pour cette étude, le liège naturel récolté dans la région de Bejaia et de Jijel est utilisé.



---

**Diamètre des granulats**

**Figure**

---

**0.5 mm**



**Figure II.3**

---

**1.5 mm**



**Figure II.4**

---

**2 mm**



**Figure II.5**

---

**II.1.3.2. Caractéristiques physiques du liège :****II.1.3.2.1. Mesure de la masse volumique :**

La masse volumique absolue et apparente ont été mesurées suivant la norme : (NF EN 1097-6) et (NF EN 1097-3) respectivement.

**▪ Masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume du matériau sans tenir en compte les vides pouvant exister entre les grains.

**✓ Procédure de l'essai :**

- On verse une quantité d'eau dans une éprouvette graduée, dans laquelle on plonge une masse et on note le volume V1.
- On enlève la masse et on introduit une quantité de granulats de liège (1g).
- On remet la masse et on mesure le volume V2.

**▪ Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume apparent brut incluant les vides et les capillaires.

**✓ Procédure de l'essai :**

- On pèse un récipient vide dont on connaît le volume.
- On verse les granulats de liège jusqu'à ce qu'il déborde et on l'arase avec une règle.
- On pèse le récipient rempli.



**Figure II.6 :** Mesure de la masse volumique absolue et apparente.



### II.1.4 L'eau de gâchage :

L'eau utilisée est une eau potable du robinet du laboratoire de génie civil à l'université de Bejaia.



**Figure II.7 :** Eau potable

### II.2. Confections des corps d'épreuve :

Dans cette étude, les essais sont effectués sur la pâte de ciment et sur le mortier normal. Pour ces corps d'épreuve, nous étudions trois formulations différentes : une formulation témoin sans incorporation d'ajouts et deux autres formulations d'étude préparées en effectuant une substitution massique du sable par les granulats de liège de différents diamètres (0.5mm, 1.5mm, 2mm) et les deux taux de substitution étudiés sont 1% et 2%. Les quantités de ciment et d'eau introduites dans le mélange du mortier varient de (350g à 450g) et de (175 à 225 g) respectivement, avec un rapport E/C qui est de 0.5.

La composition des différentes formulations du mortier est donnée dans le **Tableau II-4**.

- **Procédure de confection :**

Le mortier est confectionné conformément à la norme **NF EN196-1**, donnant la composition massique (trois parties de sable, une partie de ciment et une partie d'eau)

Un malaxeur électrique de capacité de 5 litres est utilisé pour la confection des mortiers suivant la procédure :

- Le ciment, le sable et le liège (le cas échéant) sont introduits dans le malaxeur ; un malaxage à sec de 30 secondes à vitesse lente est réalisé.
- Un arrêt de quelques secondes permet l'introduction de toute l'eau au mélange.

- Un malaxage de 2 minutes à vitesse rapide est de nouveau effectué.
- Le malaxeur est ensuite mis à l'arrêt, et le batteur est démonté, permettant de racler les parois et le fond du récipient de manière à ce qu'aucune partie du mortier ne s'échappe du malaxage.
- Le mortier ainsi confectionné est introduit dans les moules (soit 40x40x160 mm<sup>3</sup>) qui sont préalablement graissés. Après l'introduction de chaque couche, un appareil à chocs permet de donner 60 coups à l'éprouvette pour un bon serrage. Les éprouvettes sont alors recouvertes de film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et conservées dans une salle où la température est réglée à 20°C.
- Le démoulage est effectué après 24h du moulage, et les éprouvettes sont alors marquées convenablement avec un crayon résistant à l'eau, elles sont ensuite immergées dans l'eau et conservées sous conditions de température de 20±2° C.
- 

**Tableau II-4** : composition des différentes formulations du mortier.

<b>Corps d'épreuve</b>	<b>Taux de sable %</b>	<b>Masse de sable (g)</b>	<b>Taux de liège%</b>	<b>Masse de liège (g)</b>	<b>Rapport E/C</b>
<b>Mortier témoin</b>	100%	1350 g	-	-	0.5
<b>Mortier</b>					
<b>De</b>	99%	1336.5 g	1%	13.5 g	0.5
<b>Liège</b>					
<b>Mortier</b>					
<b>De</b>	98%	1323 g	2%	27 g	0.5
<b>Liège</b>					

▪ **Méthode de calcul :**

Pour la formulation d'une éprouvette prismatique de (4\*4\*16) cm<sup>3</sup> de mortier avec ajout de liège de 2% par exemple, on a :

100%  $\longrightarrow$  1350

2%  $\longrightarrow$  Masse de l'ajout (MA)

$$\text{Avec : } MA = \frac{2 \cdot 1350}{100} = 27 \text{ g}$$



Figure II.8 : Malaxage



Figure II.9 : Moulage





Figure II.10 : Démoulage



Figure II.11 : Conservation des échantillons dans l'eau

**II.3. Méthodologie d'étude :**

Les différents essais et analyses réalisés sont effectués aux échéances de 28 jours.

**Tableau II.5 :** Essais et Analyses effectués sur les échantillons.

<b>Essai</b>	<b>Norme</b>	<b>Appareillage</b>	<b>Nature de l'échantillon</b>
<b>Consistance de ciment</b>	NF EN 196-3	Appareil de Vicat	
<b>Prise de ciment</b>	NF EN 196-3	Appareil de Vicat électronique	<b>Pâte de ciment</b>
<b>Pesée hydrostatique</b>	NF P94-064	Balance hydrostatique	
<b>Conductivité thermique</b>	NF EN 12664	CT mètre	
<b>Résistance à la flexion et à la compression</b>	NF EN 196-1	Presse mécanique	<b>Mortier durci</b>
<b>Auscultation sonique</b>	NF EN 12504-4	Ausculteur sonique	
<b>Diffraction des Rayons X</b>	NF EN 15305	Diffractomètre	
<b>Spectrométrie de fluorescence X</b>	ISO 13196	Spectroscope	
<b>Analyse Thermogravimétrique et thermique différentielle</b>	NF EN ISO 11358-1	Analyseur thermique	<b>Poudre de mortier</b>
<b>Spectrométrie par Infrarouge</b>	NF XP X43-243	Spectrophotomètre	

## II.4. Dispositif de mesure des propriétés à l'état frais du ciment :

### II.4.1. Essai de consistance du ciment

- **Objectif de l'essai :**

L'essai de consistance est effectué selon la norme **EN 196-3** et consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire à un ciment pour avoir une consistance normalisée. La pâte de ciment de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. L'eau nécessaire pour obtenir une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur des pâtes contenant différentes quantités d'eau.

- **Procédure de l'essai :**

A partir d'une teneur en eau de départ, on prépare une pâte selon la procédure de malaxage. La pâte est rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs et l'excès est enlevé par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de la sonde et la plaque de base. La teneur en eau retenue est celle permettant d'obtenir une distance « d » entre l'extrémité de la sonde et la plaque de base de  $d = 6 \pm 1$  mm.



**Figure.II.12 :** Essai de consistance par l'appareil de Vicat.

#### II.4.2. Essai de prise du ciment

- **Objectif de l'essai :**

L'objectif de l'essai de prise est de déterminer le début et la fin de prise des pâtes de ciment. Il est important de connaître ces valeurs pour pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

- **Procédure de l'essai :**

Le temps de prise est effectué suivant la norme **EN 196-3** et mesuré à l'aide d'une aiguille de Vicat automatique de marque CONTROLS qui permet de suivre dans le temps l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée. Avec l'appareil de Vicat électronique équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre, on détermine le début de prise et la fin de prise. Pour cela, une pâte de consistance normalisée est préparée et est rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessive. L'excès de mortier est retiré avec une truelle et mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. L'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat et on démarre les mesures. Une minute après, l'aiguille est relâchée sans élan (sans vitesse) dans la pâte et la distance « d » séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base est enregistrée. L'opération est recommencée à des intervalles de temps convenablement espacés de dix (10) minutes. Lorsque l'aiguille s'arrête à une distance « d » du fond du moule tel que  $d = 4\text{mm} \pm 1\text{ mm}$  on dit que la prise a commencé. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « temps de début de prise ». Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.



**Figure.II.13** : Essai de prise avec l'appareil de Vicat automatique



## II.5. Dispositif de mesure des propriétés à l'état durci :

### II.5.1 Mesure des propriétés physiques

#### II.5.1.1. Pesée hydrostatique : NF P94-064

- **Définition :**

La pesée hydrostatique est une technique utilisée pour déterminer la masse volumique des solides et des liquides, basée sur le principe de la poussée d'Archimède.

- **Procédure :**

La pesée est généralement effectuée après une période de conservation des échantillons pendant 28 jours.

Cette méthode comprend trois étapes principales :

- La pesée à l'eau : Tout d'abord, l'échantillon est immergé dans l'eau à des fins de pesage, ce qui permet de déterminer sa masse dans l'eau à l'aide d'une balance.
- La pesée à l'air : après la pesée à l'eau, on essuie l'échantillon superficiellement avec un chiffon puis on le pèse.
- La pesée à sec : Enfin, l'échantillon est soumis à un étuvage pendant 24 heures à 40 °C avant d'être pesé à nouveau afin d'obtenir la masse sèche.



Figure.II.14 : Pesée hydrostatique



**II.5.1.2. Conductivité thermique : NF EN 12664****• Définition :**

La conductivité thermique, désignée par lambda  $\lambda$  et mesurée en (W/m.K ou W/m.C) fait référence à la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Un matériau dont la valeur lambda est inférieure présente des propriétés isolantes plus élevées. Ce paramètre indique l'efficacité du matériau à faciliter le transfert de chaleur par conduction dans des conditions de température variables. L'utilisation de la méthode de la plaque chauffante gardée (**Guarded Hot Plate Method**) permet de déterminer avec précision la conductivité thermique en induisant un flux de chaleur au centre d'une plaque chauffante gardée et en mesurant les températures des deux côtés de l'échantillon.

**• Procédure :**

Les éprouvettes prismatiques (40\*40\*160)  $mm^3$  utilisés dans cet essai sont conformes à la norme établie. L'évaluation de la conductivité thermique a été réalisée à température ambiante à l'aide d'un CT mètre. Ce dispositif comprend une sonde spécialisée positionnée méticuleusement entre deux échantillons, qui sont ensuite soumis à un flux de chaleur induit par l'effet Joule du CT mètre. En surveillant les variations de température au fil du temps à l'aide d'un thermocouple, la conductivité thermique du matériau peut être déterminée. De plus, un écran d'affichage est intégré pour afficher les résultats enregistrés.

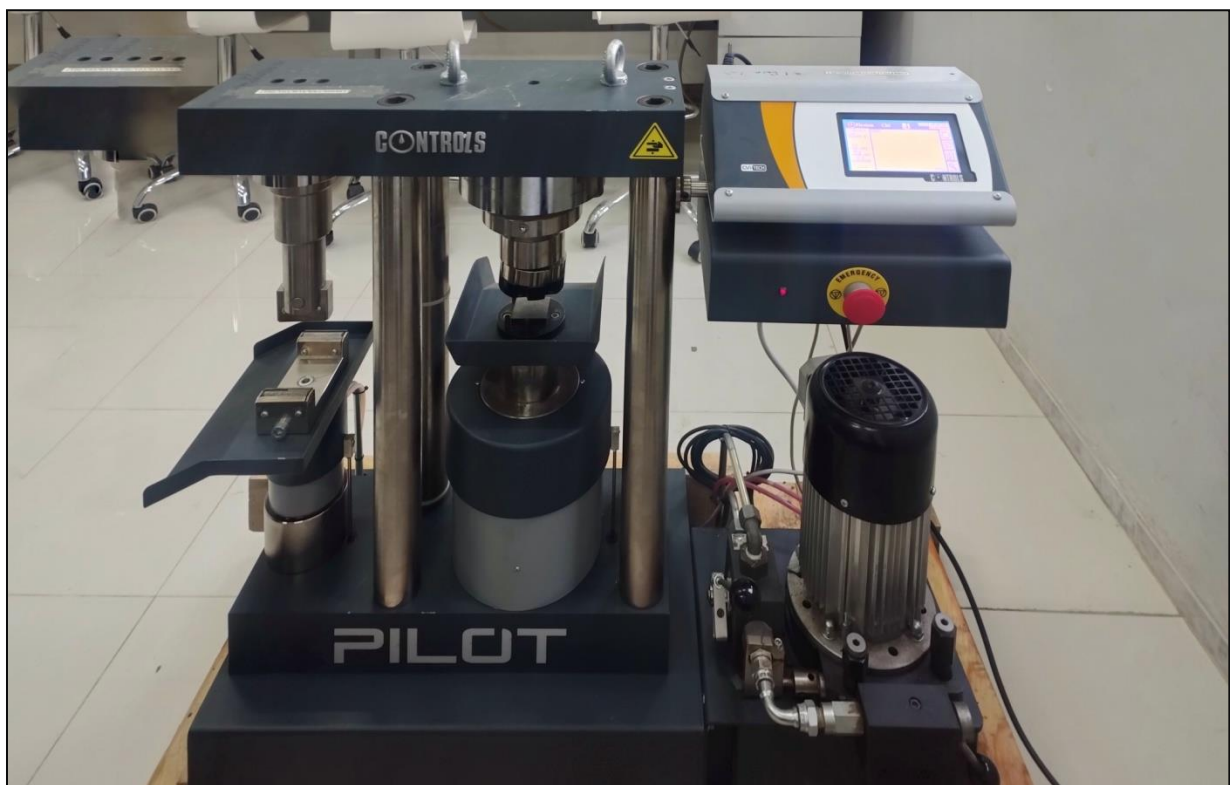


**Figure II.15 :** mesure de la conductivité thermique.

**II.5.2. Mesure des propriétés mécaniques :****II.5.2.1. La résistance à la flexion et à la compression : NF EN 196-1**

Les essais de flexion et de compression sont effectués sur des échantillons prismatiques conformément aux directives de la norme.

Dans un premier temps, les éprouvettes mesurant 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> sont soumises à un essai de flexion, suivie par des essais sur les demi-échantillons obtenues sous compression jusqu'à la rupture. Deux échantillons de chaque composition sont soumis à l'essai de la flexion, et les quatre demi-échantillons suivants sont ensuite testés sous compression. Les expériences ont été réalisées à l'aide d'une presse mécanique CONTROLS et le logiciel de la presse a été utilisé pour la collecte de données. L'examen est effectué en mouvement à une vitesse de 0,25 mm/minute.



**Figure II.16 :** Presse mécanique.

**II.5.2.2. Auscultation sonore : [NF EN 12504-4]****• Définition :**

L'objectif de la méthode d'auscultation sonore est de déterminer le temps de propagation des ondes ultrasonores entre deux emplacements spécifiques d'une structure en béton. Ce processus implique l'initiation d'une impulsion électrique par un émetteur, qui est ensuite transformée en ondes mécaniques ultrasonores grâce aux caractéristiques piézoélectriques de l'élément en béton étudié. Ces ondes traversent un milieu couplant et se propagent à travers le matériau, avant d'être capturées par un récepteur et reconverties en un signal électrique qui est renvoyé au générateur initial.

**• Procédure :**

- Les transducteurs sont placés de part et d'autre l'échantillon du mortier à tester.
- L'appareil est ensuite réglé à l'aide du barreau étalon et du potentiomètre.
- Un peu de graisse (gel) est mise sur les surfaces des transducteurs pour assurer un bon contact entre l'échantillon à tester et les transducteurs.
- Le temps T de parcours par l'onde en  $\mu s$  (micro seconde) est noté.
- En connaissant la distance D parcourue par les ondes, la vitesse du son dans le mortier est calculée selon la formule :  $V = D / T$ .

T : le temps de propagation des ondes ultrasonores

D : la distance de l'émetteur au récepteur



**Figure II.17 :** Test ultrasonique.

**II.5.3. Mesure des propriétés physico-chimiques :****II.5.3.1 Analyse minéralogique par la diffraction des rayons X [NF EN 15305]**

- **Définition:** [32]

La diffraction des rayons X est une méthode non destructive puissante utilisée pour la caractérisation des substances cristallines. Elle fournit des informations sur des propriétés telles que les structures, les phases, les orientations cristallines préférées (textures), ainsi que sur des paramètres structuraux supplémentaires tels que la taille moyenne des grains, la cristallinité, la contrainte et les défauts cristallins. Cette technique trouve une application dans l'examen des minéraux, des roches, des cristaux et d'autres matériaux contenant des composants cristallins.

- **Principe :**

Cette méthodologie consiste à projeter des rayons X sur un matériau, puis à mesurer les intensités et les angles de diffusion des rayons X diffusés par le matériau. Les données dérivées de ce processus peuvent être exploitées pour déterminer la disposition cristalline du matériau et pour identifier les diverses phases qui s'y trouvent. Particulièrement importante en catalyse, cette technique aide les chercheurs à comprendre la structure cristalline des catalyseurs, un facteur essentiel à leur mécanisme de fonctionnement et à leur efficacité.



**Figure.II.18** : Diffractomètre



### II.5.3.2. Spectrométrie de fluorescence X

- **Définition :** [33]

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire à l'échelle mondiale qui permet d'identifier et de quantifier la majorité des éléments chimiques présents dans un échantillon donné. Cette méthode est applicable à une large gamme de matériaux, qu'ils soient à l'état solide ou liquide, tels que les minéraux, les céramiques, les ciments, les métaux, les huiles, l'eau et les verres.

L'utilisation de cette technique permet l'analyse complète de tous les éléments chimiques allant du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des intervalles de concentration allant de quelques parties par million (ppm) à 100 %, ce qui permet d'obtenir des résultats précis et reproductibles.

- **Principe :**

L'échantillon destiné à être examiné est placé sous un flux de rayons X, lors de l'exposition à ces rayons X, les particules composant l'échantillon passent de leur état stable à un état d'énergie accrue. Par la suite, l'état d'énergie élevé s'avère transitoire, incitant les particules à revenir à leur état stable en déchargeant de l'énergie, notamment sous forme de photons de rayons X. Chaque particule, caractérisée par sa configuration électronique unique, émettra des photons possédant des propriétés d'énergie et de longueur d'onde distinctes. Ce processus correspond à l'apparition d'une fluorescence X, une émission dérivée de rayons X qui porte les traits distinctifs des particules composant l'échantillon. L'analyse de cette émission de rayons X dérivée facilite l'identification à la fois de la composition élémentaire et de la concentration massique d'un échantillon donné.



Figure II.19: Spectroscopie

**II.5.3.3. ATG / ATD / DSC [NF EN ISO 11358-1]**

- **Analyse thermogravimétrique ATG**

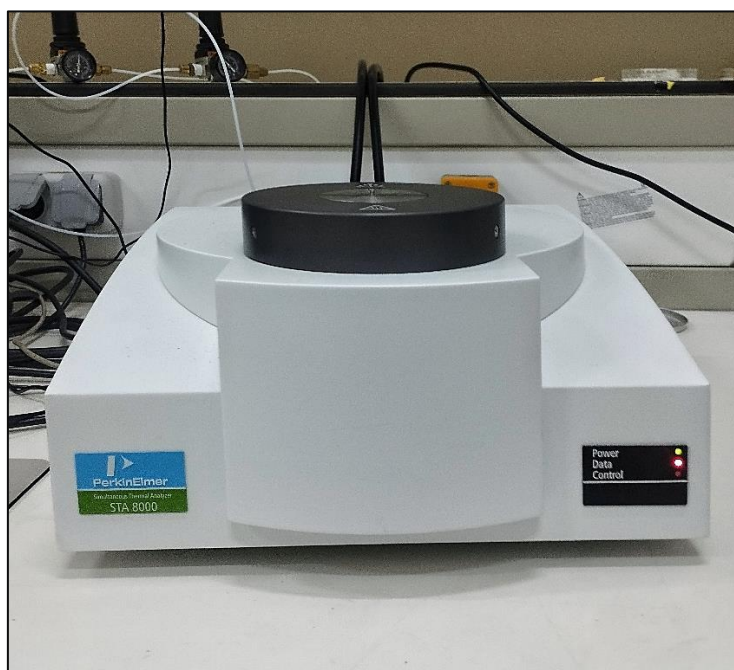
L'analyse thermogravimétrique (ATG) est une méthode qui consiste à quantifier l'altération de la masse d'un échantillon à la suite de l'exposition à des variations de température programmées dans un environnement régulé. Cette modification de masse peut se manifester par une réduction (résultant de la libération de vapeur lors de processus tels que les réactions de déshydratation ou la décarbonatation) ou par une augmentation (due à l'absorption de gaz dans des cas tels que les réactions d'oxydation ou l'hydratation).

- **Analyse thermique différentielle ATD**

L'analyse thermique différentielle (ATD) est une technique utilisée pour quantifier la variation de température entre un échantillon et un matériau de référence inerte en réponse à des changements de température au fil du temps ou à des gradients de température, tout en étant exposé à des conditions environnementales contrôlées.

- **Analyse de calorimétrie différentielle à balayage DSC**

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est une méthode utilisée pour analyser les variations du flux de chaleur qu'un échantillon émet ou absorbe lorsqu'il subit une modulation de température dans des conditions environnementales spécifiques.



**Figure II.20 :** Analyseur thermique (ATG, ATD, DSC)

**II.5.3.4. Spectroscopie par infrarouge (FTIR) : [NF XP X43-243]**

- **Définition :**

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier permet d'identifier des bandes distinctes associées à des composés organiques, inorganiques, amorphes et cristallins. Les molécules sont stimulées par le rayonnement infrarouge émis, induisant des modes vibratoires internes liés à l'étirement ou à la déformation. La comparaison entre le rayonnement incident et le rayonnement transmis (ou absorbé) par un échantillon mélangé à une matrice non absorbante permet d'identifier les principaux groupes chimiques de l'échantillon.

- **Procédure :**

L'échantillon doit être broyé en poudre fine à l'aide d'un pilon pour une bonne dispersion dans le sel KBr (Bromure de potassium). Une quantité de 0,08 g de ce dernier est mélangée avec 0,003 g de l'échantillon. Le mélange est uniformément reparti dans un moule à pastilles afin d'éviter les variations de densité ou les bulles d'air, puis une pression d'environ 70 Kilonewton est appliquée dans une presse pendant deux minutes. A la fin la pastille formée du moule est soigneusement retirée puis analysée au moyen d'un spectrophotomètre IRAffinity-1.



**Figure.II.21 :** Pastille



**Figure.II.22 :** spectrophotomètre IRAffinity-1

## **Conclusion**

Ce chapitre a essentiellement offert un aperçu complet des matériaux et des méthodologies utilisées dans l'exécution de notre projet de recherche.

La sélection des outils, des approches procédurales et des méthodes analytiques a été effectuée avec une alternation méticuleuse afin de s'aligner sur les objectifs de recherche, préservant ainsi la crédibilité et la solidité des résultats obtenus.

Grace à l'utilisation de ces matériaux et méthodologies spécifiés, une base solide a été établie pour l'élucidation des résultats expliqués dans la section suivante.

Les décisions méthodologiques exposées établissent un cadre solide pour l'exploration systématique menée, garantissant ainsi que les déductions effectuées seront enracinées dans des données fiables et reproductibles.



# Chapitre III

**Introduction :**

Après une exposition approfondie des matériaux et des méthodes utilisés dans notre étude de recherche, ce chapitre spécifique dévoile les résultats de nos efforts d'étude et explore une discussion approfondie. Les informations recueillies sont soumises à un processus d'analyse méticuleux et organisé visant à répondre aux hypothèses et objectifs prédéfinis qui ont été établis avant le début de cette recherche scientifique.

Dans la phase initiale, les données brutes seront présentées de manière lucide et succincte, en utilisant une combinaison de tableaux, de courbes et d'explications textuelles pour améliorer l'accessibilité et la compréhension. Chaque segment individuel de ce chapitre est conçu pour approfondir une facette distincte de nos résultats, en mettant en lumière les tendances discernables et les points cruciaux qui ont été observés au cours de l'étude.

Par la suite, une délibération complète et détaillée aura lieu pour déchiffrer ces résultats à la lumière des connaissances existantes et des activités de recherche antérieures. Cette critique évaluative vise non seulement à contextualiser nos découvertes dans le domaine plus large mais également à identifier les contraintes potentielles de notre étude tout en proposant des pistes pour des initiatives de recherche prospectives.

En combinant la présentation des résultats et la discussion analytique, l'objectif principal de ce chapitre est de fournir une compréhension holistique et nuancée des phénomènes étudiés, en mettant l'accent sur les contributions distinctives de notre projet de recherche ainsi que les implications théoriques et pragmatiques qui émanent de telles contributions.

### III.1. Résultats de caractérisation physique du liège :

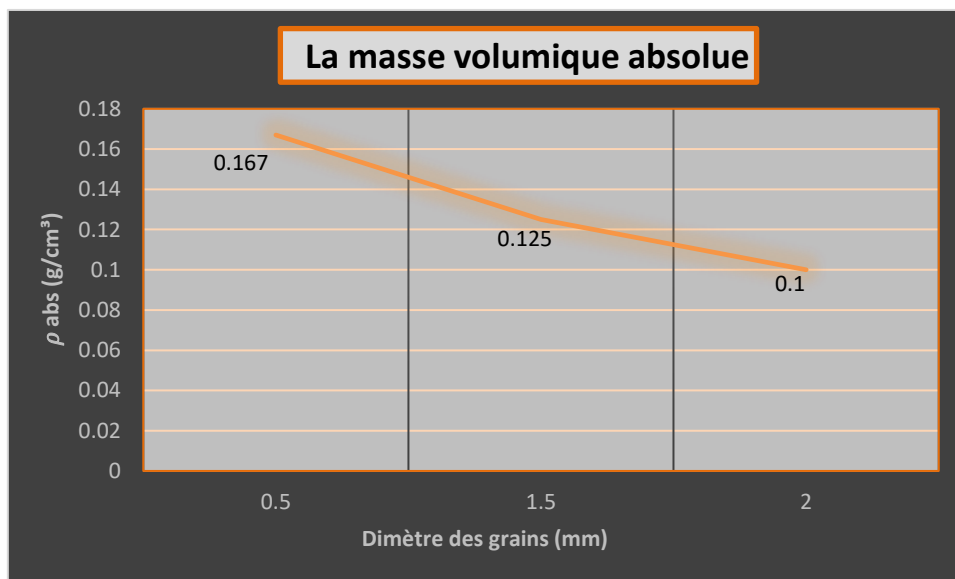
#### III.1.1. Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue est mesurée suivant la norme **NF EN 1097-6**.

Les résultats de mesure de la masse volumique absolue sont résumés dans le tableau ci-dessous et illustrés dans la **Figure III.1**.

**Tableau III.1** : Résultats de la masse volumique absolue.

Diamètre des grains (mm)	Masse (g)	V1 (cm <sup>3</sup> )	V2 (cm <sup>3</sup> )	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )
0,5	1	40	46	0,167
1,5	1	40	48	0,125
2	1	40	50	0,1



**Figure III.1** : Courbe de la masse volumique absolue.

La courbe indique une tendance décroissante, ce qui signifie que la masse volumique absolue diminue avec l'augmentation des diamètres des grains. Si le diamètre des grains augmente tout en ayant une masse proportionnellement plus petite, la densité totale diminue.

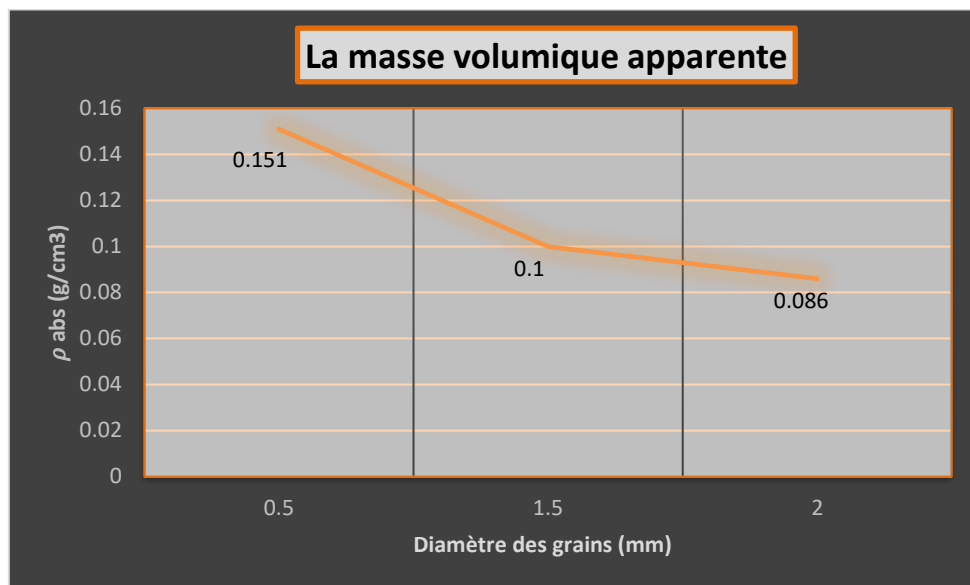
### III.1.2. Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est mesurée suivant la norme **NF EN 1097-3**.

Les résultats de la masse volumique apparente sont regroupés dans le tableau suivant et illustrés dans la **Figure III.2**:

**Tableau III.2** : Résultats de la masse volumique apparente.

Diamètre des grains (mm)	M1 (g)	M2 (g)	V (cm <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )
0,5	6,1	22,1	105,81	0,151
1,5	6,1	16,7	105,81	0,1
2	6,1	15,3	105,81	0,086



**Figure III.2** : Courbe de la masse volumique apparente.

La courbe montre une tendance décroissante, ce qui signifie que lorsque la taille des grains augmente, la masse volumique apparente diminue. Cela est dû à l'augmentation des espaces vides entre les gros grains, réduisant ainsi la densité totale.

**III.2. Résultats de mesure des propriétés à l'état frais :**

**III.2.1. Essai de prise de la pâte de ciment :**

L'essai de prise de la pâte de ciment est effectué à l'aide de l'appareil de Vicat électronique selon la norme (EN 196-3).

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.3 :** Le temps de début et fin de prise de la pâte de ciment.

Temps de début de prise	Temps de fin de prise
01h54min13s	04h54min13s

Ces résultats montrent que le ciment a un temps de début de prise de **01h54min13s** et un temps de fin de prise de **04h54min13s**. Ces temps de prise sont conformes aux attentes pour ce type de ciment et indiquent une performance appropriée pour les applications prévues.

**III.2.2. Résultats de l'essai de consistance de la pâte de ciment :**

Les variations des consistances de la pâte de ciment en fonction des taux d'ajout d'eau sont représentées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.4 :** Consistance normale de la pâte de ciment.

E/C	Ciment (g)	Eau (g)	d(mm)
<b>0.23</b>	500	115	38
<b>0.27</b>	500	135	30
<b>0.30</b>	500	150	16
<b>0.32</b>	500	160	6

Le rapport E/C=0.32 a permis d'obtenir une pâte de ciment avec une distance de pénétration (d=6mm) indiquant que la consistance est parfaitement adaptée pour l'application prévue. Ce résultat valide la méthode de formulation et confirme que la pâte de ciment est conforme aux critères de qualité nécessaire pour une performance optimale.

### III.3. Résultats de mesure des propriétés à l'état durci :

#### III.3.1. Résultats de mesure des propriétés physiques :

##### III.3.1.1. La porosité :

La porosité est exprimée en pourcentage (%) et calculée selon la norme NF EN 1097-3 à

partir de la formule suivante : 
$$P = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

Où :  $M_{air}$  : Masse de l'éprouvette pesé à l'air.

$M_{eau}$  : Masse de l'éprouvette immergée dans l'eau.

$M_{sec}$  : Masse de l'éprouvette pesée à sec.

La figure fournie ci-dessous est un graphique de surface en 3D représentant la relation entre trois variables : la teneur en liège, la teneur en ciment, et la porosité. Le graphique montre la variation de porosité en fonction des quantités variables de liège et de ciment.

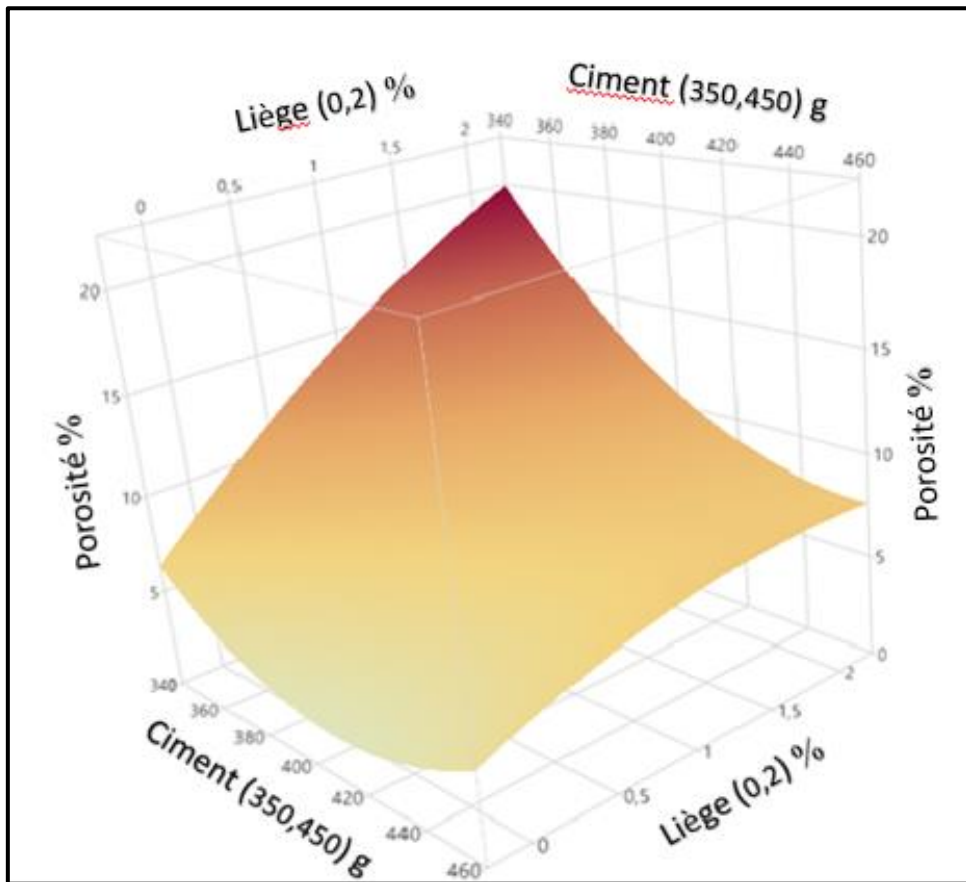


Figure III.3 : courbe 3D de la porosité

### III.3.1.2. Absorption d'eau :

L'absorption d'eau est la capacité d'un matériau à absorber et retenir l'eau lorsqu'il est immergé ou exposé à un environnement humide. Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche du matériau.

L'absorption d'eau est déterminée suivant la norme **NF EN 1097-6** et en utilisant la formule suivante :  $A = \frac{M2 - M1}{M1}$

Où : M1 : Masse de l'échantillon sec

M2 : Masse de l'échantillon saturé

La figure fournie est un graphique de surface en 3D représentant la relation entre trois variables : la teneur en liège, la teneur en ciment, et l'absorption d'eau. Le graphique montre la variation de l'absorption d'eau en fonction des quantités variables de liège et de ciment.

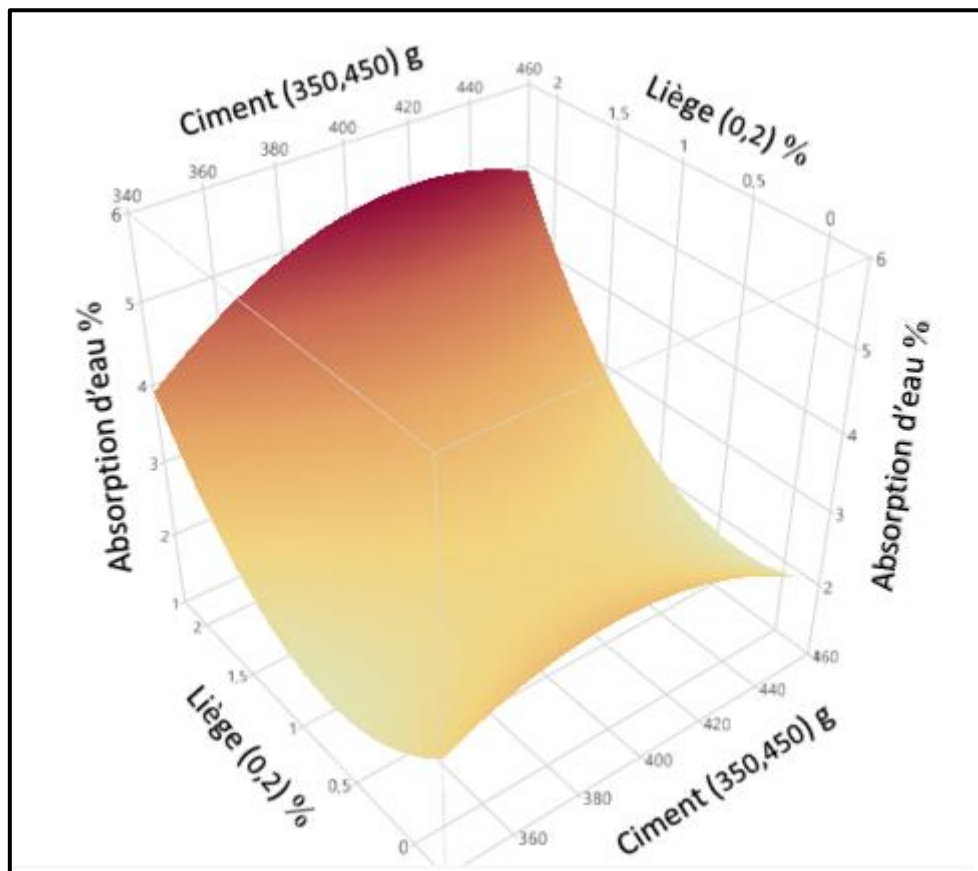


Figure III.4 : courbe 3D de l'absorption d'eau.

**La porosité :****Tendances Observées :**

- **Ciment :** La porosité est élevée dans les cas où la quantité de ciment utilisée diminue, généralement autour de (350 g), en particulier lorsque de quantités importantes de liège sont présentes. Inversement, une augmentation de la quantité de ciment, environ (450 g), entraîne une diminution de la porosité.
- **Liège :** À mesure que la teneur en liège augmente (1 à 2 %), la porosité augmente également, puisque le liège, étant un matériau plus léger et poreux, entraîne plus d'espaces vides dans la matrice du mortier.

**L'absorption d'eau :****Tendances Observées :**

- **Ciment :** A mesure que la teneur en ciment augmente, l'absorption d'eau augmente également, ceci s'explique par la capacité des propriétés capillaires du ciment à absorber et à retenir l'eau.
- **Liège :** À mesure que la teneur en liège augmente, l'absorption d'eau augmente aussi.

**Relation entre la porosité et l'absorption d'eau :**

L'incorporation du liège dans les mortiers tend à augmenter la porosité, ce qui entraîne une augmentation de l'absorption d'eau, cette relation est proportionnelle. Les pores supplémentaires créés par le liège offrent plus de chemins pour que l'eau pénètre et soit retenue dans le matériau.



### III.3.1.3. Conductivité thermique :

La figure montre un graphique en forme de courbe 3D représentant la conductivité thermique en fonction de deux variables : la teneur en ciment et la teneur en liège.

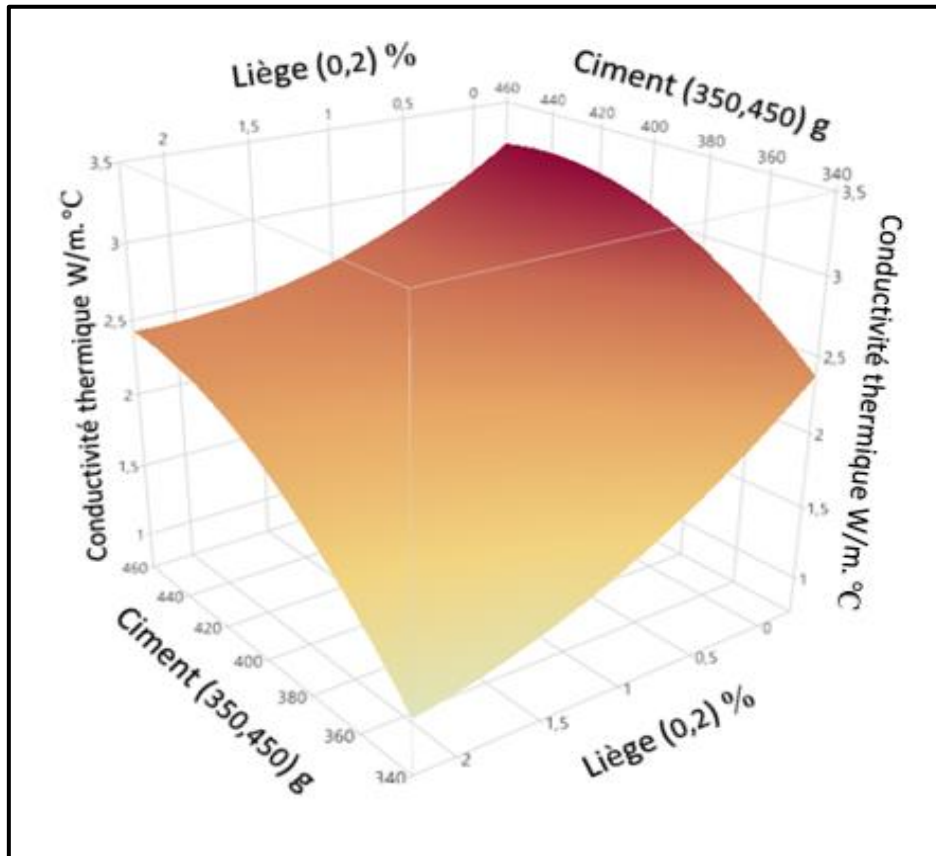


Figure III.5 : courbe 3D de la conductivité thermique.

#### Tendances observées :

- **Ciment** : La diminution de la teneur en ciment crée un ciment plus poreux et cette porosité contribue à diminuer la conductivité thermique.
- **Liège** : L'ajout de liège diminue la conductivité thermique. Cela est attendu car le liège est un matériau isolant avec une faible conductivité thermique.

#### Interaction entre ciment et liège :

À teneur en ciment constante, l'augmentation de la teneur en liège réduit la conductivité thermique. La surface du graphique illustre que cette diminution est plus prononcée à des teneurs en ciment plus élevées, ce qui montre que le liège peut efficacement réduire la conductivité thermique même dans des matrices à haute teneur en ciment.

### III.3.2. Mesure des propriétés mécaniques

#### III.3.2.1. La résistance à la flexion et à la compression : NF EN 196-1

##### La résistance à la compression :

Le courbe ci-dessous illustre les variations de la résistance à la compression en fonction des quantités variables de liège et de ciment :

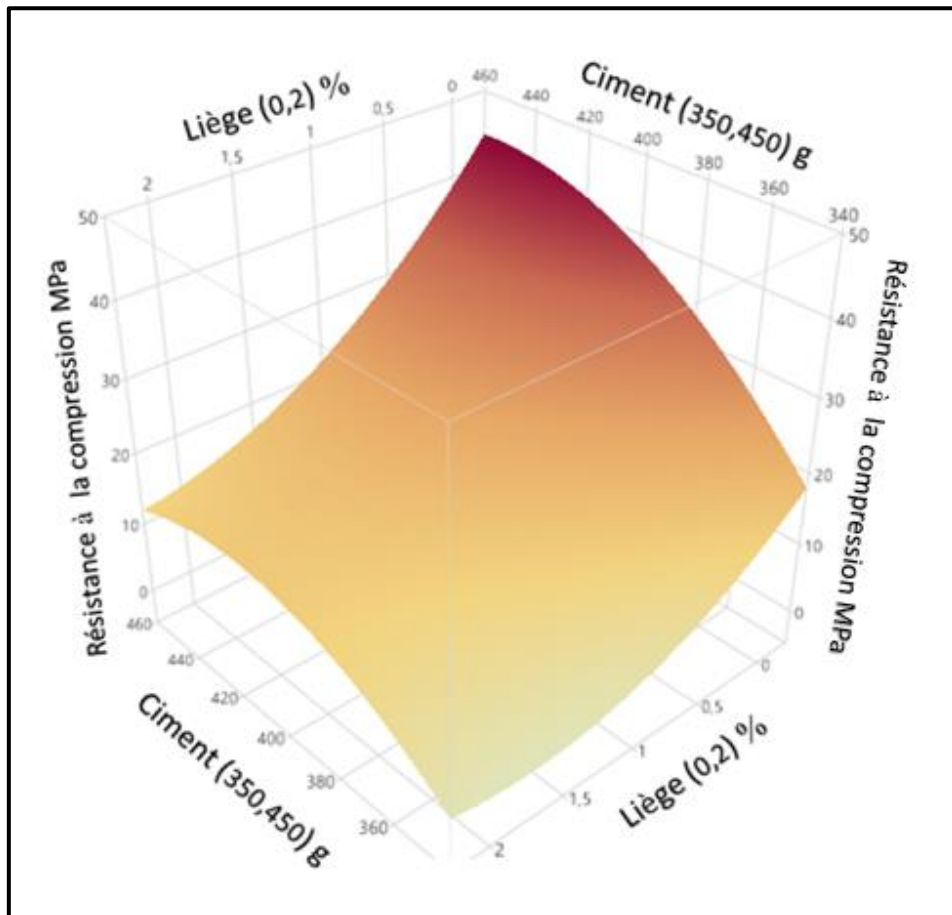


Figure III.6 : courbe 3D de la résistance à la compression.

##### Tendances Observées :

- **Ciment** : On observe que l'augmentation de la teneur en ciment fait augmenter la résistance à la compression. Plus de ciment conduit à une matrice cimentaire plus dense et plus résistante.
- **Liège** : L'ajout de liège réduit la résistance à la compression, car le liège, crée des vides dans la matrice cimentaire, ce qui diminue la densité et la résistance globale du matériau.

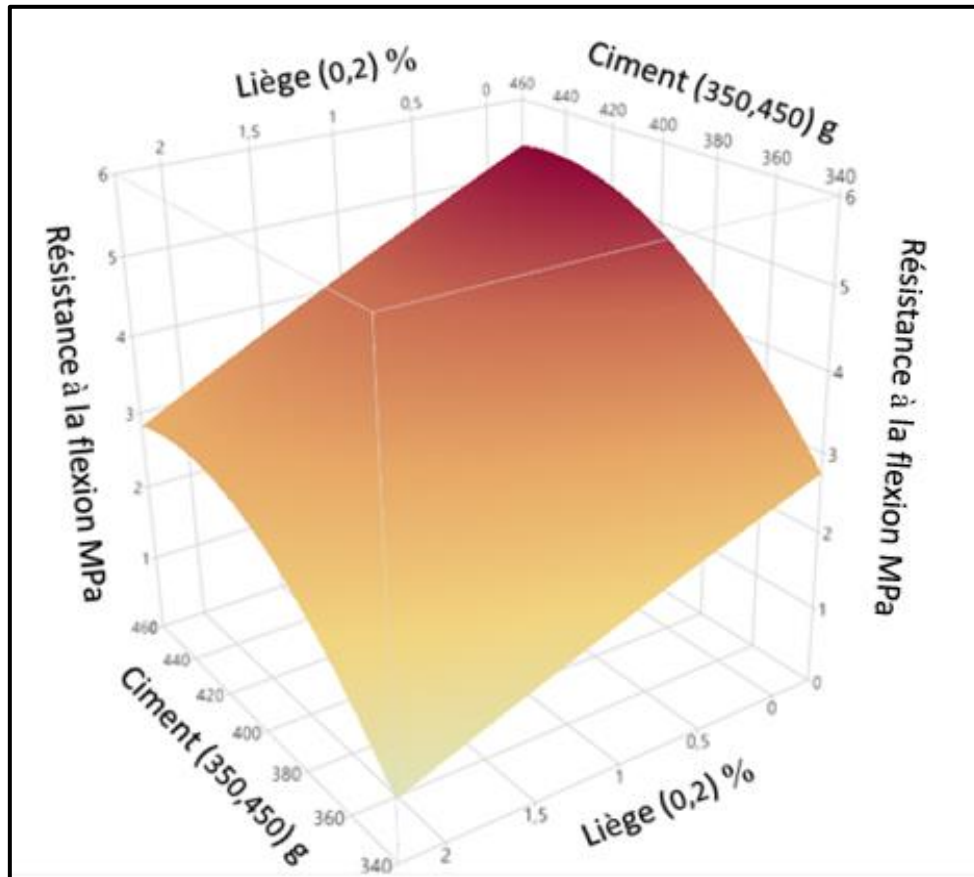




**Figure III.7 :** Ecrasement de deux demi échantillons sous l'effet de la compression.

**La résistance à la flexion :**

Le courbe 3D ci-dessous représente la résistance à la flexion en fonction de deux variables : la teneur en ciment et la teneur en liège.



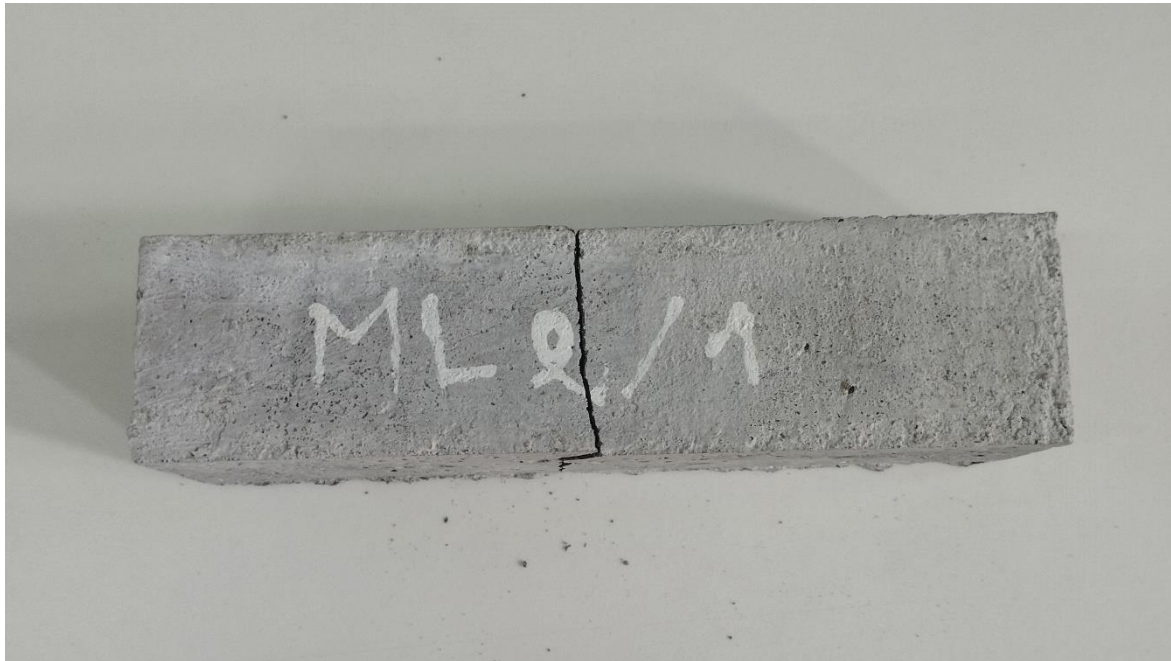
**Figure III.8:** Courbe 3D de la résistance à la flexion.

**Tendances observées :**

- **Ciment** : La teneur en ciment a une influence significative sur la résistance à la flexion. Une augmentation de la teneur en ciment tend à augmenter la résistance à la flexion.
- **Liège** : L'ajout de liège semble diminuer la résistance à la flexion. Le liège, étant un matériau léger et moins rigide, réduit la capacité du mélange à résister à des forces de flexion.

**Interaction entre ciment et liège** : Les courbes montrent une interaction entre les deux variables. À teneur en ciment constante, l'augmentation de la teneur en liège diminue la résistance à la compression et à la flexion. La surface du graphique illustre que cette diminution est plus prononcée à des teneurs en ciment plus faibles.





**Figure III.9:** Echantillon en deux moitiés après flexion.



**Figure III.10:** Structure interne des deux moitiés de l'échantillon.



- Observation de la structure :



**Figure III.11** : Mortier de liège de 2mm



**Figure III.12** : Mortier de liège de 1.5mm



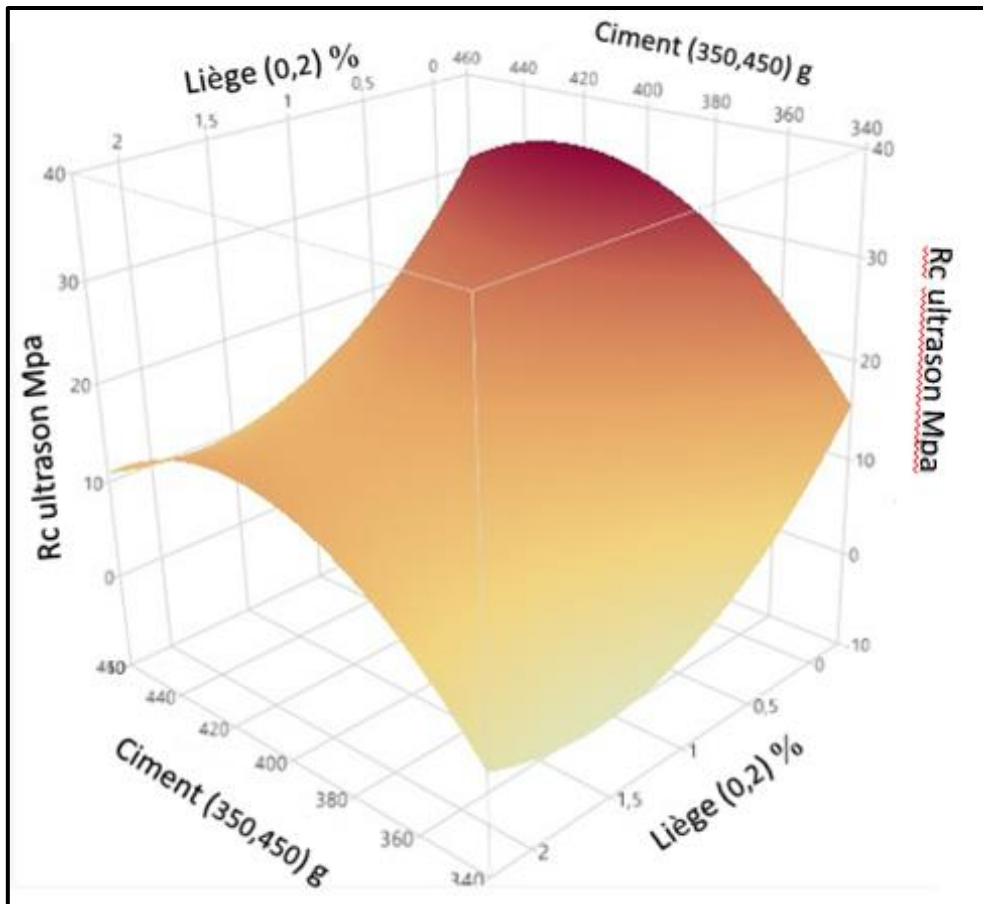
**Figure III.13** : Mortier de liège de 0.5 mm

On observe une distribution homogène du liège à l'intérieur du mortier quel que soit le diamètre incorporé.

### III.3.2.2. Auscultation sonore :

La résistance à la compression  $R_c$  en (MPa), mesurée par la méthode non destructive (ultrason) et déterminée en utilisant la formule suivante :  $R_c = 0.342.e^{1.004 v}$

Avec  $R_c$  en MPa et  $V$  en Km/s.



**Figure III.14 :** courbe 3D de la résistance à la compression par la méthode ultrason.

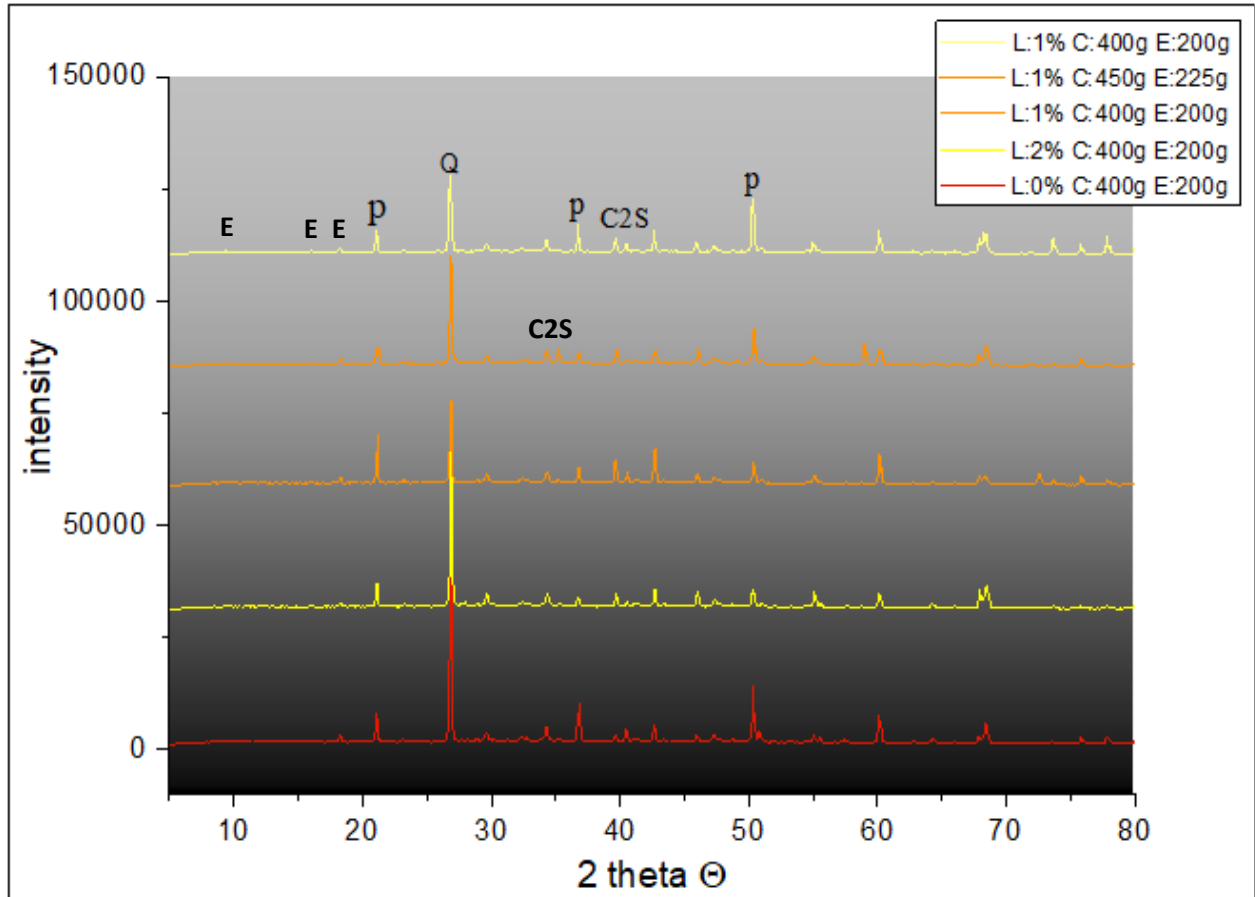
On observe que les courbes de résistance à la compression obtenues avec la méthode ultrasons suivent les mêmes tendances que celles obtenues par écrasement (essai destructif), ce qui démontre l'efficacité de la méthode ultrason pour la prédiction de la résistance à la compression des mortiers allégés par l'ajout de liège.



### III.3.3. Mesure des propriétés physico-chimiques :

#### III.3.3.1 Résultats de l'Analyse minéralogique par la diffraction des rayons X

La figure ci-dessous représente le spectre de l'analyse minéralogique par la diffraction des rayons X (DRX) d'un mortier témoin et de quatre autres mortiers avec différentes formulations.



**Figure III.15:** Spectre de l'analyse minéralogique par la diffraction des rayons X.

#### Identification des pics :

- Les pics notés P, Q, E et C2S correspondent aux phases cristallines présentes dans les échantillons.
- P représente des phases de Portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) qui est un produit d'hydratation du ciment et E représente l'ettringite.
- Q représente la phase de quartz ( $\text{SiO}_2$ ) provenant du sable.
- C2S correspond à la phase bélite ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) qui a une hydratation lente produisant essentiellement à partir du 90ième jour.

- L'échantillon sans liège (L=0%) sert de référence et montre les pics typiques du ciment Portland.
- Avec l'ajout de 1% de liège (L=1%), il y a une légère diminution des intensités des pics de Portlandite, ce qui peut indiquer une certaine interférence dans la formation de cette phase cristalline.
- À 2% de liège (L=2%), on observe une modification plus prononcée des pics, suggérant que la présence de liège à cette concentration affecte davantage la structure cristalline du ciment hydraté.

**III.3.3.2. Spectrométrie de fluorescence X :**

Ce tableau ci-dessous représente la composition chimique de cinq échantillons différents :

**Tableau III.5 : Résultats de la spectroscopie par fluorescence**

<b>Composition chimique</b>	<b>Témoin</b>	<b>(Liège=1%) (Ciment=400g)</b>	<b>(Liège=1%) (Ciment=450g)</b>	<b>(Liège=2%) (Ciment=400g)</b>
<b>Eléments légers (%) (E.L)</b>	36.99	40.70	43.38	44.07
<b>Aluminium (%) (AL)</b>	2.69	2.79	2.63	2.59
<b>Silicon (%) (Si)</b>	38.53	34.16	32.36	32.92
<b>Fer (%) (Fe)</b>	1.02	-	-	-
<b>Sulfur (%) (Su)</b>	1.67	1.71	1.49	1.60
<b>Calcium (%) (Ca)</b>	17.99	18.66	18.42	17.15

Plus on augmente la quantité de liège plus la quantité de silicium diminue, de même pour la quantité de ciment.

Plus on augmente la quantité de ciment, la quantité de calcium augmente aussi.

III.3.3.3. Résultats de l'analyse thermogravimétrique (ATG)

La figure ci-dessous présente les résultats d'analyse (ATG) de trois mortiers contenant des pourcentages différents de liège (cork).

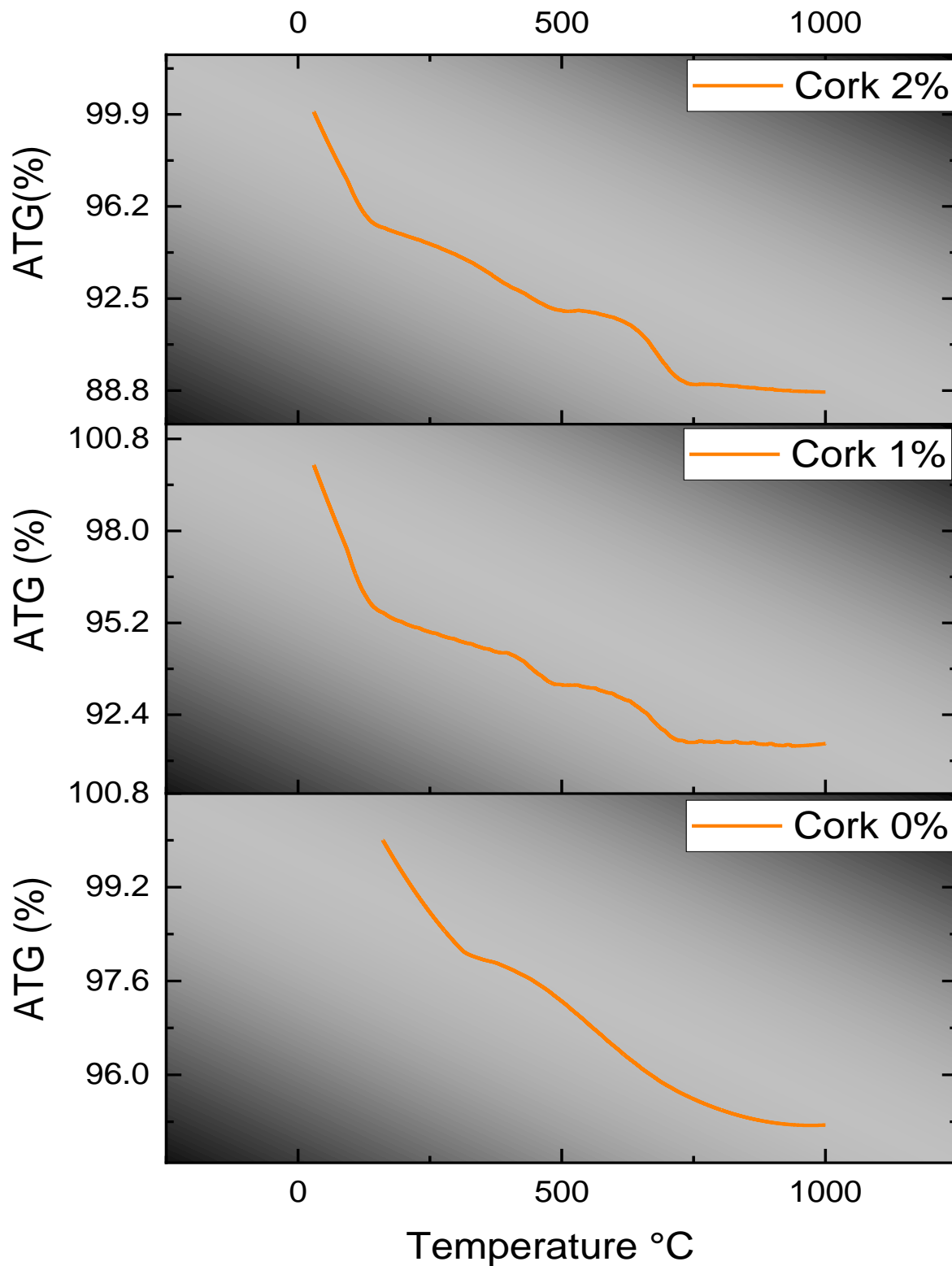


Figure III.16: Courbes de l'analyse thermogravimétrique (ATG).

- **Mortier avec 0% de liège (cork)** : La courbe montre une perte de masse graduelle, en augmentant la température jusqu'à environ 500°C, une perte de masse significative est observée, cette dernière est due à l'évaporation de l'eau.  
Au-delà de 500°C la perte est plus modérée, elle est liée à la décomposition des composants inorganique du mortier, tels que les carbonates de calcium et le dioxyde de carbone.
- **Mortier avec 1% de liège (cork)** : La courbe indique une perte de masse plus prononcée surtout entre 300°C et 500°C, ce qui correspond à la décomposition des composants organiques apportés par le liège (la subérine, la lignine, les polysaccharides et les tanins) apportés par le liège, libérant des gaz.  
Au-delà de 500°C, la perte de masse continue de manière progressive, atteignant 92% à 1000°C.
- **Mortier avec 2% de liège (cork)** : La courbe indique une tendance semblable à la précédente mais avec une perte de masse plus importante entre 300°C et 500°C, reflétant un taux plus élevé de liège en comparant aux deux autres.  
Au-delà de 500°C, la courbe montre une perte de masse continue, atteignant 88.8% à 1000°C, ce qui est plus bas.

#### **Interprétation générale :**

Les résultats montrent une perte de masse progressive avec l'augmentation de la teneur en liège, puisque ce dernier étant un matériau organique est susceptible de se décomposer à des températures inférieures à celles des composants inorganiques du mortier.

La stabilité thermique du mortier diminue avec l'augmentation de la teneur en liège, comme le montre les courbes pour 1% *et* 2% de liège par rapport au mortier sans ajout de liège.

III.3.3.4. Résultats de la spectroscopie par infrarouge (IRTF) :

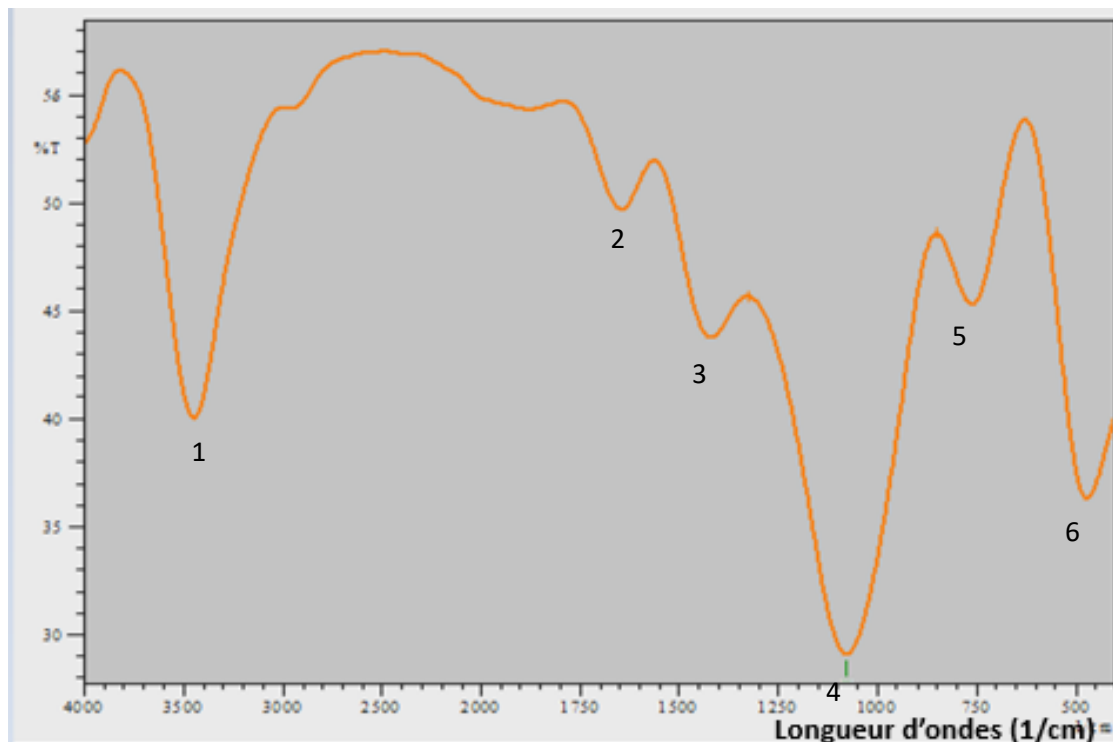
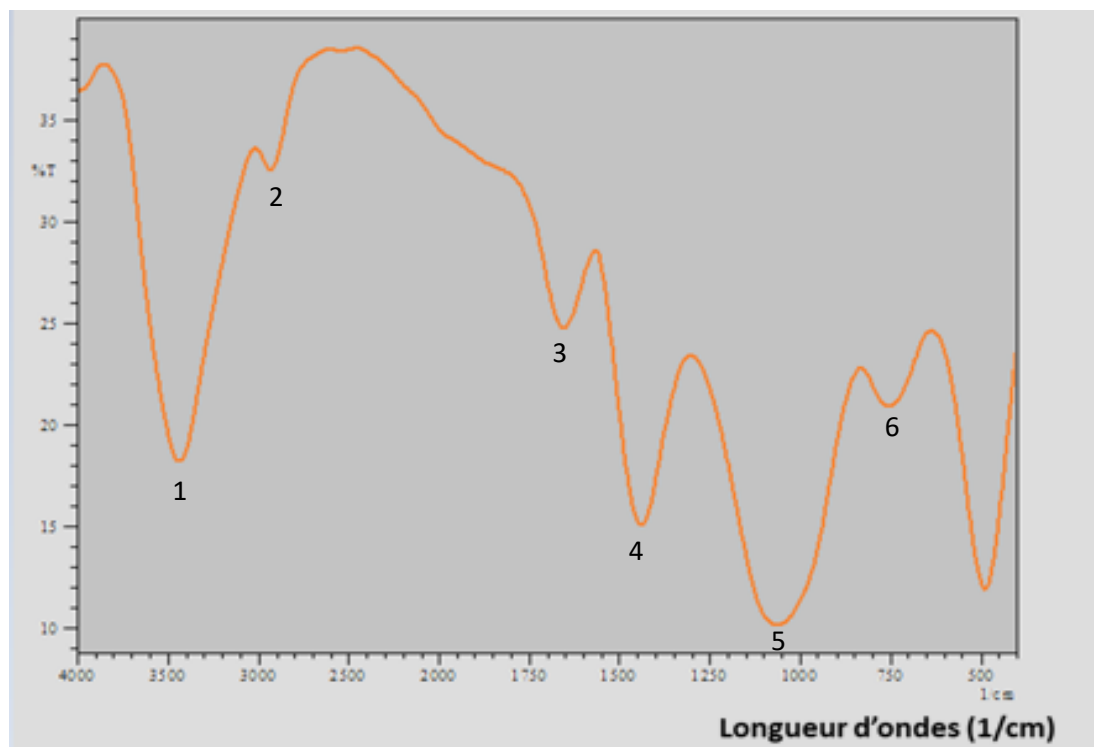


Figure III.17 : Spectre IR d'un mortier témoin (liège :0% ciment : 400g)

Tableau III.6 : Liaisons et provenance des pics du spectre IR (liège :0% ciment : 400g)

Pic	Liaison	Provenance
1	OH	Portlandite
2	H-O-H	Déformation de l'eau
3	Ca-O	Carbonate de calcium
4	Si-O-Si	Silicate
5	Si-O et Al-O	Silicates et Aluminates
6	Si-O et Al-O	Silicates et Aluminates

L'analyse infrarouge du mortier de ciment témoin montre les composants typiques du ciment Portland hydraté. La présence de portlandite, de silicates, d'aluminates et de carbonates indique des processus d'hydratation et de durcissement du ciment.

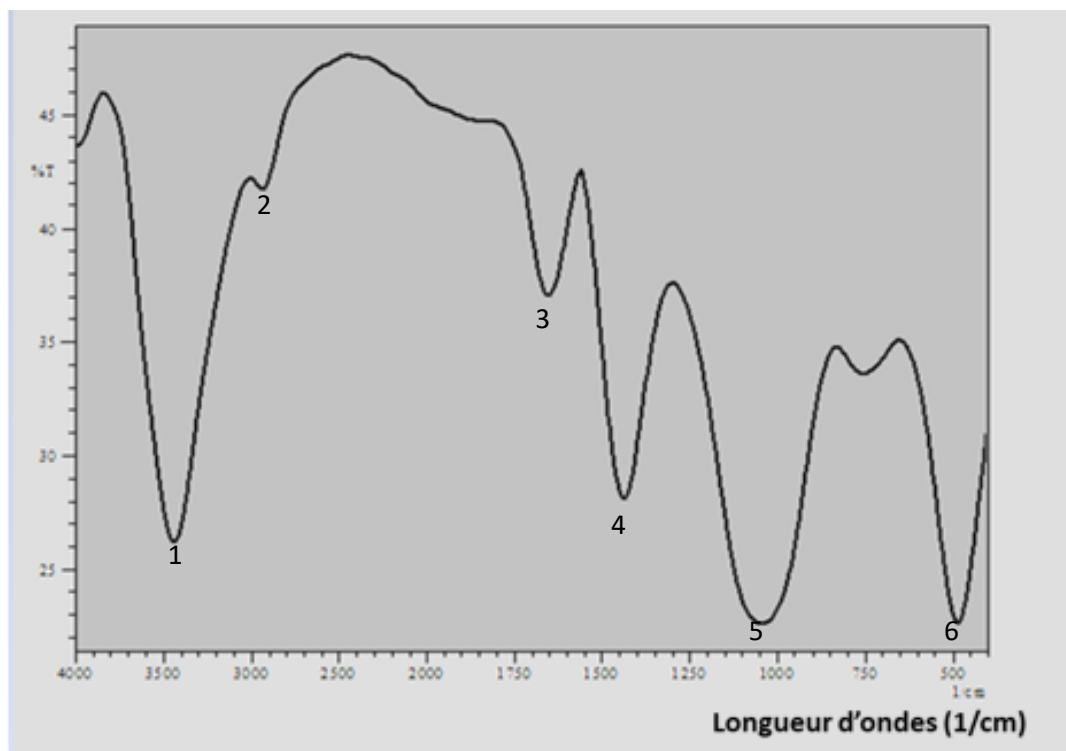


**Figure III.18** : Spectre IR du mortier (liège :2% ciment : 400g)

**Tableau III.7** : Liaisons et provenance des pics du spectre IR (liège :2% ciment : 400g)

Pic	Liaison	Provenance
1	OH	Cellulose, subérine
2	C-H	Subérine, lignine
3	H-O-H	Lignine, cellulose
4	CO et C-OH	Subérine, cellulose, polysaccharides
5	Si-O-Si	Silicate
6	Si-O et Al-O	Silicates et aluminates

L'analyse infrarouge d'un mortier de ciment contenant 2 % de liège montre les caractéristiques du liège et du ciment Portland. Les pics de liaisons OH, C-H, C-O et C-OH indiquent la présence de composants organiques dans le liège tels que la cellulose, la subérine et la lignine. Les pics de liaisons Si-O-Si et Si-O Al-O confirment la présence de phases silicatées et minérales aluminées dans le ciment. L'intégration du liège dans le mortier ajoute des signatures infrarouges organiques sans modifier considérablement les phases minérales du ciment.



**Figure III.19** : Spectre IR du mortier (liège : 1% ciment : 450g).

**Tableau III.8** : Liaisons et provenance des pics du spectre IR (liège : 1% ciment : 450g)

Pic	Liaison	Provenance
1	OH	Portlandite
2	C-H	
3	C=C et C=O	Structures aromatiques, amides.
4	C-H	Méthyle et méthylène
5	C-O et C-N	Éthers, esters, amines
6	C-H	Structures aromatiques

L'analyse infrarouge d'échantillons de mortier contenant 1 % de liège a révélé des liaisons et des groupes fonctionnels cohérents. La présence de groupes hydroxyles, de structures aromatiques, de méthyle et de méthylène, d'éthers, d'esters et d'amines a été observée. L'incorporation de liège dans le mortier de ciment ajoute des signatures organiques sans trop d'impact sur les composants minéraux. Les groupes fonctionnels provenant principalement de composants du liège tels que la cellulose, la subérine et la lignine sont détectables même à 1 % d'incorporation.



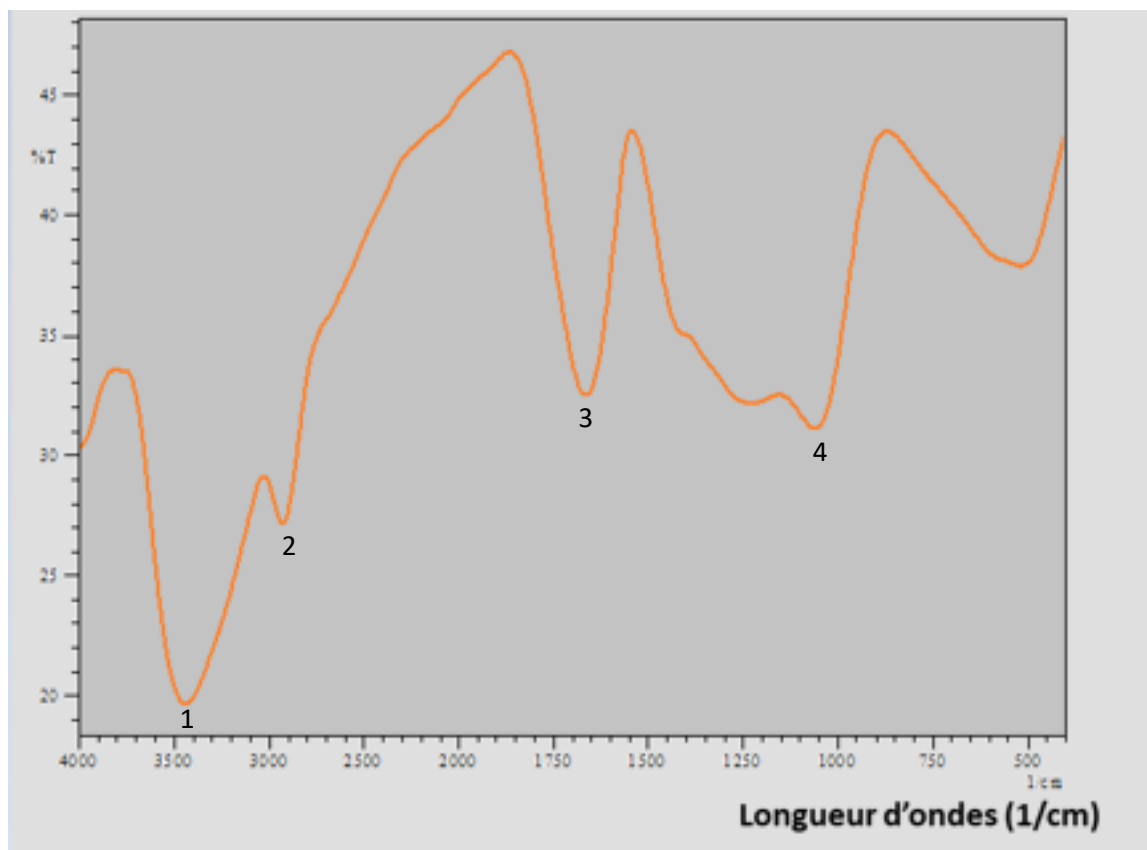


Figure III.20 : Spectre IR de liège.

Tableau III.9 : Liaisons et provenance des pics du spectre IR de liège

Pic	Liaison	Provenance
1	OH	Alcool, phénol
2	C-H	Méthyle, méthylène
3	C=C	Lignine
4	C=O	Alcools, éthers, acides, esters

L'analyse infrarouge de l'échantillon de liège révèle des signatures chimiques caractéristiques des principaux composants organiques du liège, à savoir la subérine et la lignine. Les pics correspondant aux liaisons O-H, C-H, C=C et C=O sont représentatifs des groupes fonctionnels présents dans ces biopolymères complexes. Les résultats indiquent une structure chimique diversifiée du liège avec des alcools, des phénols, des méthyles, du méthylène, des cycles aromatiques, des éthers, des acides et des esters.

**Conclusion :**

Les analyses des propriétés du ciment à l'état frais et des mortiers de liège à l'état durci, pour des pourcentages de liège de 0%, 1%, et 2%, révèlent des informations cruciales sur la performance globale de ces matériaux. À l'état frais, le ciment démontre une consistance et une maniabilité adéquate, et un temps de prise approprié, assurant ainsi une mise en œuvre efficace.

À l'état durci, les propriétés des mortiers de liège varient en fonction du pourcentage de liège ajouté. Pour le mortier sans liège (0%), les résultats montrent une faible porosité et absorption, une conductivité thermique élevée, et une haute résistance à la flexion et à la compression. L'analyse DRX, FRX et IRTF confirme une composition minéralogique typique de ciment portland lors de processus d'hydratation du ciment. Quant à l'analyse ATG, une perte de masse modérée est observée.

Pour les mortiers contenant 1% et 2% de liège, les résultats montrent une augmentation de la porosité et de l'absorption. La conductivité thermique est réduite, ce qui améliore les propriétés d'isolation thermique. Cependant, on observe une diminution progressive de la résistance mécanique avec l'augmentation du pourcentage de liège, limitant leur utilisation à des applications isolantes ou non porteuses. Les analyses DRX, FRX et IRTF confirment que liège n'a pas eu d'impact négatif sur l'hydratation du ciment, tandis que l'analyse ATG révèle une augmentation progressive des pertes de masse avec l'augmentation de la teneur en liège à des températures élevées.

Les résistances à la compression obtenues avec la méthode ultrasons, ont révélées les mêmes tendances que celles obtenues par écrasement (essai destructif).

La formulation optimale correspond à une quantité de ciment de 450g avec incorporation de 1% de liège ayant un diamètre de 2mm pour assurer un équilibre entre les propriétés mécaniques et thermiques.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif principal de cette recherche était de valoriser le liège, un sous-produit biodégradable d'origine naturelle dans le développement d'un mortier léger en améliorant ses performances thermiques sans compromettre ses propriétés mécaniques.

Des échantillons ont été confectionnés en variant les quantités de ciment et le taux de liège incorporé ainsi que son diamètre, ensuite ils ont été soumis à des essais pour évaluer leurs propriétés physico-mécaniques et thermiques.

Les recherches menées et les analyses détaillées des propriétés des mortiers intégrant des agrégats de liège ont permis de mettre en évidence plusieurs points clés. L'ajout de liège aux mortiers réduit leur densité, améliore les caractéristiques d'isolation thermique, et influence significativement la résistance mécanique. Cependant, l'ampleur de ces effets dépend fortement de la proportion de liège utilisée et de la taille des particules présentes dans le mélange.

Les analyses des propriétés des mortiers montrent que les mortiers sans liège présentent une faible porosité, une faible absorption, une conductivité thermique élevée et une haute résistance à la flexion et à la compression. En revanche, l'incorporation de 1% et 2% de liège entraîne une augmentation de la porosité et de l'absorption, une réduction de la conductivité thermique, mais également une diminution progressive de la résistance mécanique, ce qui limite l'utilisation de ces mortiers à des applications isolantes ou non porteuses.

Les analyses DRX, FRX et FTIR ont confirmé que l'ajout de liège n'entrave pas l'hydratation du ciment. Toutefois, l'analyse ATG a révélé une augmentation progressive des pertes de masse avec l'augmentation de la teneur en liège à des températures élevées. Quant à l'auscultation sonore, elle confirme les mêmes tendances que celles obtenues par écrasement.

En conclusion, cette recherche a permis de développer un mortier léger avec des performances optimisées en termes d'isolation thermique avec une formulation optimale qui correspond à un taux de liège de 1% et d'un diamètre de 2mm et une quantité de ciment de 450g. Ces résultats fournissent une base solide pour l'utilisation du liège comme matériau additif dans les mortiers, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus durables et écologiques.

## Références bibliographiques

- [1] : <https://www.unep.org> consulté le 14/03/2024 à 5:00h.
- [2]: **Bourbia, S., Kazeoui, H. & Belarbi, R.** A review on recent research on bio-based building materials and their applications. *Mater Renew Sustain Energy* **12**, 117–139 2023.
- [3] : [Home : GCCA \(gccassociation.org\)](http://Home : GCCA (gccassociation.org)) consulté le 21/03/2024 à 18 :00h.
- [4]: **C.M. Rangel, A.S. Guimarães, T.A.M. Salet, S.S. Lucas,**3D printing lightweight mortars with cork to improve thermal efficiency in buildings, *Construction and Building Materials*, Volume425,2024,136008.
- [5]: **Lakreb,N.,Şen,U.,Beddiar,A.et all.**Properties of eco-friendly mortars produced by partial cement replacement with waste cork particles:a feasibility study.*Biomass Conv.BioRef*13,pp. 2022,11997-12007.
- [6]: **Malchiodi,B.;Marchetti, R.; Barbieri, L.; Pozzi, P.** Recovery of manufacturing waste within mortar and polyurethane: a feasibility of use and physical, mechanical, thermal insulating properties of the final green composite construction materials.*App.sci.*2022,12,3844.
- [7] : **Nafissatou Savadogo.** « Elaboration et caractérisation d'un éco-ciment à base de poudre de mâchefer de charbon minéral », thèse de doctorat,. *Matériaux*. INSA de Rennes, 2017. Français. ffNNT : 2017ISAR0013.
- [8]: **Seidel, G., Huckauf, H., & Starck, J...** Technologie des ciments, chaux, plâtre : processus et installations de cuisson : Vol.230 pages (Septima, 1980).
- [9] : **Véronique Baroghel-Bouny.** Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. *Mécanique [physics.med-ph]*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- [10] : **Bouali Khaled,** « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires », thèse de doctorat, (2015), 108 pages.
- [11]: **Danuta Barnat-Hunek, Rafat Siddique, Grzegorz Łagód,** Properties of hydrophobized lightweight mortars with expanded cork, *Construction and Building Materials*, Volume 155, 2017, Pages 15-25.

[12]: **Van-Tien Phan**. Relationship between the adhesive properties and the rheological behavior of fresh mortars. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2012.

[13] : **Hemil Samir**, « Effet Combine des billes du polystyrène et les fibres plastiques sur les mortiers au ciment blanc », thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf-M'SILA (2018) PAGES 1-80.

[14] : **Nadia Benmensour**, « Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat » , thèse de doctorat, option : énergies renouvelables, Université Hadj Lakhdhar de Batna,2015.

[15] : **Bourguiba Amal**, « comportement rhéologique, ouvrabilité et durabilité des mortiers à base de résine époxyde » , thèse de doctorat, école doctorale Sciences et ingénierie (Cergy-Pontoise, Val d'Oise), 2016.

[16]: **A. Ramezani pour et J. Bahrami**, « Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes », Construction and Building Materials, n° 130, p. 470–479, 2012.

[17] : **Siyimane Mohaine**, « Etude des propriétés thermiques et mécaniques des bétons isolants structurels incorporant des céosphères », Génie civil, école centrale de Nantes, 2018.

[18]: **Thomas Poinot, Alexandre Govin, Philippe Grosseau**. Influence of hydroxypropylguars on rheological behavior of cement-based mortars. Cement and Concrete Research, 2014, 58, pp.161-168.

[19]: **Oliver Wilton, Matthew Barnett Howland**, Cork: an historical overview of its use in building construction, Construction History, 2020, Vol. 35, No. 1 (2020), pp. 1-22

[20] : [www.pixabay.com](http://www.pixabay.com) consulté le 10/03/2024 à 22:00h.

[21] : **Mebarki Moubarek**, « extraction, analyse des polysaccharides pariétaux de péricarpe du chêne liège (Quercus Suber) et du chêne vert (Quercus Ilex) essai de valorisation », Thèse de doctorat, département biotechnologie, option biotechnologie végétale, université Mohamed Boudhiafe (Oran),2019/2020.

[23]: [Quercus suber - EUFORGEN European forest genetic resources programme](#) consulté le 10.03.2024 à 10.00h.

[22]: **Kevin Crouvisier-Urien, Jean-Pierre Bellat, Régis D. Gougeon, Thomas Karbowiak**, mechanical properties of agglomerated cork stoppers for sparkling wines: Influence of adhesive and cork particle size, composite structures, Volume 203,2019.

[24]: [Industry Statistics | Cork Quality Council \(corkqc.com\)](#) consulté le 12.03.2024 à 13:30h

[25] : **Marco Delucia**. Développement de modèles multi-échelle et multi-physiques pour la conception de composites à base de liège. Génie des procédés. HESAM Université, 2022.

[26]: **Faustino, A., Pires, R.C. & Marum, L.** Periderm differentiation: a cellular and molecular approach to cork oak. *Trees* 37, 627–639 (2023)

[27]: **Lisete Garrido Moutinho, Eduardo Soares, Martinho Oliveira**, development of bio-based expanded cork polymer composites (eCPC) with poly (lactic acid) (PLA), *Materials Science and Engineering: B*, Volume 298,2023.

[28]: **Lopes H, Silva SP, Machado J.** A simulation strategy to determine the mechanical behaviour of cork-rubber composite pads for vibration isolation. *Eksplatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*,2022.

[29]: **Sheikhi, M.R.; Gürgen, S.; Altuntas, O.** Energy-Absorbing and Eco-Friendly Perspectives for Cork and WKSF Based Composites under Drop-Weight Impact Machine. *Machines* 2022, 10, 1050.

[30]: **Sergi, C.; Sarasini, F.; Tirillò, J.** The Compressive Behavior and Crashworthiness of Cork: A Review. *Polymers* 2022, 14, 134.

[31]: **Dewertzi M. et al.** Developed a Carbon footprint simulation model for the cork oak sector. *Science of the Total Environment* 2016, 566-567, pp. 499-511.

[32]: **Wachs, I. E., & Bañares, M. A.** *Spring Handbook of Advanced catalyst characterization*,2019.



**[33] : Valérie V. Thirion-Merle.** Spectrométrie de fluorescence X. Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes, Editions des archives contemporaines, 2014, Collection Sciences Archéologiques, 9782813001634.

## Références normatives

**NF EN 197-1** : Norme Française « Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », AFNOR EDITIONS, avril 2012.

**NF EN 196-2** : Norme Française « Méthodes d'essais des ciments - Partie 2 : analyse chimique des ciments » AFNOR EDITIONS, septembre 2013.

**NF EN 196-1** : Norme Française « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances » AFNOR EDITIONS, septembre 2016.

**NF EN 1097-6** : Norme Française « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau » AFNOR EDITIONS février 2022.

**NF EN 1097-3** : Norme Française « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire », AFNOR EDITIONS, aout 1998.

**NF EN 196-3** : Norme Française « Méthodes d'essai des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité », AFNOR EDITIONS, septembre 2017.

**NF P94-064** : Norme Française « Sols : reconnaissance et essais - Masse volumique sèche d'un élément de roche - Méthode par pesée hydrostatique » AFNOR EDITIONS, novembre 1993.

**NF EN 12664** : Norme Française « Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique », AFNOR EDITIONS, juillet 2001.

**NF EN 12504-4** : Norme Française « Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation des ultrasons », juillet 2021.

**NF EN 15305** : Norme Française « essais non-destructifs-Méthodes d'essais pour l'analyse des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X », AFNOR EDITIONS, avril 2009.

**ISO 13196** : Norme Française « qualité de sol-analyse rapide d'une sélection d'éléments dans les sols à l'aide d'un spectromètre de fluorescence X a dispersion d'énergie portable ou portative », AFNOR EDITIONS, mars 2013.

**NF EN ISO 11358-1** : Norme Française « plastiques-thermogravimétrie (TG) des polymères-  
Partie 1 : principes généraux, Afnor éditions, avril 2022.

**NF XP X43-243** : Norme Française « Air des lieux de travail - Dosage par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier de la silice cristalline - Echantillonnage par dispositif à coupelle tournante ou sur membrane filtrante », AFNOR EDITIONS, décembre 2022.

# **Annexes**

## Annexe A



**المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر**  
**GRUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE**

**SOCIETE DES CIMENTS D'AIN EL KEBIRA**  
**« S.C.A.E.K »**

S.P.A au Capital Social de : 2 200 000 000,00 DA

N° Identification Fiscale : 088 1920236315 / N° Article d'Imposition : 1932.20.30.031 / N° Registre de Commerce : 88 B 002353

Ref: 0235 /DQ/DDDS/SCAEK/2021

Ain El Kebira le : 03/08/2021

**FICHE TECHNIQUE CIMENT « ligne 2 »**

**MOIS : Juin 2021**

### CEM II/A - L 42.5 R

Conformément à la norme NA 442 édition 2013- NF EN 157-1 (2012)

COMPOSITIONS CHIMIQUES Norme (EN 156-2)			Essais physiques Normés (NF EN 196-3 (2017) et 196-6 (2018))		Garantie NA 442 (2013)	Mesures
ELEMENTS		Mesures	P.S	(g / Cm <sup>3</sup> )	/	3.12
SiO <sub>2</sub> -T	%	21.15	SSB	cm <sup>3</sup> /g	/	4066
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4.80	Début De Prise	minute	≥ 60	201
Fer <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4.16	Fin De Prise	minute	/	322
CaO-T	%	62.36	Expansion A. Chaud	Millimètre	≤ 10	0.27
MgO	%	1.21	Refus 45 µ	%	/	2.8
SO <sub>3</sub>	≤ 4 %	2.15	Consistance Normale	%	/	28.7
K <sub>2</sub> O	%	0.33	Type d'ajout	Calcaire (L) %	06 ≤ L ≤ 20	7.0
Na <sub>2</sub> O	%	0.13	<b>S.C.A.E.K</b>			
Cl	≤ 0,1%	0.02	<b>S.C.A.E.K</b>			
P.A.F.	%	3.69	<b>S.C.A.E.K</b>			
CaO Libre (PT207 CERIEH 1978)	%	≤ 1.06	<b>S.C.A.E.K</b>			
R. Insoluble	%	2.12	<b>S.C.A.E.K</b>			
COMPOSITION POTENTIELLE DU CLINKER (BOGUT)			CARACTERISTIQUES MECANIQUE Norme (NF EN 156-1 : 2016)			
C <sub>2</sub> S	%	<b>55.46</b>	R. Flexion MPa	02 JOURS	/	5.1
C <sub>1</sub> S	%	<b>18.85</b>		28 JOURS	/	8.8
C <sub>3</sub> A	%	<b>8.56</b>	R. Compression MPa	02 JOURS	L1 ≥ 20.0	22.6
C <sub>4</sub> AF	%	<b>12.43</b>		28 JOURS	L1 ≥ 42.5	58.7

Le chef de service contrôle de qualité

K. BELAÏE  
 Chef de Service  
 Contrôle Qualité

*CBF*



SIEGE SOCIAL : Ouled Aduane, BP 81 - Ain El Kebira (W.560) Algérie  
 Direction Générale : Tel : (036) 82.83.39 / (036) 82.83.41 - Fax : (036) 82.83.46  
 Usine : Tel : (026) 68.83.80 / (036) 68.82.82 / (036) 68.83.83 - Fax : (036) 68.81.81  
 Site Web : [www.scaek.dz](http://www.scaek.dz)

Date : 22/05/2024 10:53:44

Technicien : amel

**Description essai**

Profil : **Profile 1**  
 ID Essai : **test**  
 Client : **amel**  
 Type de ciment : **CM II 42.5**  
 Teneur en eau [%]: **25.0**  
 Température [°C] **20.0**  
 Humidité [%] **80.0**

**N. [mm] [hh:mm:ss]**

01	37.2	01:39:13
02	34.9	01:54:13
03	9.0	02:09:14
04	6.8	02:24:13
05	2.3	02:39:13
06	1.6	02:54:13
07	1.1	03:09:13
08	1.8	03:24:13
09	4.1	03:39:13
10	0.2	03:54:13
11	0.4	04:09:14
12	0.4	04:24:13
13	1.0	04:39:13
14	0.2	04:54:13
15	0.3	05:09:13
16	0.4	05:24:13
17	0.1	05:39:13
18	0.0	05:54:13
19	0.3	06:09:13
20	0.6	06:24:13
21	0.3	06:39:13
22	0.0	06:54:13
23	0.0	07:09:13

**Paramètres essai**

Norme : **EN 196-3**  
 T. Initial [hh:mm] **10:50**  
 Délai [min] **90**  
 Nombre de chutes **23**  
 Mode de chutes **Libre**  
 Fréquence chutes : **Automatique**

Temps de maintien: **No**  
 Fin essai automatique : **Oui**  
 Départ différé[sec] : **1.0**  
 Nombre de chutes **0.0**  
 Différence [mm] : **0.0**  
 Logique :  
 Seuil : **0.0**

**Resultats**

Li [mm] : **0.0** Ti [hh:mm:ss] : \_\_:\_\_:\_\_  
 Lf [mm] : **0.0** Tf [hh:mm:ss] : \_\_:\_\_:\_\_

**Le Technicien**

**La Direction**



Description essai

Profil : Profile 1  
 ID Essai : test  
 Client : amel  
 Type de ciment : CM II 42.5  
 Teneur en eau [%]: 25.0  
 Température [°C] 20.0  
 Humidité [%] 80.0

Paramètres essai

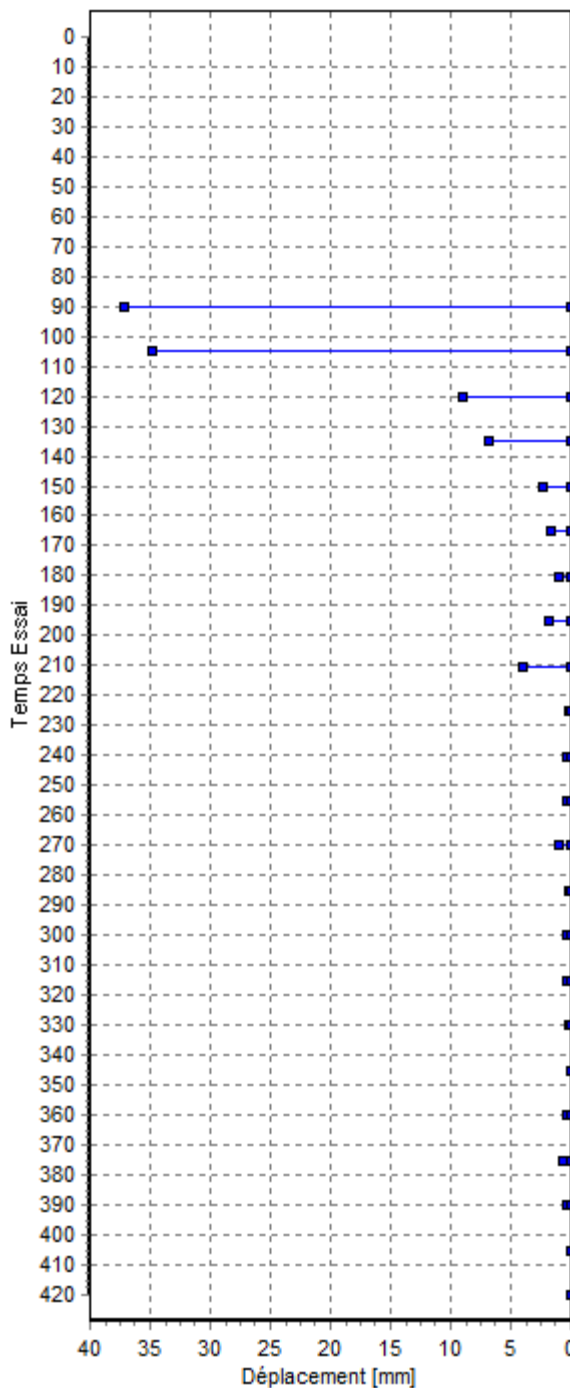
Norme : EN 196-3  
 T. Initial [hh:mm] 10:50  
 Délai [min] 90  
 Nombre de chutes 23  
 Mode de chutes Libre  
 Fréquence chutes : Automatique

Temps de maintien: No  
 Fin essai automatique : Oui  
 Départ différé[sec] : 1.0  
 Nombre de chutes 0.0  
 Différence [mm] : 0.0  
 Logique :  
 Seuil : 0.0

Resultats

Li [mm] : 0.0      Ti [hh:mm:ss] : \_\_:\_\_:\_\_  
 Lf [mm] : 0.0      Tf [hh:mm:ss] : \_\_:\_\_:\_\_

N. [mm] [hh:mm:ss]



Le Technicien

La Direction

## Abstract

This study examines the impacts of integrating cork at different proportions (0%, 1%, and 2%) into mortar blends to analyze its influence on the mechanical and physical characteristics of the resultant composite material. Cork, acknowledged for its sustainability and lightweight nature, is being evaluated for its capacity to augment the efficiency and eco-friendliness of construction materials. The experimental procedure encompassed the creation of mortar specimens with substituting normal sand with cork at 1% and 2% in terms of volume. These specimens underwent a series of evaluations to determine their workability, density, compressive strength, flexural strength, thermal conductivity, and water absorption characteristics. The principal aim was to identify the optimal cork volume that strikes a balance between mechanical efficacy, enhanced thermal insulation, and reduced mass. The findings reveal that the inclusion of cork substantially influences the physical and mechanical attributes of the mortars. With higher cork content, a noticeable decrease in density and thermal conductivity was observed, leading to improved insulation qualities. Nonetheless, this was accompanied by a decline in compressive and flexural strength. The mortar containing 1% cork displayed a harmonized performance, providing a reasonable trade-off between strength and thermal effectiveness.

**Keywords:** Lightweight mortar, cork, thermal conductivity, mechanical properties, physical properties.

## Resumé

Cette recherche étudie les effets de l'incorporation de liège à différents pourcentages (0 %, 1 % et 2 %) dans des mélanges de mortiers afin d'évaluer son impact sur les propriétés mécaniques et physiques du matériau composite obtenu. Le liège, reconnu pour ses caractéristiques durables et légères, est évalué pour son potentiel à améliorer l'efficacité et le respect de l'environnement des matériaux de construction. Le processus expérimental a impliqué la mise au point d'échantillons de mortier en remplaçant le sable ordinaire par du liège à des taux de 1 % et 2 %. Ces échantillons ont été soumis à une série de tests pour évaluer leur densité, leur résistance à la compression, leur résistance à la flexion, leur conductivité thermique et leurs propriétés d'absorption d'eau. L'objectif principal était de déterminer le volume de liège optimal permettant d'atteindre un équilibre entre les performances mécaniques, une meilleure isolation thermique et un poids réduit. Les résultats indiquent que l'inclusion de liège a un impact significatif sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers. L'augmentation de la quantité de liège a entraîné une réduction notable de la densité et de la conductivité thermique, améliorant ainsi les propriétés d'isolation. Cependant, cela s'est accompagné d'une légère diminution de la résistance à la compression et à la flexion. Le mortier contenant 1 % de liège a démontré une performance équilibrée, offrant un compromis raisonnable entre résistance et efficacité thermique.

**Mots clés :** Mortier allégé, liège, conductivité thermique, propriétés mécaniques, propriétés physiques.