

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de génie civil

Laboratoire de Géo matériaux et génie civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Construction

PERFORMANCES MÉCANIQUES ET THERMIQUES DES MATÉRIAUX COMPOSITES À BASE DE DÉCHETS DE LIÈGE EXPANSÉ

Par

Salem MERABTI

Devant le jury composé de :

K. GRINE.	Prof. U .Saad Dahleb-Blida1	Président
B. MENADI	Prof. U .Saad Dahleb-Blida1	Examineur
A. HEBBOUCHE	MCA. ENSH, Blida	Examineur
A. HADJ SADOK	MCA. ENSH, Blida	Examineur
S. KENAI	Prof U.Saad Dahleb-Blida1	Rapporteur
R. BELARBI	Prof U.Rochelle, France	Co-Rapporteur

La soutenance aura lieu le :
Mercredi 15/09/2021 à 9h00 à la salle de conférence de la faculté de la
technologie (Pavillon 6)

Le public est cordialement invité

Blida 1, juillet 2021

الملخص

يقلل استخدام نفايات الفلين الممددة في الاسمنت بشكل كبير من تأثيرها على البيئة. ومع ذلك، أثناء إضافة هذه المنتجات الثانوية، تؤدي عيوب التوافق مع مصفوفة الإسمنت إلى تأخير في زمن الاخذ. اتضح أن هذه المواد لها سلبيات كبيرة في التغيرات الحجمية والتي تسبب تشققات وبالتالي تقلل من متانتها. في هذه الأطروحة تم دراسة تأثير إضافة أحجام من الفلين و خبث الفرن العالي أو الرمل على الخواص الفيزيائية والحرارية الميكانيكية.

لهذا الغرض، تم تحضير ثلاث نسب بالحجم للإسمنت/ الفلين (ا/ ف): 1/1 و 2/1 و 3/1. العينات المستعملة في تجارب الانضغاط وقوة الانحناء تم الاحتفاظ بها في ثلاث بيئات معالجة مختلفة وتم الاحتفاظ بعينات الاختبارات الحرارية في بيئة رطبة وفي هواء المخبر. تمت دراسة تأثيرات استبدال الاسمنت بخبث بالوزن بنسبة 15% و 30% و 50% أو رمل الوادي 10% و 20% و 30% على المقاومة الميكانيكية والانكماش. كما تم تقييم الخصائص الحرارية لجميع التركيبات بما في ذلك التركيبات (ا/ف:3/1) التي تم الحصول عليها باستبدال رمل الوادي أو الكثبان الرملية بنسبة 30% بوزن الإسمنت.

أظهرت المركبات التي تمت دراستها في هذا العمل تأثيرات إيجابية للسلوك الميكانيكي في بيئة معالجة رطبة لمدة 14 يوماً ثم في هواء المختبر ولكن تسمح أيضاً بالحصول على كثافة ظاهرية متوسط. تحسنت الناقلية الحرارية لجميع التركيبات عن طريق المعالجة في هواء المختبر أو عن طريق زيادة حجم الفلين. تُظهر التركيبات التي تم الحصول عليها بإضافة الخبث تحسينات كبيرة في قوتها الميكانيكية ، على وجه الخصوص معدل استبدال 30% وانخفاض في التوصيل الحراري والانكماش. علاوة على ذلك، أظهرت النتائج أنه مع إدراج رمل الوادي يؤدي إلى انخفاض المقاومة الميكانيكية، خاصة عندما يتم تخزين المواد المركبة في هواء المختبر، ولكن هذا الأخير يميل إلى تحسين ظاهرة الانكماش لمعدل 30%. لوحظ تحسين الناقلية الحراري مع إضافة الرمل الناعم كبديل للإسمنت مقارنة مع رمل الوادي.

الكلمات المفتاحية : الفلين الممدد، خبث الفرن العالي ، الرمل ، الإسمنت، الخصائص الفيزيائية ، المقاومة ، الانكماش، الخصائص الحرارية.

Résumé

L'emploi des déchets de granulats de liège expansé dans les ciments permet de réduire de façon conséquente leur impact sur l'environnement. Toutefois, lors de l'introduction de ces sous-produits, des inconvénients de compatibilité avec la matrice cimentaire, conduisent à un retard de prise. Il se trouve également que ces matériaux possèdent des variations dimensionnelles importantes qui provoquent des fissures qui influent sur la réduction de leur durabilité. Dans cette thèse, les effets de l'addition de volumes de liège, de laitier de haut fourneau ou de sable sur les propriétés physiques et thermomécaniques ont été étudiés.

À cet effet, trois rapports en volume Ciment/Liège (C/L) ont été expérimentés : 1/1, 1/2 et 1/3. Les éprouvettes destinées aux essais de résistance à la compression et la flexion des composites ont été conservés dans trois environnements de cure différents et celles pour les essais thermiques ont été conservés dans un environnement humide ou à l'air de laboratoire. Les effets de substitution du ciment en poids par les laitiers à 15%, 30% et 50% ou par le sable de rivière à 10%, 20% et 30% sur la résistance mécanique et le retrait ont été étudiés. Les caractéristiques thermiques ont également été évaluées pour toutes les compositions y compris les formulations (C/L: 1/3) obtenues par le remplacement de sable de rivière ou de dune à 30% en poids de ciment.

Les composites étudiés dans ce travail ont montré les effets positifs des comportements mécaniques dans un environnement de cure humide pendant 14 jours suivi de cure à l'air de laboratoire mais ont permis également d'obtenir des masses volumiques apparentes moyennes. Tous les composites ont apporté une amélioration de la conductivité thermique par la cure à l'air de laboratoire ou par l'augmentation du volume de liège. Les compositions obtenues avec l'ajout de laitier présentent des améliorations significatives de leurs résistances mécaniques, en particulier, pour 30% de substitution et une diminution de la conductivité thermique et du retrait. De plus, les résultats montrent que l'inclusion du sable de rivière conduit à une diminution de la résistance mécanique surtout lorsque les composites ont été conservés à l'air de laboratoire, mais ce dernier a tendance à améliorer potentiellement le phénomène du retrait pour le taux de 30%. Cependant, on observe une amélioration de la conductivité thermique avec l'ajout de sable fin, en tant que substitution de ciment, par rapport au sable de rivière.

Mots-clés : liège expansé, laitier de haut fourneau, sable, ciment, propriétés physiques, résistance, retrait, propriétés thermiques.

Abstract

The use of expanded waste granular lack of cork in cement significantly reduces their impact on the environment. However, during the addition of these by-products, due to the lack compatibility with a cementitious matrix, a delay in the setting is observed. These materials also present significant dimensional variations causing cracks and therefore reducing their durability. In this thesis, we investigated the effects of the addition of cork, blast furnace slag or sand on the physical and thermo-mechanical properties of cement composites.

For this purpose, we tested three Cement/Cork (C/L) volume ratios: 1/1, 1/2 and 1/3. Specimens for the compressive and flexural strength tests of the composites were kept in three different curing environments whereas those of the thermal tests were kept in a humid environment or the laboratory air. We also studied the effect of replacing cement by weight with 15%, 30% and 50% of slag or 10%, 20% and 30% of river sand on mechanical strength and shrinkage. Besides, we evaluated the thermal characteristics for all the compositions including the formulations (C/L: 1/3) obtained by replacing river sand or dune at 30% by weight of cement.

The composites studied in this work showed positive effects of mechanical behaviour in a humid curing environment for 14 days and followed by storage in the air in the laboratory but also allows obtaining a moderate bulk density. All composites improved thermal conductivity by curing in the air of laboratory or by increasing the volume of cork. The compositions obtained with the addition of slag show significant improvements in their mechanical strength, in particular, for 30% substitution and a decrease in thermal conductivity and shrinkage. Moreover, the results show that with the inclusion of river sand leads to a decrease in the mechanical strength especially when the composites are kept in the air of the laboratory but the latter tends to potentially improve the phenomenon of shrinkage for the rate of 30%. Though, the thermal conductivity is improved noticeably with the addition of fine sand as a substitute for cement compared to river sand.

Keywords: expanded cork, blast furnace slag, sand, cement, physical properties, strength, shrinkage, thermal properties.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse Professeur Said Kenai pour son aide, son soutien et pour la grande confiance qu'il m'a accordée. Il m'a dirigé tout au long de ces années et m'a formé à la recherche. Sa disponibilité, sa compétence et son optimisme ont permis le déroulement de la recherche et son achèvement dans les meilleures conditions. Sans son aide, ce document n'aurait pas vu le jour. Un grand merci au Professeur Rafik Belarbi, Enseignant-Chercheur à l'Université de La Rochelle (France), pour son collaboration scientifique précieuse.

Je tiens également à remercier Professeurs Grine Khaled, Menadi belkacem, Hadj sadok Ahmed et Monsieur Hebbouche Abdelhamid directeur de l'École nationale supérieure d'hydraulique (ENSH) de Blida d'avoir accepté de faire partie du jury de thèse.

Mes plus vifs remerciements vont à Méziane, technicien du laboratoire au CNERIB pour ses précieux conseils dans le domaine de la thermique ainsi que pour sa grande disponibilité. Il m'a offert l'opportunité d'effectuer mes essais dans son service.

Je voudrais adresser mes remerciements sincères à Dr Afra Hamid ex-directeur du CNERIB qui m'a facilité l'accès au laboratoire et l'utilisation des équipements disponibles.

Je voudrais également remercier les collègues, amis et les enseignants du département de Génie Civil et de génie mécanique de l'Université Khemis Miliana.

Durant ces années, ma famille a été d'une importance capitale ; grâce à leur soutien, leur compréhension et leur affection, ils m'ont aidé à avancer. Mes parents ont toujours derrière moi et je pense que ce travail leur doit énormément. Ce travail est dédié à ma défunte sœur que Dieu l'accueille en son vaste paradis.

Enfin, ma dernière pensée est pour ma femme. Merci infiniment pour ce que tu es, pour ton aide, ton soutien et pour tout le bonheur que tu m'apportes depuis que nous sommes mariés, sans oublier mes deux enfants Dayana et Daris.

TABLE DES MATIERES

ملخص	1
Résumé	2
Abstract	3
Remerciements	4
Table des matières	5
Liste des tableaux	9
Liste des figures	10
Liste des illustrations et des abréviations	13
Introduction générale	15
CHAPITRE 1 : DÉCHETS INDUSTRIELS ET AGRICOLES	18
1.1 Introduction	18
1.2 La notion du déchet	18
1.3 Les déchets industriels	18
1.4 Les type de déchets	19
1.4.1 Déchets ménagers et assimilés (DMA)	19
1.4.2 Déchets encombrants	20
1.4.3 Déchets spéciaux	20
1.4.4 Déchets des activités de soins	21
1.4.5 Déchets inertes	21
1.5 Les déchets industriels en Algérie	22
1.6 Valorisation des déchets industriels dans la fabrication des ciments	23
1.6.1 Le laitier de haut fourneau	24
1.6.2 La fumée de silice	26
1.6.3 Les cendres volantes	27
1.7 Les déchets agricoles	28
1.8 Le bois	29
1.8.1 La composition cellulaire du bois	30
1.8.2 Les compositions chimiques du bois	31
1.8.3 La masse volumique du bois	32
1.8.4 Absorption d'eau et variations dimensionnelles du bois	33
1.8.5 La conductivité thermique du bois	35
1.8.6 Propriétés mécaniques du bois	35

1.8.7 La structure microscopique du bois	36
1.9 Les déchets agricoles en Algérie	37
1.10 Contexte réglementaire concernant les déchets en Algérie	46
1.11 Conclusion	46
CHAPITRE 2 : COMPOSITES A BASE DE MATÉRIAUX VÉGÉTAUX	47
2.1. Introduction	47
2.2 Contexte: pourquoi, comment ?	47
2.3 Compatibilité des composites cimentaire à base de matériaux végétaux	48
2.4 Propriétés mécaniques des composites à base de matériaux d'origine végétale	52
2.5 Comportement des composites vis-à-vis de l'eau et des variations dimensionnelles	57
2.6 Propriétés thermiques des composites à base de matériaux d'origine végétale	59
2.7 Comportement acoustique des composites à base de matériaux d'origine végétale	63
2.8 Conclusion	65
CHAPITRE 3 : LES BETONS LEGERS	66
3.1 Introduction	66
3.2 Définition des bétons légers	66
3.3 Les origines des granulats du béton léger	67
3.4 Propriétés physiques des bétons légers	68
3.4.1 Porosités	68
3.4.2. La masse volumique apparente	70
3.4.3 Retrait et fluage	70
3.4.4 Perméabilité et absorption	70
3.5 Performances mécaniques	73
3.6 Interactions des granulats avec la matrice cimentaire	77
3.7 La durabilité des bétons légers	77
3.8 Les propriétés thermiques des bétons légers	78
3.9. Les propriétés acoustiques des bétons légers	81
3.10. Les avantages et les inconvénients des bétons légers	82
3.11 Conclusion	82
CHAPITRE 4 : MATERIAUX ET ESSAIS	83
4.1. Introduction	83
4.2 Matériaux utilisés	83
4.2.1 Le ciment	83
4.2.2 Le liège expansé	84

4.2.3. Le laitier de haut fourneau	84
4.2.4 Les sables	85
4.2.5 L'eau de gâchage	85
4.3 Caractérisation des matériaux	85
4.3.1 Granulats du liège expansé	85
4.3.2 Les sables	90
4.4 Etudes préliminaires	93
4.5 Préparation et conservation des éprouvettes	93
4.6 Essais de caractérisation des composites	94
4.6.1 Essais des propriétés physiques	94
4.6.2 Essais des propriétés mécaniques	96
4.6.3 Essais des propriétés thermiques	98
4.6.4 Essais des variations dimensionnelles	100
4.7 Variables étudiées	102
4.8. Conclusion	103
CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSIONS	104
5.1 Introduction	104
5.2. Essais préliminaires	104
5.3 Caractéristiques physiques	106
5.3.1 Essai d'absorption d'eau par capillarité	106
5.3.2. Essai d'absorption par immersion	108
5.2.3. Masse volumique apparente	110
5.4 Caractéristiques mécaniques	119
5.4.1 Effet de conservation et d'addition de liège	119
5.4.2 Effet de l'addition de sable	124
5.4.3 Effet de l'addition de laitier	127
5.4.3 Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en flexion	129
5.5 Variations dimensionnelles des composites	133
5.5.1 Effet de l'addition de liège	133
5.5.2 Effet de l'addition de sable	136
5.5.3 Effet de l'addition de laitier	137
5.6. Performances thermiques	140
5.6.1. Effet de conservation et d'addition de liège	140
5.6.2. Effet de l'addition du sable	144

5.6.3. Effet de l'addition du laitier	146
5.6.4 Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente	149
5.7 Conclusion	152
Conclusion générale	154
Recommandations et perspectives	159
Références bibliographiques	154
Annexe A	182
Annexe B	183

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Composition chimique de différents granulats lignocellulosiques	32
Tableau 1.2 : Les propriétés physiques des fibres et des granulats de bois	34
Tableau 1.3 : Paramètres thermiques de quelques essences de bois	35
Tableau 1.4 : Propriétés mécanique des bois	36
Tableau 1.5 : Pourcentage massique des différents constituants de la cellule du liège vierge et du liège « amadia ».	42
Tableau 2.1 : Caractéristiques acoustiques de quelques matériaux	65
Tableau 3.1 : Equations de prédictives du module d'élasticité E du béton cellulaire	75
Tableau 3.2 : Caractéristiques mécaniques de quelques bétons légers	76
Tableau 3.3 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux	80
Tableau 4.1 : Composition chimique du ciment	83
Tableau 4.2 : Caractéristique physico-mécanique	84
Tableau 4.3 : Composition chimique du laitier granulé d'EL Hadjar	85
Tableau 4.4 : Les propriétés physiques des granulats de liège expansé	90
Tableau 4.5: Caractéristiques physiques des granulats utilisés	92
Tableau 5.1 : Composition chimique du ciment	106
Tableau 5.2 : Le taux d'absorption d'eau après 24h d'immersion	109
Tableau 5.3 : Corrélation entre le retrait et le gonflement en fonction de la masse volumique apparente	136
Tableau.5.4 : Conductivité thermique des composites	142
Tableau.5.5 : Caractéristiques thermiques de composites à l'état saturé	143
Tableau.5.6 : Caractéristiques thermiques de composites à l'air de laboratoire	143
Tableau 5.7 : Conductivité thermique des composites	145
Tableau.5.8 : Caractéristiques thermiques de composites à l'état saturé	146
Tableau 5.9 : Caractéristiques thermiques de composites à l'air de laboratoire	146
Tableau 5.10: Conductivité thermique des composites contenant du laitier	147
Tableau 5.11 : Caractéristiques thermiques de composites au laitier à l'état saturé.	148
Tableau 5.12 : Caractéristiques thermiques de composites au laitier à l'air de laboratoire.	148

LISTE DES FIGURES

Figure.1.1 :	Temps de prise des ciments avec ajout du laitier	25
Figure 1.2 :	Coupe transversale dans un tronc d'arbre	29
Figure 1.3 :	Directions principales d'une pièce de bois (R : radiale; T : tangentielle; L : longitudinale)	30
Figure 1.4.	Représentation schématique de la paroi cellulaire	31
Figure 1.5 :	Microstructure du bois : (a) structure cellulaire, (b) ponctuations	37
Figure 1.6 :	Coupe transversale d'une tige de Chêne-liège	38
Figure 1.7 :	Les différents types du liège : a) Liège mâle, b) Liège femelle	38
Figure 1.8 :	Morphologie du liège obtenue par microscope électronique à balayage montrant en détail la direction non radiale (NR) et direction radiale (R)	39
Figure 1.9 :	Représentation schématique des cellules du liège avec l'agencement de ses constituants chimiques. (a) section radiale, (b) sections axiale ou tangentielle	40
Figure 1.10:	La structure chimique de deux des principaux produits chimiques du liège : (A) subérine et (B) de la lignine	41
Figure 1.11 :	Distribution mondiale du Chêne-liège	44
Figure 1.12 :	Les déchets du liège: (a) Jijel (liège cru), (b) Bejaïa (granulés expansés)	45
Figure 2.1 :	Micrographe optique du béton en bois de sable. (a) Béton avec RS ($B= 20 \text{ kg/m}^3$) et (b) béton avec le DS ($B=20 \text{ kg/m}^3$)	50
Figure 2.2 :	Variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la teneur volumique en eau	54
Figure 2.3 :	Variation de la résistance à la compression en fonction de la conductivité thermique apparente	55
Figure 2.4 :	Coefficient d'absorption acoustique α par octave de quelques matériaux	63
Figure. 2.5 :	Le coefficient absorption du matériau composite gypse-liège (épaisseur 1.5cm)	64
Figure. 2.6.	Le coefficient absorption du matériau composite gypse-liège (épaisseur 7.5 cm)	64
Figure 3.1 :	Représentation schématique des différents types de béton léger	66
Figure 3.2 :	Variation d'absorption d'eau en fonction du temps du béton mousse ciment-sable	72
Figure 3.3 :	Variation d'absorption d'eau en fonction du temps du béton mousse ciment-sable-cendres volantes	72
Figure 3.4 :	Influence de niveau de recharge de cendres volantes sur l'absorption d'eau	73
Figure 3.5 :	Relation entre contrainte –déformation des granulats légers soumis à l'effort uniaxial, d'après Zhang et Gjorv	74
Figure 3.6 :	Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire	80
Figure 4.1:	Liège expansé : (a) panneaux d'agglomérés de liège expansé, (b) granulés de liège expansé	84
Figure 4.2 :	Dispositif de mesure de la masse volumique	86
Figure 4.3 :	Dessiccateur en verre utilisé dans l'expérimentation	87
Figure 4.4 :	Analyse granulométrique de déchets du liège	89
Figure 4.5 :	Analyse granulométrique du sable de rivière et de dune	91
Figure 4.6 :	Essai granulométrique : Tamiseuse électrique	91
Figure 4.7:	Essai de l'équivalent de sable	92

Figure 4.8: Dispositif expérimental de l'essai de capillarité	95
Figure 4.9 : Essai de résistance à la flexion	97
Figure 4.10 : Essai de résistance à la compression.	98
Figure 4.11 : Essai de conductivité thermique et de la chaleur spécifique par CT-Mètre	99
Figure 4.12 : Comparateur utilisé pour la mesure des variations Dimensionnelles.	101
Figure 4.13 : Variables des essais mécaniques	102
Figure 4.14 : Variations dimensionnelles des composites	102
Figure 4.15 : Variables des essais thermiques	103
Figure 5.1 : Absorption de l'eau par capillarité en fonction du temps.	107
Figure 5.2: Absorption d'eau après par immersion en fonction des composites.	110
Figure 5.3: Evolution de la masse volumique des composites ciment-liège en fonction du temps : cure humide.	111
Figure 5.4: Evolution de la masse volumique des composites ciment-liège en fonction du temps : cure humide pendant 14 jours suivie de cure au laboratoire.	112
Figure 5.5 Evolution de la masse volumique des composites ciment-liège en fonction du temps : cure au laboratoire.	112
Figure 5.6: Variation de la masse volumique en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L:1/3: cure humide	114
Figure 5.7 : Variation de la masse volumique en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L:1/3: 14 jours cure humide suivie de cure au laboratoire.	115
Figure 5.8: Variation de la masse volumique en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L:1/3: cure au laboratoire.	116
Figure 5.9 : Influence de l'ajout du laitier sur la masse volumique des composites	117
Figure 5.10 : Evolution de gain et de perte de masse en fonction du pourcentage de liège des composites : (a) conservés dans l'eau, (b) conservés à l'air de laboratoire.	118
Figure 5.11 : Evolution de gain et de perte de masse en fonction du pourcentage de liège des composites conservés dans l'eau pendant 14 jours suivie de cure à l'air de laboratoire.	119
Figure. 5.12: Variation de la résistance à la compression en fonction du temps : (a) conservé dans l'eau, (b) à l'air du laboratoire, (c) cure pendant 14 jours dans l'eau suivie de cure à l'air de laboratoire	120
Figure.5.13: Variation de la résistance à la flexion en fonction du temps : (a) conservé dans l'eau, (b) à l'air du laboratoire, (c) cure pendant 14 jours dans l'eau suivie de cure à l'air de laboratoire.	121
Figure.5.14: Variation de la résistance à la compression en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L :1/3: (a) conservé dans l'eau, (b) à l'air de laboratoire.	124
Figure.5.15: Variation de la résistance à la compression en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L :1/3: (c) 14 jours dans l'eau et le reste à l'air de laboratoire.	124
Figure.5.16: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L :1/3: (a) conservé dans l'eau, (b) à l'air, (c) 14 jours dans l'eau et le reste à l'air de laboratoire.	126
Figure.5.17: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'ajout du laitier (formulation C/L:1/3).	127
Figure.5.18: Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'ajout	127

du laitier (formulation C/L:1/3).	
Figure .5.19 Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression	130
Figure.5.20: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion des composites contenant du laitier de haut fourneau.	
Figure.5.21: Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression des composites ciment-liège-sable: (a) cure humide, (b) cure à l'air du laboratoire, (c) cure humide pendant 14 jours suivie d'une cure à l'air de laboratoire.	132
Figure.5.22: Variation du retrait libre en fonction du volume du liège	134
Figure.5.23 : Variation du gonflement fonction du volume du liège	134
Figure.5.24 : Variation du retrait en fonction du temps de composites ciment-liège-sable de rivière (C/L :1/3)	136
Figure.5.25: Variation du gonflement en fonction du temps de composites ciment-liège-sable de rivière (C/L :1/3).	137
Figure.5.26:Variation du retrait en fonction de l'ajout du laitier de haut fourneau des composites C/L:1/3.	138
Figure.5.27 : Variation du gonflement en fonction de l'ajout du laitier de haut fourneau des composites C/L:1/3.	139
Figure. 5.28 : Conductivité thermique en fonction de contenu de liège dans une cure humide et à l'air du laboratoire.	140
Figure.5.29. Variation de la conductivité thermique en fonction de la nature du sable des composites C/L :1/3.	144
Figure.5.30: Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage du laitier des composites C/L :1/3.	147
Figure.5.31: Conductivité thermique vs la masse volumique : Cure humide.	149
Figure.5.32: Conductivité thermique vs la masse volumique : Cure à l'air libre du laboratoire.	150
Figure 5.33 : Corrélation entre la conductivité thermique vs la masse volumique apparente dans une cure humide des composites avec du laitier de haut fourneau.	150
Figure 5.34: Corrélation entre la conductivité thermique vs la masse volumique dans une cure à l'air du laboratoire des composites avec du laitier de haut fourneau.	151
Figure 5.35: Corrélation entre la conductivité thermique vs la masse volumique des composites sans et avec du laitier de haut fourneau : conservé dans l'eau	151
Figure 5.36 : Corrélation entre la conductivité thermique vs la masse volumique des composites sans et avec du laitier de haut fourneau : conservé à l'air de laboratoire.	151

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

λ	Conductivité thermique
C_p	Chaleur spécifique
α_t	Coefficient de dilatation thermique
ν	Coefficient de Poisson
α	Coefficient d'absorption acoustique
W	Coefficient d'adsorption d'eau par capillarité
Ab	Coefficient d'absorption d'eau
D_θ	Coefficient capillaire isotherme
C/L	Ciment/Liège
R	Coefficient de corrélation
R^2	Coefficient de détermination
R	Direction radiale
T	Direction tangentielle
L	Direction longitudinale
a	Diffusivité thermique
Q	Débit
Q_x	Débit volumique
ES	Equivalent de sable
E/C	Eau/ Ciment
HR	Humidité (%)
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LHF	Laitier de haut fourneau
E	Module longitudinal

M_f	Module de finesse
E_t	Module tangentiel
G	Module cisaillement
ρ	Masse volumique apparente
γ_{sec}	Masse volumique sèche ($kg.cm^{-3}$)
γ	Masse volumique
Φ	Porosité
K	Perméabilité au fluide du matériau
P	Pression
β_T	Retrait tangentiel
β_R	Retrait radial
β_L	Retrait longitudinal
R_f	Résistance à la flexion
R_c	Résistance à la compression
R	Résistance thermique
T	Température ($^{\circ}C$)
μ	Viscosité de fluide
V_t	Volume total
$V_{més}$	Volume mésoscopique
V_p	Volume des pores

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les matériaux d'origine végétale ne cessent de s'accroître ces quatre dernières décennies. Ils sont disponibles localement et sont obtenus à partir de différentes ressources : le textile (fibre de lin, chanvre...etc), l'alimentaire (diverses céréales) et le non alimentaire (Lin oléagineux et Agro-forestiers). En effet, le secteur agricole produit une grande quantité de déchets et de matières premières renouvelables pouvant être réutilisés dans les matériaux de construction, comme remplacement de granulats minéraux de ressources non renouvelables, dans le but de réduire leur quantité ou de les éliminer afin de répondre parfaitement aux soucis de l'environnement. Le secteur du bâtiment consomme 40% de l'énergie totale utilisée [1]. Par conséquent, ce secteur doit travailler au mieux non seulement pour améliorer les performances énergétiques des constructions neuves et existantes, mais également pour innover et proposer des matériaux nouveaux qui répondent parfaitement à la réglementation thermique et à la législation, en termes environnementaux et sanitaires par la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). C'est pourquoi, plusieurs études ont été menées et continuent de l'être sur l'utilisation de matières d'origine végétale dans la fabrication des composites cimentaires [2-6]. Ces composites ont des propriétés beaucoup plus intéressantes, on leur attribue la légèreté et des performances thermiques et acoustiques adéquates. Par contre, des problèmes de compatibilités entre le ciment et les matériaux d'origine végétale peuvent être rencontrés comme le retard de prise, les variations dimensionnelles et la durabilité. Pour éviter de tels inconvénients, différents traitements ont été mis au point de façon à valider leur utilisation [7-9].

L'Algérie figure parmi les leaders dans la culture du chêne-liège (*Quercus suber* L) [10-12]. Ces subéraies servent à produire du liège dont les propriétés sont uniques. Les sept unités industrielles de transformation situées principalement à l'Est du pays génèrent une grande quantité de déchets dont le liège expansé [13]. Ces déchets sont souvent jetés dans des décharges publiques et/ou brûler lentement engendrant des fumées polluantes. Par conséquent, il est primordial de mettre l'accent sur l'importance de recycler ces granulats dans la fabrication des matériaux composites isolants. Jusqu'à présent, peu de travaux ont été réalisés dans pays. D'autant plus que ces déchets sont disponibles et obtenus à partir de ressources naturelles renouvelables. Ces déchets de liège peuvent remplacer les sables de ressources non renouvelables qui s'épuisent avec la hausse de la demande.

Ce travail de thèse s'inscrit directement dans ce contexte, la valorisation des matériaux locaux, notamment le liège expansé, pour formuler des matériaux composites cimentaires isolants. Les recherches antérieures sur ces composites ont été focalisées principalement sur les propriétés mécaniques et thermiques. Néanmoins, les variations dimensionnelles de ces matériaux composites constituent un vrai obstacle pour son utilisation. La variation dimensionnelle du matériau composite est considérée comme un indicateur de durabilité. En effet, il se trouve qu'il n'y a pas de recherches se rapportant aux variations dimensionnelles. Dans ce genre des matériaux composites, des détériorations liées à une mauvaise adhérence entre les granulats sont souvent observées, et par conséquent le comportement à long terme de ces granulats au sein de la matrice de ciment dans des différents milieux de conservations a été réalisé.

Jusqu'à présent, aucune investigation n'a été réalisée pour évaluer l'effet du laitier de haut fourneau, en tant que substituant au ciment, sur les propriétés mécaniques, thermiques et les variations dimensionnelles des composites à base de granulats de liège. En plus, l'influence de l'ajout de deux sables (rivière et dune), comme substituant au ciment, a été inversé pour évaluer les propriétés mécaniques (résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion), thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique et diffusion thermique) et les variations dimensionnelles (retrait et gonflement) du matériau composite.

L'objectif de ce présent travail c'est de formuler des composites à base de liège expansé, ayant des propriétés mécaniques, thermiques et des variations dimensionnelles acceptables, pour être appliqués dans les constructions.

Pour cela, nous avons réparti notre travail comme suit :

Après une introduction générale, une revue bibliographique est présentée, en trois chapitres (1, 2 et 3). Le premier chapitre donne une revue bibliographique sur les déchets industriels et agricoles. Cette partie vise également à énumérer les différents matériaux végétaux et minéraux les plus utilisés dans les constructions.

Le deuxième chapitre est réservé aux matériaux composites isolants à base de matériaux végétaux. Ces matériaux composites sont différents des matériaux usuels utilisés dans les constructions. Par conséquent, tous les problèmes rencontrés tels que la compatibilité du

composite à base des matériaux d'origine végétale sont soulevés. Dans cette partie, les effets des différents traitements sont examinés et élucidés. Ces matériaux sont considérés comme des matériaux légers et isolants, ce qui nous mène à parler des bétons légers.

Le troisième chapitre expose une revue bibliographique sur les propriétés des bétons légers et leurs influences sur le comportement mécanique, thermique et acoustique.

Le quatrième chapitre porte sur les caractérisations des matériaux utilisés et les essais expérimentaux réalisés. En effet, plusieurs essais ont été effectués, des essais physiques, physico-chimiques, mécaniques à court, moyen et long terme ainsi que des essais d'isolation thermique.

Dans le cinquième chapitre, seront présentés l'élaboration et l'étude des matériaux composites cimentaires à base de déchets de liège expansé ainsi que les résultats obtenus et leur interprétation. À la fin de cette thèse, une conclusion générale dressera un bilan des résultats obtenus et les perspectives potentielles de ce travail.

CHAPITRE 1

DÉCHETS INDUSTRIELS ET AGRICOLES

1.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux déchets industriels et agricoles ainsi que leurs impacts sur l'environnement et la santé. Cette première partie définit également les possibilités de valorisation de certains déchets pour produire de nouveaux matériaux qui peuvent être réutilisés dans les constructions. Ces matériaux sont, en général, légers et isolants et prennent en considération les exigences et les recommandations de l'environnement et de la santé.

1.2 La notion du déchet

La loi Algérienne définit le déchet comme étant « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer ». Cette loi a pour objet de fixer les modalités de gestion, de contrôle et de traitement ainsi que la valorisation des déchets pour obtenir des matériaux réutilisables [14]. Une définition similaire a été donnée par Alain et Gérard [15, 16]. Par contre, pour Balet [17], la définition du déchet est floue : « un déchet est un déchet pour celui qui s'en débarrasse, mais peut ne plus en être un pour celui qui lui trouve une utilité ».

1.3 Les déchets industriels

Les déchets industriels, appelés déchets d'activités économiques (DAE), sont des déchets produits par l'activité humaine. En effet, l'homme est tourné vers la production rapide de biens et les déchets générés ont été très longtemps négligés. Par conséquent, le problème de la pollution de l'environnement est de plus en plus perceptible avec cette croissance rapide [18]. Elle a des effets négatifs visibles plus particulièrement sur la production agricole [19]. Au fil des ans, l'effet de la pollution sur la production agricole a été bien étudié dans plusieurs pays développés [20, 21]. De plus, elle peut avoir des effets invisibles, tels que la pollution sonore, le rayonnement thermique et le rayonnement

ultraviolet [22-23]. La forte génération de déchets ou de sous-produits industriels est l'un des principaux problèmes auxquels sont confrontés, aujourd'hui aussi bien, les industries de la construction que d'autres industries [24]. La pollution industrielle est plus observée dans la zone rurale car le contrôle n'y'est pas strict comme dans les zones urbaines [25]. Une faible sensibilisation de la population rurale à la protection de l'environnement [26] et aux usines mal planifiées est conçue, sans tenir compte des facteurs environnementaux tels que la direction du vent et la dispersion des gaz sont les principaux facteurs prétendant dans la propagation de pollution dans ces zones rurales [27]. Ainsi, il est très opportun de protéger l'environnement et d'économiser les ressources naturelles en employant la plupart des déchets industriels dans le béton de différentes manières, à savoir les différents déchets industriels solides comme les mâchefers, les scories de cuivre, les scories de four, les déchets céramiques, le calcaire, la poussière de marbre, la poussière de carrière et les granulats de bétons recyclés [28-30], ainsi que les déchets industriels toxiques et d'origine végétale, issus de l'agriculture ou de certaines industries particulières, dont nous examinerons le pourquoi et le comment. Ces résidus seront recyclés et nous présenteront notamment les avantages et les inconvénients des matériaux obtenus.

1.4 Les types de déchets

La classification des déchets peut se faire de différentes manières, selon les objectifs recherchés et selon l'intérêt des informations qui peuvent être tirées. Les déchets peuvent être classés soit par leur nature ou catégorie (comme les déchets solides), soit par leur origine (agriculture, industrie, ménages). La loi relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets subdivise les déchets comme suit [31]: déchets ménagers et assimilés (DMA), déchets encombrants, déchets spéciaux, déchets d'activités de soins et déchets inertes.

1.4.1 Déchets ménagers et assimilés (DMA)

Tout déchet produit par des ménages (OM) ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, artisanales et commerciales, des écoles, des services publics, du secteur tertiaire, des hôpitaux et autres qui, par leur nature et leur composition, sont assimilables aux déchets ménagers [31]. À l'échelle mondiale, environ un tiers de la nourriture que nous produisons pour la consommation est perdu ou gaspillé quelque part le long de la chaîne alimentaire [32]. Dans les pays industrialisés, plus de 40% des aliments

sont gaspillés au stade de la vente et aussi par le consommateur [32, 33], d'où un énorme gaspillage de ressources précieuses qui s'accompagne également de pollutions environnementales [34].

1.4.2 Déchets encombrants

Tous les déchets issus des ménages qui, en raison de leur caractère volumineux, ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les DMA [31]. On y trouve les équipements ménagers usagés (électroménager, vieux meubles et literie, textiles et vêtements, gros cartons, vélos.....), les déblais, les gravats, les déchets verts (espace aménagé, gardienné, clôture). Cela peut être aussi des déchets de chantier : bâtiment (bois, matières plastiques, métaux, briques, béton, tuiles), génie civil (asphalte, revêtements routiers et matériaux d'excavation) ou divers tels que les déchets d'origine animale, voiture usagées, batteries d'automobiles ; déchets électroniques) [35].

1.4.3 Déchets spéciaux

Tous les déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toute autre activité qui en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés dans les mêmes conditions que les DMA [31]. Ils sont appelés aussi toxiques, ces déchets présentent un risque physique, biologique et un risque environnemental. Le traitement de ces déchets nécessite des installations adaptées car leur élimination demande des précautions particulières pour la protection de l'environnement. Par ailleurs, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a défini les déchets dangereux comme "des substances ayant des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques imposant des procédés de manipulation et d'évacuation éliminant les risques sanitaires et/ou d'autres effets nocifs sur l'environnement "[36]. Bien que plusieurs initiatives existent pour la collecte séparée des déchets spéciaux des ménages, certains déchets spéciaux sont généralement égarés et sont gérés avec les déchets ménagers résiduels [37]. Les déchets spéciaux sont parfois collectés en tant que déchets résiduels, et le tout est incinéré. Les conséquences environnementales des déchets spéciaux des ménages égarés sont relativement inconnues. Astrup et al. [38] ont mené des essais sur l'effet de l'incinération des déchets de batterie et ont constaté que les batteries entraînaient une augmentation du mercure (Hg) et du cadmium (Cd) dans les gaz de combustion, ainsi qu'une augmentation du nickel (Ni) et du soufre (S) dans les résidus solides. Dans notre

pays, le transport des déchets spéciaux dangereux est soumis à l'autorisation du ministre chargé de l'environnement après avis du ministre chargé des transports [31].

1.4.4 Déchets des activités de soins

Tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire [31]. Ces déchets sont classés comme des déchets dangereux et doivent être séparés des autres déchets [15].

Les déchets générés par l'amélioration des soins aux patients ont posé un grave problème, un défi au monde entier. Aujourd'hui, le défi de l'élimination des déchets de soins d'une manière écologiquement, socialement et économiquement durable est devenu encore plus compliqué avec des déchets hautement infectieux provenant de patients atteints de Covid-19 [39]. En effet, la pandémie de la Covid-19 a exercé une pression extrêmement élevée sur les mouvements des équipements chirurgicaux due aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement et au recul des activités d'élimination et de recyclage [40].

1.4.5 Déchets inertes

L'exploitation continue de diverses ressources naturelles pour la construction conduit à la génération de millions de tonnes de déchets de construction et de démolition chaque année. Ces déchets sont généralement définis comme des déchets solides inertes [41]. Ils sont classés inertes lorsqu'ils ne peuvent pas subir de transformations importantes, physiquement, chimiquement ou biologiquement [42]. La définition précédente des déchets inertes est conforme à la loi Algérienne du 15 décembre 2001 [31]. Ces déchets se composent principalement de terre, de pierres et de galets, de béton, de briques, de bois, de matériaux de toiture, ...etc. [43]. Les principaux travaux responsables de l'augmentation de la quantité des déchets de construction et de démolition sont la rénovation, la nouvelle construction, la démolition des anciennes structures, l'élargissement des routes et la reconstruction du réseau de transport [44]. Ces différents secteurs dégagent des quantités importantes [45]. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, environ 136 106 tonnes de débris de construction et de démolition liés au bâtiment sont générées sur lesquelles 20% à 30% seulement sont recyclés chaque année [46]. Ces déchets composés principalement de béton, de maçonnerie, de calcaire, de grès, de métal, de bois, etc. peuvent varier selon le type de construction [47,48]. Ces types de déchets peuvent affecter la santé publique et

l'environnement en raison de la présence d'autres polluants secondaires qui sont pour la plupart toxiques comme les métaux lourds. Par conséquent, il y a lieu de recycler ces déchets. En effet, on peut trouver plusieurs utilisations comme du béton à base de déchets de briques ou la production de blocs de ciment en utilisant du béton en poudre [49], ou bien encore des bétons verts en utilisant des granulats en céramique. Ce béton présente des caractéristiques mécaniques similaires à celles du béton ordinaire [50, 51]. En raison de la disponibilité des ressources de déchets, le potentiel de réutilisation et de recyclage de ces résidus est élevé [49].

Afin de mettre fin aux décharges anarchiques et illicites en Algérie, la loi relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets interdit le dépôt, le rejet et l'abandon des déchets inertes sur tout site non désigné à cet effet et notamment sur la voie publique. Le générateur des déchets doit prendre en charge la collecte, le tri, le transport et la mise en décharge de ces déchets inertes.

Quant aux déchets urbains, ils couvrent les DMA et les déchets que la collectivité collecte tels que les boues de station d'épuration, les matières de vidange, les déchets d'espaces verts, les résidus de nettoyage des rues, les papiers divers des locaux administratifs...etc. [35]. Les déchets plastiques, les papiers-cartons, les textiles, le bois non traité, les métaux, les verres et matières organiques appartiennent, en général, à la catégorie des déchets banals (non dangereux) qui sont des déchets non inertes et non dangereux que produisent aussi bien les ménages que les entreprises [15].

1.5 Les déchets industriels en Algérie

Les chiffres des déchets produits, annoncés par le Ministère de l'environnement à travers le Cadastre National des déchets spéciaux (CNDS) sont énormes. Ces déchets présentent une menace pour l'environnement et pour la santé humaine, car certains déchets industriels contiennent des substances dangereuses et doivent donc impérativement être dépollués. Il est bien connu que ces déchets, lorsqu'ils sont mis dans des décharges ou incinérés génèrent dans l'air, le sol et l'eau, des émanations toxiques dangereuses pour l'homme et l'environnement.

En Algérie, les déchets industriels représentent un danger réel pour l'environnement et la population et sont parmi les plus préoccupants car le seul mode d'élimination utilisé est la mise en décharge sur des sites qui n'arrivent plus à répondre à la forte demande des grands centres industriels. Le secteur de l'industrie dégage des quantités importantes de déchets en Algérie. L'industrialisation rapide qui a caractérisé les deux décennies de l'indépendance est à l'origine de graves déséquilibres écologiques compromettant ainsi la qualité de la vie. En outre, l'absence de croissance économique réelle et durable est la cause de la dégradation accélérée des écosystèmes, fragilisés par une exploitation et une gestion irrationnelle [52].

D'après une étude réalisée en 2002 par le CNDS, l'Algérie produit plus de 325.100 tonnes de déchets industriels spéciaux par an. Les déchets industriels spéciaux sont générés par quatre secteurs, à savoir les hydrocarbures (34%), la chimie, le caoutchouc et le plastique (23%), la sidérurgie et la métallurgie (16%) et les mines (13%). Par contre, le secteur des textiles 4% et ceux du papier et de la cellulose, du ciment et dérivés, de l'agriculture et de la mécanique 2% [24]. A titre d'exemple de déchets sidérurgiques, le complexe d'EL Hadjar produit annuellement environ 0,6 millions de tonnes de laitier. Une petite quantité de ces déchets a été utilisée comme ajouts au ciment dans la cimenterie de Hadjar Essaoud afin de limiter les risques de rejet dans l'environnement et en produisant un ciment aux qualités supérieures [51]. Nous nous intéresserons aux déchets industriels solides et plus particulièrement aux déchets industriels solides réutilisés dans la production du ciment.

1.6 Valorisation des déchets industriels dans la fabrication des ciments

L'utilisation des déchets industriels en béton est très répandue pour réduire au minimum l'impact des activités humaines sur l'environnement et la planète et ainsi réduire considérablement la consommation d'énergie et par conséquent, le coût de la fabrication et l'émission de CO₂. La réutilisation des déchets inorganiques générés par l'industrie tels que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et la cendre volante est la meilleure dans la fabrication du ciment et du béton vert. En effet, les résultats montrent que l'introduction des cendres volantes augmente la résistance à la pénétration de chlorure comparé au béton ordinaire [50].

1.6.1 Le laitier de haut fourneau

Le laitier est un sous-produit des aciéries. Les industries métallurgiques génèrent environ 300 kg de laitier par tonne de fonte. Le refroidissement appliqué et le procédé de fabrication déterminent les variétés de laitier [53].

Les variétés de laitier de haut fourneau dépendent essentiellement du refroidissement. Lorsque le laitier liquide est refroidi très lentement, on obtient un laitier rocheux (cristallisé). Ce matériau est ensuite arrosé pour obtenir un laitier cristallisé de masse volumique apparente de 1,2 à 1,4 t/m³ [54]. Ce déchet minéral possède une porosité variant de 3 à 20% due à l'oxydation du soufre. Par conséquent, la masse volumique absolue et la conductivité thermique du laitier sont plus faibles. Par comparaison, ce matériau présente une masse volumique et une conductivité thermique inférieures à celles du calcaire et du granite. Le béton confectionné avec les granulats de laitier constitue un excellent isolant thermique [55].

Le refroidissement du laitier liquide, suivi par une injection d'air et de vapeur d'eau, produit un laitier expansé de masse volumique apparente de l'ordre 0,3 à 1,1 t/m³. Ce procédé de fabrication du laitier génère une structure poreuse et, par conséquent, une faible conductivité thermique variant de 0,1 à 0,18 W/m.K et une faible résistance mécanique, variant de 1 à 8 MPa, à la compression. L'utilisation de ce matériau peut être bénéfique pour l'isolation thermique [55].

Il existe aussi le laitier de haut fourneau vitrifié (granulé ou bouleté). Le laitier liquide est dirigé, après séparation avec la fonte, vers un dispositif dans lequel il va subir un refroidissement par arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression (trempe) afin d'obtenir le laitier vitrifié ou granulé. Le laitier granulé doit présenter des propriétés hydrauliques latentes, c'est-à-dire qui se manifestent quand le laitier subit une activation convenable [56]. La densité apparente de ce matériau est de l'ordre de 0,7 à 1,4 et sa densité absolue est de l'ordre de 2,6 à 2,8. [54]. Par contre, le laitier bouleté est obtenu par arrosage et exposition à l'air libre et prend une forme sphérique sous l'effet de tension superficielle. Cela produit un laitier bouleté, de granulométrie variant de 0-20 mm, de masse volumique absolue de 1,4 à 1,6 t/m³, avec une porosité de 45 à 50%. Ce matériau peut également améliorer les caractéristiques thermiques du béton par sa faible conductivité thermique qui tourne autour de 0,15 W/ m.K [57].

Ce déchet industriel a des propriétés hydrauliques, et son utilisation améliore l'ouvrabilité du béton frais et le rend plus plastique et de meilleure cohésion. Les caractéristiques de surface des grains de laitier, plus lisses, absorbent un peu d'eau au cours du malaxage [53]. Le laitier granulé peut être broyé à la finesse désirée, mais habituellement à une finesse supérieure à $350 \text{ m}^2/\text{kg}$, plus fine que celle du ciment Portland. Une augmentation de la finesse conduit à une augmentation de l'activité à jeune âge [56]. Une étude réalisée par Frigione [58] montre que la surface spécifique de Blaine de $250 \text{ m}^2/\text{kg}$ à $500 \text{ m}^2/\text{kg}$ augmente la résistance du béton plus que du double. En ce qui concerne la prise du béton contenant du laitier, la présence du laitier conduit à un retard de prise variant entre 30 à 60 minutes [59]. Nigri et al. [60] ont également examiné l'évolution du temps de prise en fonction de la teneur en laitier. Ces auteurs ont pu montrer que l'augmentation du pourcentage du laitier a un effet retardateur sur le temps de prise et une diminution de la résistance initiale par rapport à celle du béton à base de ciment Portland [61].

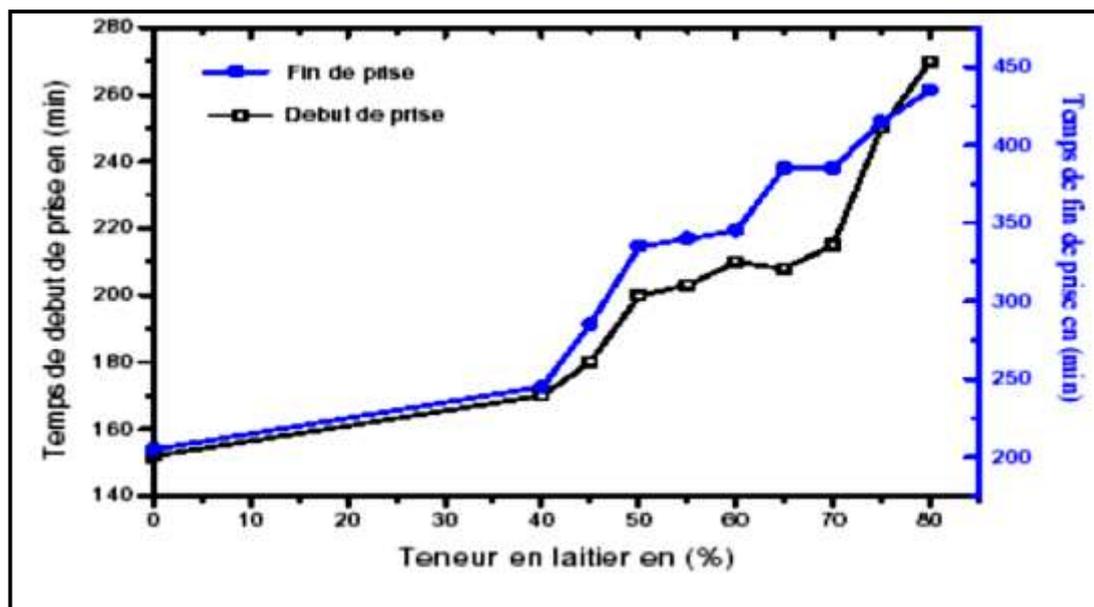


Figure.1.1 : Temps de prise des ciments avec ajout du laitier [60].

La résistance du béton durci est influencée par le pourcentage de laitier. A moyen terme, pour obtenir une résistance élevée, le pourcentage du laitier à mettre en œuvre est de 50% de liant [62]. La norme ACI 318-89 impose une limite de la teneur en laitier de 50% du total du liant. Lorsque le laitier et les cendres volantes sont ajoutés ensemble dans le béton, la masse totale de ces deux matériaux doit être limitée à 50% de la masse initiale du liant ; la limite de la teneur en cendres volantes étant de 25% [63]. Sivasundaram et Malhotra

[64] ont présenté une étude où ils ont accrédité la possibilité d'utiliser des pourcentages de laitier plus importants variant entre 50 et 75%. Dans cette étude, les auteurs ont démontré une bonne évolution de la résistance du béton pour un dosage en liant compris entre 300 et 420 kg/m³. La résistance du béton à base de ciment et de laitier est également influencée par le mode de conservation. En effet, la conservation humide prolongée doit être importante en raison de la faible vitesse initiale d'hydratation qui provoque une perte d'eau dans le système des pores capillaires sous l'effet des conditions de séchage [53].

En ce qui concerne la perméabilité, les essais réalisés sur les mortiers à base de laitier de haut fourneau ont montré que ces derniers sont moins perméables à l'eau. L'utilisation du laitier de haut fourneau dans la confection des mortiers, selon Bakker, réduit fortement la diffusion des chlorures [65]. À ce propos, on doit noter que, pour le béton ayant au moins 60% de teneur en laitier avec un rapport Eau/Ciment de 0,50, la diffusion de ce matériau exposé aux chlorures est au moins, 10 fois plus faible que dans le cas où le liant est constitué de ciment Portland [64, 66]. Par conséquent, la durabilité du béton contenant du laitier de haut fourneau est plus marquée que celle d'un béton confectionné avec du ciment Portland seul. En effet, l'incorporation du laitier a un effet bénéfique sur la microstructure. La pâte de ciment hydratée est plus dense, l'espace poreux étant rempli par des C-S-H par rapport à la pâte de ciment Portland seul. Par conséquent, la résistance aux sulfates de ce béton à long terme est particulièrement durable [53].

1.6.2 La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit d'industrie provient de la réduction du quartz de grande pureté du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la fabrication de silicium et d'alliages de ferrosilicium. Ces particules sont sphériques très fines contenant une forte teneur en silice amorphe (SiO₂). La fumée de silice est aussi appelée micro-silice ou fumée de silice condensée, mais l'expression « fumée de silice » est plus usitée. Les fumées de silices sont utilisées en remplacement du ciment [53].

En général, la densité de la fumée de silice est de 2,20, mais elle est peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible [67]. Le diamètre de la fumée de silice varie entre 0,03 et 0,3µm et habituellement le diamètre de ces particules fines est inférieur à 0,1µm. Par conséquent, la surface spécifique de la fumée de silice est plus élevée, elle est

d'environ de 20 000 m²/kg. Cette surface spécifique ne peut pas être déterminée par la méthode de Blaine, elle est déterminée par la méthode d'absorption d'azote [53]. La silice est très réactive et le raffinement des particules accélère la réaction avec l'hydroxyde de calcium engendrée par l'hydratation du ciment Portland. Les très petites particules des sphères permettent généralement de diminuer la perméabilité à l'air et à l'eau.

Les propriétés du béton frais sont influencées par la présence de fumée de silice. En effet, les bétons contenant de la fumée de silice ont très peu de ressuage. En revanche, la diminution du ressuage peut provoquer le retrait plastique. Par ailleurs, ce béton peut être facilement pompé et bétonné sous l'eau, il peut être utilisé comme un béton fluide [53].

L'incorporation de la fumée de silice augmente la résistance du béton durci jusqu'à environ 7 jours (jeune âge). En effet, la fumée de silice agit comme un filler qui améliore l'interface avec les granulats et particulièrement avec les gros granulats [68, 69]. Une augmentation de la résistance est également constatée, à long terme, avec un ciment contenant de la fumée de silice. En effet, la résistance augmente respectivement de 7 MPa et de 16 MPa avec une teneur de 10% et de 20% de fumée de silice [70]. Le taux de remplacement optimal de la fumée de silice se situe aux environs de 10% de la masse totale du liant. La perméabilité de la pâte de ciment est réduite avec ce pourcentage et l'augmentation de ce pourcentage conduit à de faibles changements [15].

1.6.3 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des résidus nuisibles à l'environnement. Ce sont des particules minérales, très fines et de forme sphérique, recueillies dans des installations de dépoussiérage de gaz de combustion des centrales thermiques alimentées au charbon. La finesse des cendres est très élevée, la surface spécifique de Blaine varie entre 250 et 600m²/kg. Par conséquent, les cendres volantes réagissent facilement avec l'hydroxyde de calcium et leur forme contribue à l'amélioration de la maniabilité [53].

Il existe deux types de cendres volantes, les cendres volantes de classe F provenant de charbon bitumineux, principalement siliceuses et les cendres de classe C provenant des charbons et lignite sous-bitumineux. On a pu constater, lors de la substitution une partie du ciment Portland par de la cendre volante d'une teneur de 5 à 15%, dans la confection du

béton, une réduction du besoin en eau, réduction autant plus importante pour un rapport Eau/Ciment plus élevé [71]. La présence de cendres volantes dans un béton frais retarde la prise du béton d'environ une heure. Par conséquent, cela peut être avantageux par temps chaud [53]. Les cendres volantes sont moins sensibles aux agents agressifs et ont la capacité de réagir avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment Portland (réaction pouzzolanique). La présence de la cendre volante améliore également d'autres aspects des propriétés du béton: porosité capillaire plus fine et hydratation plus lente. De ce fait, un tel résidu présente des bénéfices forts intéressants qui méritent d'être évoqués [71].

1.7 Les déchets agricoles

Le secteur agricole dispose de ressources considérables pour fournir des matériaux d'origine végétale. En effet, divers matériaux ont été appliqués avec succès dans la confection des composites tels que les copeaux de bois [72], les déchets de menuiserie [73], la coque de palmier [74], la coque de noix de coco [75], le bambou [76, 77], etc. Plus récemment, la coque d'abricot et de pêche ont été utilisées pour le béton léger d'origine biologique. La pêche est un fruit originaire de Chine [78, 79], elle est largement cultivée dans le monde, principalement en Chine, en Italie, en Grèce, en Espagne et aux États-Unis [80]. L'abricot est également l'un des principaux fruits au monde. En 2017, la superficie de plantation d'abricotiers dans le monde était d'environ $5,4 \times 10^5$ ha, avec une production annuelle d'environ $4,26 \times 10^6$ tonnes [81]. En dehors de leur consommation comme fruits, la plupart des pêches et des abricots sont transformés en jus en conserves, etc. Par conséquent, les coques de pêche et d'abricot sont utilisées dans la fabrication du béton léger en raison de leur légèreté et de leur rigidité [8, 78, 82]. D'autres déchets comme le liège ont suscité beaucoup d'intérêt pour la production de matériaux composites isolants [3-6].

Différentes expériences ont été menées afin de développer des matériaux composites isolants à base de déchets agricoles ou à base de matériaux biosourcés. Ces matériaux ont servi à la confection de nouveaux composites isolants qui seront utilisés dans les constructions. On peut également les utiliser pour la production des énergies renouvelables ce qu'on appelle couramment la biomasse. Beaucoup d'expériences ont été réalisés dans plusieurs pays. Au Brésil, le carburant pour les véhicules est obtenu à partir de la canne à sucre qui est transformée en bioéthanol. Le maïs est également utilisé à cet effet aux États-

Unis. En Chine, du bio-gaz, surtout du méthane, est obtenu à partir de la fermentation du fumier. En France, dans certaines fermes, les raies (parties centrales) du maïs sont brûlées pour assurer le séchage des grains, ce qui permet une économie de fioul [83]. Comme on peut le constater, des progrès assez considérables ont été accomplis et de nouvelles formulations de composites ont vu le jour. Ces matériaux à base de ciment-matériaux d'origine végétale seront présentés en détail ultérieurement dans le chapitre 2.

1.8 Le bois

C'est une matière ligneuse et compacte qui compose les branches, le tronc et les racines des arbres et des arbrisseaux [84]. Le tronc est constitué de bois et d'écorce. La qualité du bois est liée à sa structure macroscopique et microscopique, mais aussi à la structure des parois cellulaires déterminée par ses constituants chimiques. Cette qualité peut être mesurée dans l'aubier et dans le duramen. Une coupe transversale à la figure 1.2 permet de distinguer l'ensemble des couches concentriques [85].

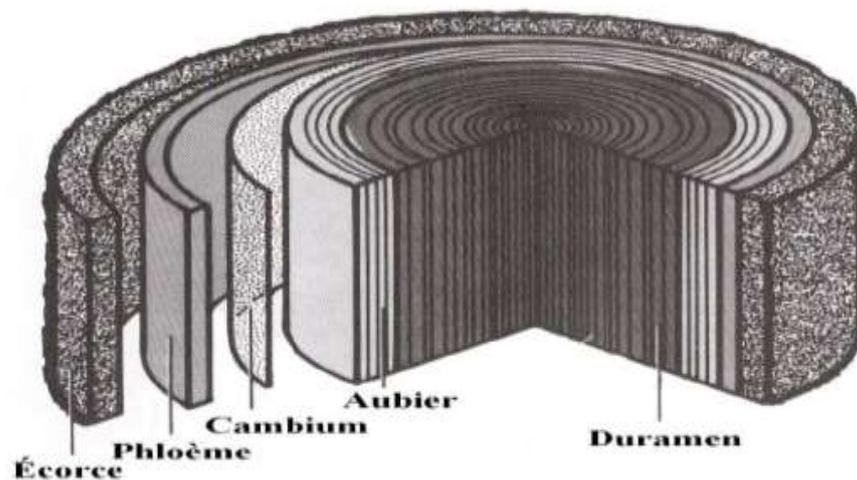


Figure 1.2 : Coupe transversale dans un tronc d'arbre [85].

Le bois est un matériau composé principalement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène et est considéré comme matériau biodégradable. Ses propriétés dépendent de son anatomie, de la composition chimique et des extractibles [86]. C'est un matériau poreux, hygroscopique et anisotrope, ses propriétés mécaniques, physiques et technologiques changeant suivant la direction choisie (Figure 1.3). En effet, on distingue trois plans nécessaires pour faire une description de sa structure anatomique. Le plan transversal

(RT) qui est perpendiculaire à l'axe de la tige et sur lequel on peut observer les cernes annuels ; le plan longitudinal-radial (LR) passant au centre de la tige et sur lequel se développent les trachéides radiales permettant la communication tridimensionnelle et une meilleure cohésion structurelle de l'ensemble et enfin le plan longitudinal-tangentiel (LT) qui est excentré, parallèle à l'axe de la tige et tangent aux cernes annuels et sur lequel se trouve l'assise génératrice libéro-ligneuse, qui est la région active où les cellules sont vivantes et se divisent pour donner la croissance diamétrale. La figure 1.3 présente les trois plans et les trois directions d'anisotropie du bois axiale (L), radiale (R) et tangentielle (T). [85, 86].

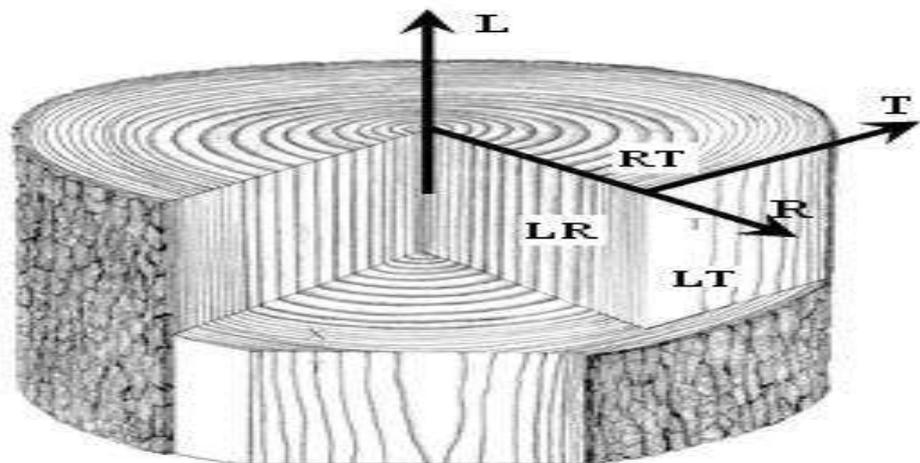


Figure 1. 3 : Directions principales d'une pièce de bois
(R : radiale; T : tangentielle; L : longitudinale) [85].

1.8.1 La composition cellulaire du bois

Les principales composantes chimiques de la paroi cellulaire sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine (Figure 1.4). Les chaînes de molécules cellulosiques, entourées d'hémicellulose et incrustées dans la digne, constituent des micro-fibrilles en forme de spirales croisées. La cellulose et l'hémicellulose sont les éléments prépondérants de la paroi cellulaire. Ces deux constituants sont très hydrophiles. La cellulose est caractérisée par une résistance et une rigidité axiale très élevées qui contribuent significativement à la réponse mécanique du matériau. La cellulose et l'hémicellulose ont des caractéristiques mécaniques orthotropes. Quant à la lignine, elle est supposée isotrope [84].

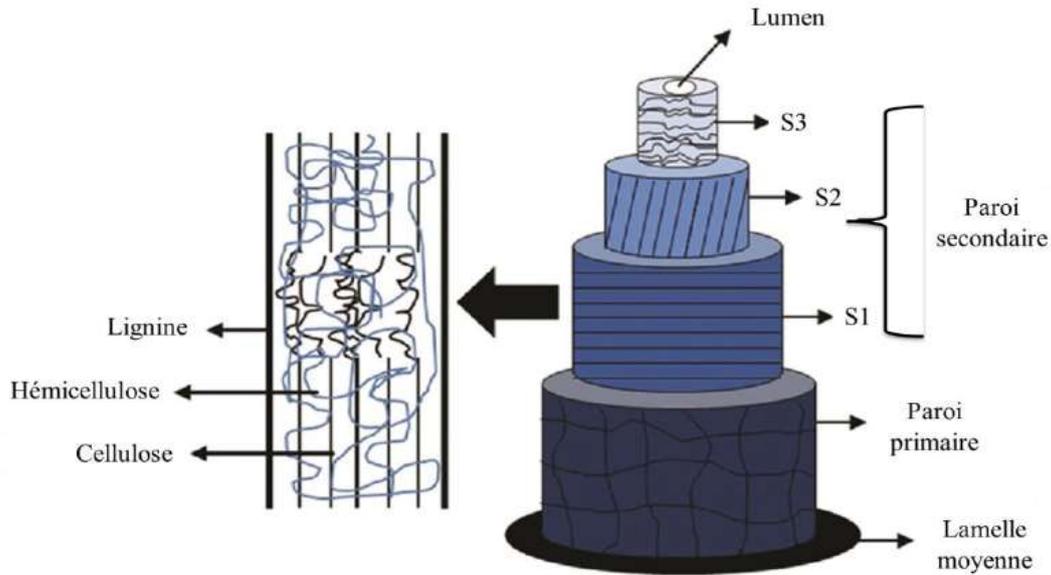


Figure 1.4. Représentation schématique de la paroi cellulaire [87].

1.8.2 Les compositions chimiques du bois

La matière organique du bois est essentiellement constituée de cellulose, de lignine et d'hémicellulose mais elle contient également des protéines, des ions, des cendres et de l'eau. La compréhension de la composition chimique et de la structure des matériaux d'origine naturelle contribuerait à la recherche et au développement de composites incorporant des granulats lignocellulosiques naturels. De plus, ces matériaux contiennent un certain nombre de molécules solubles dans l'eau ou dans des solvants (alcool, éther, benzène), désignés comme extractibles qui apportent des propriétés comme l'odeur, la couleur, l'hygroscopicité et la durabilité. [17, 86]. L'eau contenue dans le bois joue un rôle très important sur toutes les propriétés : densité, propriétés physiques, caractéristiques mécaniques ... etc. Elle peut atteindre 100%, et parfois plus, de la masse du bois sec. Elle est présente dans le bois à trois niveaux différents ; on distingue en effet, l'eau de constitution, combinée chimiquement à la masse ligneuse (elle reste présente dans le bois dit « anhydre »), l'eau d'imprégnation, contenue dans les membranes des cellules et l'eau libre, qui remplit les vides des tissus et l'intérieur des cellules lorsque les membranes sont saturées d'eau. Lors du séchage continuant, c'est l'eau d'imprégnation qui commence à s'évaporer. Le bois « sec à l'air » a une humidité de 13 à 17% suivant les saisons. On peut obtenir un état plus sec par séchage artificiel : en effet, l'état anhydre est atteint après le passage, durant plusieurs heures, dans l'étuve à une température de 100 à 105°C [84]. La

composition chimique de quelques matériaux lignocellulosiques naturels est donnée dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Composition chimique de différents granulats lignocellulosiques (%) [14].

Granulats	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectine	Cire	Cendres
Anas de lin	53	13	24	0,4-5	-	2,7
Pulpe de betterave	21	23	2-6	30	-	5
Chênevotte	48	12	28	6	4	2
Tige de tournesol	42,1	29,7	13,4	5,9	1	7,9
Canne à sucre	41,7	28	21,8	10		3,5
Coco	43	0,3	45	4	-	1,1
Bois	38,8	26,3	29,3	-	-	-
Coque de palmier à huile	14,7	16,4	53,6	-	2,3	2,3

Généralement la teneur en lignine est plus élevée chez les résineux que chez les feuillus. Cependant, ces derniers possèdent plus de carbohydrates et de composés extractibles et l'analyse chimique peut conduire à différencier le bois des résineux du bois des feuillus [14].

1.8.3 La masse volumique du bois

La masse volumique des bois est différente : certains sont légers (peuplier, épicéa,...etc.) et d'autre très lourds (chêne, ébène,...etc.). Cette masse volumique varie d'une essence à l'autre et varie, même, au sein d'une même espèce [84]. Elle varie également en fonction de l'environnement. D'après l'étude menée par Woodcock et al. [88], la masse volumique des espèces est faible dans les environnements humides tropicaux et est plus élevée dans les conditions sèches. Par ailleurs, la masse volumique peut varier en fonction de la provenance et/ou de la famille dans la provenance [89]. Une étude sur les feuillus tropicaux a démontré des différences significatives chez certaines espèces dont l'âge variait entre 6 et 10 ans. Le bois possédant une porosité importante est plus léger, moins résistant, dur et stable [84].

1.8.4 Absorption d'eau et variations dimensionnelles du bois

Les granulats lignocellulosiques sont poreux et leur capacité de rétention d'eau est importante. Ces pores ou vides sont des indicateurs pour la capacité d'absorption d'eau. L'étude de la capacité d'absorption d'eau des granulats de bois introduits d'une matrice cimentaire a attiré l'attention de nombreux chercheurs [90-92]. Ces chercheurs ont conclu que les granulats d'origine végétale ont la capacité d'interférer avec l'eau. Cela pourrait provoquer la sorption/désorption d'humidité qui est accompagnée d'un gonflement/rétraction des végétaux. Il est évident, donc, que ces matériaux ont une capacité d'absorption élevée et ce taux d'absorption dépend de la nature des matériaux végétaux utilisés [93]. A cela, s'ajoute la modification de leurs propriétés (densité, dimensions, propriétés mécaniques). Cela est conforme avec les travaux de recherches de Tedjditi et al. et Menor et al. [94, 95].

Kollmann et Schneider [96], ont effectué des essais sur du bois de hêtre, de chêne et de pin traité entre 70°C et 200°C pendant des période allant de 6 à 24 heures, les résultats montrent que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la température de traitement et aussi avec la prolongation du temps de traitement. Ces résultats ont été confirmés par Nikolov et Enceev [97]. Par conséquent, l'étude de l'absorption d'eau est essentielle car les composites obtenus peuvent être soumis à une humidité ou à des conditions environnementales qui peuvent changer rapidement et qui vont provoquer des variations dimensionnelles importantes dans le matériau [98].

Le tableau 1.2 donne le taux d'absorption après 24 heures d'immersion de quelques granulats de bois et fibres de bois les plus couramment utilisés dans le béton du bois. Il est à noter que les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous donnent un coefficient d'absorption d'eau des granulats de bois et des fibres végétales très élevé. En effet, elles peuvent absorber une masse d'eau supérieure à leur propre masse.

Tableau 1.2 : Les propriétés physiques des fibres et des granulats de bois.

Matériaux	Taux d'absorption (%)
Coco [83]	80 %
Sisal [83]	150 %
Sisal [99]	201 %
	200 %
	230 ± 16 %
Sous-produit- sisal [100]	110-240 %
Chanvre [83]	150 %
Chanvre [99]	158 ± 30 %
Jute [83]	250 %
Jute [99]	281 %
Fibre de coco [100]	93.8-161 %
Lin [99]	136 ± 25 %
	152 ± 07 %
Pulpe d'eucalyptus [100]	643 %
Copeaux de bois [101]	160 %

Plusieurs facteurs peuvent provoquer le retrait du bois. En effet, il est affecté par la teneur en humidité, la masse volumique, la structure anatomique, les extractibles, les constituants structuraux, l'effort mécanique et la proportion de bois juvénile [102, 103]. On trouve deux types de retrait, les retraits linéaires et volumiques. Compte tenu de l'anisotropie du bois, trois directions de retrait linéaire sont considérées, les directions radiale, tangentielle et longitudinale. Ces retraits suivent un ordre de grandeur : le retrait tangentiel (β_T) qui est environ le double du retrait radial (β_R), lequel est largement supérieur au retrait longitudinal (β_L) [102]. Pour limiter le gonflement dû à l'humidité, il faut sécher le bois jusqu'au degré d'humidité qui assurera l'équilibre avec l'atmosphère dans laquelle il sera utilisé. Le bois subit un retrait lorsque l'eau libre commence à se détacher de l'eau liée des parois cellulaires [84]. Le traitement thermique du bois entraîne une amélioration de la stabilité dimensionnelle. L'étude réalisée par Burmester [104], qui est l'une des premières études sur cette amélioration, a montré les conditions optimales de traitement. Il est possible de réduire la déformation provoquée par le gonflement de 75% pour le chêne, 60% pour le hêtre, 55% pour le pin, et 52% pour l'épicéa. Giebeler [105] a mentionné que le gonflement diminue d'environ 50% à 80% après traitement thermique du hêtre, du peuplier, du pin, de l'épicéa et du bouleau. Dirol et Guyonnet [106] ont montré que les gonflements radiaux et tangentiels sont toujours plus faibles après traitement pour l'épicéa, le sapin et le peuplier, et ont tendance à diminuer encore avec des traitements plus sévères. Les mêmes résultats ont été trouvés sur le hêtre et le pin sylvestre [107]. D'autres traitements ont été proposés par Monreal [108], Khazma et al. [109] et Ledhem et al. [91]

pour réduire les variations dimensionnelles des granulats lignocellulosiques des composites à base de betterave, d'anas de lin et de copeaux de sapin respectivement. Une amélioration significative des variations dimensionnelles a été constatée, mais elles restent quand même importantes.

1.8.5 La conductivité thermique du bois

La conductivité thermique du bois est, environ, 10 fois plus faible que celle du béton et 250 fois plus faible que celle de l'acier. Cette propriété dépend de la densité, du taux d'humidité et de la direction considérée, soit parallèlement aux fibres (direction L), soit perpendiculairement à celles-ci (direction R et T) [84]. Ramanaiah et al. [18] ont étudié la variation de la conductivité et la capacité thermique spécifique du composite polyester renforcé par les fibres. Les résultats ont révélé que la conductivité et la capacité thermique du composite diminuent avec l'augmentation de la teneur en fibres. La conductivité thermique du bois traité thermiquement est réduite de 20 à 25% par rapport au bois résineux non traité, ce qui peut être un avantage pour certaines utilisations du matériau. Par contre, les diffusivités thermiques ont été baissées d'environ 27% après traitement thermique de toutes les essences. Le tableau 1.3 présente les valeurs des différentes propriétés thermiques de quelques essences de bois [86].

Tableau 1. 3 : Paramètres thermiques de quelques essences de bois [86].

Matériaux	Masse volumique kg.m^{-3}	Conductivité thermique $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Diffusivité thermique $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
Frêne	675	0,1588	1,47E-07
Hêtre	653	0,1544	1,48E-07
Peuplier	437	0,1112	1,59E-07
Pin	461	0,1116	1,58E-07
Sapin	447	0,1320	1,59E-07

1.8.6 Propriétés mécaniques du bois

Les propriétés mécaniques dépendent de la quantité d'eau que le bois recèle et de sa structure [84]. En effet, en raison de sa structure anatomique, le bois a un comportement mécanique différent selon la direction sollicitée. L'axe longitudinal est plus résistant, suivi de l'axe radial et de l'axe tangentiel. Cela résulte du fait qu'environ 90 % des cellules constructives du bois sont orientées verticalement contre 10 % orientées horizontalement

(les cellules de rayons) [85]. Les caractéristiques mécaniques des diverses espèces de bois sont données dans le tableau 1. 4.

Tableau 1. 4 : Propriétés mécanique des bois [84].

Bois	Masse volumique (kg/m ³)	Module d'Young GPa		Résistance, MPa, // aux fibres		Ténacité MPa \sqrt{m}	
		// aux fibres	⊥ aux fibres	Traction	Compression	// aux fibres	⊥ aux fibres
Balsa	100-300	4	0,2	23	12	0,05	1,2
Acajou	530	13,5	0,8	90	46	0,25	6,3
Sapin Douglas	550	16,4	1,1	70	42	0,34	6,2
Pin d'Ecosse	550	16,3	0,8	89	47	0,35	6,1
Bouleau	620	16,3	0,9	-	-	0,56	-
Frêne	670	15,8	1,1	116	53	0,61	9,0
Chêne	690	16,6	1,0	97	52	0,51	4,0
Hêtre	750	16,7	1,5	-	-	0,95	8,9

1.8.7 La structure microscopique du bois

L'observation du bois, par microscopie à balayage, permet de distinguer deux microstructures [110] :

- La microstructure des résineux (pin maritime, pin sylvestre, épicéa, sapin,...) est très simplifiée. La nature du bois est constituée d'un seul type de cellules qui constituent à la fois le tissu de soutien (donnant la résistance au bois), et le tissu de conduction (conduisant l'eau et les vaisseaux d'irrigation).
- La microstructure des feuillus (peuplier, hêtre, chêne, châtaignier,...) est beaucoup plus complexe que celle des résineux, et là, on distingue nettement deux classes (Figure 1.5).
 - Des cellules de grand diamètre : notées « V » sur le cliché, il s'agit de vaisseaux dont le rôle est de véhiculer la sève.
 - Des cellules de petit diamètre : il s'agit des cellules de structure.
 - Des cellules perpendiculaires à ces dernières (orientées selon le rayon du tronc) : notées « R » sur le cliché, il s'agit des parenchymes qui contiennent les nutriments nécessaires à la vie.
- Ces cellules communiquent par l'intermédiaire de ponctuations comme nous le montre la figure 1.5b.

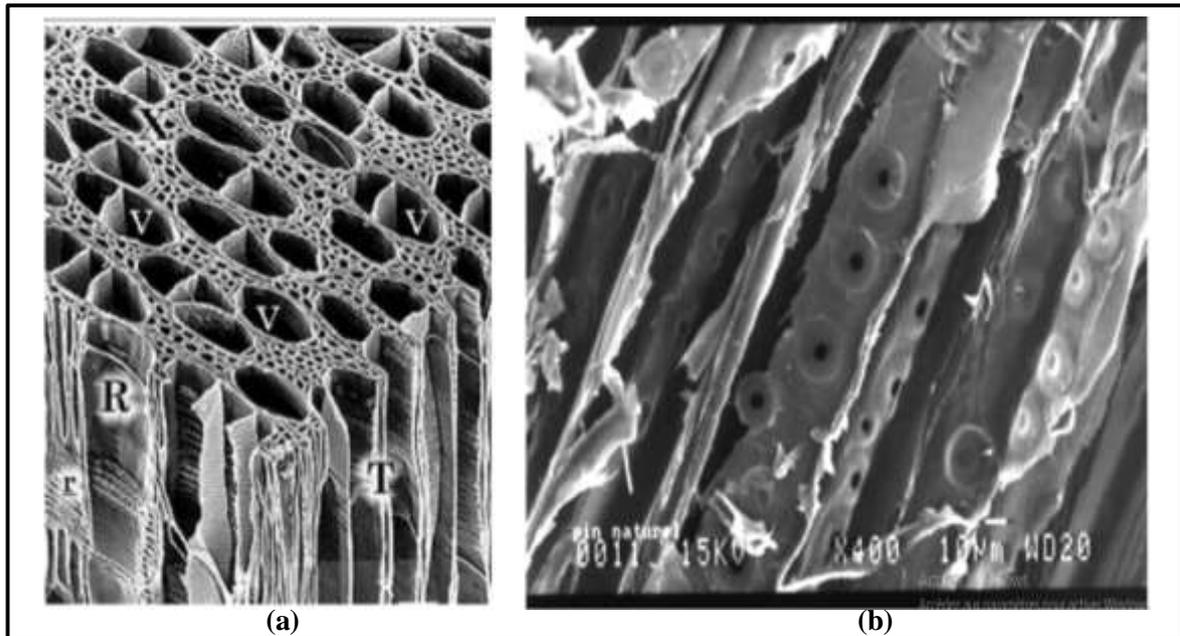


Figure 1.5 : Microstructure du bois : (a) structure cellulaire, (b) ponctuations [110].

1.9 Les déchets agricoles en Algérie

Les déchets agricoles sont des déchets provenant principalement de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche, ainsi que de la préparation et la transformation des aliments. Malheureusement, en Algérie, il n'y a aucune statistique officielle concernant le flux annuel de ces déchets. Par ailleurs, différents types de déchets tels que le bois, la paille, les huiles, les déchets végétaux des secteurs forestiers sont issus du secteur agricole. Ces derniers restent la principale source d'énergie. Dans notre pays, l'exploitation de ces sous-produits, d'origine végétale de ressources renouvelables, dans la fabrication des matériaux nouveaux et dans le développement des énergies renouvelables présente peu d'intérêt. À ce propos, deux installations expérimentales à Béchar et à Ben Aknoun destinée à l'étude de la production de biogaz à partir de bouse de vache ont été édifiées [111].

Parmi les déchets les plus répandus, on a le déchet du liège. On retrouve beaucoup de références au liège et à ses différentes applications à travers l'histoire. En effet, le liège était déjà utilisé en Babylonie, en Chine, en Egypte, et dans toute la Perse ; il servait à fabriquer des équipements et autres éléments employés dans l'art de la pêche [112]. Le liège est un tissu végétal formé d'un empilement de cellules mortes et creuses aux parois subérifiées. La mère du liège se situe entre une assise subéro-phellodermique (ou phellogène) et une assise libéro-ligneuse (ou cambium) qui produit vers l'extérieur le liber

et vers l'intérieur l'aubier (xylème). La coupe transversale de la figure 1.6 permet de distinguer l'aubier et le duramen [113].

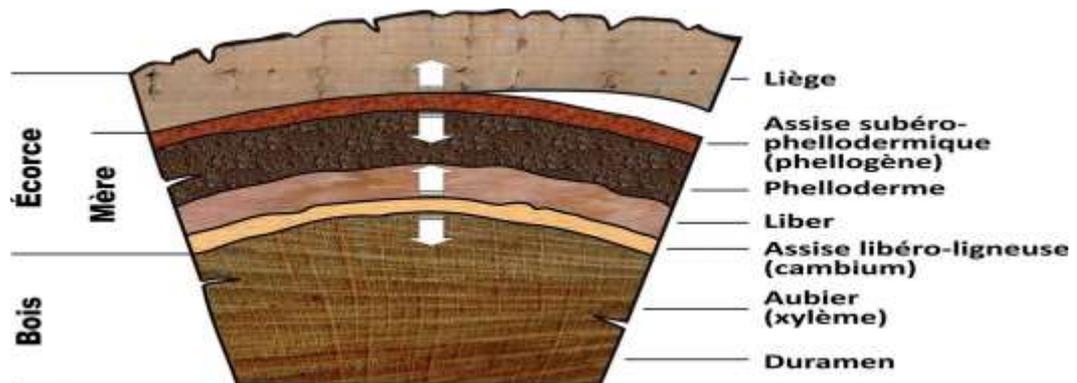


Figure 1.6 : Coupe transversale d'une tige de Chêne-liège [112].

On distingue deux types de liège (Figure 1.7) [113] :

- Le liège mâle : c'est un liège qui se développe sur le tronc et les branches de l'arbre. Il peut atteindre 25 cm d'épaisseur s'il n'est jamais récolté. Il devient compact, siliceux et dépourvu d'élasticité et se crevasse fortement en vieillissant, ce qui ne permet pas de l'utiliser en bouchonnerie mais, peut-être, dans la trituration et la fabrication d'isolants. Le liège mâle est enlevé lorsque les chênes lièges atteignent une circonférence de 70cm.
- Le liège femelle (ou de reproduction): c'est un liège qui se développe après le démasclage. Inversement au liège mâle, il est moins crevasse, plus homogène et plus élastique, ce qui lui permet d'être utilisé dans la fabrication de bouchons.

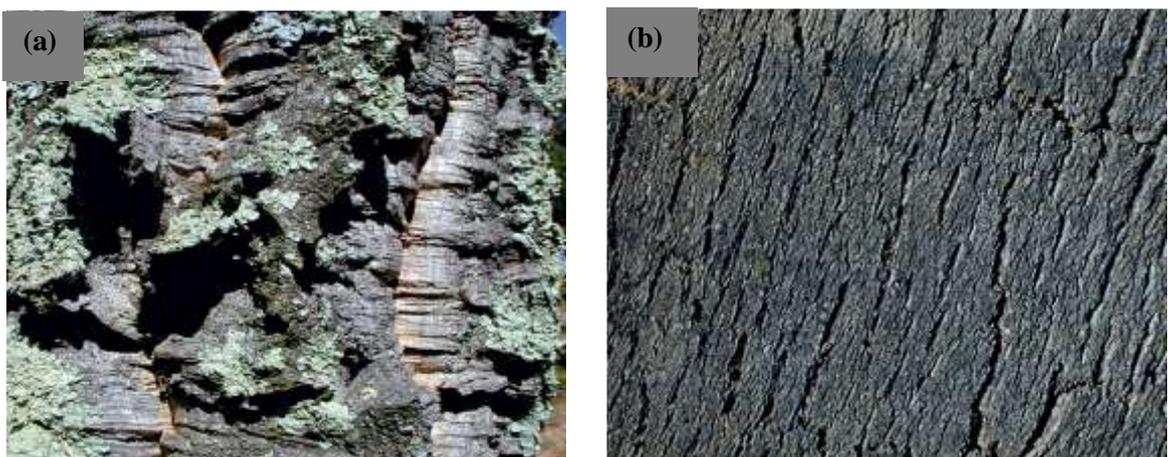


Figure 1.7 : Les différents types du liège : a) Liège mâle, b) Liège femelle [113].

Le liège est, en fait, un tissu végétal composé de cellules fermées donnant au liège une légèreté et une capacité d'isoler la chaleur comme nous le montre la figure 1.8 [114]. Dans un centimètre cube de liège, on retrouve près de 40 millions de cellules et les espaces intercellulaires sont remplis d'un mélange gazeux, identique à celui de l'air [112]. Les tailles des cellules variant de 20 à 40 μm , de forme polygonale dans la direction radiale de l'arbre et de forme rectangulaire dans les directions non radiales (tangentielle et axiale (Figure 1. 8) [115, 116]. L'épaisseur de la paroi cellulaire est d'environ 1 à 2 μm dans toutes les directions. Dehors de cette structure, le liège présente également une série de canaux lenticulaires orientés dans la direction radiale de l'arbre pour transférer l'oxygène, le dioxyde de carbone et l'eau vers l'environnement extérieur [117].

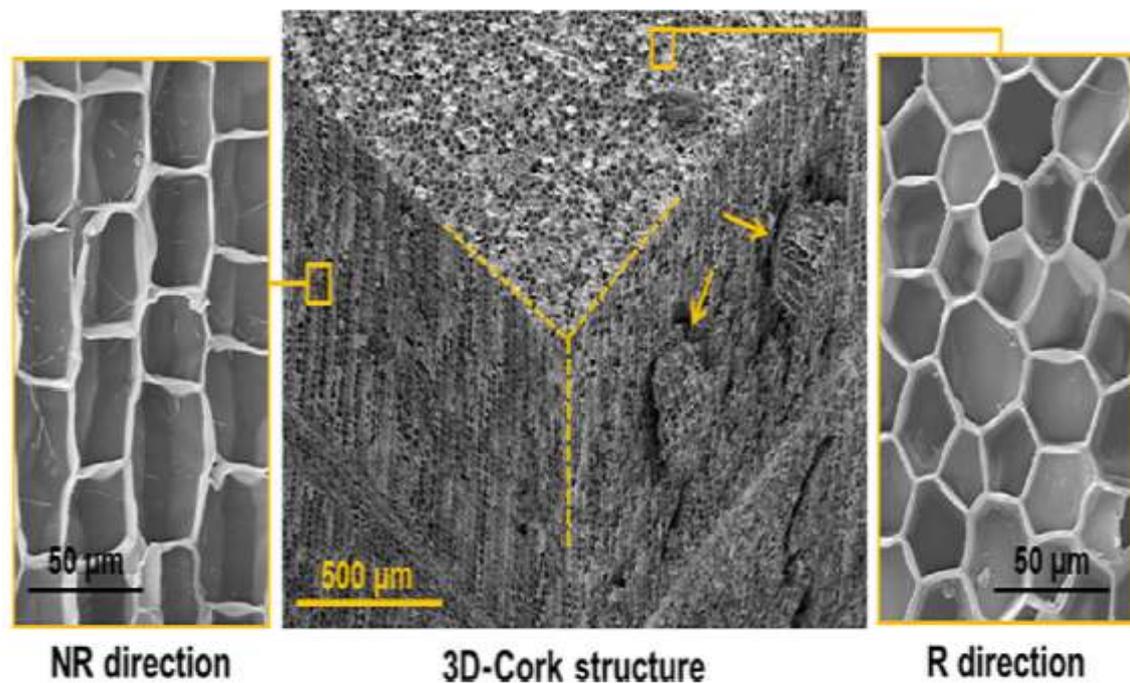


Figure 1.8 : Morphologie du liège obtenue par microscope électronique à balayage montrant en détail la direction non radiale (NR) et direction radiale (R) [118].

Les cellules du liège sont constituées de trois couches de différents polymères agencés de façon précise (Figure 1.9) : la paroi interne primaire est fine et riche en lignine qui joue un rôle de « ciment », la paroi secondaire plus épaisse est formée par l'alternance de lamelles de subérine et de cire et enfin la paroi tertiaire, fine, est constituée de polysaccharides [114].

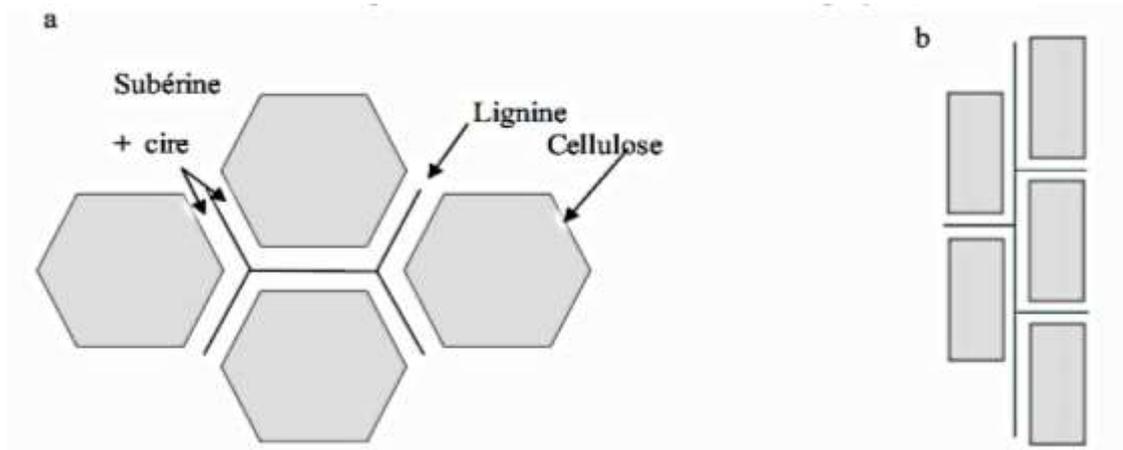


Figure 1.9 : Représentation schématique des cellules du liège avec l'agencement de ses constituants chimiques. (a) section radiale, (b) sections axiale ou tangentielle [114].

Anjos et al. [119] ont mesuré la porosité de la poudre de liège, la porosité la plus élevée est observée pour le haut de gamme, le nombre de pores présents sur 100 cm² est en moyenne de 568±186 dont 47±18 possèdent une surface supérieure à 0,8 mm². Tandis que pour un liège de faible qualité, le nombre de pores pour 100 cm² est de 815±194 dont 176±64 présentent une surface supérieure à 0,8 mm². En général, le liège est un très bon isolant thermique et électrique. Cela est dû au gaz contenu dans les cellules. De plus, les petites tailles des cellules lui permettent de minimiser les transferts thermiques par convection. Cependant, les propriétés des cellules du liège dépendent de leur composition, de leur température et de leurs dimensions qui peuvent changer après un traitement thermique. De ce fait, la conductivité thermique augmente avec la température du matériau.

Comme tout matériau naturel, le liège présente également une grande variabilité chimique qui est affectée par la région où l'arbre est planté [120] et par les conditions météorologiques auxquelles l'arbre a été soumis lors de la formation de son écorce, c'est-à-dire du liège [121]. De plus, la composition chimique va être différente, non seulement, d'un arbre à un autre mais, également, au sein d'un même arbre entre le haut et le bas du tronc. Le liège est constitué majoritairement de subérine, de lignine, de polysaccharides et d'extractives [115, 120].

Le premier récolté est appelé liège vierge (brut) qui n'a subi aucun traitement après la récolte ; il est irrégulier dans sa structure, épais, dense et rugueux et lors de la seconde production, le liège présente une structure déjà plus régulière, plus lisse et intacte. La meilleure qualité de reproduction du liège appelée « amadia » est obtenue lors de la

troisième récolte et est utilisée pour la fabrication de bouchons. Une grande variabilité de la teneur de constituants chimiques est observée (Tableau 1.5) [119]. La subérine, qui est une structure à base de polyester, est le composant le plus abondant du liège et la lignine ; qui est un polyéther, est le deuxième composant le plus important (Figure 1.10) [118].

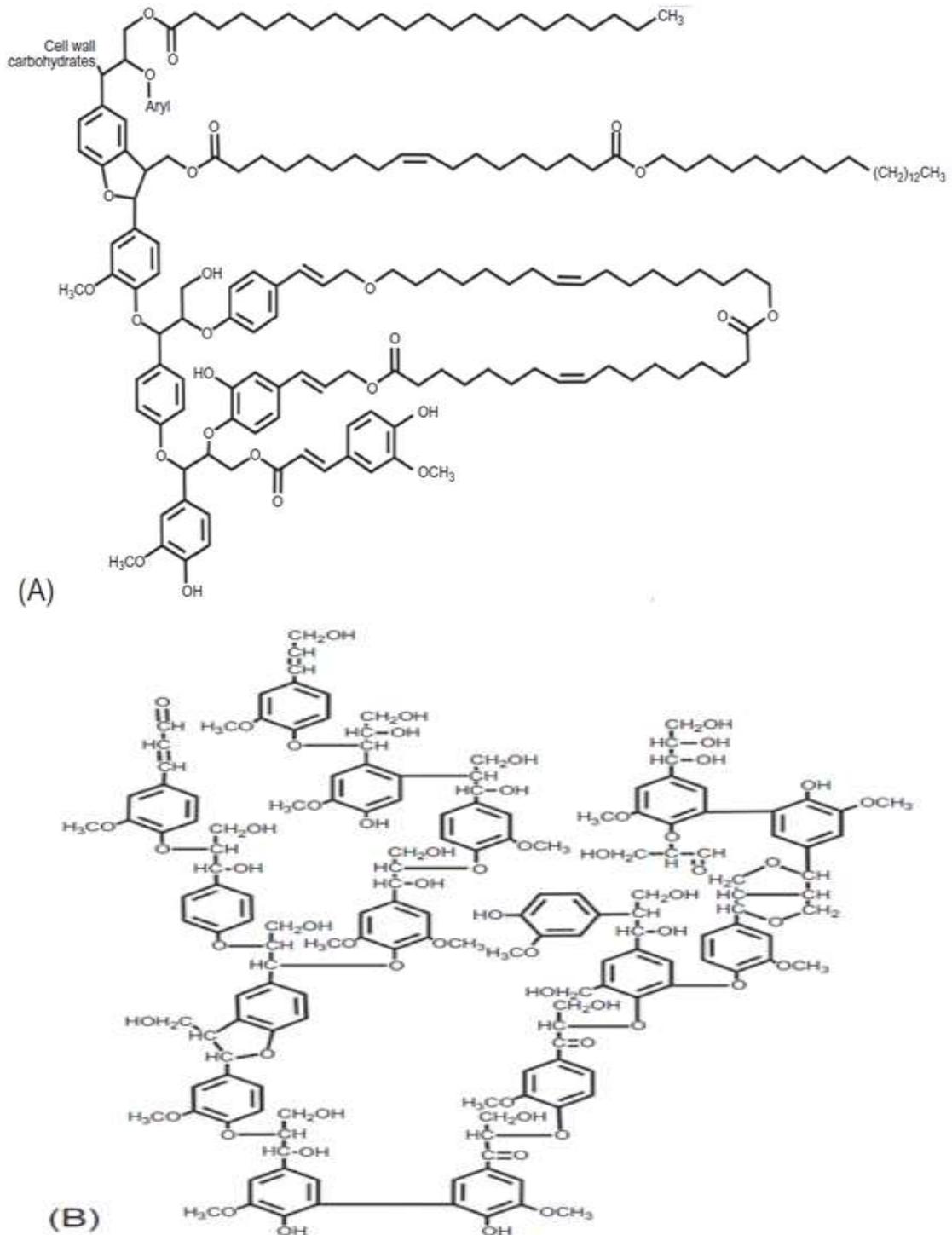


Figure 1.10: La structure chimique deux des principaux produits chimiques du liège : (A) subérine et (B) de la lignine [118].

Tableau 1.5 : Pourcentage massique des différents constituants de la cellule du liège vierge et du liège « amadia ».

Constituants (%)	vierge		Amadia	
	[115]	[119]	[115]	[119]
Subérine	45	45	33.5	33-50
Lignine	21	21-27	26	13-29
Polysaccharides (cellulose et hemicellulose)	13	12-13	25	6-25
Extractibles	19	10-19	13	8,5-24
Cendres	1.2	0,9-5	2.5	1,2-3
Cires	-	-	-	2-7,9
Tannins	-	-	-	1-7
Autres	0.8	0,8	-	6-7

La densité du liège vierge varie entre 160 et 240 kg/m³ par contre le liège de reproduction varie entre 120 et 180 kg/m³ [116]. Selon Silva et al. [115] et Pereira et al. [116], la densité du liège peut varier entre 110 et 300 kg/m³ selon l'âge, les différents traitements subis par le liège et la proportion de lenticelles (pores). Cette variation dépend des dimensions des cellules. En effet, on peut avoir des parois épaisses et lourdes qui correspondent à une densité élevée [122] et à des cellules de petite hauteur (15 µm) et, sous l'effet d'une forte compression (55 MPa), cette densité peut atteindre 1250 kg/m³ [115].

Les propriétés physico-chimiques lui confèrent des performances en matière d'isolation thermique et électrique, d'obturation, de frottement, de résistance à l'usure et de barrière aux liquides et aux gaz. Ces propriétés sont liées à sa densité, à sa teneur en eau, à ses propriétés thermiques et électriques, à ses propriétés de surface (mouillabilité, énergie de surface) et à son comportement mécanique. Selon Rosa et Fortes [123], les effets d'un chauffage à haute température (soit 300°C) à la vapeur d'eau vont réduire les propriétés physiques et mécaniques du liège.

Anjos et al. [119] ont déterminé le module d'élasticité et ont montré que le module de Young diminue quand la teneur en eau augmente et cette dernière est immédiate lorsqu'il est immergé dans l'eau à 100°C. De plus, la présence de pores (lenticelles) semble avoir également un léger effet sur le module de Young, mais, il est plus difficile à mettre en évidence. Par contre, la présence des lenticelles est très bénéfique pour le comportement du

liège sous tension puisque des cassures peuvent apparaître le long de ces lenticelles (dans la direction perpendiculaire à la tension) quand le liège est placé sous une contrainte de 1 MPa dans la direction axiale soit une élongation d'environ 5%. Concernant la compression, selon cette étude, plus le liège est dense, plus il est résistant à la compression.

Les propriétés du liège sont à la base de son utilisation généralisée comme bouchons pour le vin de bouteilles. Dans ce cas, sa capacité à limiter l'échange d'oxygène à des niveaux appropriés pour le vieillissement du vin et à ne pas favoriser son oxydation prolongée a été un facteur clé pour maintenir le liège comme le meilleur choix pour les bouchons [124]. En effet, c'est l'application la plus importante et la plus répandue, cependant, il existe d'autres utilisations générant des matériaux et des produits uniques, tels que les revêtements de sol, les revêtements muraux et les panneaux d'isolation acoustique et thermique [115]. Les industries développent ces matériaux avec du liège en raison de sa capacité à absorber les impacts pour réduire la propagation des ondes acoustiques et pour limiter l'échange de chaleur [118].

Ces matériaux sont très compétitifs en termes de performance par rapport aux synthétiques. Mis à part ces performances techniques, le liège présente l'avantage majeur d'être une matière naturelle, dont la récolte ne nuit pas à l'arbre et, au contraire, favorise sa régénération. Le liège est l'un des meilleurs matériaux naturels avec des propriétés d'isolation acoustique élevées en raison de sa structure poreuse. De plus, le liège présente une résistance élevée à l'eau en raison de sa nature hydrophobe qui peut être considérée comme un avantage significatif par rapport à d'autres matériaux lignocellulosiques, comme le bois [118].

Les peuplements naturels de chêne-liège s'étendent sur sept pays au nord et au sud de la Méditerranée, dont quatre européens : Portugal, Espagne, France, Italie, et trois nord-africains : Algérie, Maroc, Tunisie (Figure 1.11) [113]. La première récolte du liège est exécutée 25 ans après la plantation des chênes et, par la suite, systématiquement, tous les 9 ans [125].



Figure 1.11 : Distribution mondiale du Chêne-liège [113].

Le potentiel de production de liège brut en Algérie correspond à une superficie de chêne-liège de plus de 400 000 ha, censé donner une production de plus de 300 000 q/an. Il faut rappeler que l'Algérie a produit par le passé plus de 450 000 q de liège brut et exporté autant vers l'Europe. Les récoltes historiques de l'Algérie la plaçaient en troisième position dans le monde après le Portugal et l'Espagne, les autres pays du Maghreb venant bien loin [57]. Cependant, la production du liège est relativement faible ces dernières années mais grâce à une meilleure gestion et une exploitation plus rationnelle, la production nationale peut connaître une sensible augmentation à court terme. Ce matériau végétal existe dans neuf wilayas du Nord-Est et du Nord-Ouest du pays. La répartition des surfaces occupées par le chêne-liège dans les différentes wilayas est comme suit [112]:

- Béjaia : 33 943 ha soit 10.5 % des superficies du territoire de la wilaya
- Jijel : 79 % des superficies forestières totales
- Skikda : 77 % des superficies du territoire de la wilaya
- Guelma : 10 600 ha soit environ 55 % des superficies
- El Taref : 52581 ha soit 67 % des superficies forestières
- Souk Ahras : 18 % de la superficie forestière totale
- Annaba : Chêne liège parfois en mélange au Chêne Zéen occupe près de 70 % des superficies forestières

Le liège récolté est transformé et commercialisé sur le marché national puis exporté par l'entreprise publique Générale Liège d'Algérie ex- Entreprise National de Liège. Cette entreprise est constituée de sept unités industrielles, implantées à travers les wilayas d'Alger, Béjaia, Jijel, Skikda et Annaba. Ces unités qui fabriquent des éléments isolants et d'autres éléments à base de liège (Bouchons naturels, Bouchons agglomérés, Agglomérés noirs, Agglomérés blanc...etc.), sont implantées à travers sept wilayas. Ces unités dégagent à différents stades de production 1900 tonnes/an de granulés de liège et 5600 tonnes/an de poudre de liège (Figure 1.12) [13]. On constate que les déchets de poudre sont plus importants par rapport aux granulats. Effectivement, selon Fernandes et al. [126], l'industrie du liège produit plus de des quantités de poudre que de granulats de liège, résultant des étapes finales et des étapes de transformation du liège ou résultant de produits en liège existants comme les produits de revêtement de sol en liège.

Dans notre pays, les déchets obtenus sont jetés et/ou incinérés dans des décharges publiques. Par conséquent, il est nécessaire de valoriser ces déchets dans le domaine de la construction. On peut concevoir des composites légers et isolants. Ces composites peuvent trouver une large utilisation dans l'industrie du bâtiment. L'exploitation de ces déchets est une solution aux problèmes énergétiques dans les constructions, par la réduction ou l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'habitat, et environnementaux par l'élimination ou la réduction de la pollution.



Figure 1.12 : Les déchets du liège: (a) Jijel (liège cru), (b) Bejaïa (granulés expansés).

1.10 Contexte réglementaire concernant les déchets en Algérie

Les déchets sont générés de façon continue, en quantité croissante, avec le développement des modes de vie des sociétés si bien qu'il a fallu les réglementer. En Algérie, des lois ont apparues sur la gestion, le contrôle et l'élimination des déchets ainsi que sur la protection de l'environnement [31, 127]. D'autres lois ont été mises en place afin d'être en conformité avec les engagements internationaux auxquels l'Algérie a souscrit [128- 130]. Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (MATE) a mis en place un plan national de gestion des déchets spéciaux (PNAGDES) et un plan de Wilaya de gestion des déchets spéciaux (PWAGDES). Mais malgré tous les efforts déployés et cet arsenal juridique, des insuffisances sont constatées à ce jour. Notre pays n'a pas encore réussi à concilier développement et prévention du milieu. En effet, l'activité industrielle continue de propager des déchets et contribue ainsi, à la dégradation de la qualité de l'environnement (air, sol, eau) dans le voisinage des localités où se trouvent implantées certaines grandes industries telles que les cimenteries, les centrales électriques, les complexes chimiques, les pétrochimiques... etc.

1.11 Conclusion

Les informations récoltées, dans cette partie, montrent que les activités humaines génèrent différents déchets qui perturbent les milieux naturels, eau, atmosphère, sol et par conséquent la santé publique. En effet, le rejet continu des déchets industriels non traités, qui contaminent tout l'écosystème, et l'exposition continue à des substances chimiques peuvent provoquer des anomalies chromosomiques. Les efforts déployés restent insuffisants ce qui continue de nuire à l'environnement et à la santé publique. Par conséquent, une grande attention doit être accordée aux projets de valorisation de certains déchets non nocifs et à l'élimination des déchets nocifs. Cependant, il reste beaucoup à faire dans le domaine du recyclage car on assiste à l'élimination des déchets non nocifs par des méthodes ancestrales telles que l'incinération. Dans ce contexte, ces déchets peuvent être exploités et valorisés dans la confection de nouveaux matériaux isolants utilisables dans les constructions, ils peuvent, également, être des sources d'énergies renouvelables.

CHAPITRE 2

COMPOSITES A BASE DE MATÉRIAUX VÉGÉTAUX

2.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons une étude bibliographique sur les différents composites à base de sous-produits d'origine végétale, ainsi que leurs performances mécaniques et thermo-physiques. Ensuite, nous allons exposer les problèmes potentiels qui peuvent se présenter lorsque ces matériaux sont mélangés avec les ciments. Enfin, une synthèse des travaux de recherche réalisés sur les composites à base de déchets de liège sera présentée.

2.2 Contexte : pourquoi, comment ?

La COP 26, qui se tiendra du 1^{er} au 12 novembre 2021 à Glasgow, en Écosse, sous l'organisation du Royaume-Uni, en partenariat avec l'Italie, vise à ce que les pays participants présentent leur plan national de réduction des émissions de gaz à effet de serre et à promouvoir la politique dite « le développement durable ». Cette politique consiste en un développement économique par la réduction de la consommation d'énergie en utilisant des ressources locales avec un meilleur respect des équilibres écologiques et sociaux [1].

L'industrie de la construction consomme de grandes quantités d'énergie et donc il y a nécessité de développer de nouveaux matériaux isolants pour être utilisés dans les constructions. Comme le climat en Afrique du Nord est chaud en été et froid en hiver, le besoin pour le chauffage et le refroidissement est important. C'est pourquoi la consommation d'énergie dans la construction de bâtiments représente environ 40% de l'énergie totale utilisée [1]. Notre pays a pris ses dispositions en élaborant une loi sur la maîtrise de l'énergie afin de préserver nos ressources naturelles [131]. En effet, de bonnes performances thermiques des matériaux de construction baissent la consommation d'énergie des bâtiments et diminuent les émissions de GES et permettent, ainsi, de participer à la politique de développement durable. De ce fait, une loi a été adoptée dans le but de mettre en place une réglementation thermique dans les bâtiments. [132]. En effet,

deux règlements ont été mis en place par le Centre National d'Etude et de Recherche Intégrées du Bâtiment (CNERIB) [133, 134].

Le béton de granulats végétaux a généralement des caractéristiques de légèreté et est associé à une meilleure isolation thermique et acoustique, attribuées aux micropores des granulats [135]. Ces derniers sont renouvelables ce qui peut réduire les coûts de construction [136]. En effet, le recyclage de ces granulats, qui sont des ressources localement abondantes, est une technique intéressante pour réduire la consommation d'énergie dans les constructions, à faible coût, tout en préservant l'environnement.

2.3. Compatibilité des composites cimentaires à base de matériaux d'origine végétale

La composition chimique des matériaux végétaux rend leur compatibilité avec le ciment beaucoup plus complexe suite aux interactions pouvant exister entre ces granulats hydrophiles et le ciment [137]. En effet, l'inconvénient principal de l'exploitation de ce type de végétaux est la vulnérabilité à la décomposition chimique que présentent un certain nombre de ses constituants chimiques, dans l'environnement alcalin du ciment [138].

Les principaux constituants de la coque de palmier, de noix de coco et d'autres biosourcés sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine [139], et les composants chimiques sont principalement composés de C, H, N et O [140]. Le sucre libéré par la matière organique des matériaux d'origine végétale peut diminuer le pH de la pâte de ciment et affecter l'hydratation du ciment [141-143], à cause de la grande capacité de rétention d'eau des granulats [144, 145], générant, ainsi, de faibles propriétés mécaniques du béton léger à base de matériaux végétaux et empêchant la prise du ciment [146-148]. Par conséquent, ces matériaux doivent être préalablement traités et si l'interface fibre ou granulat-matrice a été traitée chimiquement, cela minimise l'effet hygroscopique et augmente la liaison interfaciale [149]. Plusieurs solutions sont proposées qui consistent en l'introduction d'accélérateurs de prise du ciment. Afin de contrecarrer l'effet néfaste des extractibles de végétaux, on préconise l'emploi du chlorure de fer, d'étain ou d'aluminium à 5% de la masse. Il est même possible de neutraliser les effets des extractibles à l'aide de chlorure de calcium sans altérer les propriétés mécaniques [150]. Dans un travail de recherche réalisé par Agopyan et al. [100], les fibres de coco ont été traitées dans une solution saturée d'hydroxyde de calcium ($\text{pH} \approx 12$) à la température de laboratoire, ce qui les rend plus résistantes à l'attaque alcaline. Par contre, les fibres traitées avec une solution d'hydroxyde

de calcium qui contenant de la chaux libre, pendant six mois, avec un PH égal à 12.6, peuvent engendrer une perte de 3,5% de la contrainte initiale. La modification de la matrice cimentaire des composites par l'ajout de cendre de cosse de riz (RHA) et de laitier a été également effectuée. Une amélioration des performances mécaniques a été observée pour les composites avec du laitier à long terme. Blankenhorn et al. [149] ont proposé d'étudier les composites à base de fibres provenant du recyclage de papier d'emballage et de produits de papiers (feuillus). Ces fibres ont été traitées avec une solution aqueuse d'acrylique ou avec une solution aqueuse d'alkylalkoxysilane avant d'être employées dans une matrice cimentaire. Les résultats ont montré que les fibres traitées avec une solution d'acrylique ou une solution d'alkylalkoxysilane sont plus résistantes à la détérioration, lors du cycle d'humidité, que le ciment seul et les fibres de bois non traitées. Dans la même étude, l'effet du silicate de sodium (N), du silicate de potassium (K) et le niveau de traitement du silane (Si) sur les fibres de journaux recyclés et sur les fibres de feuillus ont été également étudiés. Pour les composites à base de fibres de papier recyclé, le traitement avec le silicate de sodium (N) a donné des valeurs de compression plus élevées par rapport aux autres traitements chimiques. Cependant, pour les fibres feuillues les résultats sont différents. Néanmoins, les valeurs obtenues de la résistance à la compression des fibres feuillues traitées sont comparables pour tous les traitements étudiés. Le même traitement de surface a été étudié par Coatanlem et al. [98], selon eux on peut aussi traiter les matériaux d'origine végétale par d'autres solutions chimiques telles qu'une solution alcaline [151], de l'alcool polyvinylique [152], etc.

L'influence du traitement à la chaux hydraulique et suivi par de l'eau bouillante a été également étudiée par Ledhem et al. [72]. Un béton léger argileux à base de bois a été examiné. Il semble qu'une bonne compatibilité a été observée. En effet, les deux traitements sont la méthode la plus efficace pour augmenter la résistance mécanique et diminuer les variations dimensionnelles du composite. La variation maximale enregistrée après le traitement est de 3.5 mm/m. Cette technique de traitement permet de réaliser un excellent compromis entre les propriétés physiques et la densité, et par conséquent, la conductivité thermique. Ce procédé technique permet également de préserver quelques propriétés très intéressantes tout en se conformant à la RILEM qui recommande que le béton léger possédant une résistance R_c supérieure à 3,5 MPa doit avoir un coefficient de conductivité thermique λ inférieur à 0,7 W/m^{°K}.

Bederina et al. [153] ont exploré deux composites ciment-bois-sable (rivière et dune). La figure 2.1 indique que, généralement, les copeaux adhèrent bien à la matrice (ciment-charge-sable). Cependant, des défauts autour des granulats de bois ont été observés, dus au rétrécissement des copeaux de bois qui dépend de l'évaporation de l'eau renfermée dans les copeaux de bois.

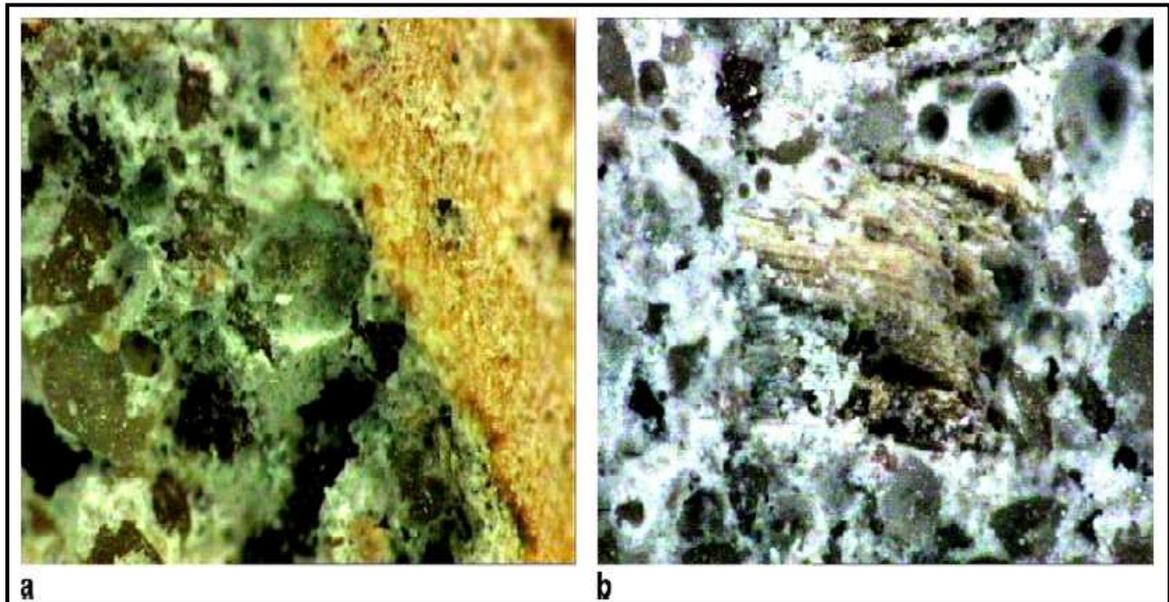


Figure 2.1 : Micrographe optique du béton en bois de sable. (a) Béton avec RS ($B= 20 \text{ kg/m}^3$) et (b) béton avec le DS ($B=20 \text{ kg/m}^3$) [153].

La microstructure, la porosité et la perméabilité du béton à base de matériaux d'origine végétale sont plus élevées que celles du béton normal, et par conséquent, la résistance aux cycles de gel-dégel est nettement inférieure. Polat et al. [154] ont montré que les propriétés de retrait au séchage du béton de matériaux biosourcés isolants devraient être étudiées et améliorées avant son application dans une structure. Par contre, on constate une résistance au cycle gel-dégel due à la porosité élevée de ces composites.

La compatibilité entre les granulats de liège et le ciment a été l'objet d'une étude réalisée par Barnat-Hunek et al. [155]. Une zone de transition inter-faciale entre les granulats de liège et la pâte de ciment-chaux, ainsi qu'une structure composée de multiples micropolyèdres poreux a été observée dans le liège. Les résultats montrent que le composite C1L (10% liège, 30% chaux et 30% ciment) est riche en portlandite et en ettringite. La phase C-S-H est, également, devenue cristallisée. Le granulat de liège adhère bien aux mortiers C1L et C2S (20% liège, de 30% sable et 30% ciment). En revanche, dans le cas des

mortiers C2L (20% liège, 25% de chaux et 25% du ciment), des micro-fissures entre le granulat et la pâte de ciment ont été observées. De nombreux pores d'air de 200 à 527 μ m sont présents dans la structure de composite C2L. Les pores d'air et les fissures entre le liège expansé et la pâte de ciment auraient pu influencer l'augmentation de la porosité, ainsi que la baisse de la durabilité et de la résistance au gel de ce composite. L'absence de fissures ou pores d'air et une bonne adhérence entre le sable de quartz ou le granulat de liège et la pâte de ciment-chaux ont été constatées. Cela peut avoir deux conséquences, une durabilité élevée et une bonne résistance au gel du composite C2L.

Le traitement de surface pour l'amélioration des performances du béton léger à base de matériaux d'origine végétale est limité car la matière organique existe toujours dans les matériaux végétaux. De plus, certains traitements de surface comme l'huile de bois [156] peuvent affaiblir la liaison entre les granulats et le mortier. Par rapport au traitement de surface, le traitement thermique peut décomposer complètement la matière organique des agrégats [157, 158] et éliminer leurs effets négatifs sur le béton léger d'origine végétale. L'incorporation de charbon de bois, traité thermiquement, dans le béton offre une résistance mécanique plus élevée, par exemple, l'ajout de charbon de bois, à une température de pyrolyse (décomposition thermique) de 300-500 °C dans le mortier, augmente la résistance à la compression de 40% à 50% par rapport au mortier ordinaire [159, 160]. Wu et al. [8] ont montré que les granulats végétaux traités thermiquement augmentent la résistance à la compression du béton de 33,8 à 53,6% par rapport aux agrégats non traités. De plus, ce traitement peut améliorer la qualité de surface des granulats végétaux, leur adhérence au mortier et, de manière considérable, la résistance mécanique [8]. Durant le traitement, une élimination des microbiennes et une décomposition des nutriments sont obtenues, ce qui donne à ces granulats une excellente résistance à la biodégradation [161]. En effet, pendant le processus de pyrolyse, les principaux composants de l'hémicellulose, de la cellulose et de la lignine des matériaux végétaux sont progressivement décomposés et transformés en phase de charbon à différentes plages de température. La température de pyrolyse est associée à des phénomènes physiques, tels que la formation de pores, la carbonisation du squelette du charbon et la libération de substances volatiles, etc. [162] et influe considérablement sur les propriétés physico-chimiques des matériaux biosourcés [163]. Pour la plupart des matériaux lignocellulosiques, l'hémicellulose se décompose lorsque la température varie de 220 à 315 °C alors que la cellulose et la lignine se décomposent respectivement dans

l'intervalle de 315 à 400 °C et 160 à 900 °C [164]. L'augmentation de la température de pyrolyse réduit non seulement la taille des pores des granulats végétaux, mais augmente également la stabilité dimensionnelle et l'activité pouzzolanique [165, 166], et contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques du béton des matériaux lignocellulosiques. Bien que le traitement thermique nécessite une consommation d'énergie (<500°C) [167], les granulats naturels d'origine végétale traités thermiquement sont encore relativement économes en énergie [168]. La consommation d'énergie des granulats d'origine végétale traités thermiquement peut être minimisée en utilisant la dernière technologie de pyrolyse. Par exemple, le traitement hydrothermal peut économiser plus de 50% d'énergie par rapport au traitement thermique à sec [169]. Par conséquent, le traitement thermique reste une méthode relativement durable et économe en énergie pour le traitement des granulats d'origine végétale.

2.4 Propriétés mécaniques des composites à base de matériaux d'origine végétale

L'addition des matériaux d'origine végétale dans la matrice cimentaire diminue les propriétés mécaniques. Celles-ci diffèrent d'un végétal à l'autre ; en effet, elles dépendent de plusieurs facteurs comme la composition chimique, la morphologie différente, mais aussi des proportions et des méthodes de fabrication. Les travaux de recherche sur les composites ciment-matériaux d'origine végétale sont extrêmement larges. En effet, beaucoup d'études en littérature font la référence à ces matériaux.

Les études de Benchikou [170] sur les composites de fibres de cellulose ont contribué à mettre en évidence l'effet des conditions de cure des fibres sur la résistance des composites. Les résultats montrent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la concentration de fibres pour les deux cas sèche et sec. Pour la résistance à la traction, de matériau composite conservé à l'air libre donne une résistance inférieure à celui conservé dans l'eau. L'effet de la longueur des fibres de durian et de noix de coco a été étudié par Khedari et al. [171]. Dans cette étude, les blocs à base de déchets de noix de coco donnent une résistance à la compression de 2,4 MPa et une densité de 958 kg/m³. Par contre, les blocs à base de durian donnent une résistance à la compression d'environ 3,3 MPa et leur densité est d'environ 1456 kg/m³. Les résultats expérimentaux montrent également que la résistance à la compression augmente avec la longueur des fibres. La résistance à la compression est inférieure à celle du mortier témoin, mais elle

reste supérieure à 2 MPa [172]. Par conséquent, il peut être efficace pour la fabrication des blocs en maçonnerie non porteurs [173].

Agopyan et al. [100] ont utilisé des sous-produits de noix de coco et de pulpe d'eucalyptus pour la fabrication de panneaux et la production de tuiles. Les fibres de noix coco ont une teneur de lignine et d'hémicellulose plus élevée que le sisal. Par conséquent, la lignine réduit les performances mécaniques des fibres.

Moslemi et Lim [174] ont étudié non seulement les propriétés d'un mur et des tuiles en béton de bois contenant du laitier de haut fourneau mais aussi leurs comportements en utilisation intérieure. Les bétons de mur présentent une résistance à la compression de 6.48 MPa, le module de Young de 9.55 GPa et de 0.167 pour le coefficient de Poisson. Les tuiles élaborées se dégradent et deviennent sombres au bout de 60 mois et la performance mécanique chute de 65% à 80%, cette chute est attribuée à une combinaison de différents processus tels que la carbonatation de la matrice et la dégradation de la zone de transition. Par contre, Ledhem et al. [72], Al-Rim et al. [73] et Benmalek et al. [175] ont additionné du bois aux bétons argileux. En effet, les composites obtenus peuvent améliorer les caractéristiques d'isolation thermique, et cela est dû à la réduction de densité. Ces résultats ont été confirmés par la RILEM [176]. Il est rapporté que plus la teneur en sciures de bois dans les composites ciment-argile est élevée, plus ceux-ci présentent une diminution de la résistance à la compression. Il en est de même pour le module d'élasticité, alors que la résistance à la flexion augmente légèrement [73].

Bouguerra et al. [177] ont ajouté également de l'argile dans le béton de bois et les résistances obtenues à la compression varient entre 7 et 24 MPa et les masses volumiques entre 1178 et 1540 kg/m³. Pour déterminer l'influence des fines argileuses sur le comportement mécanique, Benmalek et al. [175] ont introduit deux argiles dans les composites à base de granulats de bois (Agrelith C), le premier contient principalement de la Kaolinite et peu de quartz et le deuxième contient environ 50% de Quartz, Kaolinite...etc. Les proportions utilisées sont: 25% de ciment(C)+50% de fines minérales(F)+25% de bois (B), soit un rapport constant F/C=2. Les résistances mécaniques obtenues sont entre 2,0 et 2,2 MPa (masse volumique variant entre 700 et 740 kg/m³) et sont comparables à celles des bétons de bois usuels. Ils avancent que ces performances mécaniques dépendent des caractéristiques des fines et de la nature de la matrice qui est

primordiale pour la stabilité dimensionnelle du composite. Quelques études ont été menées sur l'effet de l'addition de différents types de liège sur les propriétés mécaniques. EL Bakkouri et al. [178] ont préparé un béton à base de déchets de liège dans une matrice cimentaire. Le rapport entre le liège et le béton (L/B) varie entre 0,8 et 3,2% pour les éprouvettes destinées à la résistance mécanique. Deux rapports ont été pris pour mesurer la conductivité, L/B égal à 0,5 et L/B égal à 0,7. Les résultats des essais sur la conductivité thermique sont donnés par la courbe présentée sur la figure 2.2. La conductivité thermique du matériau composite à base de liège est influencée par l'humidité : plus le matériau est humide, plus son pouvoir d'isolation est faible [178].

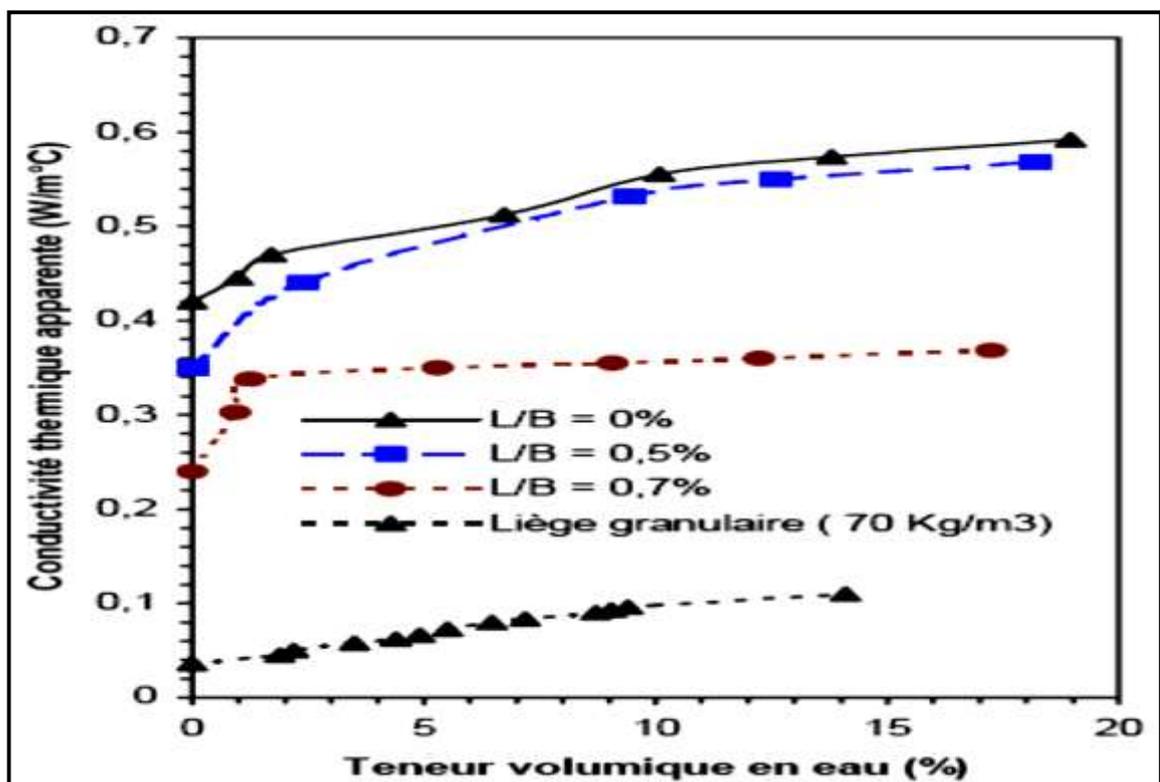


Figure 2.2 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la teneur volumique en eau [178].

L'addition du liège diminue à la fois, la résistance mécanique et la conductivité thermique du composite. Dans cette étude, la loi de la variation de la résistance à la compression en fonction de la conductivité thermique apparente a été dégagée (Figure 2.3).

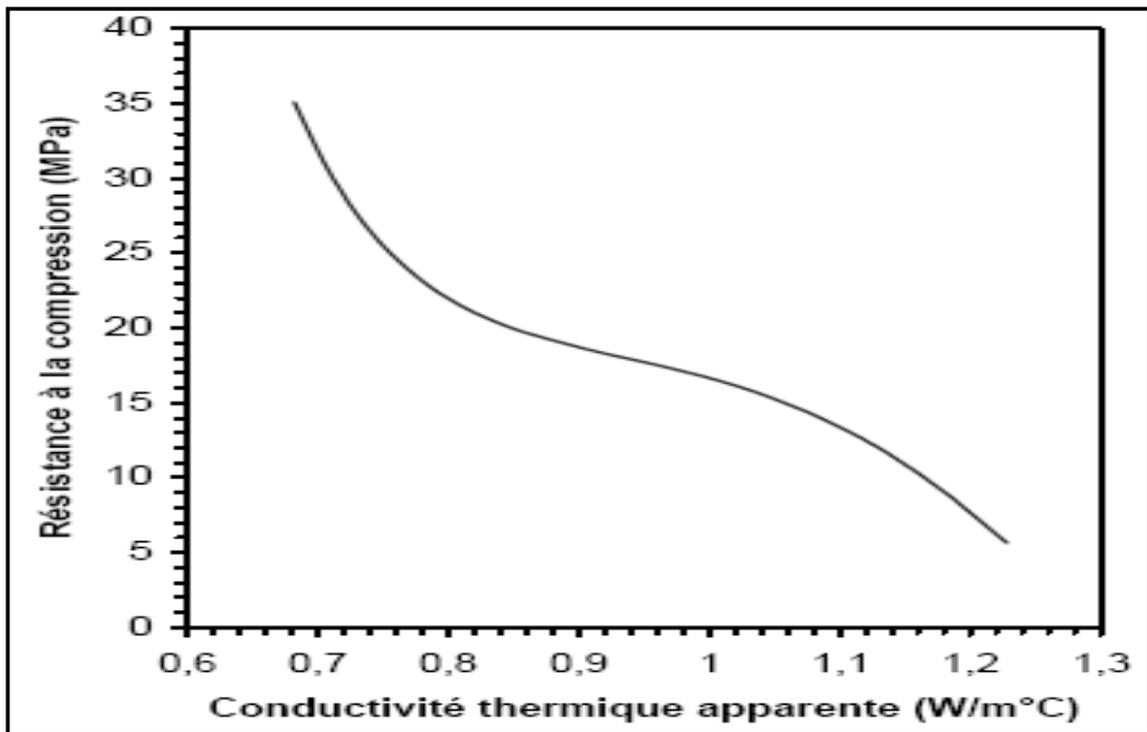


Figure 2.3 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la conductivité thermique apparente [178].

Novais et al. et Borges et al. [6, 179] ont examiné l'impact des cendres volantes substituées au ciment sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des composites ciment-liège. En effet, des mortiers de revêtement à base de ciment et de granulats de liège expansé, comme remplacement du sable, et un matériau avec différentes additions de cendres volantes ont été réalisés. L'ajout de cendres volantes n'a aucune influence sur les propriétés mécaniques [179]. De plus, une très faible densité, une faible conductivité et une absorption acoustique élevée ont été obtenues [6]. Matos et al. [180] ont montré la possibilité d'utiliser la poudre de liège comme substitut des fines dans les mélanges de béton auto-plaçant. Cela a permis d'évaluer la résistance (C30/37) et la durabilité de ce nouveau matériau. Les résultats montrent un bon niveau de résistance et une durabilité adéquate pour les applications courantes.

Dans une autre étude, le liège est mélangé avec du gypse afin de confectionner un nouveau composite [181]. Le composite est composé de quatre types de liège, granulats de liège d'hiver (GT), granulats de liège d'été (Vbg) de comté Valderrey, granulats de liège d'été de comté Morena (SBG) et les granulats de liège d'hiver et du nettoyage de forêt (PCG). Deux séries d'essais ont été réalisées en mélangeant 80% de gypse et 20% de liège avec un rapport Eau / Ciment 0,8 et 0,6 respectivement. Les résultats de ces travaux montrent que

la résistance à la compression de la série 1 est plus élevée que celle de la série 2 excepté pour les composites fabriqués en utilisant des granulats de liège PCG. Ce liège contient, en effet, beaucoup de petites fibres végétales qui contribuent à l'augmentation de la résistance mécanique du composite gypse-liège.

La combinaison de deux liants a été également mélangée avec du liège. Dans les travaux réalisés par Barnat-Hunek et al. [155], le ciment et la chaux hydratée ainsi que les granulats de liège expansé ont été mélangés en pourcentage. Les composites étudiés contiennent 10% et 20% de liège expansé de dimension 0.5/2mm. En effet, trois spécimens ont été réalisés : C1L désigne les composites avec 10% de granulats de liège, 30% de chaux hydratée et 30% de ciment CEMI32.5R; C2L renvoie aux composites avec 20% de granulats de liège, 25% de chaux hydratée et 25% de ciment; C2S correspond aux composites comprenant 20% de granulats de liège, 30% de sable de diamètre 0/2mm et 30% de ciment. Les résistances mécaniques ont été diminuées avec l'addition du liège. Le composite C2S, avec le sable, a les propriétés mécaniques les plus élevées. L'augmentation du liège, en double, réduit de moitié la résistance à la compression du composite, cela est valable pour le même liant. En revanche, pour le composite contenant 20% de granulats de liège, et du sable au lieu de la chaux, la résistance à la compression est supérieure à 11%, tandis que la résistance à la flexion est supérieure à 20,4% [155].

Dans une étude réalisée par Gama et al. [3], le liège a été utilisé afin d'améliorer les propriétés des mousses en polyuréthane imprimées en 3D. En effet, les résultats préliminaires obtenus ont été satisfaisants. L'addition de liège dans les mousses PU diminue à la fois la densité, la conductivité thermique et la rigidité des composites sans, pour autant, affecter la stabilité thermique des composites. Les résultats suggèrent que l'ajout de liège ne peut pas compromettre les performances des mousses polyuréthane (PU) imprimées en 3D. Enfin, au-delà de ces propriétés thermiques, le comportement élastomère des mousses imprimées en 3D réalisées leur attribue de nombreux champs d'application en combinant deux paramètres essentiels: isolation thermique et propriétés d'amortissement.

Plusieurs relations empiriques du type: $R_f = K(R_c)^R$, entre les résistances de compression et de traction, ont été proposées [53]. En effet, les résultats expérimentaux des résistances mécaniques (compression-flexion) sont conformes à cette expression. Les résistances d'écrasement à la compression simple indiquent que, jusqu' au contenu approximatif de

35% en bois (équivalent à une densité sèche apparente d'environ 600 kg/m^3), ces matériaux satisfont les critères de la classe III de RILEM d'isolation des bétons légers c'est-à-dire la résistance à la compression $R_c > 0,5 \text{ MPa}$ et la conductivité thermique $\lambda < 0,3 \text{ W/m.K}$ [182].

Moslemi et Zhengtian [150] ont proposé une relation empirique (2.1) pour les bétons légers où E et R sont le module d'élasticité et la résistance à la compression respectivement exprimés en MPa et d (sans unités) est la densité du matériau. L'analyse des résultats obtenus avec cette formule a donné un coefficient de corrélation $r=0,96$, quant au rapport entre le module d'élasticité et la densité des matériaux étudiées, il peut être évalué par la relation suivante :

$$E = 1600R^{0,5}d^{1,7} \quad (2.1)$$

2.5 Comportement des composites vis-à-vis de l'eau et des variations dimensionnelles

Plusieurs recherches sur les composites végétaux ont été réalisées dans lesquelles on s'accorde sur la nécessité d'étudier leur comportement vis-à-vis de l'eau et par conséquent les variations dimensionnelles. Selon Benchikou [170], les variations dimensionnelles augmentent avec l'ajout de fibres. Cependant, le gonflement est très faible comparativement avec le retrait trouvé. Cerezo [183] a étudié le comportement des panneaux à base de végétaux vis-à-vis de l'eau et a constaté que les composites posent des difficultés d'utilisation et des variations dimensionnelles importantes qui vont créer des efforts à la structure porteuse (matrice cimentaire ou panneaux de murs à remplir). Elle peut, alors, être détériorée (fissures, déformations...) et offrir un aspect peu attractif donc incompatible avec l'utilisation dans l'habitat [183]. En effet, les panneaux en bois ne sont pas inertes, le bois incorporé dans la matrice du ciment se dégrade progressivement par l'incompatibilité résiduelle entre le ciment et le bois ou par l'agression de l'environnement où il est appliqué. On peut réduire les variations dimensionnelles et augmenter la durabilité des panneaux en bois, soit par la modification des copeaux pour réduire leur hygroscopicité, soit par la modification de la pâte de ciment pour réduire sa perméabilité ou par l'application d'enduits extérieurs pour arrêter le chemin de transport de l'humidité [83]. Dans ce contexte, Fan et al. [184] ont appliqué différents enduits sur la surface des panneaux en bois pour réduire les variations dimensionnelles et augmenter la durabilité des

panneaux. Les panneaux avec enduit ont montré une bonne résistance à la carbonatation et le changement de cycle de l'humidité a montré une efficacité des enduits employés. D'une manière générale, les variations dimensionnelles des panneaux et le taux d'absorption d'humidité sont réduits avec l'application d'enduits. Ces derniers ont maintenu un aspect acceptable après une série de cycles, bien qu'il y ait eu une tendance au jaunissement après des périodes de temps prolongées.

Les propriétés hydriques des bétons à base de granulats d'origine végétale ont été étudiées [185-187]. Il a été montré que ces matériaux peuvent transférer une quantité importante d'humidité et une capacité de stockage élevée. En effet, la capillarité des matériaux poreux peut causer de graves dommages dans les bâtiments. Dans ce cas, la durabilité des matériaux lignocellulosiques est très sensible à l'humidité. Une meilleure compréhension du transfert d'humidité peut, donc, réduire ou empêcher l'endommagement des matériaux composites. En effet, la teneur en humidité conduit à des changements de la conductivité thermique et des propriétés mécaniques [188]. Pour contenir ce phénomène, Al-Mohamadawi et al. [189] et Mboumba [190] ont démontré la capacité du traitement des granulats lignocellulosiques à réduire la quantité d'eau absorbée par l'action capillaire des composés cimentaires préparés à partir de pulpe de lin et de betterave. Ce coefficient capillaire peut être déterminé par une technique expérimentale de Boltzmann basée sur des mesures gravimétriques de l'absorption capillaire de l'eau. En effet, cette technique a été appliquée par Goula et al. et par Bellini [191, 192] sur le béton aéré argileux (CAC). Bouguerra [193] ont également appliqué cette technique sur le béton léger à base d'argile-ciment-bois pour estimer la teneur en eau et le coefficient capillaire isotherme D_θ . La teneur en eau est déterminée sur un volume local ($40 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$) en appliquant la formule 2.2:

$$\theta(x, t) = \frac{V_w(x+10, t) - V_x(x, t)}{V_{\text{local}}} \quad (2.2)$$

Avec :

$x = 10, 20, 30$ et 40 mm ,

$V_w(x, t)$: est le volume d'eau absorbé par l'élément de hauteur $h = x$ (mm) au temps t ,

V_{local} : est le volume local étudié.

L'étude du comportement hydrique du composite à base de liège, à savoir l'absorption d'eau et la capillarité, est important car ce dernier présente une structure poreuse. Barnat-Hunek et al. [155] ont étudié trois composites. Le composite C2L (20% liège, 25% chaux et 25% ciment) présentait la porosité la plus élevée, et par conséquent, la plus grande absorptivité a été enregistrée. Par contre, le composite avec du sable C2S (20% liège, 30% sable et 30% ciment) est le plus étanche et sa capacité d'absorption est la plus faible, presque trois fois inférieure à l'absorptivité du composite C1L (10% liège, 30% chaux et 30% ciment). Menor et al. [95] ont découvert, également, que l'introduction de liège vierge et d'écorce dans une matrice cimentaire augmente la porosité et l'absorption capillaire. Les auteurs ont suggéré que la cure de ce béton doit être à l'abri d'eau pour éviter une absorption d'eau élevée de ces granulats. Par contre, les composites obtenus avec l'ajout de cendres volantes assurent des performances de résistance à l'eau et, par conséquent, de bonnes performances s'ils sont utilisés comme enduit [179].

D'une manière générale, les variations dimensionnelles des bétons légers sont de l'ordre de 5 mm/m tandis que la norme préconise des variations à 0,45 mm/m pour une utilisation en génie civil. Elles peuvent atteindre 10 mm/m pour des granulats particulièrement hydrophiles [108]. Cependant, ces variations dimensionnelles peuvent être réduites de moitié avec un traitement, sans aucun changement des propriétés mécaniques ou de la conductivité thermique [90, 91]. On peut aussi diminuer ces variations par l'augmentation du dosage en ciment afin d'augmenter la rigidité de la matrice entourant les granulats et bloquer le gonflement [194].

2.6 Propriétés thermiques des composites à base de matériaux d'origine végétale

Les propriétés thermiques des composites à base de matériaux d'origine végétale diffèrent, non seulement, par les proportions et les méthodes de fabrication, mais aussi, par leur composition chimique et leur morphologie différentes. En général, l'addition de granulats végétaux dans une matrice cimentaire conduit à une amélioration des propriétés thermiques et à une diminution à la fois de la masse volumique et des propriétés mécaniques. Ces propriétés sont affectées par plusieurs facteurs. Nous présenterons, dans cette partie, le comportement thermique des matériaux composites à base d'éco-matériaux sous l'influence de plusieurs paramètres.

L'évaluation de l'impact de la concentration des fibres sur la conductivité thermique a été suggérée par Benchikou [170]. Dans cette étude, l'augmentation de la concentration des fibres dans le matériau composite diminue la conductivité thermique, avec 15% de fibres, le composite étudié donne un coefficient de conductivité thermique de $0,3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. L'effet des fibres dans les composites constitués de noix de coco et de durian sur la conductivité thermique a été l'objet d'une expérimentation réalisée par Khedari et al. [171]. Il apparaît que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la quantité de fibres et qui elle est dans la gamme des bétons légers ($0,3$ et $0,6 \text{ W/m}^\circ\text{K}$). Les éprouvettes à base de déchets de noix de coco donnent une conductivité thermique de $0,2543 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Par contre, la conductivité thermique des blocs à base de durian est de $0,3506 \text{ W/m}^\circ\text{K}$.

De même, Khedari et al. [77] ont développé des panneaux avec les mêmes déchets et la conductivité thermique obtenue varie entre $0,0728$ à $0,1342 \text{ W/m.K}$ pour une masse volumique de 314 à 856 kg/m^3 . Des panneaux à base de paille comprimée ont, également, été développés. La paille est sélectionnée, puis nettoyée et séparée de tous les éléments impropres. Elle est, ensuite, passée dans une machine assurant le chauffage à 250°C environ, la compression et l'enrobage d'un film de colle, avec revêtement d'un carton spécial sur toutes les faces. Le tapis sortant de la machine est découpé aux longueurs standards et est traité, à la fabrication, contre les moisissures et les insectes. La conductivité thermique de ces panneaux est entre $0,10$ et $0,12 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. En 2005, une autre étude a été menée par Khedari et al. [172] sur le matériau composite à base de déchets de noix de coco et de durian, la conductivité thermique obtenue, alors, est inférieure d'environ 85% et 79% par rapport au mortier témoin.

Afin de cerner les paramètres les plus influant sur la conductivité thermique, Kim et al. [194] ont varié la température, le type de ciment, le pourcentage de granulats fins, le rapport E/C et l'état d'échantillon (sec ou humide). Les facteurs les plus dominants sont le pourcentage de granulats et l'humidité. L'addition de granulats fins donne une faible conductivité thermique par rapport aux gros granulats du fait que les agrégats fins sont distribués proportionnellement dans la matrice. Par contre, l'âge d'essai n'affecte pas la conductivité thermique excepté pour le jeune âge. L'influence de la température et le rapport E/C sur la conductivité thermique sont significatives, l'augmentation de ces paramètres contribue à la diminution de la conductivité thermique. De plus, la conductivité thermique est fonction de la qualité du ciment employé. La substitution des ciments par les

cendres volantes ou le laitier de haut fourneau diminue le coefficient de la conductivité thermique. Khedari et al. [172] ont également examiné l'influence des dimensions du sable sur la conductivité thermique. Les résultats montrent que la diminution du diamètre du sable améliore la conductivité thermique du matériau composite. Cela est dû à l'introduction du sable fin dans la matrice entre les fibres qui provoque l'éloignement des fibres l'une de l'autre créant, ainsi, des vides dans la matrice. Cet effet engendre une diminution de la densité et de la conductivité thermique des blocs. Le rapport optimum des fibres de déchets de noix de coco est de 20 % du poids du ciment, tandis que celui des fibres de durian est de 10% du poids du ciment. Ce travail de recherche a été confirmé sur le béton de bois par Bederina et al. [153], en utilisant le sable de dune et le sable de rivière dans les bétons de sable. Les copeaux de bois ont été incorporés avec des proportions variant de 0 à 100 kg par mètre cube. Les résultats obtenus indiquent une amélioration remarquable de la conductivité thermique grâce à l'addition de copeaux de bois, qui diminue distinctement leur densité et leur conductivité thermique. Cependant, la conductivité thermique du béton de sable de rivière a été légèrement plus élevée que celle du béton de sable de dune, mais cette différence tend à disparaître avec un contenu de bois plus élevé. Par contre, l'augmentation du pourcentage de copeaux réduit la résistance mécanique des bétons de sable.

Les travaux de Benmalek et al. [175] ont porté sur le comportement thermique d'un matériau composite d'argile et de granulats de bois dans un état saturé et sec. Leurs résultats montrent que la conductivité thermique varie entre 0,514 et 0,522 W/m.K, selon l'argile utilisée, dans un état saturé et de 0,117 à l'état sec. Une grande quantité de sciures de bois (jusqu'à 50%) a été additionnée et la densité obtenue a varié entre 370 et 1010 kg/m³. La conductivité thermique diminue de 0,24 à 0,08 W/m.K lorsque le pourcentage des granulats en sciures de bois augmente (situé entre 10% et 50%) [73]. L'influence de la nature des fines argileuses sur la conductivité thermique a été effectuée en utilisant une argile contenant principalement de la Kaolinite et peu de quartz et une argile contenant environ 50% de Quartz, de la Kaolinite...etc. Leurs études montrent que les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques sont comparables à celles des bétons de bois usuels.

Dans le cas de composites associant du liège et une matrice à base de ciment, on a constaté que les granulats de liège semblent diminuer la conductivité thermique. En effet, la mesure

de la conductivité thermique pour chaque étude montre que la conductivité thermique du composite cimentaire s'améliore en présence de granulats de liège [115, 195-198]. D'autres chercheurs ont montré également que la teneur en liège dans les blocs de béton ou dans le mortier réduit la conductivité thermique. Ils ont affirmé que la conductivité thermique est affectée par l'inclusion de liège et, donc, par la densité apparente [199-201]. De plus, cette conductivité thermique est influencée par l'humidité : plus le matériau est humide, plus son pouvoir d'isolation est faible [178].

Les résultats expérimentaux réalisés par Tedjditi et al. [202] sur un composite à base de liège vierge et de liège d'écorce ont montré une remarquable augmentation de la porosité et, par conséquent, de la conductivité thermique. Dans une autre étude, un enduit a été produit en remplaçant le sable par les granulats de liège pour augmenter l'isolation thermique des façades [4]. Novais et al. et Borges et al. [6, 179] ont examiné l'impact des cendres volantes substituées au ciment sur les propriétés thermiques des composites ciment-liège expansé. Comme pour les autres composites, grâce à la présence de cendres volantes, une amélioration de la conductivité thermique a été constatée [179]. Pour examiner l'influence de taille des granulats de liège sur la conductivité thermique, Cherki et al. [10, 11] ont formulé des mortiers à base de gypse ou de plâtre. Ces chercheurs sont arrivés à la conclusion que la taille du liège n'a aucun effet sur les propriétés thermiques.

En Algérie, une étude montrant l'importance de divers paramètres de conception des murs sur la résistance thermique globale a été réalisée sur des murs en briques. Afin d'élucider le comportement thermique des constructions existantes et, par conséquent, d'améliorer leurs qualités d'isolation thermique, des murs en briques d'argile ont été réalisés. Les murs analysés sont de deux sortes; murs avec des briques sans isolant (liège) et murs avec des briques remplies de matériau isolant. En injectant le liège ($\lambda = 0,039 \text{ W/m.K}$) dans les cavités, on améliore la conductivité thermique qui peut atteindre 88,64% pour des murs avec des briques de petite taille et 93,33% pour des briques avec une plus grande taille [203].

2.7 Comportement acoustique des composites à base de matériaux d'origine végétale

Parmi les bétons légers, seul le béton de bois est utilisé actuellement pour ses qualités acoustiques, car il représente un bon compromis entre une certaine masse volumique et une bonne capacité d'absorption. La figure 2.5 permet de comparer le coefficient d'absorption α du béton de bois STRUCTA (panneau double face commercialisé par Béton Bois Système), celui du béton cellulaire Siporex (mesures LGM), et ceux du béton peint, de la brique, du contre-plaqué et du plâtre (mesures CEBTP). Au-delà de 400 Hz, le béton de bois absorbe plus de 80% de l'énergie de l'onde acoustique incidente et réfléchi par le matériau. Le pouvoir absorbant du béton de bois est deux à trois fois plus élevé que celui des autres matériaux de construction rencontrés usuellement dans le bâtiment [183]. Une autre étude a été menée par Moghaddam et al. [204] sur des composites de fibres de Typha mélangées avec du polypropylène et selon les résultats, les fibres de Typha pourraient être un choix acceptable pour les applications destinées à la réduction du bruit.

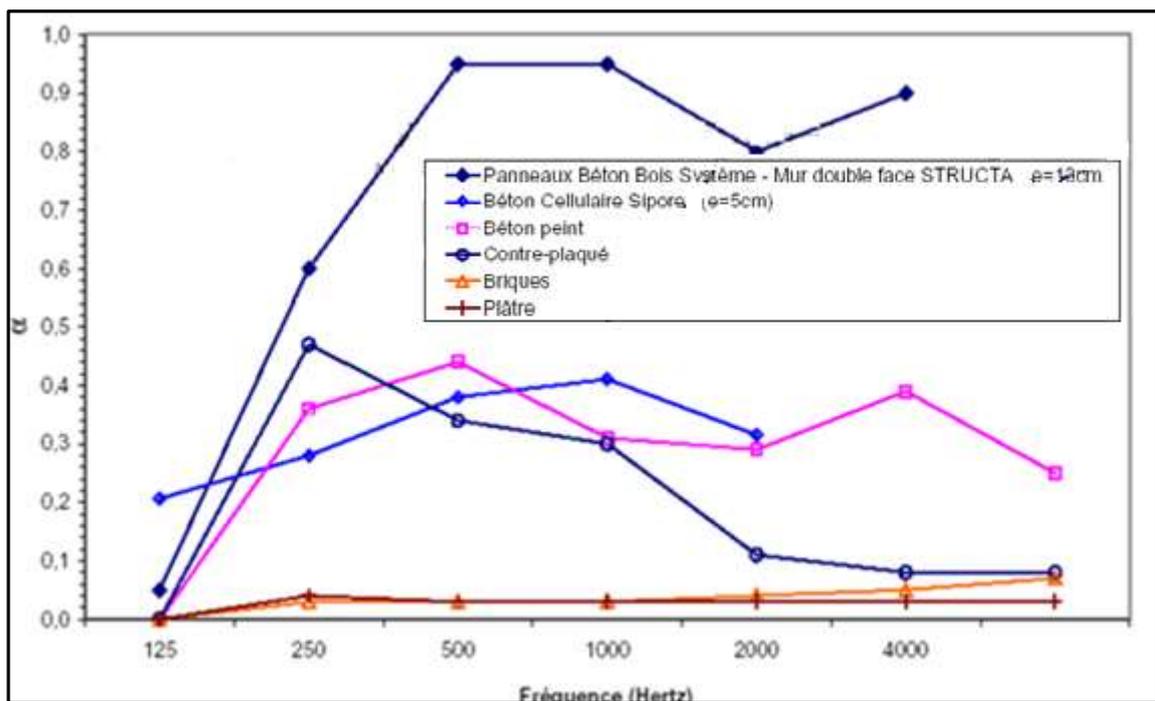


Figure 2.4 : Coefficient d'absorption acoustique α par octave de quelques matériaux [204].

Les propriétés acoustiques des composites de gypse-liège ont été examinées par Hernandez-Olivares et al. [181] pour déterminer le coefficient acoustique d'absorption sous des fréquences élevées (Figures 2.5 et 2.6). Le composite obtenu est insonorisant mais réfléchissant, il est identique aux plaques de plâtre.

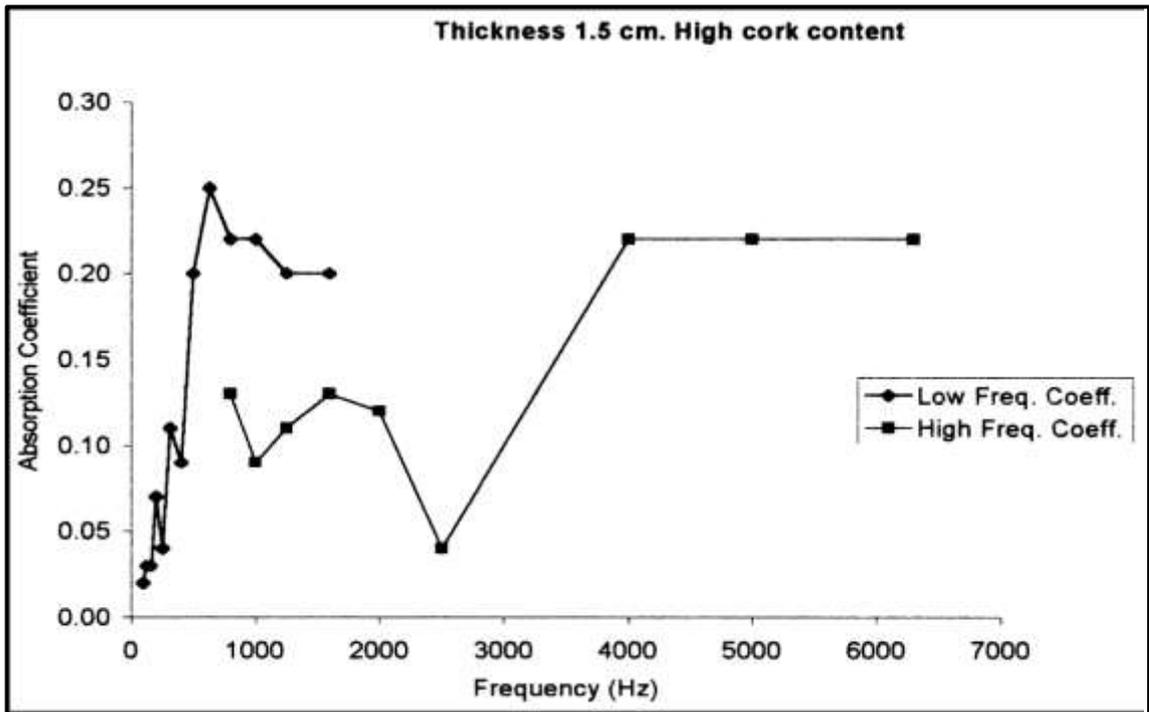


Figure. 2.5 : Le coefficient absorption du matériau composite gypse-liège (épaisseur 1.5 cm) [181].

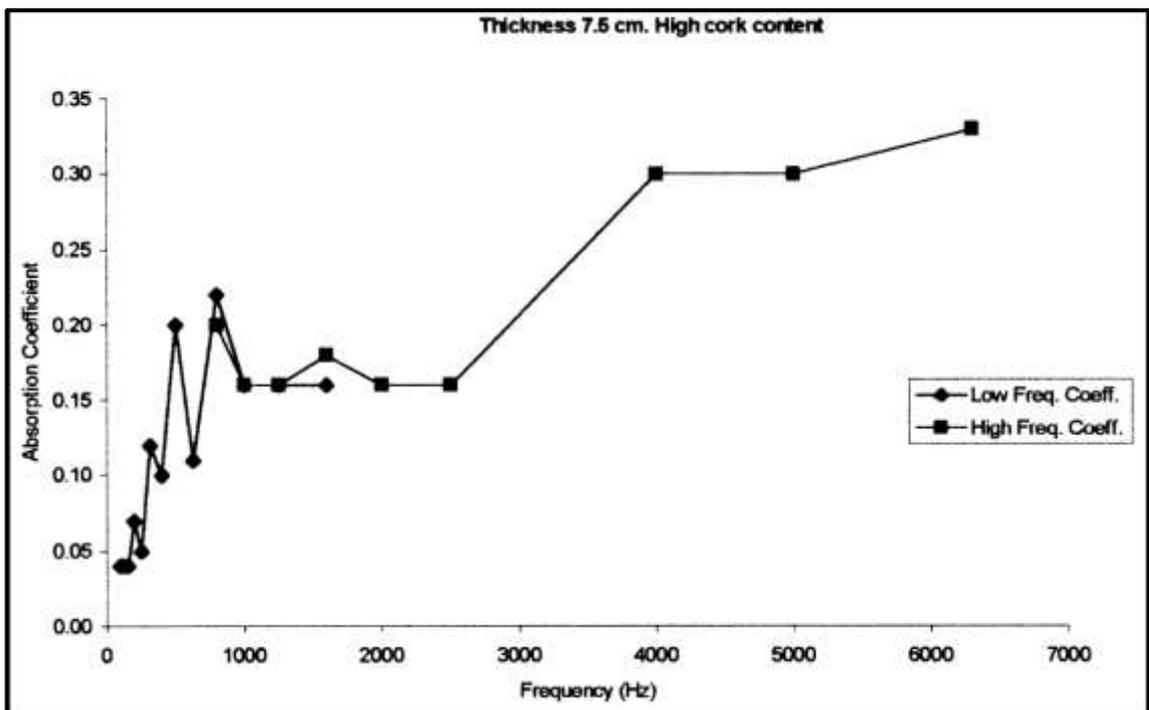


Figure. 2.6. Le coefficient absorption du matériau composite gypse-liège (épaisseur 7.5 cm) [181].

Quelques propriétés acoustiques de différents composites végétaux sont reportées dans le tableau 2.1.

Tableau 2. 1 : Caractéristiques acoustiques de quelques matériaux [183].

	ρ (kg/m ³)	Porosité ϕ	Perméabilité Π (m ²)	α
Contre-plaqué	700	-	-	0,10 à 0,40
Béton hydraulique	2330	8 %	10^{-16} à 10^{-18}	0,30 à 0,40
Béton argile expansé	1600	36 %	-	-
Béton cellulaire	350 à 650	75 % à 82%	1 à 10^{-14}	0,21 à 0,32
Béton de bois	600 à 900	52 %	-	> 0,55
Brique	1800	-	-	< 0,05

2.8 Conclusion

Les matériaux d'origine végétale sont particulièrement sensibles aux changements d'humidité, et par conséquent, montrent un impact négatif sur la durabilité et sur l'isolant thermique du béton léger cimentaire à base de bois, en particulier sur les propriétés liées à l'eau telles que le retrait de séchage et la perméabilité. Par conséquent, il est primordial que lorsque ces matériaux sont développés, les propriétés de durabilité doivent être évaluées. Des études antérieures montrent que ces composites ont généralement un retrait plus élevé que le béton normal en raison de l'absorption d'eau élevée et de la porosité des matériaux d'origine végétale. Différents traitements ont été appliqués afin de les rendre compatibles avec le ciment et de réduire les variations dimensionnelles.

La revue des travaux antérieurs sur les composites à base de liège concernait principalement les performances mécaniques et thermiques. Cependant, il n'y a pratiquement pas de recherche sur le retrait pour évaluer le risque des fissurations et donc la durabilité. Nous avons remarqué que les travaux concernant l'effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés mécaniques et la durabilité des composites pour réduire son alcalinité sont inexistantes. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes intéressés aux variations dimensionnelles et à l'effet du laitier, substitut du ciment, à long terme, dans les composites à base de liège expansé. De plus, l'impact de l'environnement sur les différentes propriétés a été également examiné.

CHAPITRE 3

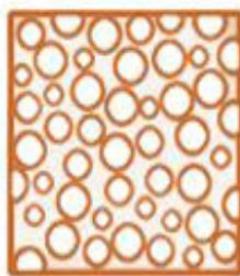
LES BÉTONS LÉGERS

3.1 Introduction

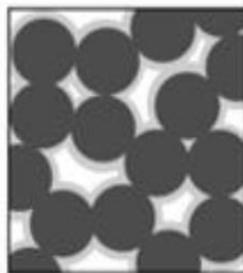
Ce chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les bétons légers et leurs caractéristiques physiques, mécaniques ainsi qu'aux caractéristiques d'isolation thermique et acoustique. Cette partie définit alors une manière plus ou moins développée du béton léger.

3.2 Définition des bétons légers

Les bétons légers sont des bétons à haute porosité, constitués de granulats de faible densité, légers ou normaux et de liants hydrauliques ou de résines synthétiques. La masse volumique des bétons légers est comprise entre 1500 kg/m^3 et 1900 kg/m^3 , mais des valeurs de masse volumique aussi faibles ont été obtenues avec du béton confectionné avec des granulats de bois (chapitre 2). Dans le cas où l'air est directement incorporé dans la matrice, on parle de béton cellulaire (Figure 3.1-a). Par contre, on parle de béton caverneux lorsque l'air se situe entre les gros granulats (Figure 3.1-b). Enfin, on parle de béton de granulats légers (Figure 3.1-c) lorsque les granulats possèdent une porosité élevée [53]. L'air qui est emprisonné dans le béton favorise la réduction de masse béton de granulats légers (figure 3.1-c). Ces caractéristiques peuvent se révéler techniquement et économiquement intéressantes [14].



(a) Béton cellulaire



(b) Béton caverneux



(c) Béton de granulats légers

Figure 3.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger [14].

3.3 Les origines des granulats du béton léger

Généralement, les granulats légers se trouvent à l'état naturel, les autres sont obtenus artificiellement par procédés chimiques. Parmi les granulats légers naturels (minéraux), on peut citer les ponces, la perlite, la vermiculite...etc. Ces granulats sont poreux et ont une proportion très élevée absorber l'eau, ce qui entraîne une variation de poids importante. Les sous-produits industriels tels que les cendres volantes et le laitier de haut fourneau sont utilisés pour fabriquer des granulats légers [205].

Les autres granulats sont obtenus par procédé chimique par expansion tel que l'argile expansée qui est fabriquée à partir de matériaux naturels. Ces bétons ont en général une résistance plus élevée que celle des bétons confectionnés avec d'autres types de granulats légers. L'ensemble de ces granulats sont souvent utilisés pour la fabrication des bétons de granulats légers [53].

Les bétons cellulaires sont constitués d'un mélange de ciment et de granulats fins inférieurs à 80 μm . On additionne, à ce mortier, un fluide, soit une matière génératrice de gaz (le plus souvent de l'hydrogène), comme par exemple de la poudre d'aluminium ce qui donne un béton gaz, soit un produit moussant à base de savon ou de détersifs qui, en cours de malaxage, provoque une infinité de bulles d'air. Cette méthode permet de gérer le processus de formation des pores en dosant correctement l'agent moussant et de répartir les pores d'une manière régulière dans la matrice [206]. Lorsque le matériau a atteint sa taille finale, une étape de cuisson par autoclave finit de cristalliser le béton cellulaire. On obtient un produit manufacturé, de structure connue et contrôlés donc de qualité constante. La densité de ces bétons varie de 0.4 à 1.2. En général, ces bétons sont utilisés en construction pour réaliser des murs et des planchers. Ils sont commercialisés sous forme de panneaux ou de briques préfabriqués [207].

Dans le cas des bétons caverneux, le mélange est réalisé avec des granulats légers ou normaux dans lequel on a supprimé, en totalité ou en partie, le sable et une partie du liant qui avait été nécessaire à l'enrobage de ce sable. La densité de ces bétons varie entre 1,6 et 1,8 et montre une résistance à la compression, à 28 jours, de l'ordre de 5 MPa [207].

Les autres granulats légers naturellement poreux sont d'origine végétale. Ces granulats végétaux jouent le rôle de granulats légers. Il existe une très grande variété de particules

lignocellulosiques qui sont, en générale, biosourcés ou des sous-produits du secteur industriel et agricole. Parmi ces déchets, le liège granulé et la poudre de liège. Une partie de ces déchets est transformée en panneau pour les constructions. Cependant, une grande partie (20 à 25% du poids) reste inutilisée et est jetée. Il est estimé que, chaque année, 68 000 à 85 000 tonnes de liège restent inutilisées [142]. Globalement, les matériaux d'origine végétale sont introduits dans différents liants pour obtenir des composites de bonne qualité thermique à faible coût. De nombreux matériaux composites ont été développés dans le secteur de la construction afin de diminuer la consommation d'énergie et ainsi participer à la politique du développement durable. Ces matériaux ont été détaillés dans le chapitre précédent.

3.4. Propriétés physiques des bétons légers

3.4. 1. Les porosités

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité (entre 25 et 75% du volume apparent). Le béton réalisé avec ces granulats est constitué de plusieurs familles de vides. En générale, ces vides se répartissent aléatoirement sous différentes formes, et ils sont de différentes dimensions et contribuent à l'hétérogénéité de la matière et leurs tailles varient de quelques d'Angstrom à quelques millimètres selon l'origine de ces pores. Un matériau est classé comme poreux lorsque les vides se répartissent régulièrement dans le volume avec un diamètre supérieur à 10°A . Aussi, la pâte de ciment, le mortier et le béton sont-ils des matériaux poreux. Ils ont des pores de capillarite de 100 à 1000°A de diamètre. La porosité d'un matériau peut être caractérisée par plusieurs facteurs [208].

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

Au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau, des vides d'air apparaissent dans la matrice du liant. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant Φ_l . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H, varie entre $0,01 \mu\text{m}$ et $5\mu\text{m}$ et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre $5 \mu\text{m}$ et 1 mm [209], l'air intra-liant est considéré comme de l'air microscopique. Ces vides peuvent être calculés par l'équation 3.1.

$$v_t = \frac{V_{vides}}{V_{liant}} \quad (3.1)$$

Avec :

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

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

Enfin, l'arrachement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement des granulats et du liant) crée des vides supplémentaires (équation 3.2), à l'origine de la porosité mésoscopique du matériau.

$$v_{meso} = \frac{V_{vides}}{v_t} \quad (3.2)$$

Avec :

V_{vides} : volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule (m^3).

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

Une porosité élevée est fortement nuisible à la résistance et à la perméabilité d'un matériau de construction [208]. Pour caractériser la porosité d'un matériau, on utilise une balance sensitive à 0.02%, un récipient pour l'immersion de l'échantillon dans l'eau, un fil pour suspendre l'échantillon immergé dans l'eau (la norme ASTM C642). La procédure d'utilisation de cette méthode est la suivante :

- Séchage à l'étuve à 100-110°C de l'échantillon pendant au moins 24 heures, jusqu'à masse constante. Celle-là est notée "A". Le volume du béton ne doit pas être moins de 350 cm^3 , le poids approximativement égal à 800 g.
- Immersion de l'échantillon est dans l'eau pour une durée supérieure ou égale à 48 heures. La masse calculée après cette durée est appelée "B".
- Immersion de l'échantillon dans l'eau bouillante pendant 5h, puis pesée à l'air après avoir été essuyé au chiffon, soit la masse C.
- Pesée du même échantillon dans l'eau donnant la masse D.

Le volume des pores accessibles en % s'exprime par l'équation 3.3.

$$V_p = \frac{C - A}{C - D} * 100 \quad (3.3)$$

3.4.2. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la caractéristique principale du béton léger, en effet, tout dépend d'elle pratiquement, que ce soit les propriétés mécaniques, les propriétés thermiques ou certaines variations dimensionnelles. Cette masse est fonction de la structure (Béton caverneux du 400 à 900 kg/m³, semi caverneux du 1000 à 1200 kg/m³, Isolants et porteurs du 1000 à 1400 kg/m³), de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment et de la quantité d'eau éventuellement absorbée par les granulats [208].

3.4.3. Le retrait et le fluage

Le retrait des bétons légers est plus important que celui des bétons traditionnels car l'eau absorbée par les granulats est progressivement restituée, retardant ainsi la déshydratation du mortier. Le retrait au séchage du béton léger est de 5 à 40 % plus élevé que celui du béton ordinaire et des bétons confectionnés avec des granulats d'argile, de schiste et de laitier expansé, ils sont, donc, classés dans la gamme des plus faible retraits [53]. Les déformations maximales des bétons légers à haute performance sont de l'ordre de 3,3 à 4,6 mm/m pour des résistances de 50 à 90 MPa, elles sont supérieures à celles des bétons de granulats rigides de même résistance [210]. Cependant, la déformation de fluage du béton léger est du même ordre que leur déformation instantanée [207].

3.4.4. La perméabilité et l'absorption

La perméabilité est l'une des propriétés importantes pour l'évaluation de la durabilité du béton, il est évident que la perméabilité est liée aux pores existants dans le béton. En général, la perméabilité des bétons légers est faible, elle est le résultat de plusieurs facteurs ; le faible rapport E/C, la qualité élevée de l'interface pâte-granulats, ce qui empêche l'écoulement autour des granulats. La perméabilité a des effets négatifs sur la durabilité du béton, tels que l'augmentation de la masse et la perte des propriétés acoustiques et thermiques du matériau [210].

Henri Darcy a formulé, en 1856, la loi de la vitesse d'écoulement de l'eau dans un corps poreux, à la suite de travaux sur l'écoulement de l'eau dans une couche filtrante de sable. Un Darcy correspond à la perméabilité d'un corps assimilé à un milieu continu et isotrope à travers lequel un fluide homogène de viscosité égale à celle de l'eau à 20°C s'y déplace à la vitesse de 1cm/s sous l'influence d'un gradient de pression de 1atm/cm (10^7 Pa/m). 1 Darcy = $0,97 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ [211]. D'après Darcy, cette loi se traduit par l'équation 3.4.

$$Q = k.S \frac{H + e}{e} \quad (3.4)$$

Avec :

Q : Volume d'eau écoulé par unité de temps (débit)

S : Surface de la couche filtrante

e : Epaisseur de couche

H : Hauteur de la colonne d'eau au-dessus de la couche filtrante

K : Coefficient lié à la nature du sable, lorsque la pression sous le filtre est égale à la pression atmosphérique.

Considérons l'ensemble du matériau poreux de section apparente A, siège d'un écoulement établi en régime laminaire. Le débit volumique Q_x du fluide de viscosité μ dans la direction Ox sous un gradient de pression est donné sous forme différentielle par la loi de Darcy.

$$Q_x = \frac{k_x}{\mu} \cdot A \frac{dP}{dx} \quad (3.5)$$

Avec :

K_x : Perméabilité au fluide du matériau dans la direction OX considérée (m^2)

μ : Viscosité de fluide (Pa.s)

A : Section (m^2)

P : Pression (Pa)

X : Longueur (m)

Q_x : Débit volumique de fluide (m^3/s)

D'après les diverses études réalisées sur les bétons légers, le pouvoir d'absorption d'eau des granulats légers manufacturés initialement secs varie généralement entre 10 et 20% après 24 heures d'immersion. Cependant, le taux d'absorption initial est souvent complété

dès les toutes premières minutes, plus de 50% de l'absorption est enregistré [212, 213]. Les figures 3.2 et 3.3 présentent le taux d'absorption du béton de mousse, constitué, respectivement, par du ciment-sable et ciment-sable-cendres volantes. Le taux initial d'absorption est très important pendant les premières 24 heures, il diminue au-delà de cette période et l'absorption devient constante dans les 7 jours. L'effet du remplacement du sable par les cendres volantes est remarquable sur la figure 3.3. L'absorption d'eau est relativement plus élevée dans les mélanges avec le remplacement par les cendres volantes. Elle augmente avec le niveau de cendres volantes (Figure 3.4) [214].

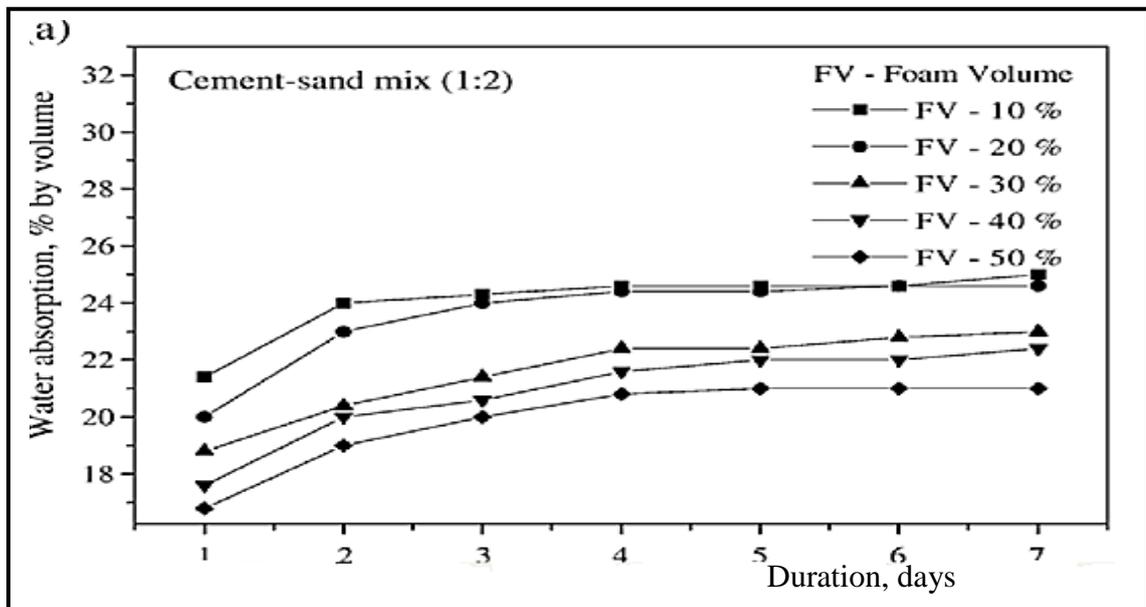


Figure 3.2 : Variation d'absorption d'eau en fonction du temps du béton mousse ciment-sable [214].

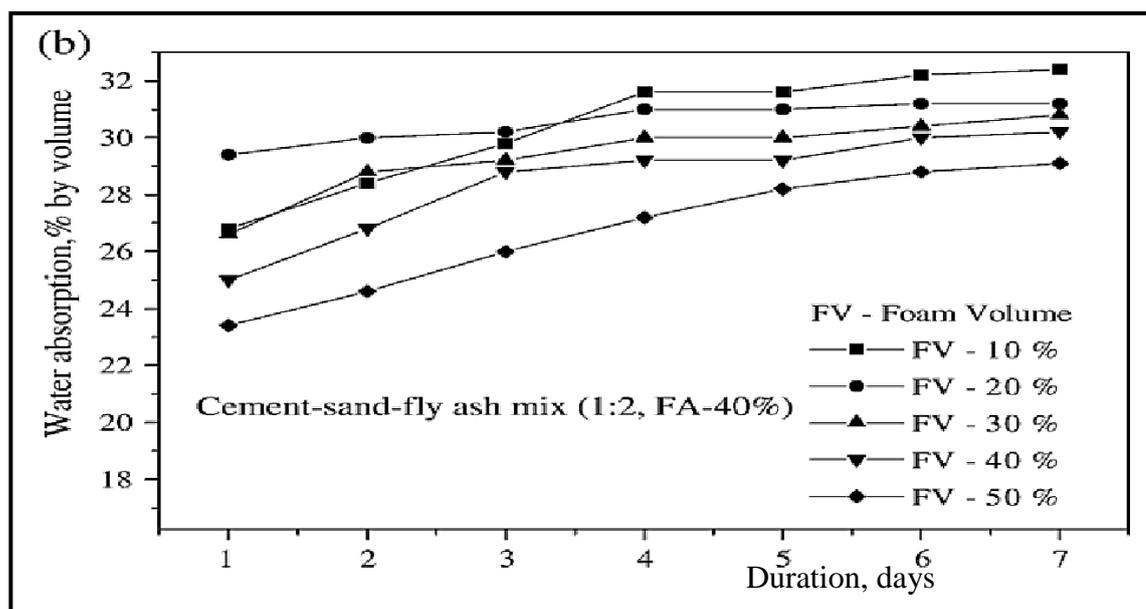


Figure 3.3 : Variation d'absorption d'eau en fonction du temps du béton mousse ciment-sable-cendres volantes [214].

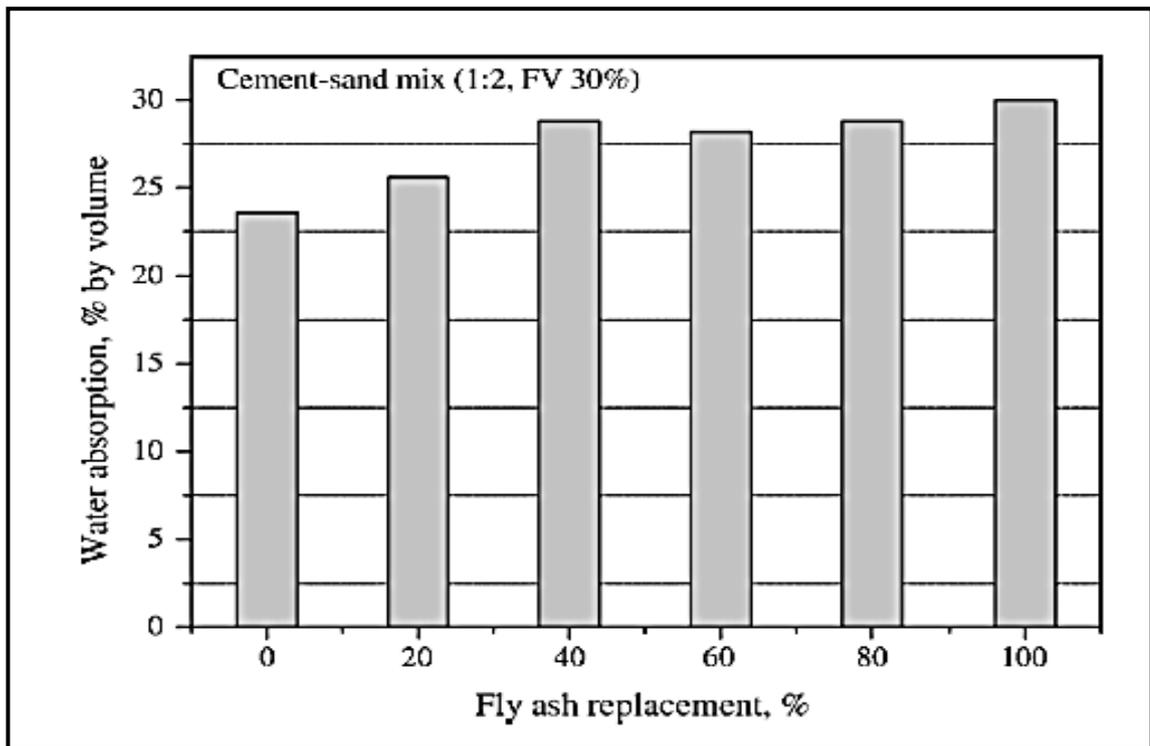


Figure 3.4 : Influence de niveau de rechange de cendres volantes sur l'absorption d'eau [214].

Le béton léger fabriqué avec de granulats légers absorbe une quantité importante d'eau de gâchage. Cette absorption d'eau dépend toutefois de l'interconnexion des pores dans les granulats, du degré de saturation initial des granulats et du rapport eau/ciment de la matrice cimentaire. L'effet sur l'ensemble du matériau peut se traduire par une perte rapide de maniabilité, mais peut aussi contribuer à améliorer la microstructure de la matrice cimentaire aux interfaces pâte-granulats par un effet de filtration [215]. Par conséquent, l'eau absorbée par les granulats est considérée comme une réserve pour l'hydratation de la matrice cimentaire [216, 217]. Le remouillage des granulats ou l'utilisation d'un traitement de surface, visant à réduire l'absorption, ont été réalisés pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers [209].

3.5 Les performance mécaniques

En général, dans le cas du béton usuel, les granulats sont plus résistants que les mortiers et leur rupture se produit par décollement des granulats. La fissure se produit autour des grains qui se décollent de la pâte. La résistance du béton est donc pilotée par la résistance de la zone servant d'interface entre le mortier et les granulats rigides. A l'inverse, dans le cas du béton léger contenant des granulats de faible résistance, la rupture du béton léger se

produit par cassure des granulats légers, dans les plans qui coupent le plus grand nombre possible de granulats légers. Ainsi, les caractéristiques des granulats légers sont déterminantes dans les performances mécaniques des bétons légers, comme le montrent, entre autres, le travail expérimental et l'étude statistique [218]. La résistance à la compression peut être comparée avec celles des bétons traditionnels, en choisissant des granulats légers spécifiques. La résistance à la compression du béton léger est liée au dosage en ciment. Le ciment ayant une densité beaucoup plus élevée que celle des granulats légers et celle de l'eau, pour n'importe quel granulat particulier, la résistance augmente, donc avec l'augmentation de la masse volumique [219].

La relation contrainte-déformation des bétons de granulats légers sollicités en compression uniaxiale est représentée par la figure 3.5 [220]. D'après cette figure, on remarque que la linéarité de la relation contrainte-déformation augmente en fonction de la résistance du matériau. On remarque également que les déformations instantanées du béton augmentent pour les bétons dont le module d'élasticité est faible. Contrairement aux granulats rigides, les granulats légers ne gênent pas les déformations de la pâte de ciment [209].

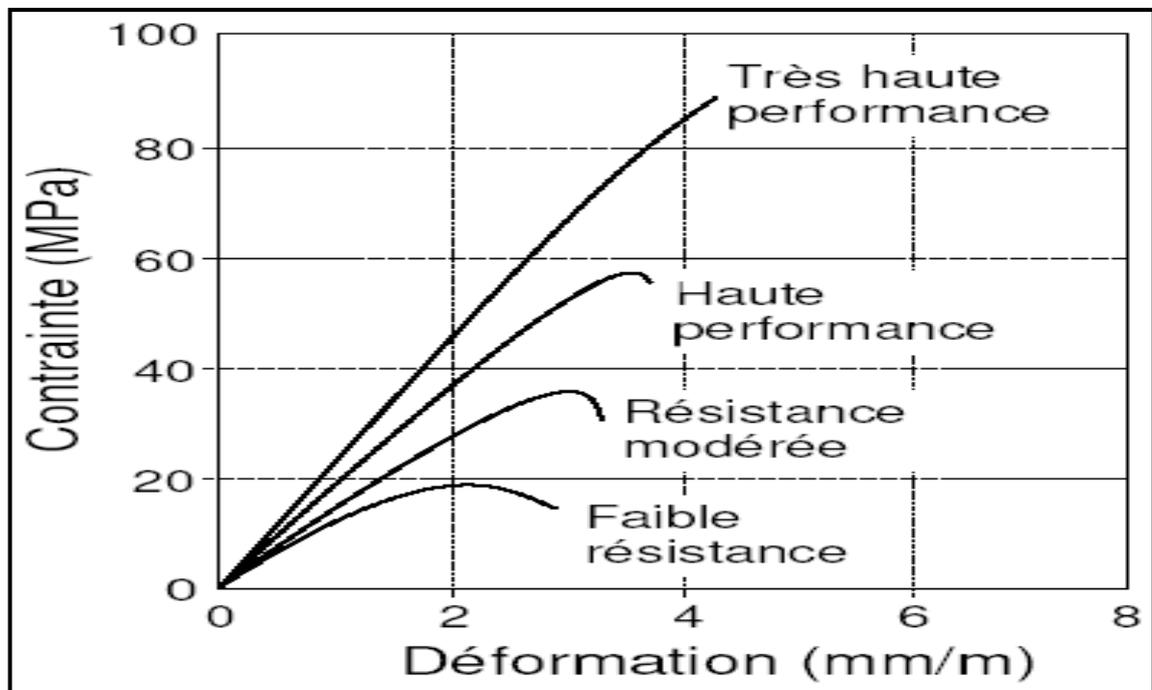


Figure 3.5 : Relation entre contrainte-déformation des granulats légers soumis à l'effort uniaxial, d'après Zhang et Gjørv [220].

Diverses formules empiriques ont été déterminées afin de prédire la résistance en compression R_c et le module d'élasticité E du béton cellulaire en fonction de la porosité. La résistance à la compression de ces bétons est comprise entre 1 et 5 MPa et E entre 20 et 30 MPa [206]. Le tableau 3.1 donne la prédiction du module d'élasticité du béton cellulaire. Une méthode dynamique développée par Müller-Rochholz [221] permet d'évaluer le module élastique des granulats légers par des mesures de vitesse de propagation d'ondes à ultrason. La relation (3.6) exprime le module élastique E_g , en fonction de la densité apparente des granulats légers, ρ_g :

$$E_g = 8 \cdot \rho_g^2 \quad (3.6)$$

Tableau 3.1 : Equations de prédictives du module d'élasticité E du béton cellulaire [206].

Module d'élasticité E	Notations
$6000 (\alpha)^{1,5} S$	α : masse volumique sèche (g.cm^{-3}) S : la résistance à la compression sur cube (kg.cm^{-3})
$1555 S^{0,7}$	S : la résistance à la compression sur cube (kg.cm^{-3})
$K \gamma_{\text{sec}} (f_c)^{0,5}$	K : constance variant entre 1,5 et 2 γ_{sec} : masse volumique sèche (kg.cm^{-3}) f_c : résistance à la compression (MPa)
$C_1 (\rho - C_2)$	C_1 et C_2 : constantes ρ : masse volumique sèche (kg.cm^{-3})

La corrélation entre performance et porosité est fonction du type de granulats légers et de la quantité employée dans le matériau. La résistance à la traction des bétons légers non renforcés est relativement faible, d'autant plus que la propagation des fissures s'effectue au travers des granulats légers et non au niveau des interfaces. Wilson et Malhotra.[222] ont mesuré des résistances au fendage de 3,3 à 4,2 MPa et des contraintes maximales en flexion de 5,0 à 7,6 MPa pour des bétons d'une masse volumique moyenne de 1940kg/m^3 . Les résultats de Zhang et Gjvorv. [223], du même ordre de grandeur, varient entre 3,5 et 5,6 MPa en fendage et entre 5,4 et 7,3MPa en flexion pour des bétons de 1620 à 1885kg/m^3 [218]. La résistance à la traction du béton léger en fonction de la résistance à la compression peut être effectuée par les formules suivantes :

$$F_t = 0.5 + 0.05 \cdot f_c \quad (3.7)$$

Une autre formule de calcul de la résistance à la traction de béton léger en fonction de la compression est donnée par [53].

$$F_t = 0.23 f_c^{0.67} \quad (3.8)$$

Les caractéristiques mécaniques de quelques bétons légers sont récapitulées dans le tableau 3.2 [183]. Enfin, plusieurs études ont été effectuées dans le but de concevoir des bétons légers à hautes performances [224]. Les mélanges de granulats légers (argiles expansées), dosé entre 224 et 293 kg/m³, et des quantités élevées de ciment variant entre 440 et 710 kg/m³ avec un ajout de 10% (en masse de ciment) de fumée de silice donnent un matériau de masse volumique autour de 1500 kg/m³. Les résistances en compression à 7 jours, varient entre 40 et 55 MPa et les modules de rigidité de Young varient également entre 12 et 15 GPa. D'autres études ont pour objectif d'améliorer la qualité de la matrice [183].

Tableau 3.2 : Caractéristiques mécaniques de quelques bétons légers [183].

	Constituants			ρ (kg/m ³)	Porosité Φ	Rc (MPa)	E (GPa)	ε (m/m)
	nom	masse (kg)	volume (m ³)					
Granulats	Granulat minéral (grés, granite.)			2600	<1%	-	60	-
	Argile expansée			850	60 à 70%	-	6 à 9	
	Copeaux de bois en vrac			275	75%	-	-	
	Granulats bois Agresta			600	60%	-	10 à 12	
Béton hydraulique	granulat	755	0,285	2330	9%	30	36	1.10 ⁻⁴
	sable	925	0,350					
	ciment	440	0,140					
	eau	210	0,210					
	air	-	0,015					
Béton argile expansé	granulat	351	0,444	1600	36%	25	14	-
	sable	602	0,230					
	ciment	400	0,127					
	eau	193	0,193					
	air	-	0,025					
Béton cellulaire	mortier ciment			350-650	75 à 82%	5	2 à 3	2.10 ⁻³
	air							
Béton de bois	copeaux de bois	170	0,212	600-900	52%	3,5 à 4	-	-
	ciment	350	0,113					
	eau	200	0,200					
	air	-	0,379					
	sable*	250	0,096					
	filler*	-	-					

* : Charge minérale non obligatoire.

3.6 Interactions des granulats avec la matrice cimentaire

Les interactions pâtes-granulats légers sont différentes et la qualité microstructurale de ces bétons est généralement supérieure à celle des bétons de granulats rigides. Par conséquent, les mécanismes d'interaction physique, chimique et mécanique ont été identifiés, sans compter l'influence du faible module élastique des granulats sur la microfissuration des interfaces. Lorsque les granulats légers poreux sont recouverts d'une mince couche plus ou moins rigide, la structure poreuse de ces granulats est complètement isolée. Dans le cas de granulats semi-légers, la couche de liant est très dense, elle est semblable à la microstructure des interfaces observée dans les bétons de granulats rigides, c'est-à-dire qu'elle est plus poreuse et qu'elle peut contenir de larges cristaux de portlandite et des aiguilles d'ettringite. La microstructure de l'interface est plus dense et plus homogène lorsque la couche protectrice des granulats est moins rigide ou que les granulats sont concassés. Cette densification de la matrice diminue localement avec le rapport eau/ciment de la matrice cimentaire [216]. Par contre, l'absorption de l'eau de gâchage dépend du degré de saturation initial des granulats. Une très faible activité pouzzolanique semble possible entre les granulats légers (argile expansée et cendres volantes frittées) et la matrice cimentaire [225, 226]. Une interaction chimique peut contribuer à augmenter la résistance à long terme des bétons avec granulats de cendres volantes frittées [223].

Les rugosités et les pores à la surface des granulats légers servent à loger la pâte de ciment. Par conséquent, cet ancrage mécanique améliore l'adhérence des granulats à la matrice cimentaire. Il dépend de la texture des granulats, de la taille des grains de ciment et de la viscosité de la matrice. L'absence de portlandite améliore également la résistance de l'interface [227].

3.7 La durabilité des bétons légers

La porosité des granulats légers est généralement discontinue et l'utilisation de ces granulats n'affecte pas la durabilité à long terme du béton. En effet, cette propriété est plutôt contrôlée par la pâte de ciment durcie et par la qualité des interfaces pâte-granulats. Dans les bétons à haute performance, confectionnés avec des granulats légers, on utilise un faible rapport eau/ciment qui diminue la microfissuration des interfaces. Par conséquent, on observe une meilleure compatibilité élastique entre les granulats et la matrice, ce qui ne favorise pas le transfert des matières à l'intérieur du matériau [228, 229].

La perméabilité aux gaz des bétons légers augmente avec les volumes de vides existants dans les granulats. Le béton cellulaire possède une porosité élevée, permettant la pénétration des liquides et des gaz. Cela peut provoquer l'endommagement de la matrice [206].

Diverses études ont été réalisées sur la résistance du béton léger au gel et à l'écaillage en combinant des granulats et une matrice de qualité. Par conséquent, ces bétons sont très résistants au gel malgré la porosité des granulats. Comme dans les bétons usuels, lorsque les granulats légers sont saturés, avant la fabrication du béton, on augmente toutefois les risques d'endommagement du matériau si ce dernier est rapidement soumis à des cycles répétés de gel-dégel, l'air entraîné permet de protéger efficacement le matériau contre le gel et l'écaillage [230, 231].

La stabilité aux attaques chimiques des bétons légers est obtenue par des granulats légers exposés à une très grande température. Par conséquent, la composition minéralogique de ces granulats peut faire face à la réactivité alcali-silice [209]. Cependant, des précautions sont nécessaires pour les bétons cellulaires afin d'éviter les attaques des sulfates. La carbonatation peut augmenter la densité de ces bétons mais elle n'est pas très considérable à moins que l'exposition au CO₂ soit très élevée [214]. Enfin, pour assurer la durabilité face aux agressions des bétons légers, un bon choix du type de ciment et du rapport eau/ciment est cependant essentiel.

Le retrait de séchage dans les bétons légers est influencé par la proportion volumique et la perméabilité de la matrice cimentaire, et est également lié au degré de saturation des granulats [209].

3.8 Les propriétés thermiques des bétons légers

Une des propriétés intéressantes des bétons de granulats légers est leur pouvoir d'isolation thermique. Ce pouvoir se caractérise par le coefficient de conductivité thermique λ (quantité de chaleur que laisse passer dans l'unité de temps une épaisseur de 1 m pour une différence de température de 1°C entre les deux faces). Les propriétés thermiques du béton sont directement liées à celles de ses composants, la matrice du mortier et les granulats, ainsi qu'au degré de saturation du matériau. Les granulats légers manufacturés, obtenus à partir de procédés à très haute température, sont généralement caractérisés par une meilleure stabilité thermique que les granulats rigides naturels. Les bétons légers fabriqués

avec ces granulats ont un coefficient de dilatation thermique qui peut varier entre 7 et $11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [209].

Une relation entre la porosité et la conductivité thermique doit être nuancée en tenant compte du mode de transfert de la chaleur, par convection. Cette dernière traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement. Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection peuvent devenir significatifs. En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire ($\Phi=80\%$) ne présente pas de convection. Plus la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus plus la conductivité thermique est faible (Figure 3.6).

Un autre élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C_p en $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C . Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de la température du milieu extérieur. Un coefficient C_p élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de température à l'intérieur de la structure. Enfin, à partir de la conductivité λ et de la chaleur massique C_p , on définit la diffusivité « a » (m^2/s). Cette grandeur caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de « a » est faible, plus la chaleur met de temps à traverser le matériau.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (3.9)$$

Ainsi, le pouvoir isolant du matériau dépend, non seulement, de la valeur de « λ », mais également de la vitesse de transfert thermique traduite par «a» [183].

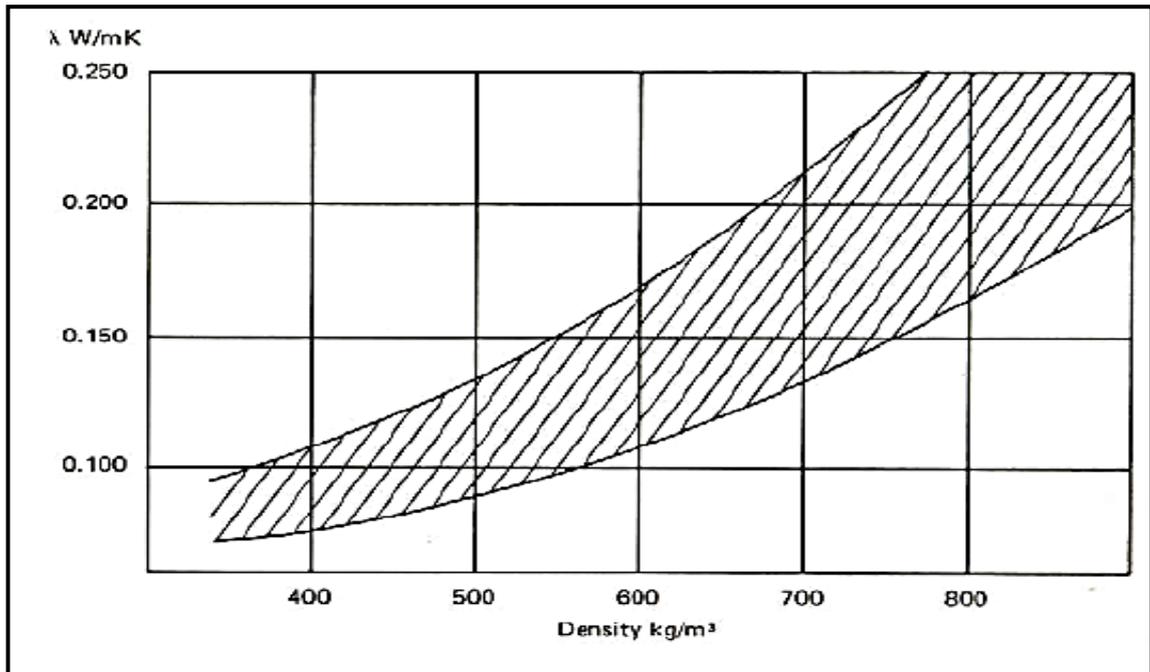


Figure 3.6 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire [183].

Le tableau 3.3 nous donne une synthèse des caractéristiques thermiques de quelques matériaux. On constate par exemple, que le béton de bois est plus poreux qu'un béton d'argile expansée et possède une conductivité thermique plus faible. En revanche, il diffuse la chaleur plus rapidement. Le dernier élément qui influe sur les propriétés thermiques des bétons légers est lié au pouvoir d'absorption d'eau de ces matériaux. L'eau est un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du béton, en se substituant à l'air isolant. Divers travaux sur le béton de bois ont montré que la conductivité thermique augmentait de 40 à 90% pour des teneurs en eau w de 30% [183].

Tableau 3.3 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [183].

	ρ (kg/m ³)	Porosité ϕ	Cp (J/kg.K)	λ (w/m.k)	a (m ² .S ⁻¹)
air	1,2	-	1000	0,026	2,2 E-05
eau liquide	998	-	4180	0,602	1,4 E-07
styrodur	50	-	-	0,033	-
cuivre	8900	-	390	400	1,2 E-04
contre-plaqué	700	-	1500	0,12	1,1 E-07
Béton hydraulique	2330	8%	1050	1,8 à 2,00	7,4 à 8,2 E-07
béton argile expansé	1600	36%	900	0,46	3,2 E-07
Béton cellulaire	350 à 650	75 à 82%	880	0,16 à 0,33	5,2 à 5,8 E-07
béton de bois	600 à 900	52%	1200	0,09 à 0,30	1,2 à 2,8 E-04
brique	1800	-	860	1,15	7,4 E-07

3.9. Les propriétés acoustiques des bétons légers

Les propriétés acoustiques sont intéressantes lorsque le béton est utilisé comme parois séparatives dans les bâtiments d'habitation. L'isolation acoustique d'une paroi simple et étanche est d'autant plus grande que la masse surfacique de la paroi et la fréquence de son incidence est plus élevée. Les parois isolantes en béton léger sont caractérisées par un indice d'affaiblissement acoustique R . Cet indice dépend de la résistance de la paroi, souple ou rigide, et de la nature de l'onde (incidence nulle ou diffuse) [217].

L'objectif de l'isolation acoustique est de limiter la transmission des sons de part et d'autre d'un matériau. Généralement, on utilise des matériaux de forte densité car leur inertie est difficile à transmettre les ondes acoustiques. Certains matériaux peuvent absorber les ondes acoustiques, ces derniers peuvent amortir les sons par dissipation visqueuse. Cependant, ce mécanisme de dissipation d'énergie suppose que les ondes puissent pénétrer dans le matériau et disposer d'un espace suffisant pour être amorties. Il faut donc une certaine perméabilité et une porosité ouverte importante. La porosité globale d'un matériau n'explique pas, à elle seule, une bonne ou une mauvaise absorption acoustique. Le béton cellulaire, par exemple, possède une forte porosité mais il n'absorbe pas plus de 40% du son, car il est peu perméable. L'onde sonore ne parvient pas à pénétrer dans le matériau et ne peut, donc, pas être amortie. Il en est de même pour le plâtre et la brique dont les surfaces sont peu perméables [183].

3.10. Les avantages et les inconvénients des bétons légers

Les avantages d'utilisation du béton léger sont nombreux et bien connus, tels que des densités plus faibles, un rapport résistance/poids plus élevé [232], une conductivité thermique plus faible [233, 234], que meilleure résistance au feu par rapport au béton normal [235], des propriétés de durabilité améliorées [236], réduction des dimensions des fondations [237-239],...etc. Les inconvénients de ces matériaux quant à eux sont la ségrégation des agrégats légers qui peuvent être surmontés par l'ingénierie technique. Ainsi, on peut empêcher la ségrégation des granulats légers, incorporés dans le béton, en améliorant la qualité par la production d'un béton léger à haute performance [240]. C'est encore plus souhaitable si le béton léger peut être modifié en béton léger auto-plaçant en raison des avantages bien connus en termes de maniabilité. La performance du béton léger

auto-plaçant se manifeste par trois facteurs principaux: la maniabilité, la résistance et la durabilité [241].

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques généralités sur les bétons légers. Ces derniers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de granulats allégés. Des adjuvants, comme les entraîneurs d'air peuvent aussi être ajoutés pour un allègement maximum. On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux : c'est le cas du béton cellulaire. On peut aussi obtenir du béton léger en introduisant des matériaux d'origine végétale. Ces matériaux nous permettent de réaliser un gain de poids pour l'ouvrage auquel ils sont destinés. Ils sont également utilisés pour l'isolation thermique et acoustique. Par ailleurs, ce béton présente une variation dimensionnelle et une absorption plus importantes que le béton ordinaire.

CHAPITRE 4

MATERIAUX ET ESSAIS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on énumèrera les différents matériaux qui ont servi à l'élaboration des matériaux composites cimentaires à base de déchets de liège expansé et on présentera les différents essais réalisés.

Tout d'abord, les matières entrant dans la composition des composites, tels que les granulats de liège expansé, le ciment, le laitier de haut fourneau et les sables sont caractérisés. La connaissance précise des différents constituants des composites est essentielle pour l'élaboration et la caractérisation des composites. Ensuite, on présentera la définition des procédures des essais expérimentaux effectués pendant l'examen et l'investigation des différents échantillons de composites.

4.2 Matériaux utilisés

La qualité des composites à base de granulats végétaux est liée aux propriétés des constituants et de l'environnement dont lesquels ils sont conservés. La maîtrise de l'impact de l'environnement sur les composites nécessite la maîtrise du comportement des différents matériaux utilisés.

4.2.1 Le ciment

Le type de ciment utilisé dans cette étude est le ciment CEMI 42,5 dont la composition chimique et les propriétés physico-mécaniques sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2. Les essais mécaniques sont effectués sur des éprouvettes prismatiques 40x40x160 mm³ avec un mortier normalisé ; 450g de ciment, 1350g de sable et 225g d'eau. Ces essais sont réalisés selon la norme NF P 15-471 [242].

Tableau 4.1 : Composition chimique du ciment (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	PAF	MgO	SO ₃	RI
21,06	3,60	4,47	63,4	0,57	0,13	2,53	1,85	2,00	0.65

Tableau 4. 2 : Caractéristique physico-mécanique

Finesse (cm ² /g)	Début du temps de prise	fin du temps de prise	Expansion Le chatelier	Résistance à la compression 2 jours	Résistance à la compression 28 jours
3210	170 mn	270 mn	1 mm	18.9 MPa	56.2 MPa

4.2.2 Le liège expansé

Les granulats de liège expansé sont issus d'un processus de fabrication de panneaux de liège expansé (Figure 4.1). Ces particules sont des sous-produits d'origine végétale obtenus par l'unité de transformation de Béjaia. Elles sont constituées principalement de subérine (38%), de lignine (24%) et de polysaccharides (cellulose et hémicellulose) (20%) et le reste est composé de cire, de matière minérale et d'eau [243].

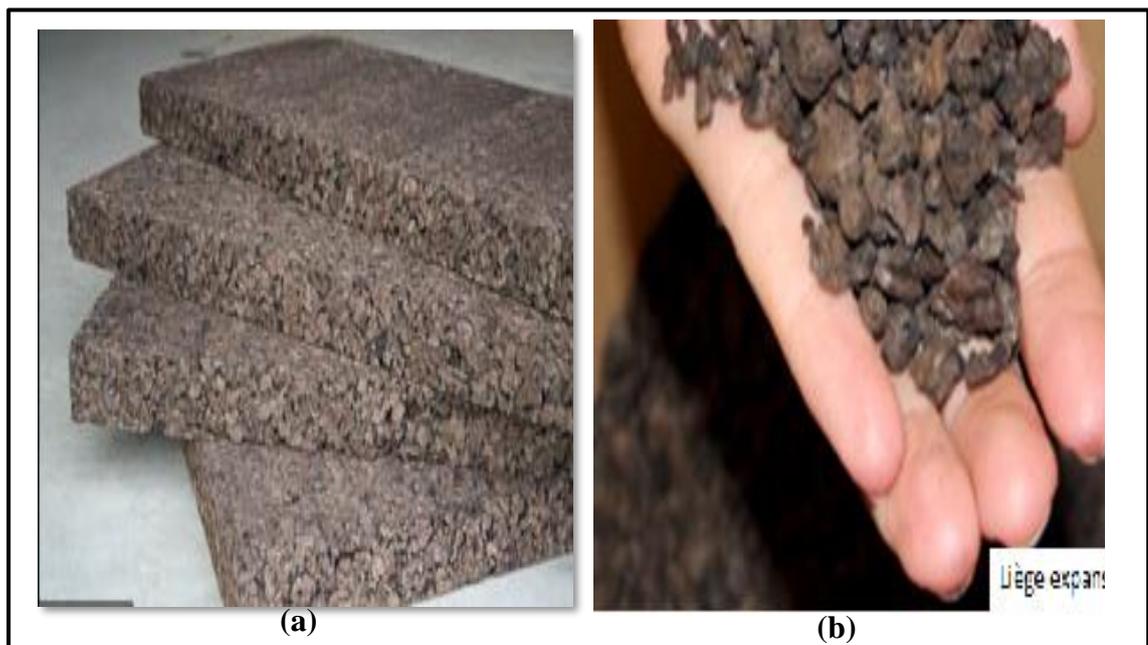


Figure 4.1: Liège expansé : (a) panneaux d'agglomérés de liège expansé, (b) granulés de liège expansé.

4.2.3. Le laitier de haut fourneau

Le laitier utilisé dans cette étude provient du complexe sidérurgique de la wilaya de Annaba (El Hadjar). La finesse du laitier a été obtenue par broyage dans un broyeur à boulets. Effectivement, après séchage, le laitier a été introduit dans le broyeur et des mesures répétées de la finesse ont été effectuées pour chaque intervalle de temps constant.

L'objectif de l'essai consistait à avoir la même finesse pour tout le laitier à utiliser dans cette étude. La finesse visée pour les essais va de 4200 à 4300cm²/g. Pour obtenir cette finesse, le laitier a été broyé pendant 165 minutes. La courbe de l'évolution de la finesse du laitier en fonction du temps de broyage est présentée en annexe A. La composition chimique du laitier est donnée dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Composition chimique du laitier granulé d'EL Hadjar.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	PAF
41,20	9,19	3,44	42,84	2,11	1,07	1,16	0.10	0.15	0,20

4.2.4 Les sables

Deux sables ont été utilisés dans l'expérimentation, le sable de rivière (Baghlija) et le sable de dune (Boussaâda). Ils présentent respectivement une granulométrie 0/5 et 0/3.

4.2.5 L'eau de gâchage

Toutes les compositions ont été fabriquées avec l'eau potable du robinet, propre et exempte d'impuretés.

4.3 Caractérisation des matériaux

4.3.1 Granulats du liège expansé

Les caractéristiques physiques de granulats du liège expansé suivantes ont été déterminées:

- la masse volumique apparente ;
- l'humidité ;
- la capacité d'absorption d'eau ;
- une analyse granulométrique;

4.3.1.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est réalisée conformément à la norme française NF B 57-0.12 [244]. L'échantillon de l'essai est conditionné à une température de 20±2°C dans une atmosphère d'humidité relative de 65±5 % pendant 24 heures. Une masse est prélevée au

hasard, après avoir choisi la taille des granulats comme indiqué dans la norme française NF B 57- 014 [245]. La masse volumique apparente est exprimée en kilogramme par mètre cube, et la masse trouvée est arrondie au nombre entier le plus voisin. La détermination est effectuée cinq fois sur la même prise par remplissage d'un récipient d'un litre préalablement taré avec des granulats secs jusqu'à débordement, puis arasage de la surface supérieure à l'aide d'une règle, sans tassement (Figure 4.2). La masse volumique apparente obtenue est d'environ 50 kg/m^3 . Cette masse est un paramètre important qui nous permet d'avancer des effets avantageux sur les composites. D'une part, on peut prédire des composites plus légers. D'autre part, la faible masse des granulats est très efficace pour améliorer la capacité d'isolation du composite.

Les granulats de liège présentent la plus faible masse volumique apparente par rapport à celle des granulats légers utilisés pour le béton léger tels que la perlite et la vermiculite [84]. Elle est également inférieure à celle de la plupart des granulats de bois utilisés dans la fabrication du béton de bois. Ces granulats possèdent une porosité importante [86].

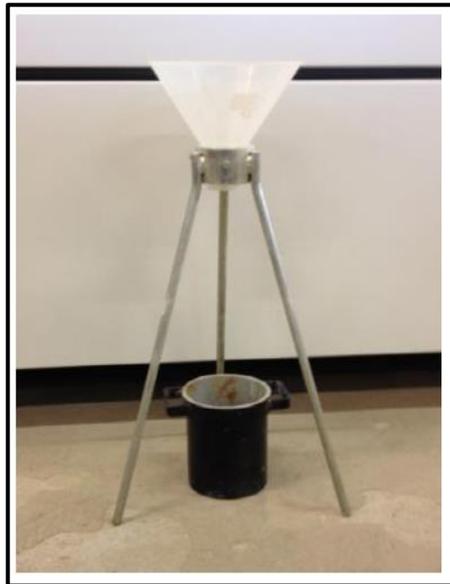


Figure 4.2 : Dispositif de mesure de la masse volumique.

4.3.1.2 Humidité

Des mesures ponctuelles du taux d'humidité ont été effectuées selon la norme NF B 57-013 [246]. Trois échantillons de 100 g chacun sont pris au hasard. Cette opération est effectuée selon les prescriptions de la norme NF B57-014 [245]. On pèse le récipient vide,

ensuite on introduit la prise d'essai dans ce récipient, puis on pèse l'ensemble. Le récipient et son contenu sont placés dans une étuve à une température de 103°C. Le séchage de l'échantillon se poursuit jusqu'à ce que les résultats de deux pesées successives, effectuées à deux heures d'intervalle, ne dépassent pas, au plus, 0.5% de la masse initiale de la prise d'essai. Après séchage, on place le récipient et son contenu dans un dessiccateur pendant 30 min, puis on pèse l'ensemble (Figure 4.3). La moyenne arithmétique des résultats obtenus sur les trois prises d'essai est retenue comme résultat final de cette expérimentation. Les résultats des trois prises d'essai sont calculés par la formule (4.1) :

$$W(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} \times 100 \quad (4.1)$$

D'où :

M_1 , M_2 , M_3 , sont les masses, en grammes, arrondie au nombre entier le plus proche, du récipient et la prise d'essai avant séchage, du récipient et la prise d'essai après séchage et du récipient respectivement.

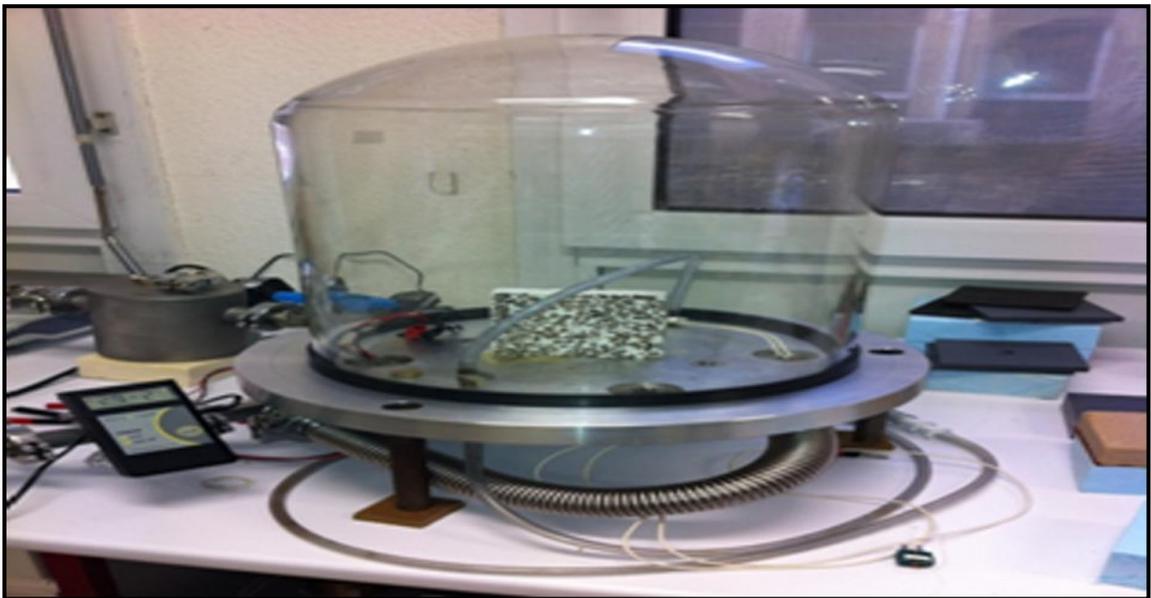


Figure 4.3 : Dessiccateur en verre utilisé dans l'expérimentation.

Les résultats obtenus par ces essais donnent un taux d'humidité de granulats de liège de 6%. La norme dédiée à cet essai (NF B 51-002) [247] indique que ces granulats sont considérés anhydres ($W < 13\%$).

4.3.1.3 Capacité d'absorption d'eau

Les granulats végétaux sont connus pour leur capacité d'absorption élevée. L'absorption peut être définie par la quantité de liquide qui pénètre dans les matériaux. Cette absorption conduit à l'augmentation de la masse (ou du volume).

La procédure de l'essai consistait à mettre une quantité précise de granulats de liège dans l'eau pendant 24 heures mais, ces granulats sont séchés, avant l'expérience dans une étuve à 103°C jusqu'à ce qu'une masse constante soit mesurée. Afin de permettre aux granulats d'absorber l'eau librement, nous avons piégé les granulats sous des passoirs. Pour éliminer l'eau de surface, nous avons utilisé un papier absorbant. Le taux d'absorption d'eau par les granulats de liège est calculé par la formule (4.2).

$$W(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (4.2)$$

D'où :

M_1 : la masse de l'échantillon après séchage ;

M_2 : la masse de l'échantillon une fois que l'échantillon est égoutté

Au bout de 24 heures d'immersion, le taux d'absorption est d'environ 1.08 fois leur poids initial. On constate pour tous les échantillons testés une forte capacité d'absorption d'eau. Ceci peut être lié à la présence des hémicelluloses mais cette absorption reste inférieure à celles de la plupart des fibres et des granulats de bois [83, 99-101]. La forte porosité des granulats est à l'origine de cette absorption. En effet, les particules de liège sont capables d'absorber l'équivalent de leur poids sec. Ce résultat pourrait s'expliquer probablement par la modification de la nature du liège. Néanmoins, cette absorption est inférieure à l'absorption du liège vierge (116.78%) [248]. Comme tous les matériaux lignocellulosiques, les granulats de liège sont considérés hydrophiles et ce comportement est une caractéristique importante à prendre en compte. Cette eau absorbée par les granulats constitue une réserve pour l'hydratation de la matrice cimentaire.

4.3.1.4 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des granulats de liège a été réalisée par tamisage, à partir de la norme NF B 57-011 [249]. À première vue, on remarque certains résidus de poudre avant même de faire l'essai. On obtient, effectivement, après l'essai 8% de poudre. Cela est dû, principalement, au changement de la nature du liège expansé. Ce dernier est friable, il peut, par conséquent, engendrer une quantité de poudre. Cette partie s'est d'ailleurs très bien distinguée sur la figure 4.4. On peut qualifier ces granulats de poudres de liège lorsque leurs diamètres sont inférieurs ou égaux à 0.25 mm conformément à la norme NF B 57-010 [250]. Comme il a été observé, la taille du liège varie des plus gros jusqu'aux poudres de liège. L'approche expérimentale consiste à utiliser une large gamme de granulats.

Un paramètre lié à la granulométrie des granulats de taille est le module de finesse (M_f). Cet indicateur est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins. Il a été déterminé par l'équation 4.3. La valeur du module de finesse obtenue pour ces granulats est de 2.87 (moyenne de 3 essais).

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumu (\%)} \quad (4.3)$$

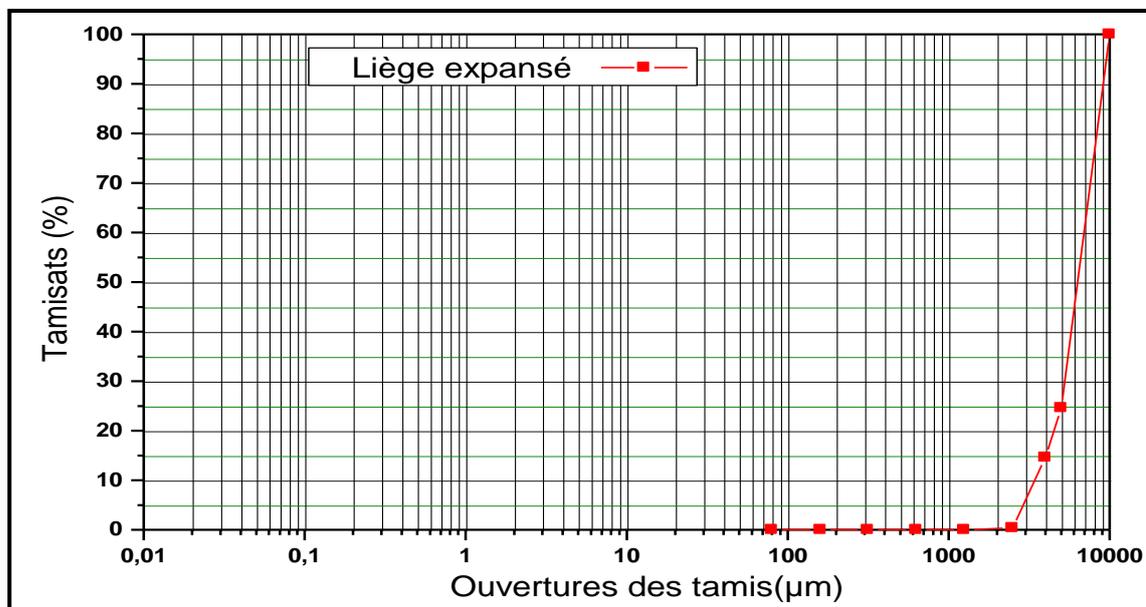


Figure 4.4 : Analyse granulométrique de déchets du liège.

Le tableau 4.4 résume les résultats des propriétés physiques de granulats de liège expansé utilisés dans la partie expérimentales.

Tableau 4.4 : Les propriétés physiques des granulats de liège expansé.

Propriétés physiques	Résultats
Masse volumique apparente (kg/m^3)	50
Absorption d'eau, 24h (%)	108
Le taux d'humidité (%)	06
Le module de finesse	2.87

4.3.2 Les sables

4.3.2.1 Masses volumiques

D'après les essais réalisés sur ces granulats, on a observé que la masse volumique apparente moyenne des sables de rivière et de dune est respectivement de 1530Kg/m^3 et 1450Kg/m^3 . On constate également que la masse volumique absolue moyenne du sable de rivière est de 2540Kg/m^3 et de 2500Kg/m^3 pour le sable de dune. Ces essais ont été effectués selon la norme NF EN 1097-6 [251].

4.3.2.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique de ces deux sables est effectuée et les courbes granulométriques sont illustrées par la figure 4.5. Cet essai nous permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de différentes familles de grains constituant les échantillons. Cette détermination est conforme à la norme EN 933-1 [252]. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm. L'essai consiste à disposer une série de tamis dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure du tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. Une machine électrique comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales à la colonne du tamis (Figure 4.6). Cet essai nous permet également de calculer le module de finesse M_f qui est égal à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 et 5,00mm. Le module de finesse du sable de rivière et du sable de dune est respectivement 2,86 et 1.

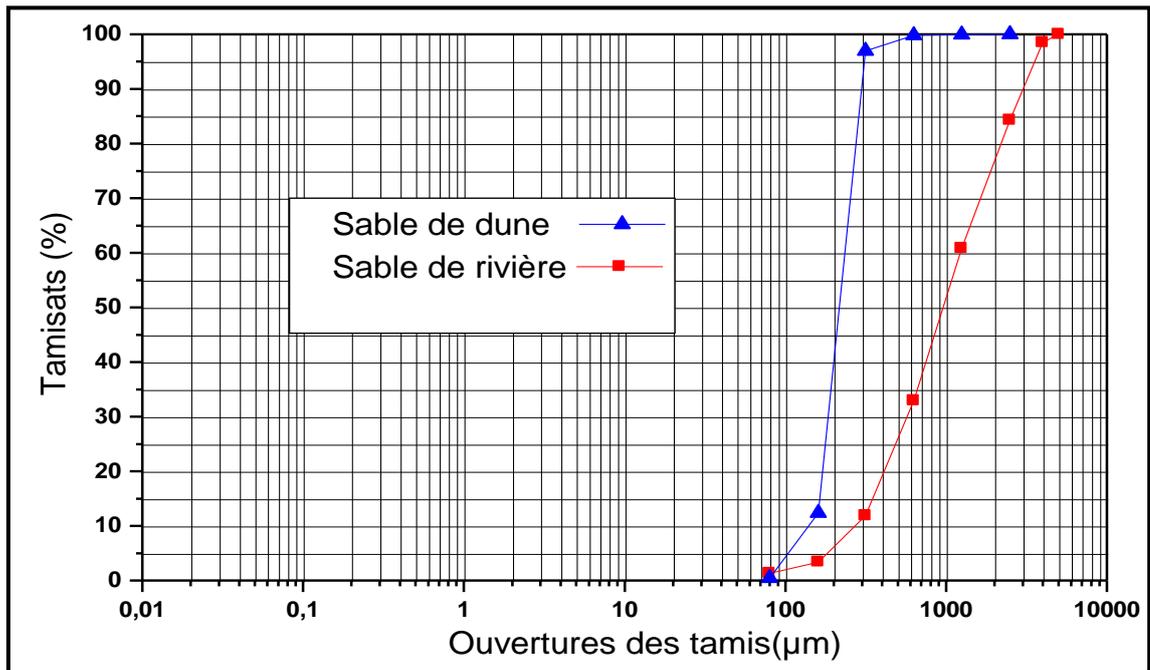


Figure 4.5 : Analyse granulométrique du sable de rivière et de dune.



Figure 4.6 : Essai granulométrique : Tamiseuse électrique.

4.3.2.3 Equivalent du sable

Pour mesurer la propreté du sable, un essai d'équivalent du sable a été mené selon la norme NF EN 933-8 [253]. L'essai consiste à séparer les flocculats fins contenus dans le sable (Figure 4.7). Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci (formule 4.4). Il apparaît, d'après

les résultats obtenus sur l'essai, que le sable de dune contient plus de flocculat par rapport au sable de rivière. En effet, l'essai nous donne un pourcentage ES de 50% pour le sable de dune et 91% pour le sable de rivière.

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100 \quad (4.4)$$

Avec :

h_1 : sable propre + éléments fins,

h_2 : sable propre seulement.

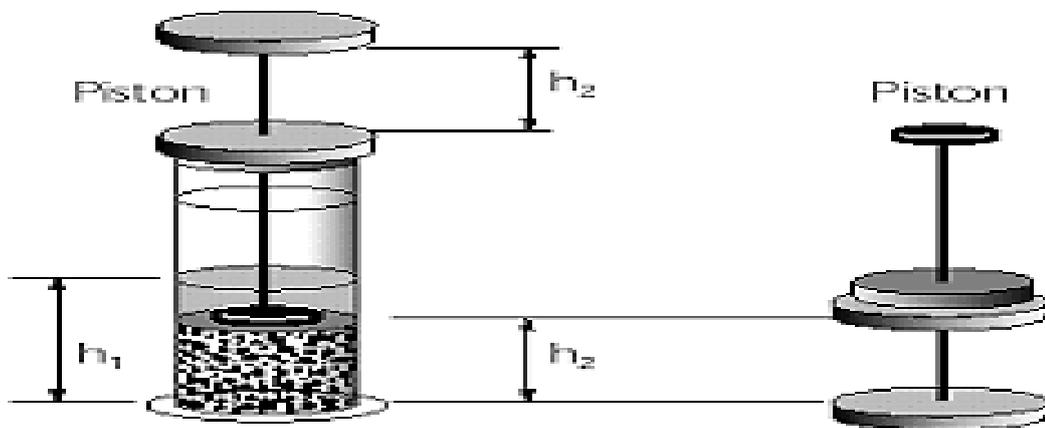


Figure. 4.7: Essai de l'équivalent de sable.

Le tableau 4.5 récapitule les caractéristiques physiques de chacun des granulats utilisés dans la partie expérimentale.

Tableau 4.5: Caractéristiques physiques des granulats utilisés

Granulats	D (mm)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Module de finesse	Equivalent de sable (%)
Rivière	0-5	1530	2540	2.86	91
Dune	0-3	1450	2500	1	50

4.4. Etudes préliminaires

Une étude préliminaire a été menée afin de déterminer les quantités de matériaux à utiliser par essai (déchets de liège et ciment) ainsi que la détermination de la quantité d'eau (E/C). En effet, différents rapports E/C ont été utilisés ; E/C=0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 et 0.60. Ces essais préliminaires permettaient, tout d'abord, d'apprécier l'ouvrabilité en fonction de la teneur en eau, avant toute évaluation. A ce stade, il s'agit de définir la formulation générale des composites sur la base de la masse volumique apparente, permettant de les qualifier de légers. L'addition des sous-produits industriels de faible alcalinité comme le laitier de haut fourneau par substitution au ciment, a été également réalisée. Dans une autre étape, nous avons ajouté du sable de rivière à la formulation ciment-liège. Les quantités ont été ajoutées en pourcentage par substitution au ciment. Toutes les formulations proposées dans cette étude expérimentale contiennent une étendue granulaire située entre 2.5 et 8mm. Ces granulats sont donc valorisés en tant que matière première de source locale.

4.5 Préparation et conservation des éprouvettes

Après avoir déterminé les volumes des matériaux, on procède à la préparation des composites. Les granulats de liège expansé sont les principaux composants des composites cimentaires. Ils ont été introduits dans un malaxeur à mortier à axe vertical d'une capacité de 5 litres. Le ciment est ensuite ajouté graduellement, puis le laitier de haut fourneau pour obtenir un composite homogène. Ces matériaux sont mélangés pendant au moins 2 minutes à vitesse lente après l'introduction du dernier constituant et une fois que le mélange est parfaitement homogène, l'eau est ajoutée dans le malaxeur à une vitesse lente pendant encore 2 minutes. Dans le cas des composites contenant du sable, ce dernier a été ajouté en dernier lieu en vue d'une bonne répartition dans le composite. Pour toutes les formulations, la mise en place est faite par vibration à l'aide d'une table à secousses. Les composites ont été réalisés dans des éprouvettes 40x40x160 mm³ et le démoulage est effectué après 24 heures de gâchage, puis conservés dans différents milieux de conservation. Les béciers en verre utilisés pour la confection des composites sont représentés dans l'annexe A.

D'une manière large, la durabilité d'un matériau est liée à la conservation de ses propriétés initiales sous l'action de plusieurs paramètres : l'humidité, la température, le temps (vieillessement)...etc. Les matériaux composites étudiés font donc l'objet de multiples

essais. Parmi ceux-là, l'analyse du comportement des composites vis-à-vis du milieu de conservation est l'une des premières étapes. En effet, le comportement physique et mécanique de ces composites diffère significativement. Des composites ont été conservés à la cure humide (HR=100% et $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$), une cure humide de 14 jours, suivie d'une cure à l'air de laboratoire. D'autres composites ont été également conservés à l'intérieur du laboratoire à l'air libre à $65\pm 5\%$ d'humidité et à une température de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Ces composites pourront être classés selon la différence des propriétés. Le choix de la méthode de cure du composite repose essentiellement sur la masse volumique apparente, la résistance mécanique et sur ses performances thermiques. A ce propos, les effets de cure sur les propriétés thermiques ont été également examinés. Notre analyse a porté sur les composites à sec (conservation à l'air de laboratoire). Toutefois, d'autres composites ont été conservés dans l'eau afin de comparer les effets de cure sur les propriétés thermiques. Dans cette étude, l'influence de l'ajout de sable sur les propriétés physiques, mécaniques et thermique en fonction de leur dosage a été également étudiée. D'autres composites ont été obtenus en remplaçant une partie du ciment par le laitier de haut fourneau.

4.6 Essais de caractérisation des composites

4.6.1 Essais des propriétés physiques

Dans cette partie, les caractéristiques physiques des composites à base de granulats de liège ont été identifiées.

4.6.1.1 Masse volumique apparente

La valeur de la masse volumique apparente retenue pour chaque composite est la moyenne des mesures effectuées sur trois éprouvettes. Ces dernières sont conservées jusqu'à l'âge d'essai. Les éprouvettes destinées aux essais mécaniques ont été utilisées pour déterminer la masse volumique apparente. En effet, avant chaque essai de flexion et de compression, les éprouvettes ont été essuyées puis pesées en utilisant une balance électronique de précision $\pm 0,1$ mg.

4.6.1.2 Essai d'absorption par capillarité

Cet essai donne des informations sur l'importance du réseau capillaire et la structure interne des matériaux. À travers ce test, on peut notamment caractériser la durabilité des composites cimentaires. Il est bien connu que l'absorption capillaire se produit lors du contact du matériau avec l'eau. Ce mouvement d'eau dans les capillaires influe sur les propriétés mécaniques et thermiques. L'essai est réalisé sur des éprouvettes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ préalablement séchées à l'étuve pendant 24h, à une température de 50°C , jusqu'à stabilisation de masse ce qui élimine pratiquement toute l'eau des pores. Ensuite, on place les éprouvettes dans une enceinte climatique de température de 20°C avec un taux d'humidité relative de 65%. Les quatre faces latérales des éprouvettes sont isolées de tout contact avec l'ambiance extérieure. Ainsi, trois échantillons ont été utilisés pour cet essai. Le principe consiste à poser la section transversale de l'éprouvette en contact avec l'eau dans un bac sur une hauteur de $5 \pm 1 \text{ mm}$ selon la norme EN 480-5 [254]. La profondeur d'immersion est maintenue constante pendant l'essai. Le schéma de principe de l'absorption capillaire est donné par la figure 4.8. La capacité d'absorption d'eau par capillarité W (g/cm^2) est calculé d'après l'eau adsorbée (formule 4.5). L'absorption est déterminée par pesées successives pendant 90 minutes.

$$W = \frac{M_h - M_s}{S} \quad (\text{g}/\text{m}^2) \quad (4.5)$$

Avec :

M_h : masse humide

M_s : masse sec

W : coefficient d'adsorption en (g/m^2)

S : section en contact avec l'eau.

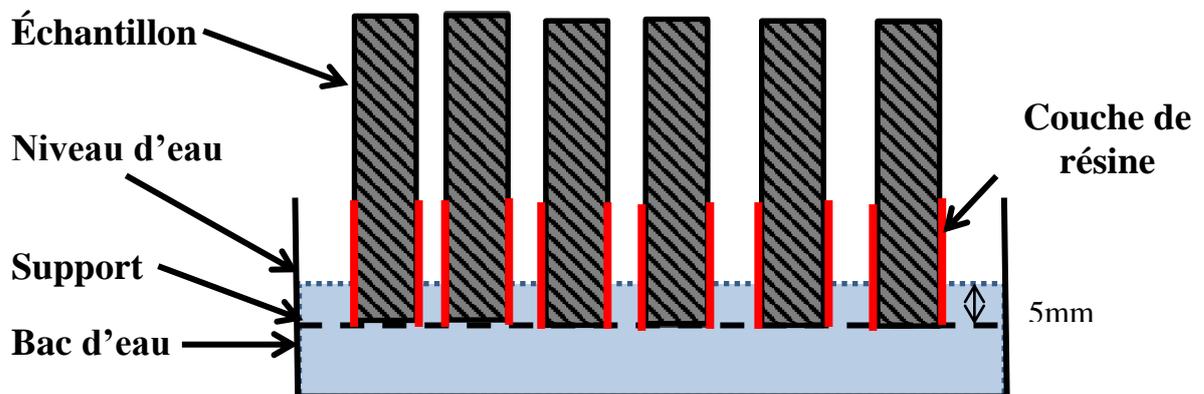


Figure 4.8: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

4.6.1.3 Essai d'absorption d'eau par immersion

L'essai d'absorption par immersion est similaire à celui de la capillarité. Cet essai est un indicateur de la durabilité du composite de granulats de liège. L'essai d'absorption d'eau par immersion s'avère donc indispensable pour attribuer un domaine d'utilisation, sachant que la porosité est la tare essentielle qui compromet la durabilité des composites à base de bois.

Pour cet essai, des éprouvettes 40x40x160 mm³ ont été immergées dans l'eau pendant 24 heures après étuvage jusqu'à masse constante. Cette expérience a été réalisée sur trois éprouvettes, la moyenne arithmétique des trois résultats caractérise la valeur du coefficient d'absorption d'eau par immersion. Le calcul du coefficient d'absorption d'eau est effectué par la formule (4.6) :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4.6)$$

Avec :

M_s : masse de l'éprouvette sèche,

M_a : masse de l'éprouvette après saturation.

4.6.2 Essais des propriétés mécaniques

Le comportement mécanique des composites à base de bois dépend essentiellement de la qualité des granulats de bois utilisés. Vient par la suite, la qualité de la matrice et la masse volumique du composite durci. L'analyse mécanique nous permet de bien visualiser les propriétés mécaniques du composite mais également de le situer selon les valeurs obtenues c'est-à-dire s'il peut être utilisé dans les constructions comme matériau porteur ou non porteur. Les essais réalisés, la forme des éprouvettes ainsi que les conditions d'essai sont exposés dans cette partie.

4.6.2.1 Résistance à la flexion

L'essai de traction par flexion est classiquement le plus pratiqué pour la caractérisation des matériaux. Les essais ont été effectués sur des composites âgés de 2, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours conservés dans trois modes de cure. La contrainte de traction par flexion est

déterminée conformément à la norme européenne EN 196-1 [255]. L'essai est réalisé sur un appareil de flexion. Ce dernier est composé de deux rouleaux sur lesquels les éprouvettes sont appuyées, et d'un autre rouleau qui est destiné à appliquer un moment fléchissant à mi-travée (Figure 4.9). Les trois plans verticaux, passant par les axes des trois rouleaux, doivent être parallèles et doivent le rester pendant l'essai. L'essai est effectué sur trois éprouvettes identiques normalisées 40x40x160mm³, la valeur moyenne obtenue sur les trois éprouvettes est la valeur retenue de la résistance à la traction par flexion. La résistance de traction par flexion est donnée par la formule 4.7 :

$$R_t(\text{MPa}) = \frac{1.5 F_t \cdot L}{b^3} \quad (4.7)$$

Avec :

F_t : charge à la rupture en N

L : distance entre axe des rouleaux d'appui de l'éprouvette ($L=100\text{mm}$)

b : largeur de section carrée du prisme en mm ($b=40\text{mm}$)

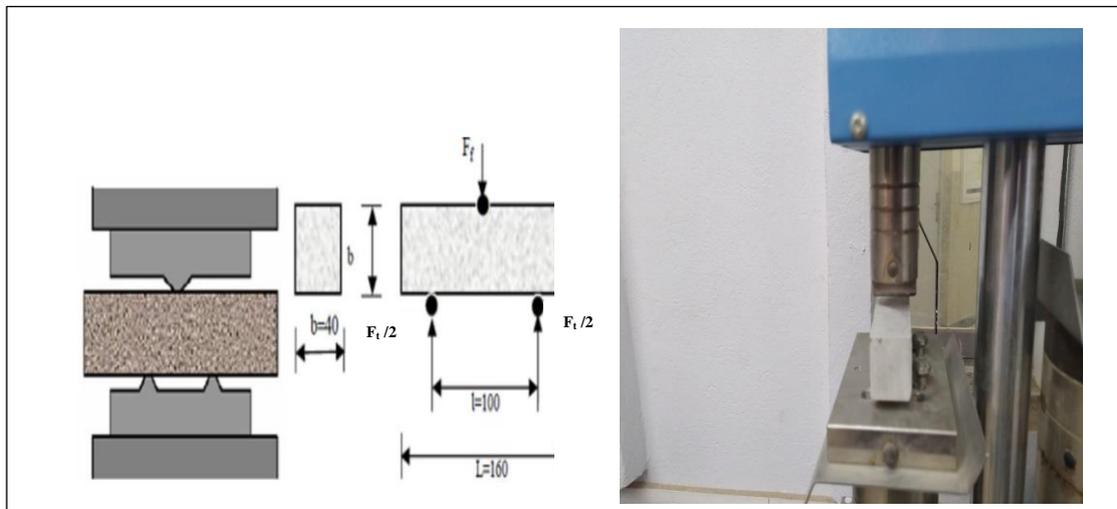


Figure 4.9 : Essai de résistance à la flexion.

4.6.2.2 Résistance à la compression

L'essai a été réalisé sur les deux morceaux obtenus après la rupture de l'éprouvette en traction par flexion (Figure 4.10). Le dispositif et l'éprouvette ont été placés entre les plateaux de la presse et l'éprouvette doit être comprimée sur ses faces latérales de moulage, sous une section de 40x40 mm². Les essais s'étendent sur une durée allant de 2

jours jusqu'à 365 jours. L'expérience a été menée conformément à la norme EN 196-1 [255].

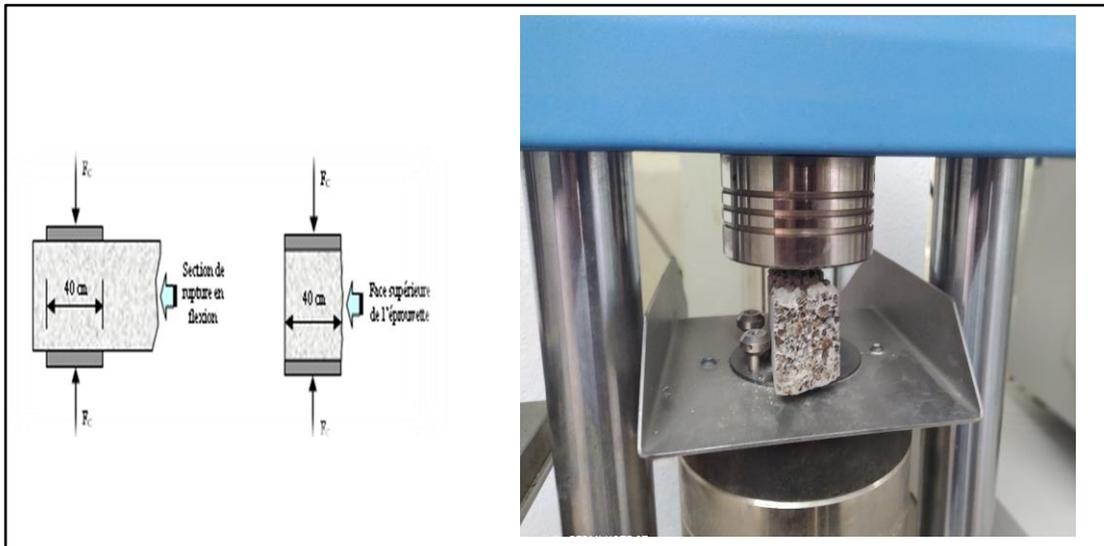


Figure 4.10 : Essai de résistance à la compression.

La résistance à la compression d'un composite, R_c exprimée en MPa, est donnée par l'Équation 4.8.

$$R_c \text{ (MPa)} = \frac{F_c}{b^2} \quad (4.8)$$

Avec b le côté de la section ($4x$) cm^2 , F_c la charge maximale à la rupture de l'éprouvette appliquée en Newton (Figure 4.10).

4.6.3 Essais des propriétés thermiques

La conductivité thermique λ , la résistance thermique ainsi que la chaleur spécifique des éprouvettes à base de déchets de liège à différents dosages sont déterminées. Cette partie est consacrée à l'étude des caractéristiques thermiques, de manière expérimentale, dans deux milieux de conservation à l'air libre et dans l'eau. Des éprouvettes de dimensions $200 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$ ont été confectionnées et les mesures sont effectuées à l'âge de 28 jours. Avant d'être passées à l'essai, les éprouvettes ont été conservées dans une étuve pendant 24 heures à une température de 103°C , ensuite, dans un dessiccateur pendant une journée.

Le nombre d'éprouvettes utilisées pour chaque composition est de six, la détermination de λ se fait entre deux échantillons. Aujourd'hui, plusieurs méthodes de mesure de la conductibilité thermique et de la chaleur spécifique sont utilisées, la méthode choisie est la méthode du fil chaud, l'appareil de mesure est le CT-METRE (Figure 4.11). Une sonde, constituée d'un fil résistif et d'un thermocouple dans un support isolant en kapton, est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser. L'expérimentation a été réalisée au laboratoire des essais thermiques du centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB).

La résistance thermique (R) des éléments confectionnés est calculée, elle est proportionnelle à l'épaisseur (e) et inversement proportionnelle à λ , elle est déterminée suivant la relation ci-dessous:

$$R = \frac{e}{\lambda} \text{ (m}^2 \cdot \text{K / W)} \quad (4.9)$$

Avec :

e : épaisseur de la paroi

λ : conductivité thermique



Figure 4.11 : Essai de conductivité thermique et de la chaleur spécifique par CT-METRE.

La chaleur spécifique, par définition, est la quantité de chaleur (Q) nécessaire pour élever la température de l'unité de masse d'une substance de 1 °C. Plus la chaleur spécifique est élevée, plus le matériau est considéré meilleur. Cette dernière est définie par la formule 4.10.

$$C_p = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p \quad (\text{j/kg} \cdot \text{k}) \quad (4.10)$$

Où Q est la chaleur « échangée » par le matériau durant cette transformation. La chaleur spécifique, comme la conductivité et la diffusivité thermique, est un paramètre intrinsèque au matériau et ne dépend que de sa composition chimique, de son état physique, de sa structure, de la température et de la pression. Elle traduit directement l'inertie thermique du matériau, en d'autres termes, sa capacité à stocker l'énergie.

La diffusivité thermique est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique). La diffusivité thermique est souvent désignée la lettre « a », elle est exprimée en (m²/s).

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (\text{en m}^2/\text{s}) \quad (4.11)$$

où :

λ : la conductivité thermique du matériau, en W.m⁻¹.K⁻¹,

ρ : la masse volumique du matériau, en kg.m⁻³,

C_p : la capacité thermique massique du matériau, en J.kg⁻¹.K⁻¹

4.6.4 Essais des variations dimensionnelles

La variation dimensionnelle des composites à base de bois constitue un véritable handicap parce que les granulats sont capables d'absorber une quantité importante l'eau. Plusieurs recherches ont été réalisées afin de mieux appréhender ce phénomène. Par contre, les études sur les variations dimensionnelles des composites à base de liège sont inexistantes. De ce fait, des essais ont été effectués, nous avons évalué le retrait et le gonflement en fonction de la teneur en particules de liège, du pourcentage de sable de rivière et du pourcentage de laitier de haut fourneau. La limitation de ces variations dimensionnelles est

importante pour la durabilité car ces dernières génèrent des contraintes pouvant conduire à la fissuration des composites.

Afin de mesurer ces variations dimensionnelles, un comparateur très sensible, à affichage digital, a été utilisé sur des éprouvettes de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ munies à leurs extrémités de plots métalliques (Figure 4.12). Les essais ont été effectués conformément à la norme française NF P15-433 [256]. Les éprouvettes utilisées pour déterminer le retrait ont été conservées dans une salle de conservation dont la température est de $20 \pm 2^\circ \text{C}$ et l'humidité relative de $60 \pm 5\%$. Par contre, les éprouvettes destinées pour déterminer le gonflement ont été conservées dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ \text{C}$. Le retrait et le gonflement ont été déterminés pour les différents âges durant 90 jours. Les mesures seront exprimées en microns par mètre.

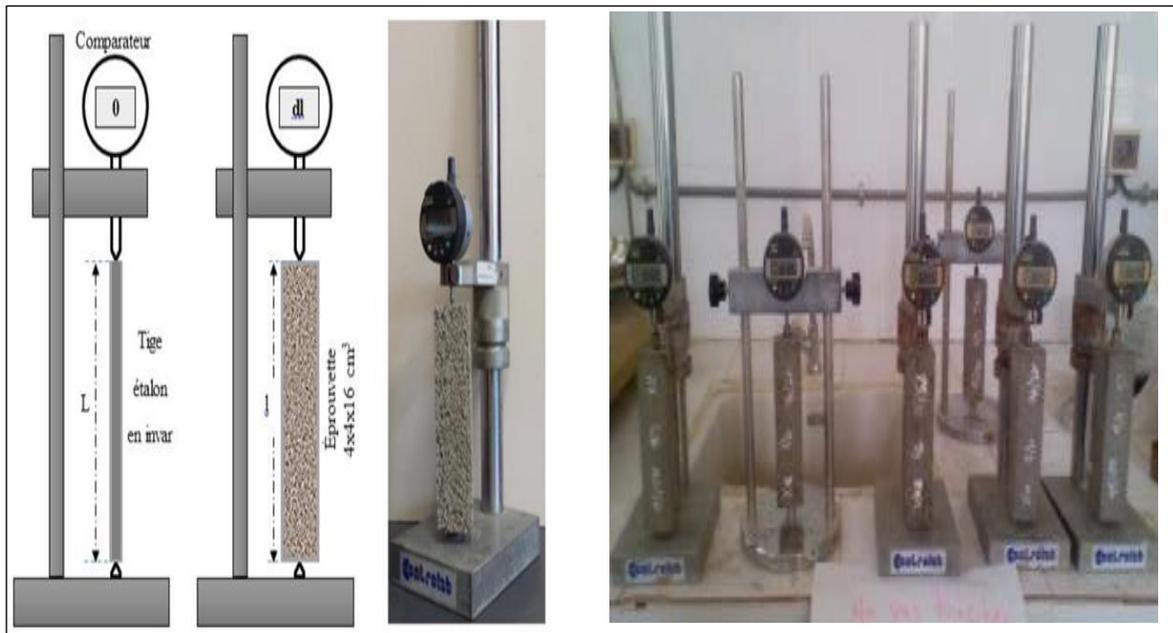


Figure 4.12 : Comparateur utilisé pour la mesure des variations dimensionnelles.

4.7 Variables étudiées

Les figures 4.13, 4.14 et 5.15 résument les variables étudiées des essais mécaniques et variations dimensionnelles ainsi que les performances thermiques.

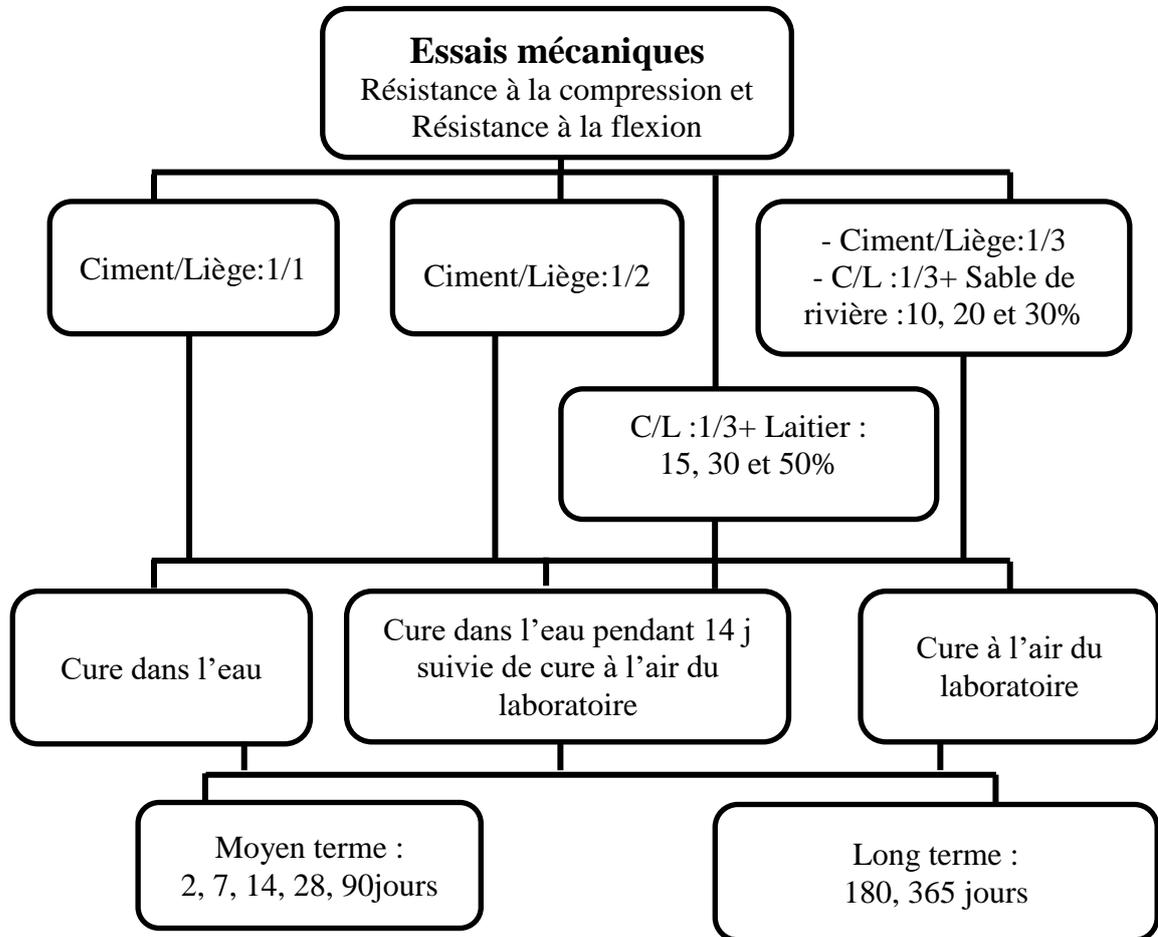


Figure 4.13 : Variables des essais mécaniques

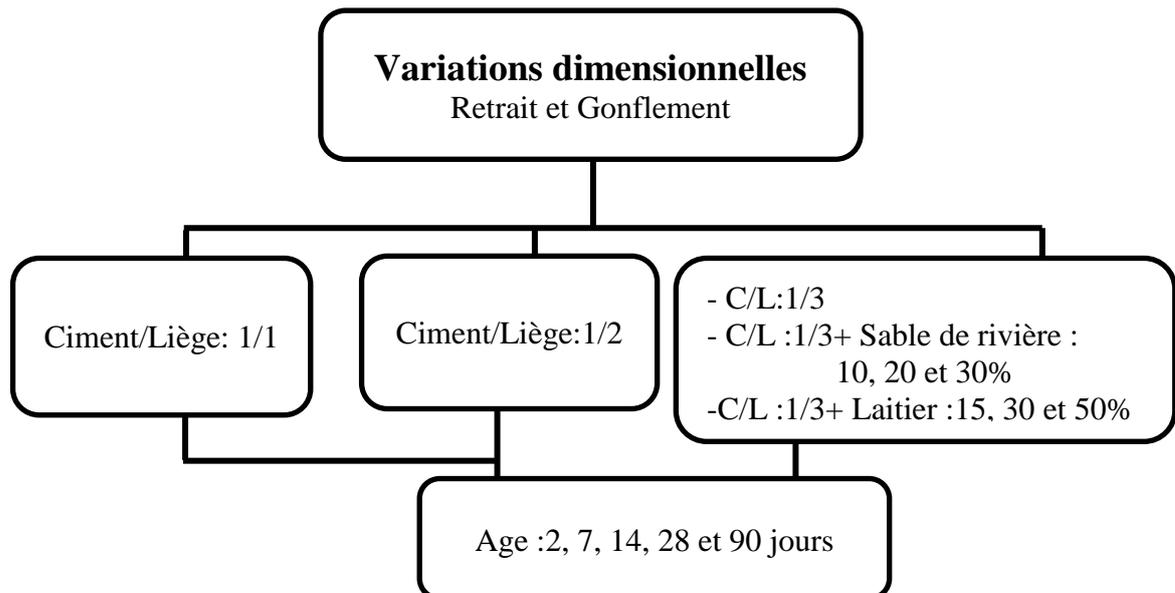


Figure 4.14 : Variations dimensionnelles des composites

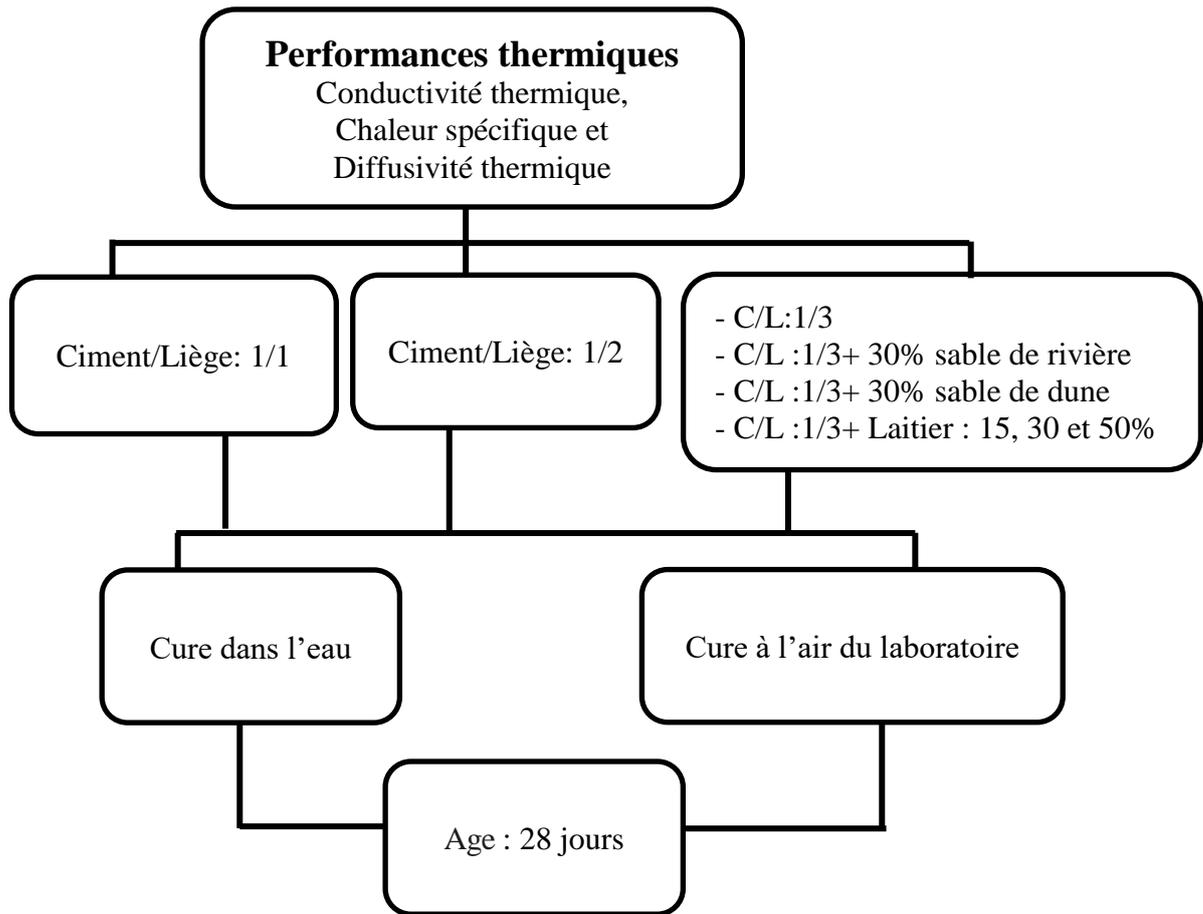


Figure 4.15 : Variables des essais thermiques

4.8. Conclusion

Cette partie est consacrée aux différents essais réalisés. En effet, de nombreux essais sont effectués sur les composites à base de granulats de liège. Nous offrons donc la possibilité de caractériser et de classer les composites étudiés. Cette campagne d'essais permet de mieux comprendre le comportement de ces composites dans différents d'environnements de cure. Ces essais expérimentaux, d'une part, nous permettent de produire des matériaux isolants qui répondent aux exigences locales en vue de promouvoir leur utilisation. D'autre part, la fabrication des composites par la valorisation des déchets locaux génère, en principe, des profils environnementaux, sanitaires et réduit le coût du matériau isolant.

CHAPITRE 5

ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

Le présent chapitre présente les résultats de l'étude des composites cimentaires à base de déchets de liège expansé. Les résultats et les analyses ainsi que les discussions des résultats des essais expérimentaux sont exposés dans cette partie. Ensuite une comparaison des résultats de notre étude avec les composites déjà développés sera effectuée.

5.2. Essais préliminaires

Après avoir caractérisé les matières premières, nous allons présenter une étape importante de l'étude : les formulations de composites granulats de liège/ciment/eau. En effet, plusieurs tentatives de formulation de composites ont été réalisées. Dans un premier temps, l'objectif est la recherche d'un composite homogène et facile à mettre en œuvre. Les composites ont été obtenus en mélangeant le ciment et le liège à sec en volume (Ciment/Liège : C/L:1/1, 1/2 et 1/3) avec différents rapports E/C. On peut noter, tout d'abord, comme premier constat que les granulats de liège ont un impact significatif sur les propriétés à l'état frais des composites cimentaires. En effet, l'ouvrabilité des composites est fortement affectée par le rapport Eau/Ciment et le volume de liège, car une partie de l'eau est absorbée par les granulats et sera, par la suite, bénéfique pour l'hydratation de la matrice cimentaire [216, 217]. La variation de l'ouvrabilité des composites de liège expansé est fonction du volume de liège. En effet, le volume de liège joue un rôle important dans la maniabilité des mélanges. L'ouvrabilité des mélanges a diminué à mesure que le volume de liège augmentait. Le composite est passé d'une consistance humide à une consistance normale. Cela peut s'expliquer en partie par une réduction du volume de pâte (en raison de la diminution du volume de liège dans le composite, associée à la faible densité des granulats de liège mais aussi à leur forte absorption d'eau). En effet, la composition du composite C/L:1/1 observe une augmentation de l'ouvrabilité, le liège circulant librement dans cette formulation. On peut conclure, qu'à l'état frais, en introduisant du liège expansé dans le ciment, la maniabilité est remarquablement diminuée avec l'augmentation du liège. Une meilleure consistance est obtenue avec un rapport massique Eau/Ciment=0.6. Cette consistance a été jugée adéquate, elle est adoptée pour les matériaux composites cimentaires à base de liège [257]. D'après les essais réalisés, il est possible d'obtenir une bonne ouvrabilité jusqu'à 75% de liège dans le volume des

composites à base de ciment. Avec la modification des volumes granulaires, les composites obtenus sont complètement différents, par conséquent, les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des composites seront différentes. Afin de situer et comparer les résultats, le rapport Eau/Ciment utilisé pour le reste de la partie expérimentale est constant pour toutes les formulations.

On constate que la prise des composites étudiées c'est adéquate pour le démoulage des éprouvettes, mais selon les travaux réalisés par Cérézo et al [183], l'introduction des particules de chènevotte perturbe la prise du ciment par l'absorption d'eau, malgré une saturation préalable. Donc, la prise est ralentie par manque d'eau disponible pour l'hydratation. Ce retard de prise est complètement confirmé par l'introduction de fibres de chanvre [258]. Quant au retard de prise du composite cimentaire contenant des granulats de liège, il est confirmé par Ana et al. [257]. D'autre part, comme on l'a vu dans le chapitre précédent, les granulats de liège contiennent un taux d'hémicellulose non négligeable mais qui reste inférieur aux autres fibres et aux granulats de bois. Ce constituant chimique peut être comme étant désigné le responsable de l'augmentation du temps de prise dans les composites ciment-granulats de liège. En effet, certaines études attribuent l'augmentation du temps de prise du ciment à une solubilisation partielle des hémicelluloses au cours de l'interaction entre la pâte de ciment et le bois [146-148], [259]. Les alcalins, qui proviennent de la dissolution du ciment, pourraient s'attaquer aux hémicelluloses et les transformer en oligosaccharides solubles qui inhiberaient ensuite l'hydratation de la pâte cimentaire [263].

La composition C/L:1/3 a été choisie pour remplacer une partie du ciment par le laitier de haut fourneau (LHF). Les essais effectués montrent qu'on ne peut introduire que 50% de laitier. Au-delà de ce pourcentage, la composition devient fragile, et on ne peut démouler des éprouvettes. Le manque d'eau est l'une des raisons de cette friabilité. Pour les compositions réalisées, nous avons constaté un retard de prise qui est d'autant plus important que le pourcentage de laitier augmente.

Dans le cas de la substitution du poids du ciment par un poids équivalent de sable, les compositions contenant au-delà de 30% de sable, présentent globalement, à l'état frais une consistance très ferme avec un rapport E/C=0.6. Ce résultat est une conséquence de la réduction du taux important de ciment. Ces composites sont considérés comme non

utilisables. Par conséquent, cette quantité de sable a été retenue comme pourcentage maximum. Enfin, que ce soit pour le laitier ou pour le sable, nous n'avons gardé que les pourcentages pour lesquels les échantillons sont exempts de tout défaut.

Nous allons dans un deuxième temps, rechercher des composites à l'état durci qui auront des résistances mécaniques, demeurant suffisantes, et avec une masse volumique légère pour réduire le poids de la structure. L'effet de l'addition du liège sur la masse volumique apparente de différents mélanges durcis dans l'eau est présenté dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Masse volumique apparente des composites en cure humide (28jours).

E/C	C/L :1/1 (kg/m ³)	C/L :1/2 (kg/m ³)	C/L :1/3 (kg/m ³)
0.30	1572	776	614
0.35	1569	1036	690
0.40	1493	1097	728
0.45	1383	1121	751
0.50	1359	1086	782

Globalement, la masse volumique apparente diminue avec l'augmentation de la teneur en liège. Cette diminution est due à la faible masse volumique apparente du liège par rapport à celle du ciment et aussi à la structure cellulaire très fine de liège. Le liège a une structure cellulaire hexagonale très fine qui ressemble à prismes et qui contient environ 85% de vides [264]. L'augmentation du rapport E/C diminue la masse volumique apparente pour le rapport Ciment/Liège de 1/1 mais augmente la masse volumique apparente pour les rapports ciment/liège de 1/2 et 1/3. De plus, on constate une compacité réduite du matériau avec l'augmentation du pourcentage de liège. Cela est plus visible sur le composite C/L:1/3.

5.3 Caractéristiques physiques

Les propriétés sont directement liées à celles de leurs composants. Par conséquent, plusieurs composants ont été changés comme nous avons pu le présenter dans le chapitre précédent.

5.3.1 Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'influence des ajouts de liège sur l'absorption d'eau par capillarité est présentée sur la figure 5.1.

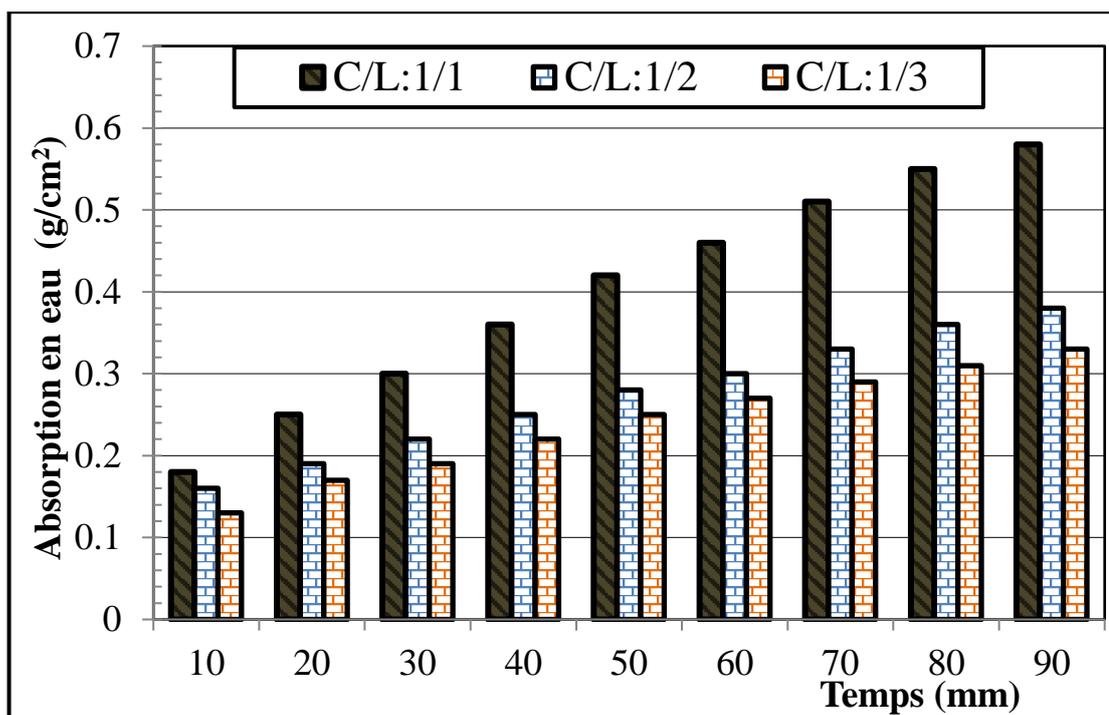


Figure 5.1 : Absorption de l'eau par capillarité en fonction du temps.

Les masses obtenues ont permis de calculer l'absorption capillaire d'eau pour chaque groupe d'éprouvettes. Les résultats d'essai montrent une augmentation de l'absorption avec le temps. En effet, la structure poreuse des granulats de liège, étant le facteur principal, ont entraîné une augmentation de l'absorption capillaire. Une étude ultérieure a montré que l'eau absorbée est à l'origine de la dégradation des composites [154]. Cependant, ces composites poreux sont plus résistants au cycle gel-dégel [262]. Les composites élaborés avec des granulats de liège présentent une structure caverneuse qui est très visible avec l'augmentation du volume de liège. En effet, une certaine quantité d'eau peut pénétrer dans cette structure. Contrairement à ce qui pouvait être supposé, le haut coefficient d'absorption d'eau par capillarité (0.58 g/cm^2) a été obtenu avec le mélange qui a un taux de volume de liège égal à 1 (C/L:1/1). Par contre, les compositions C/L:1/2 et C/L:1/3 présentent des valeurs moins prononcées qui sont de 0.38 g/cm^2 et 0.33 g/cm^2 respectivement. En effet, un réseau constitué de grands pores connectés entre eux est présent dans le composite C/L:1/2 et plus particulièrement dans la composition C/L:1/3. Cela est confirmé par les travaux réalisés par Ioannou et al. [263], un composite qui contient de grands pores d'aération possède une faible capillarité. Cette porosité va permettre à l'eau de s'échapper vers l'extérieur. Brás et al. [257] ont constaté une diminution linéaire du coefficient d'absorption par capillarité d'eau jusqu'à 50% de dosage de liège en remplacement du sable et qu'il est presque constant pour des dosages allant de 50% à 70%

de liège. Malgré la présence de liant, le réseau reste majoritairement interconnecté. De ce fait, la rétention d'eau reste plus ou moins faible, ce qui pourrait se répercuter sur les propriétés mécaniques de la matrice cimentaire et les propriétés physiques telles que la masse volumique et le gonflement du matériau. La capacité d'absorption d'eau capillaire obtenue reste importante. En effet, les composites sont très sensibles aux phénomènes de sorption/désorption (structure caverneuse).

Pour éviter la décomposition des granulats de liège qui est due à la forte alcalinité de l'eau et ainsi améliorer les performances des composites, il est nécessaire de réduire la porosité accessible à l'eau par un traitement du composite en respectant le caractère caverneux des composites. De plus, un traitement préalable des granulats de liège conduit forcément à une diminution de l'absorption capillaire. Pour surmonter ce phénomène d'absorption capillaire, plusieurs travaux ont été réalisés sur des granulats lignocellulosiques [189, 200]. Cependant, les travaux concernant le traitement des granulats de liège ont été peu exploités. Cet élément de caractérisation du composite vis-à-vis de l'eau pourrait être donc important à considérer dans la prévision de la durabilité des composite à base de liège. Par ailleurs, pour avoir une idée plus précise sur la capacité d'absorption des composites, un essai d'absorption d'eau par immersion a été réalisé.

5.3.2. Essai d'absorption par immersion

Les mesures d'absorption d'eau par immersion W sont représentées pour chacun des composites étudiés (figure 5.2). Les valeurs du Tableau 5.1 montrent que l'absorption maximale des composites préparés avec les granulats de liège atteint environ 22.5%. Cette absorption d'eau par les granulats de liège recyclé est due à la porosité importante du composite. Les résultats montrent le caractère hydrophile du liège qui favorise une augmentation de la demande en eau. La capacité d'absorption la plus élevée est celle du ratio C/L : 1/3 qui a la plus grande porosité. Les études menées par Barnat-Hunek et al. [155] confirment le caractère hydrophile des granulats de liège expansé ; avec seulement 20% de liège expansé (diamètre entre 0.5-2mm), le composite absorbe 30.1% d'eau. L'absorption d'eau de la formulation C/L : 1/3 est comparable à celle du béton de chanvre réalisé par Nguyen dont la teneur en eau minimale est de 22.4% mais reste inférieure à la teneur en eau maximale (41.9%) [264]. Selon une étude réalisée par Lukowski [265], le coefficient d'absorption d'eau, après l'addition de 60% de granulats de liège, est bien

inférieur pour les mortiers avec de la mousse de polystyrène et ceux avec l'ajout de polystyrène, ce qui est bénéfique pour les conditions d'humidité à l'intérieur d'un bâtiment. Cependant, ces composites se caractérisent par une capacité d'absorption élevée et une faible résistance à la corrosion, surtout au gel. Par conséquent, appliquer une protection hydrophobe sur ces composites semble justifié. Beaucoup de travaux ont recommandé l'application d'enduit afin d'assurer leur pérennité [83, 183, 184]. En matière de conservation, il est important de conserver les composites à l'intérieur d'une enceinte fermée pour éviter le comportement hydrique des composites. La même suggestion a été proposée par Menor et al. [95].

On remarque que la diminution du volume de liège entraîne une diminution de l'absorption d'eau d'environ 18 à 27% pour les formulations C/L : 1/2 et C/L : 1/3 par rapport à la composition C/L :1/1. Cela est dû à la structure caverneuse des composites. Ces résultats sont comparables à ceux des bétons légers à base de granulats légers manufacturés [212, 213].

Tableau.5.2 : Le taux d'absorption d'eau après 24h d'immersion.

Compositions	Absorption après 24h
C/L:1/1	16.5%
C/L:1/2	18.5%
C/L:1/3	22.5%

La porosité des granulats de liège va engendrer une compétition entre les granulats et le liant hydraulique [266, 267]. Selon le travail de recherche réalisé par Cerezo, cette compétition semble être à l'origine du freinage du liant hydraulique [183]. L'utilisation de liants à fort pouvoir de carbonatation, notamment à base de chaux aérienne, est d'ailleurs souvent choisie pour résoudre ce problème [267, 268]. La diminution de la capacité d'absorption d'eau des granulats de liège permet une meilleure adhérence entre le ciment et les granulats.

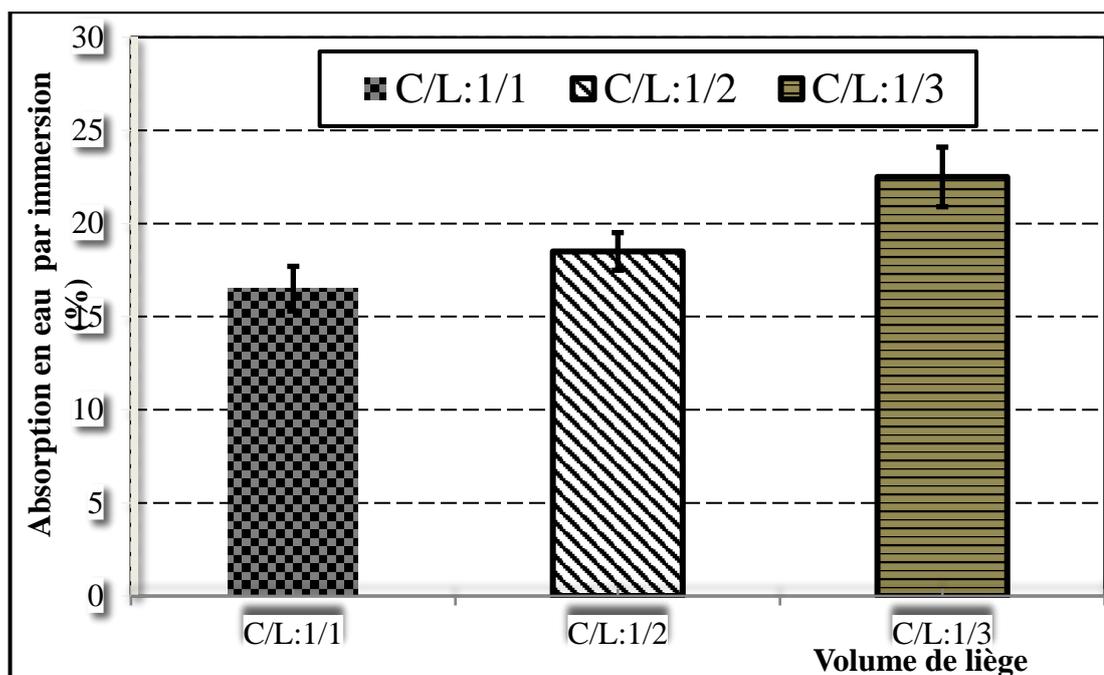


Figure 5.2: Absorption d'eau après par immersion en fonction des composites.

D'après les résultats obtenus, on constate que les composites sont très sensibles à l'eau ce qui va agir directement sur les propriétés isolantes [188]. Ce qui est en résulte une forte influence du milieu de stockage des composites. L'eau va donc remplacer l'air isolant dans les particules du liège. De ce fait, une étude des variations de conductivité thermique s'impose en fonction de l'humidité. Cette absorption élevée représente une tare essentielle qui compromet la durabilité des composites. En effet, ces facteurs d'absorption sont des indices révélateurs de la durabilité dans ce genre de matériau. On vient donc de démontrer le comportement du composite ciment-liège vis à vis de l'humidité. En comparaison avec d'autres matériaux, l'absorption d'eau par immersion des composites étudiés est comparable à celle du béton léger confectionné avec des granulats de forte absorption. Le béton léger fabriqué avec des granulats de faible et de forte absorption a une absorption d'eau de 12% et 23% respectivement [192].

5.2.3. Masse volumique apparente

Dans cette section, nous utiliserons ici la masse volumique apparente pour comparer les différents composites car il y a une forte relation entre la porosité et la masse volumique apparente dans ce type du matériau.

5.2.3.1. Effet de conservation

On étudie dans un premier temps l'impact du mode de conservation sur la masse volumique apparente. On note, un développement continu de la masse volumique apparente, au cours du temps, des composites conservés dans l'eau (Figure 5.3). En effet, la structure caverneuse et le caractère hydrophile des granulats permettent l'absorption d'une quantité importante d'eau. Ce caractère hydrophile peut, aussi, être attribué à la présence des hémicelluloses dans les granulats de liège. Par conséquent, une forte masse volumique est obtenue après un an de conservation dans la cure humide par rapport aux autres compositions, mais qui reste inférieure à celle du béton caverneux [207].

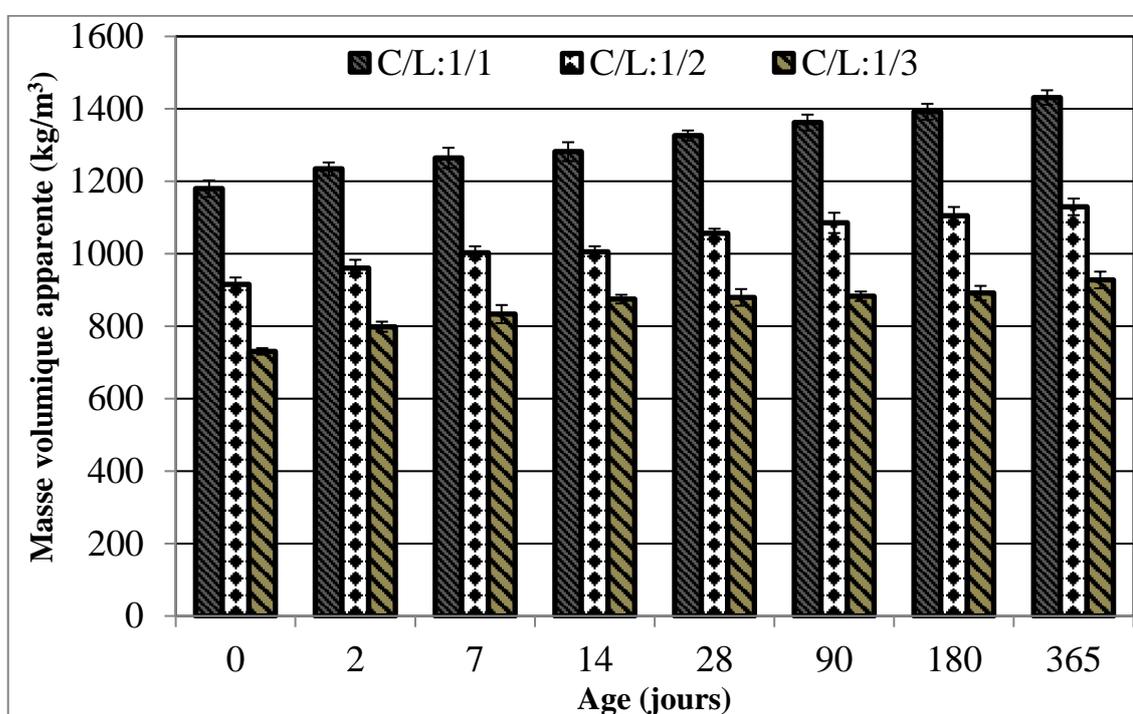


Figure 5.3: Evolution de la masse volumique des composites ciment-liège en fonction du temps : cure humide.

Globalement, cette masse varie entre 539 et 1431 kg/m³, elle est inférieure à celle obtenue avec le mortier à base de granulats de liège dont le diamètre varie entre 3 et 8mm (590 et 1980 kg/m³) [269]. Tous les composites dans lesquels on a introduit du liège expansé ont montré des masses volumiques inférieures à 2000 kg/m³ et de ce fait, appartenait à la classe des bétons légers [270].

Selon la figure 5.4, la masse volumique apparente des composites diminue après 14 jours de cure humide.

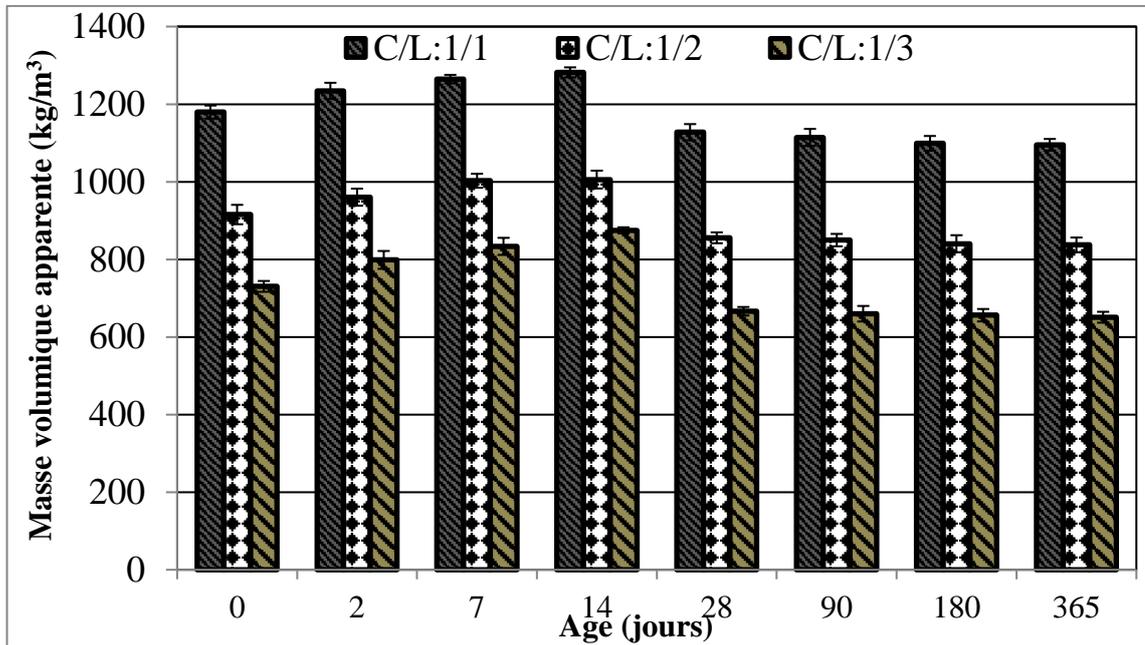


Figure 5.4: Evolution de la masse volumique des composites ciment-liège en fonction du temps : cure humide pendant 14 jours suivie de cure au laboratoire.

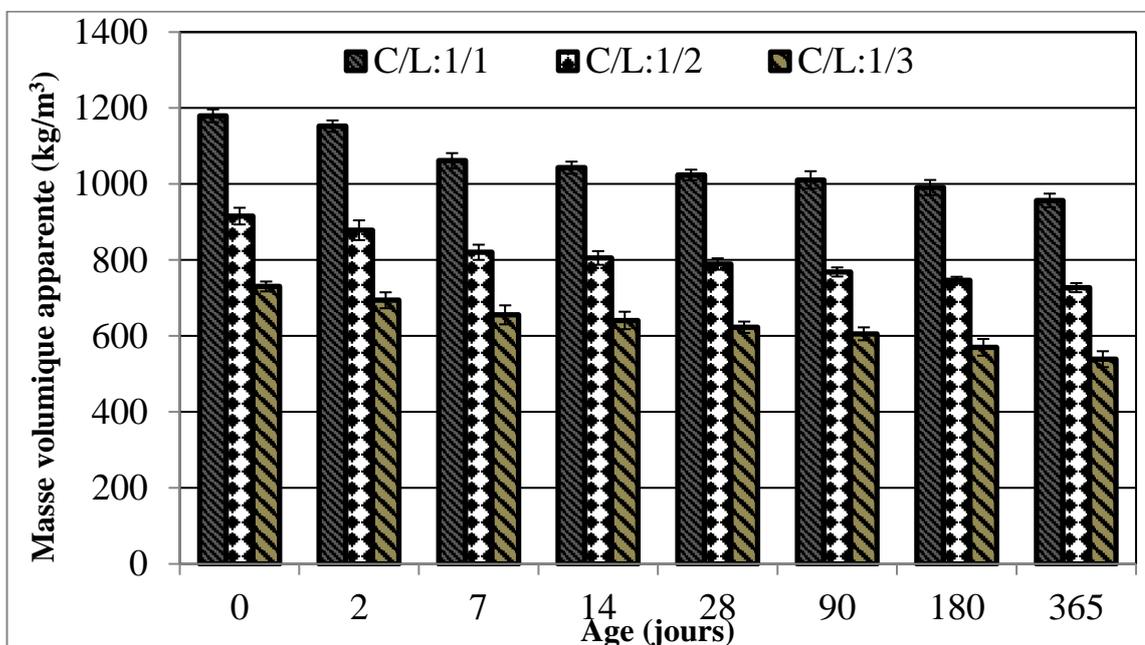


Figure 5.5: Evolution de la masse volumique des composites ciment-liège en fonction du temps : cure au laboratoire.

L'exposition des trois compositions (C/L : 1/1, 1/2 et 1/3) à l'air libre induit un séchage rapide des composites. En effet, en fonction de la porosité dans le matériau, on observe une évaporation de l'eau lors de la cure à l'air libre (Figure 5.5). On peut, donc, constater que la quantité d'eau dans le composite varie en fonction de l'environnement de cure. Par conséquent, le mode de cure est un élément important pour leur durabilité. Les composites conservés pendant 14 jours dans l'eau et le reste au laboratoire, présentent un développement optimal de la masse volumique apparente. Les composites élaborés sont plus hydratés à court terme et plus légers à moyen et long terme.

5.2.3.2. Effet de l'addition de liège

Un autre paramètre influant sur la masse volumique semble être le volume de liège dans le matériau (Figures 5.3, 5.4 et 5.5). L'observation faite sur les graphes précédents nous donne une forte diminution des mesures de masse avec l'addition du volume de liège. Comme attendu, la quantité d'air occlus dans le matériau est plus importante avec l'addition de liège [95, 155, 202], car la masse volumique du liège est nettement inférieure à celle du ciment. Cela est à relier, également, à la diminution de la teneur en pâte. Cette constatation reste valable dans les différents environnements de cure. La masse volumique varie de 539 à 1431 kg/m³ selon le volume de liège et l'environnement de cure. Cette masse est un indicateur de compacité des composites. La composition dont le volume de ciment est égal au volume de liège (C/L:1/1), après un an de cure humide, possède une masse supérieure à 1200kg/m³, ce que lui permet d'être classée dans les bétons légers classe III [271]. Les masses obtenues peuvent être comparées avec le béton de bois contenant de l'argile dans les travaux menés par Bouguerra et al. [177]. Suivant la norme ACI 213R -87, cette formulation peut être classée comme un béton léger de structure (1350 – 1900 kg/m³) [59].

Par ailleurs, l'utilisation de deux volumes de liège dans les compositions permet d'atteindre des masses volumiques apparentes variant de 727 à 1129 kg/m³. Selon le guide ACI 213R-87, ces composites peuvent être classés comme un béton léger de résistance modérée [272]. Après l'addition de trois volumes de liège dans la matrice cimentaire, on obtient une masse plus faible après durcissement. Il faut souligner que la quantité des granulats est importante dans ce composite (75%). Les masses obtenues à long terme varient de 539 kg/m³ à 927 kg/m³ pour la cure à l'air de laboratoire et la cure humide

respectivement. Par contre, la cure dans un milieu humide suivie de la cure à l'air de laboratoire donne une masse de 650kg/m^3 , ce qui nous permet de le classer comme un béton de faible densité [272].

5.2.3.3 Effet de l'addition de sable

L'introduction du sable naturel modifie la qualité de la matrice du composite. Selon Barnat-Hunek et al. [155], la combinaison entre le sable et les granulats de liège dans la pâte de ciment donne une adhérence parfaite et une chute spectaculaire de la porosité pour la même quantité de liège. De plus, l'introduction du sable pourrait avoir des conséquences directes sur propriétés des composites. En effet, on constate que la masse volumique du composite durci est plus ou moins sensible au dosage en sable (Figures 5.6, 5.7 et 5.8). Nous pouvons constater également que la masse volumique est très sensible au mode de cure. Les masses trouvées pour les composites conservés dans l'eau sont plus importantes (Figures 5.6). Cela est dû principalement au caractère hydrophile des granulats de liège. Ce constat prouve, malgré la présence du sable, que les granulats de liège restent responsables de l'évolution de la masse volumique. Une grande partie de l'eau se trouve donc absorbée ou évaporée par les granulats de liège selon le mode de cure. C'est ce qui prouve notamment qu'il y a une vraie concurrence d'absorption d'eau entre les granulats de liège et le reste des constituants.

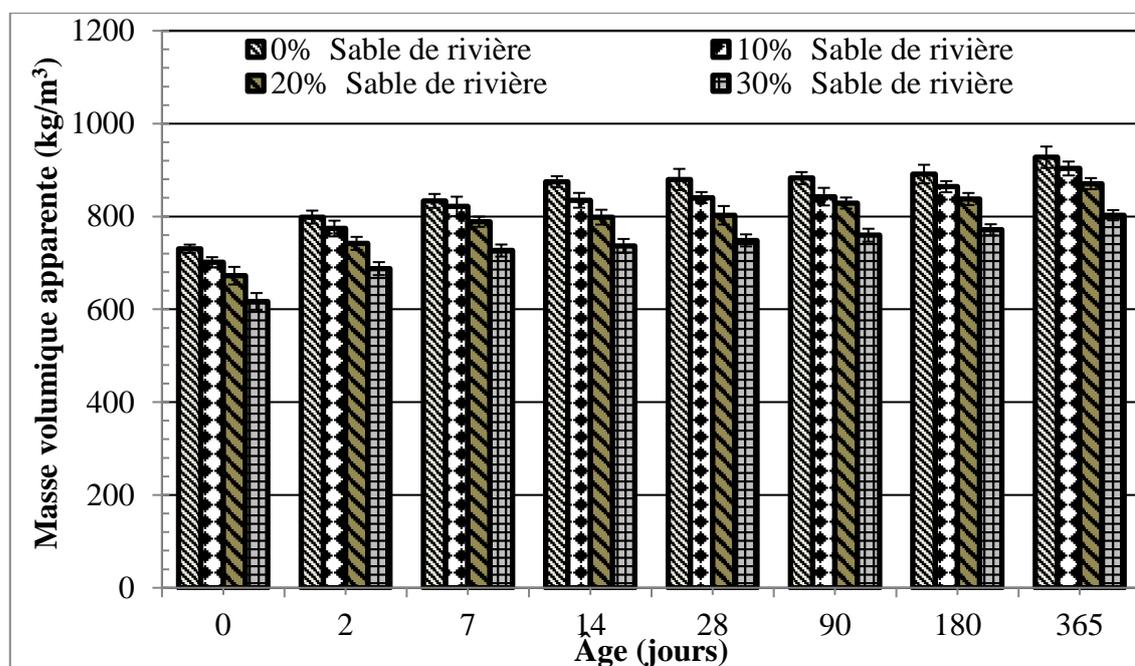


Figure 5.6: Variation de la masse volumique en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L:1/3: cure humide.

Les résultats indiquent que la masse volumique diminue avec l'ajout de sable. Après un an de cure, les composites conservés pendant 14 jours dans l'eau et à l'air ont une masse variée entre 574 kg/m^3 et 635 kg/m^3 selon les pourcentages de sable (Figure 5.7).

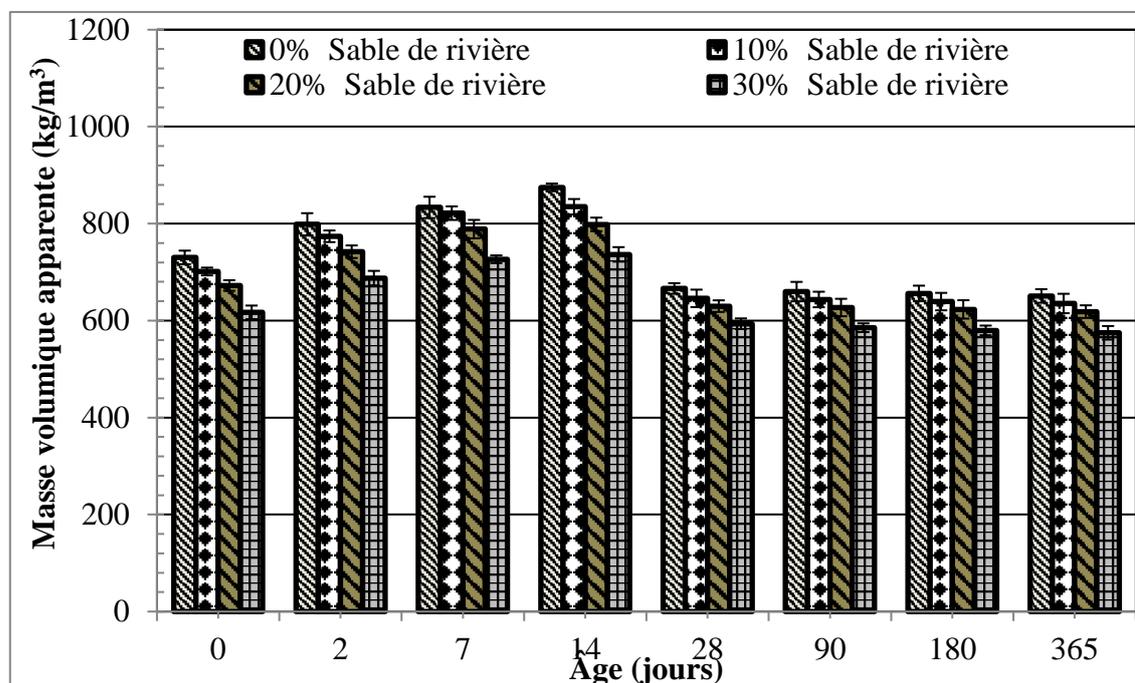


Figure 5.7 : Variation de la masse volumique en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L:1/3: 14 jours cure humide suivie de cure au laboratoire.

La masse obtenue entre dans la gamme du béton cellulaire et du béton de bois [101]. Les résultats attestent que les composites obtenus peuvent être classés, selon le guide ACI 213R-87, comme des bétons de faible densité [272]. Cela nous permet d'avancer que ces composites ne peuvent pas être utilisés comme matériaux porteurs. En raison de la présence des granulats de liège, l'eau qui sert de réserve pour l'hydratation du ciment s'évapore rapidement lors de la cure à l'air de laboratoire (Figure 5.8). Les masses volumiques apparentes obtenues sont des indicateurs de la capacité du composite à libérer l'humidité. Ce phénomène engendre à des défauts autour des granulats et, par conséquent, réduction la qualité du composite [153]. De plus, il contribue au retrait maximum du composite cimentaire [189]. Donc, nous pouvons avancer que ces composites possèdent une capacité à absorber et à libérer l'humidité importante. Selon Vrána [188], la durabilité des composites est liée à la compréhension du transfert d'humidité, ce qui nous ramène, encore une fois, à dire qu'une protection du composite de l'environnement extérieur, afin d'éviter le transfert de l'humidité, est nécessaire [83].

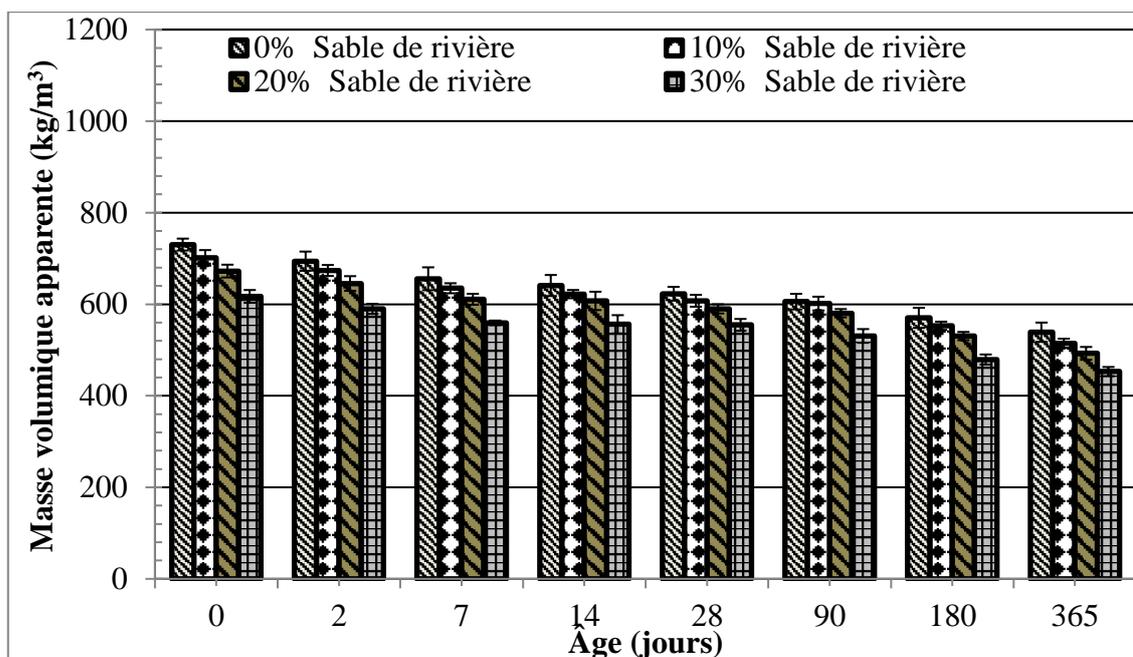


Figure 5.8: Variation de la masse volumique en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L:1/3: cure au laboratoire.

5.2.3.4 Effet de l'addition du laitier

Nous allons nous intéresser dans cette partie au liant hydraulique composé de ciment (CEM I 42.5) et d'un sous-produit industriel : le laitier de haut fourneau (LHF). D'après les résultats obtenus, il ressort que l'introduction du LHF dans les composites diminue la masse volumique apparente au moyen et long terme (Figure 5.9). Cela est dû, probablement, à l'augmentation de la porosité avec l'ajout de laitier [273]. La cure initiale humide suivie de la cure à l'air libre conduit à une porosité plus grande, notamment avec 50% de laitier [274, 275]. Les travaux rapportés par Choi et al. [276] sur les composites à base de fibres ont montré une différence de densité théorique et de densité durcie, ce qui indique que de grands pores ont été générés. Un effet contraire est observé à court terme pour les composites avec 15% et 30% de LHF. Ces composites ont une masse plus importante qu'un composite confectionné avec du ciment Portland seul. Cette diminution est une conséquence de l'hydratation latente du LHF dans le ciment Portland. D'une part, on peut constater que le laitier contenu dans les composites a un effet de retardateur de prise. Selon Jiang et Grandet [273], l'hydratation du laitier est très lente au jeune âge et activée à long terme, ce qui permet d'obtenir une structure de pore plus fine. Ce retard est d'autant plus important que le pourcentage de laitier augmente [60]. D'autre part, le phénomène de prise est lié à plusieurs paramètres parmi lesquels on peut citer la finesse de la mouture. En effet, le temps de prise est d'autant plus rapide que la finesse est grande [53].

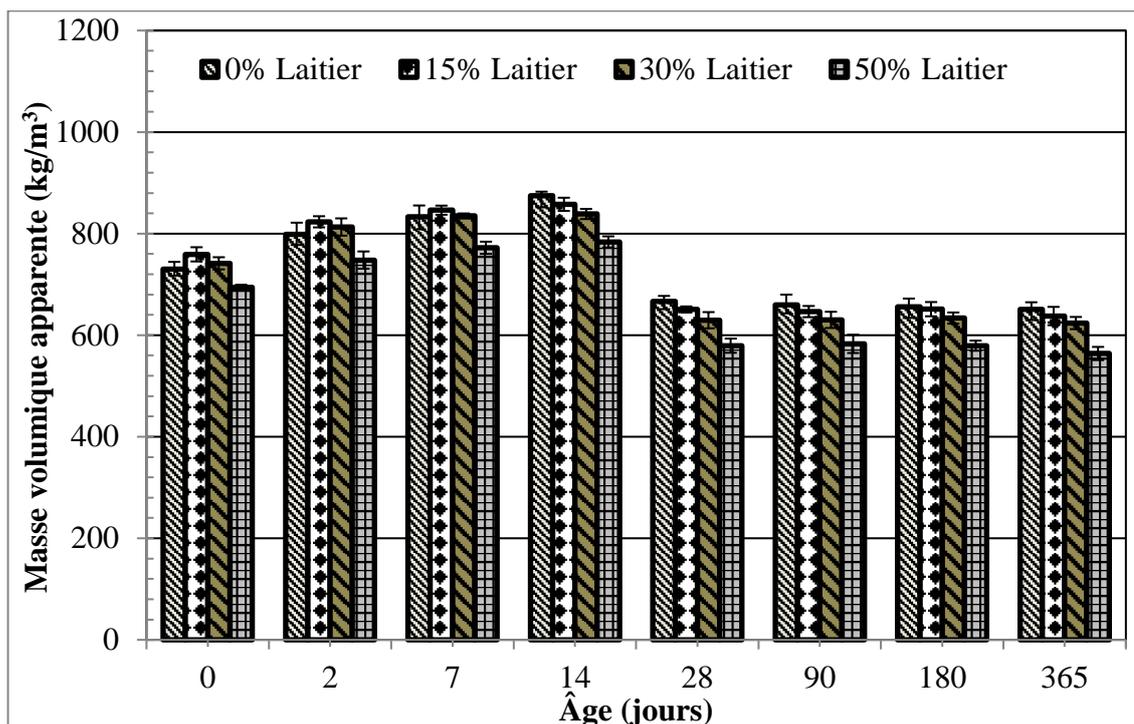


Figure 5.9 : Influence de l'ajout du laitier sur la masse volumique des composites.

La masse volumique apparente est plus faible à long terme, elle varie entre 563 et 638 kg/m³ selon le pourcentage de laitier. Selon la norme ACI 213R-87, ces composites peuvent être classés comme béton léger de faible masse volumique [272]. La substitution du ciment par le sable et le laitier dans la matrice, donne des masses volumiques apparentes comparables à celles des briques creuses ou perforées [277].

5.2.3.5 Pertes et gains de masse des composites

Le comportement des composites vis-à-vis de l'eau montre un fort coefficient d'absorption d'eau. Cela induit un gain et une perte de masse importante des composites (Figures 5.10 et 5.11). Il semble que la stabilisation massique n'est pas atteinte à l'issue d'une période de conservation d'un an. Incontestablement, les variations de masse augmentent avec l'addition de liège. En effet, l'excès d'eau est stocké dans les granulats ou évaporé selon le mode de conservation. Pour les deux modes, les variations de masse sont presque équivalentes entre les éprouvettes conservées dans l'eau et celles conservées à l'air de laboratoire. Pour toutes les formulations, la différence mesurée entre gain et perte est souvent inférieure à 3 % (Figure 5.10a et 5.10b).

On observe que les variations de perte et de gain de masse sont très notables après une semaine de démoulage et qu'elles ne dépassent pas 8% au-delà de 28 jours. On peut constater que le gain de masse est légèrement supérieur à celle de la perte de masse. Ce dernier peut être induit par l'évaporation d'une grande quantité d'eau qui génère la formation d'une porosité importante à l'état sec. Cette porosité s'ajoute à la porosité initiale des granulats de liège et la porosité du liant pur (pores des hydrates). Par contre, le gain de masse est élevé et s'explique par le fait que les granulats de liège sont hydrophiles et par l'hydratation du liant. Ce résultat permet de conclure que les composites possèdent une porosité presque entièrement interconnectée, ce qui influe, notamment, sur l'étanchéité et, par conséquent, sur la durabilité des composites. Les variations de masse constatées évoluent entre 2 et 27% de la masse initiale des éprouvettes. La composition C/L:1/1 donne un taux de 12% après 28 jours de cure humide qui est supérieur à celui du béton de bois (8%) [278]. En revanche, la composition C/L:1/3 enregistre un gain de masse plus élevé (27%) après un an de cure mais inférieur à celui du béton de chanvre (33%) [278].

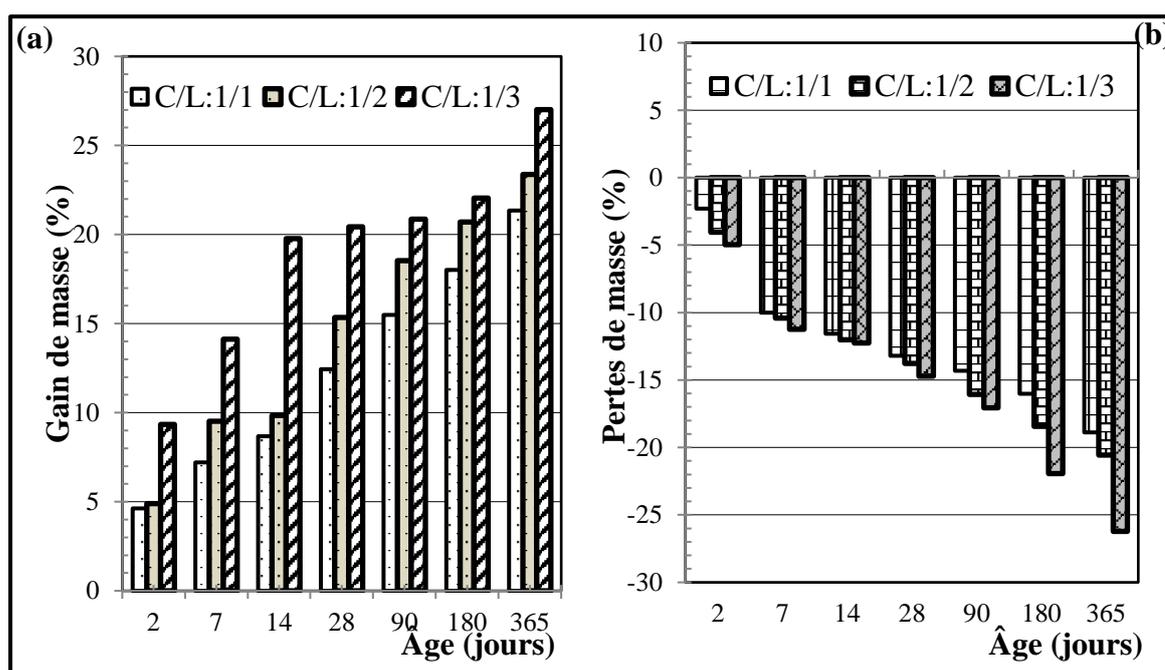


Figure 5.10 : Evolution de gain et de perte de masse en fonction du pourcentage de liège des composites : (a) conservés dans l'eau, (b) conservés à l'air de laboratoire.

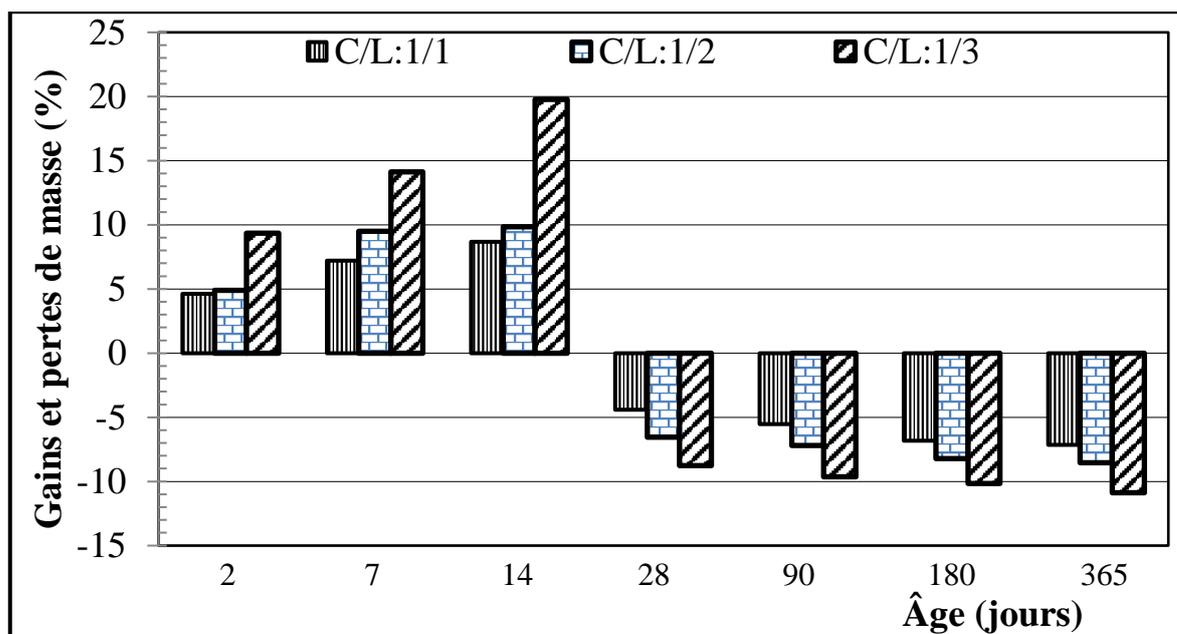


Figure 5.11 : Evolution de gain et de perte de masse en fonction du pourcentage de liège des composites conservés dans l'eau pendant 14 jours suivie de cure à l'air de laboratoire.

Les compositions conservées dans un milieu humide pendant 14 jours et le reste à l'air de laboratoire donnent, après un an de cure, des pertes de masse moins importantes. Ces pertes sont insignifiantes au-delà de 28 jours et baissent avec la diminution du volume de liège. La composition C/L:1/3 enregistre une perte de masse d'environ 11%. Enfin, on constate dans ce milieu de conservation que les masses des composites sont plus faibles que les masses initiales. Par conséquent, ce mode de conservation est plus stable.

5.4 Caractéristiques mécaniques

Les essais de compression et de flexion ont été effectués pour chaque âge de cure et chaque composite étudié. Ils ont été réalisés à court, moyen et long terme. L'effet de l'ajout de laitier de haut fourneau et de sable de rivière ainsi que le mode de cure sont étudiés. Les résultats obtenus ont été comparés avec d'autres matériaux.

5.4.1 Effet de conservation et d'addition de liège

La détermination des caractéristiques mécaniques des composites a été effectuée dans les différents modes de cure en fonction du temps (Figures 5.12 et 5.13). L'annexe B donne les résultats des résistances mécaniques d'une manière détaillée.

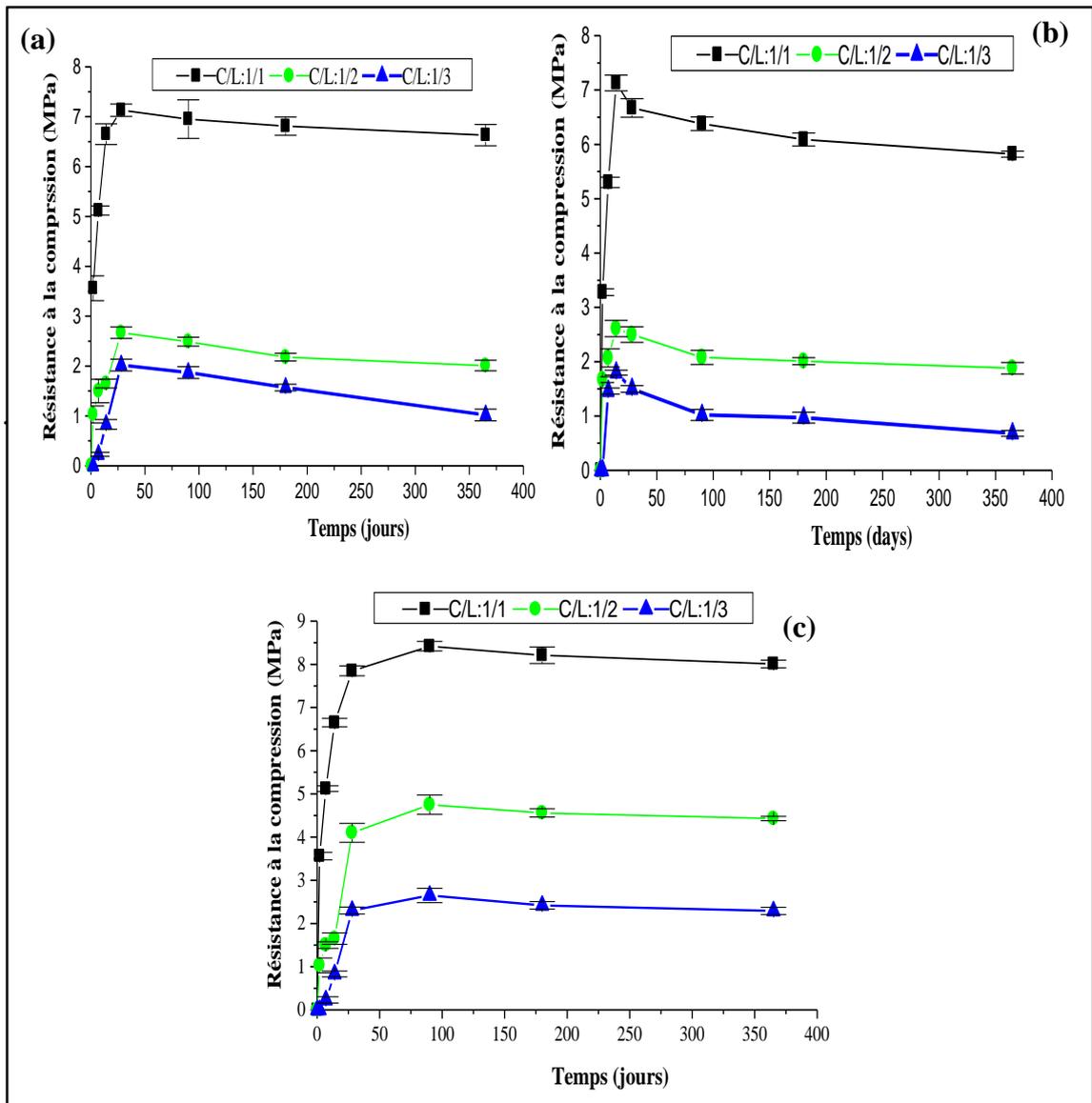


Figure. 5.12: Variation de la résistance à la compression en fonction du temps : (a) conservé dans l'eau, (b) à l'air du laboratoire, (c) cure pendant 14 jours dans l'eau et suivi de cure à l'air de laboratoire.

On constate, globalement, une même tendance des essais de compression et de flexion. Une diminution de la résistance mécanique des composites, juste après 28 jours, est observée, ce qui souligne l'influence des conditions de cure des éprouvettes. En effet, on observe une diminution de la résistance en cure à l'air de laboratoire et en cure humide [279]. Cette diminution est très prononcée à l'air de laboratoire. Par conséquent, il est conseillé, pour ce type de granulats, d'éviter de sécher de façon trop brutale et, donc, d'éviter la perturbation de l'hydratation des composites. Cependant, on constate un développement continu de la résistance à la compression et à la flexion en fonction du temps dans un milieu humide pendant 14 jours suivie de cure libre au laboratoire. Cela est

dû à la réserve d'eau dans les granulats de liège, cette quantité est suffisante pour que l'hydratation continue. Cette méthode de cure est appliquée pour le béton colloïdal léger de billes de polystyrène expansé, le mortier à base de palmier dattier et le béton de liège utilisant des granulats de liège provenant du recyclage d'emballages de fruits [53, 212, 280]. Il semble que la qualité de contact entre les granulats et la matrice s'améliore dans ce mode de cure, résultant en une augmentation significative de la force de liaison entre les granulats et la pâte du ciment.

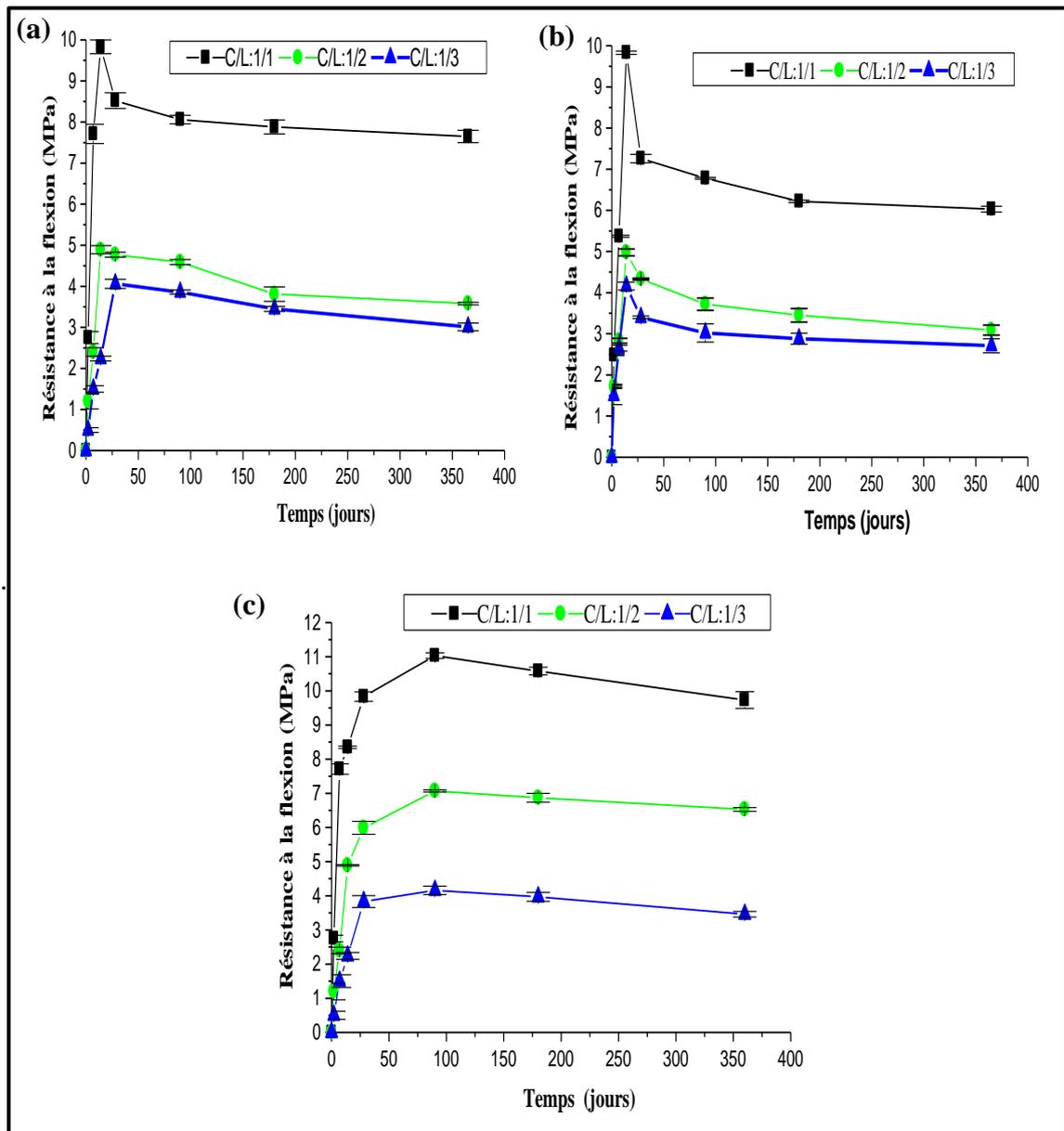


Figure.5.13: Variation de la résistance à la flexion en fonction du temps : (a) conservé dans l'eau, (b) à l'air du laboratoire, (c) cure pendant 14 jours dans l'eau suivie de cure à l'air de laboratoire.

Les propriétés mécaniques de formulation du ratio égal à 1 sont plus élevées que celles des autres composites car l'augmentation du volume de liège diminue la résistance à la compression et à la flexion. En effet, la formation des pores dans le composite a une influence significative sur la résistance mécanique. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux trouvés par Pospisil et al. [281] et Schober [282]. D'autres auteurs [155, 202] rapportent, également, que l'incorporation de granulats de liège comme remplacement du sable conduit à un matériau poreux. De plus, Karade et al. [283] ont remarqué que l'incorporation de granulats de liège d'une grosseur de 2 à 3 mm réduit la résistance à la compression par rapport à ceux dont la taille est inférieure à 0.2 mm, ils affectent le processus d'hydratation du ciment. Il en est de même pour le béton de liège étudié par Panesar et Shindman [199] qui est constitué de liège d'une taille de 5 mm. En fait, cela c'est dû à la quantité élevée ($\geq 50\%$) de liège utilisé comme remplacement au sable, ce qui peut expliquer les valeurs trouvées à la compression de nos composites

Le comportement physique diminue la résistance mécanique. Par exemple, la résistance à la compression de la composition C/L:1/1 conservée dans l'eau ensuite à l'air diminue avec l'addition de liège d'environ 45% et 71% respectivement par rapport aux formulations C/L:1/2 et C/L:1/3. Par contre, la résistance à la flexion des composites C/L:1/2 et C/L:1/3 diminue de 33% et 64%, respectivement. Cette différence, qui est assez marquée pour les flexions (Figure 5.13), peut être expliquée par la ductilité des granulats recyclés [115]. À ce propos, la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de la teneur en humidité [284].

Globalement, le durcissement entre le 28^{ème} et le 90^{ème} jour nous donne une résistance en perpétuelle évolution. En effet, les résistances à la compression et à la flexion de la composition C/L:1/1, conservée dans l'eau suivie de cure à l'air de laboratoire, augmentent respectivement d'environ 7% et 28%. Après un an de cure, les résistances à la compression et à la flexion diminuent respectivement d'environ 4.87 % et 11.79%. Par contre, les résistances des composites C/L:1/3 conservés dans les mêmes conditions diminuent respectivement d'environ 14% et 17%. Cette chute est d'autant plus élevée avec l'augmentation du pourcentage de liège. Cela s'explique par la dégradation à long terme de ces granulats au sein de la matrice de ciment. Ce résultat est confirmé avec les fibres de coco et les anas de lin [14, 100]. Selon certains chercheurs, le renforcement des propriétés mécaniques se fait par la modification chimique de la surface de contact des matériaux

d'origine végétale avec le ciment [72, 100, 156]. Cette composition peut être comparée avec le béton cellulaire aéré dont la masse volumique est d'environ 600 kg/m³ [206].

La résistance à la compression à 28 jours du ratio C/L :1/1 est de 7.85MPa, cette formulation entre dans la classe des bétons légers isolants porteurs [98]. Cette résistance est plus élevée que celle du composite constitué de ciment- sable- fibres cellulosiques et du composite fabriqué avec le ciment-sol-sable-fibres de durian ainsi que le composite sol- ciment-sable-fibres de noix de coco [57, 171, 195]. Précisons qu'avec l'ajout du volume de liège, on obtient des composites à la fois isolants et légers. Les composites C/L:1/3, pour une densité équivalente, sont plus isolants que le béton autoclave [145], béton caverneux d'argile expansé et schiste expansé [58]. De plus, ces composites ont montré des propriétés mécaniques compétitives par rapport aux matériaux agro-composites trouvés dans la littérature [285, 286]. Toutefois, la résistance à la compression obtenue est inférieure à celle du béton de silice expansée [287], du béton de coque de noix de coco [288] et du béton de coque de palmier à huile [289] et du béton de coquille de pêche et coquille d'abricot [7]. Néanmoins, la résistance à la flexion de nos composites est plus importante. Toutefois, la résistance à la compression reste toujours supérieure à 2MPa ce qui nous permet de l'utiliser dans la fabrication des blocs en maçonnerie non porteurs [171]. Selon Agopyan et al. [100], les présences de lignine et d'hémicellulose diminuent ces performances mécaniques. Des conclusions similaires sont également rapportées par d'autres chercheurs [280, 290].

Nous observons ici que le rapport résistance à la flexion / à la compression est toujours plus élevé, au-dessus de 1,15, sauf pour la composition C/L:1/1 durci à l'air de laboratoire (0.97). Ce rapport augmente avec l'augmentation du volume de liège. Cela est dû au fait que la résistance à la traction des granulats de liège est beaucoup plus élevée que leur résistance à la compression. Ces constatations sont en accord avec celles trouvées par Silva et al. [115].

5.4.2 Effet de l'addition de sable

Les résultats des essais de résistances à la compression du composite C/L:1/3 sont représentés dans les figures 14 et 15.

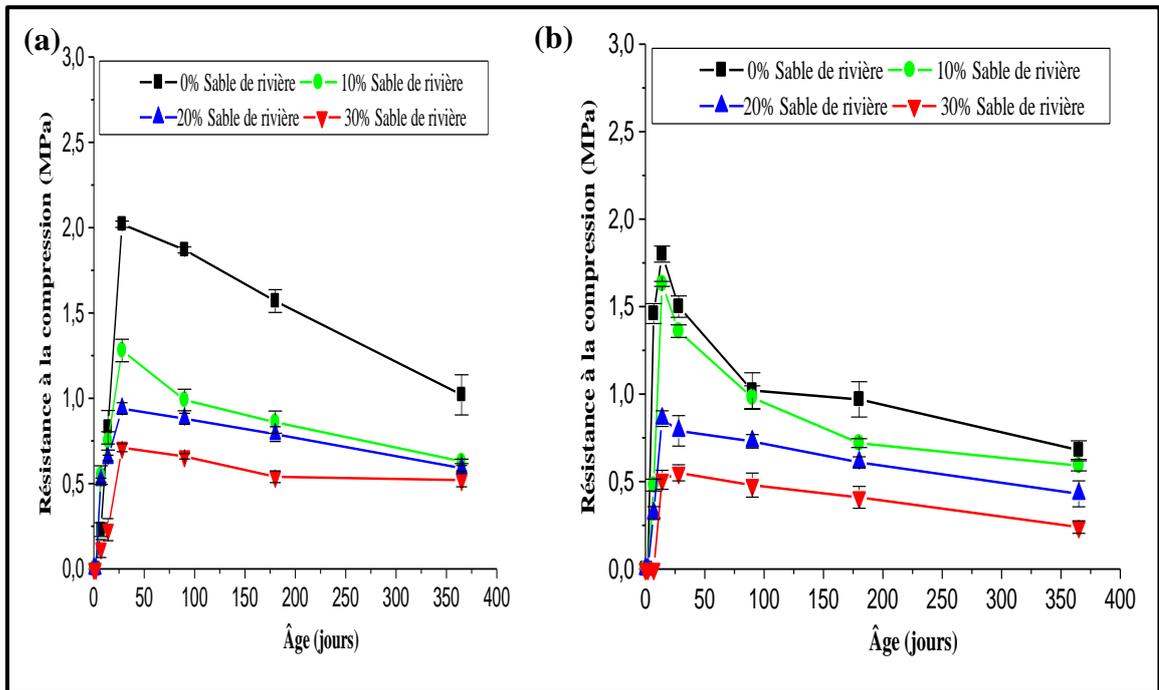


Figure.5.14: Variation de la résistance à la compression en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L :1/3: (a) conservé dans l'eau, (b) à l'air de laboratoire.

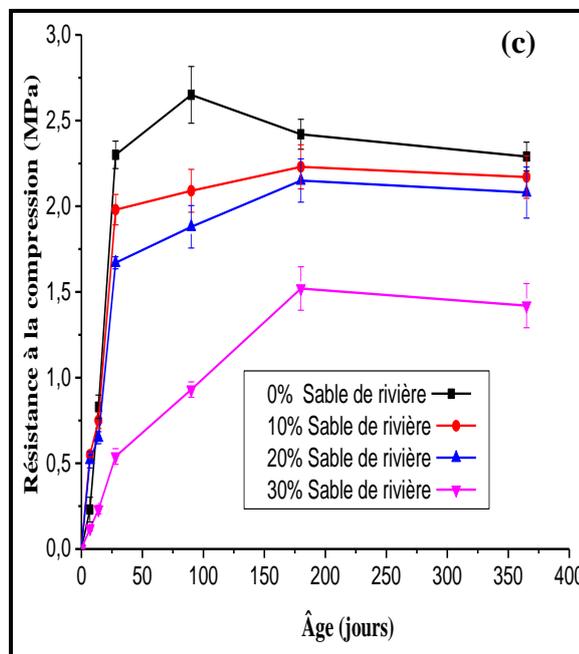


Figure.5.15: Variation de la résistance à la compression en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L :1/3: (c) 14 jours dans l'eau et le reste à l'air de laboratoire.

On peut observer que la résistance n'est pas déterminée par le volume de liège, mais plutôt par la teneur en sable qui remplace le ciment. Par conséquent, le comportement et les caractéristiques mécaniques du composite sont liés au dosage en ciment. La teneur en sable de rivière a entraîné une réduction des résistances mécaniques.

Le composite sans sable présente les résistances plus élevées. De plus, la conservation dans un environnement humide ou à l'air n'a pas d'effet bénéfique sur la résistance mécanique. La résistance mécanique diminue après 180 jours de cure. Cela signifie qu'il y a une amélioration de la résistance mécanique, dans l'intervalle de temps allant de 90 et 180 jours, de la composition conservée dans un milieu humide puis à l'air de laboratoire. Après ce délai, on observe une diminution progressive de la résistance mécanique qui peut être expliquée, comme évoqué précédemment, par une dégradation progressive des composites et, cela, malgré l'incorporation de sable dans la pâte cimentaire. Cela pourrait indiquer que les granulats de liège sont responsables de cette dégradation. En effet, la mise en contact des particules de liège avec la pâte de ciment conduit à la dégradation de ces derniers. Cette diminution est due probablement à l'effet de la présence de lignine et d'hémicellulose [100, 280, 290]. Le composite contenant 20% de sable donne, après un an de conservation dans l'eau suivie d'une conservation à l'air, une résistance à la compression moyenne dépassant 2 MPa pour une masse volumique de 620 kg/m³. Avec 20% de sable, il n'y a pas de différence de résistance à la compression, mais le composite sans sable, elle est inférieure de 9.02% seulement. Il semble que le rapport optimum du sable est de 20%. La valeur de la résistance à la compression obtenue dans notre étude est comparable à celle trouvée dans les travaux de Khedari et al. [172] et Moslemi [174].

La diminution de la résistance à la flexion est presque linéaire avec l'augmentation du dosage en sable (Figure 5.16 (a et b)). Il est également observé que la diminution est importante pour la conservation à l'air de laboratoire. Par contre, une augmentation de la résistance à la flexion jusqu'à 180 jours est observée dans la conservation humide et ensuite à l'air libre. Comme dit précédemment, la quantité d'eau absorbée pendant 14 jours est suffisante pour l'hydratation complète des composites.

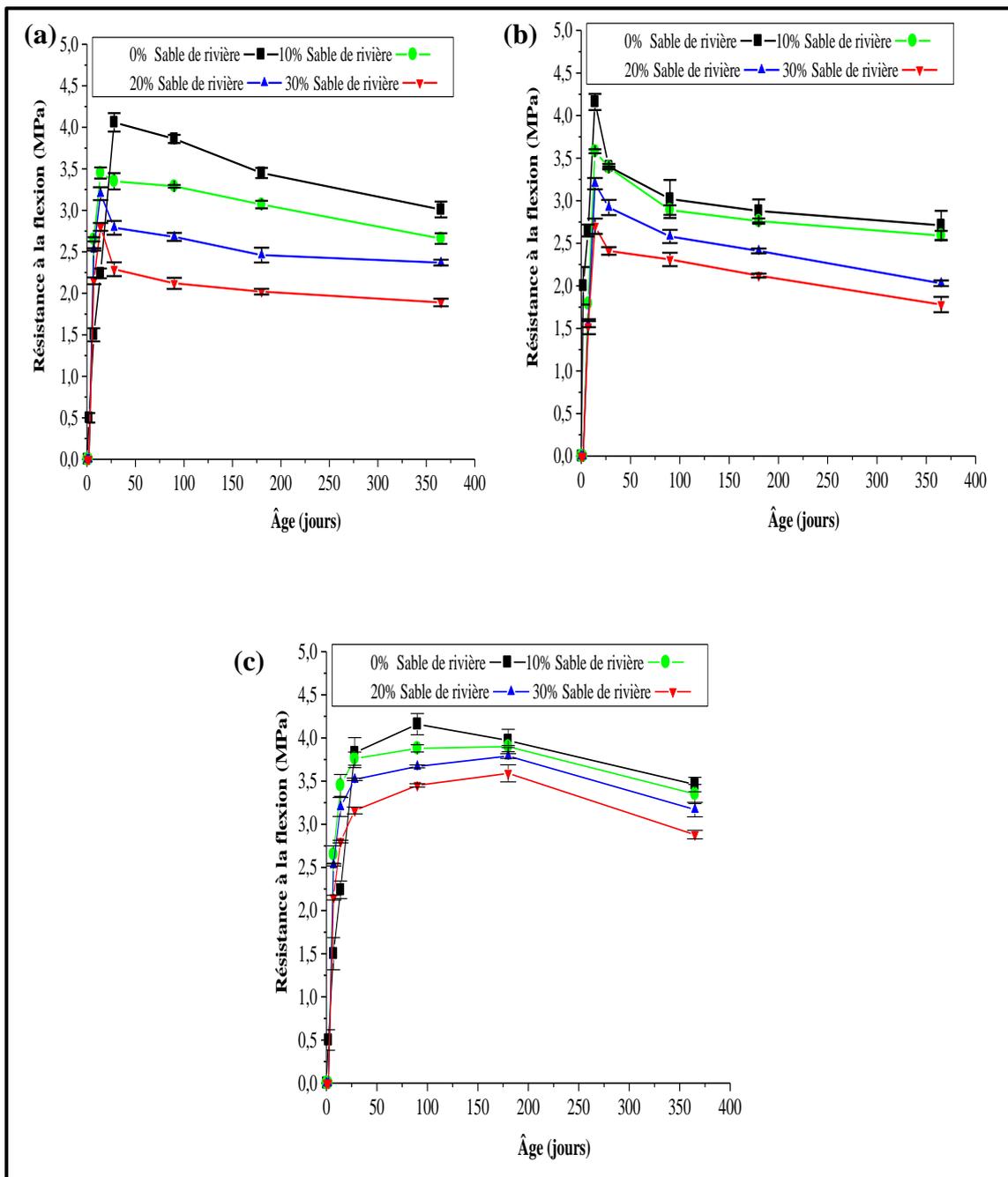


Figure.5.16: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la quantité du sable de rivière pour les composites C/L :1/3: (a) conservé dans l'eau, (b) à l'air, (c) 14 jours dans l'eau et le reste à l'air de laboratoire.

5.4.3 Effet de l'addition de laitier

Le remplacement d'une partie du ciment par le laitier de haut fourneau, en gardant le même volume de liège, présente des avantages évidents (Figure 5.17 et 5.18).

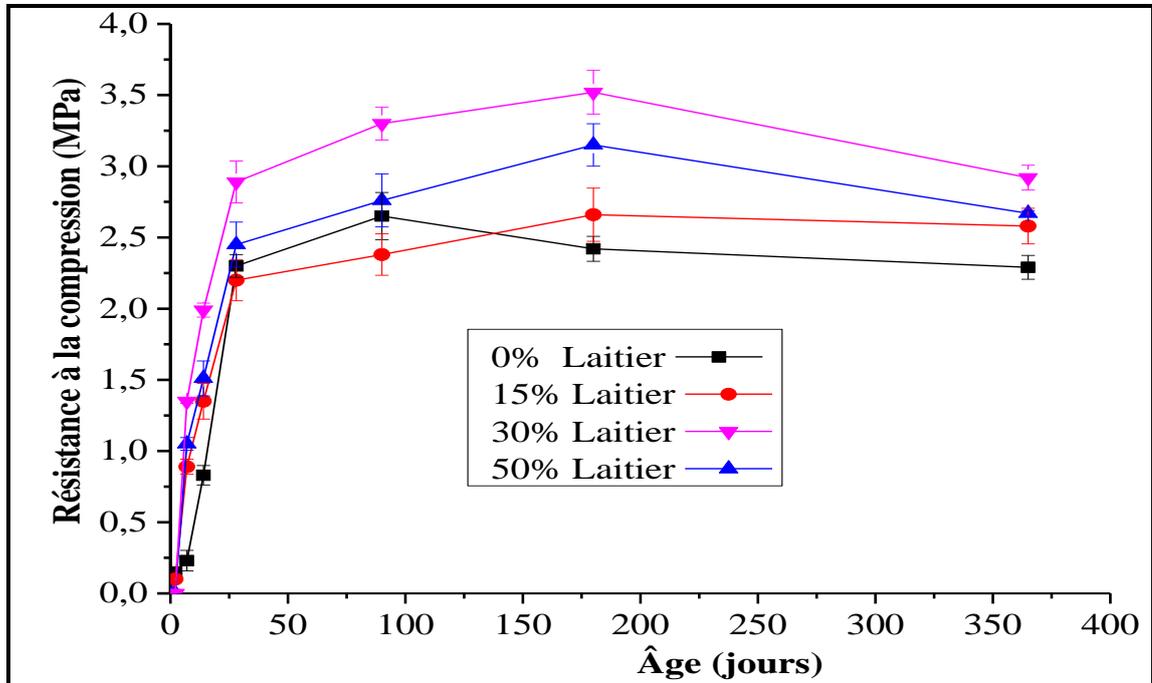


Figure.5.17: Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'ajout du laitier de haut fourneau (formulation C/L:1/3).

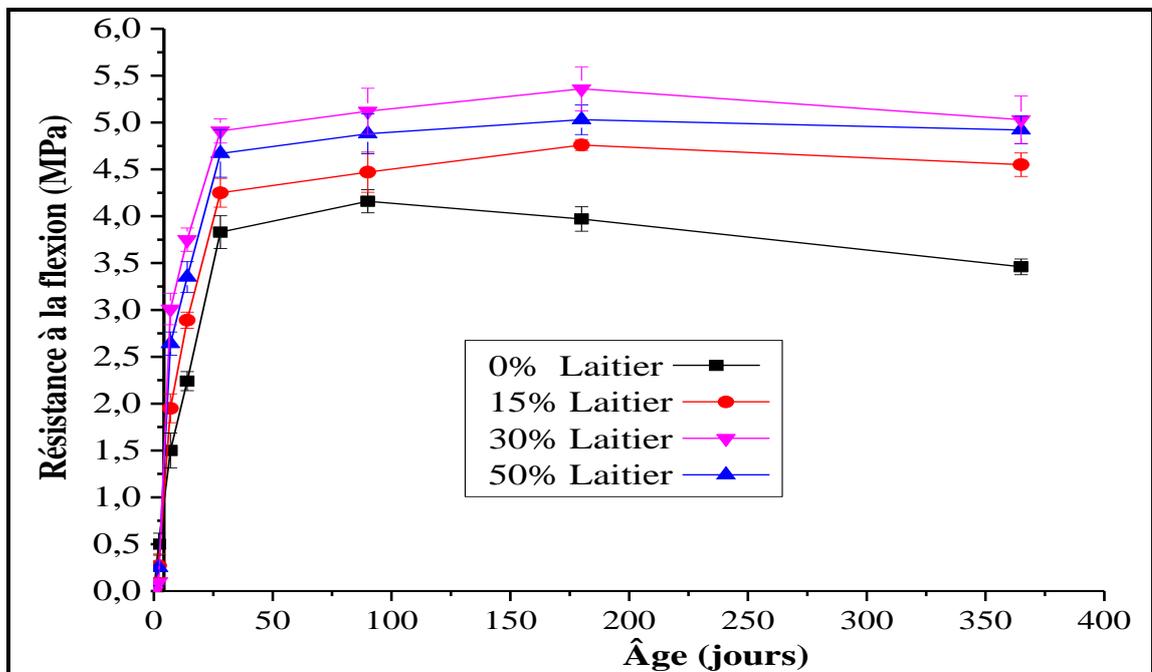


Figure.5.18: Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'ajout du laitier de haut fourneau (formulation C/L:1/3).

Ce travail vise à augmenter les performances mécaniques. Il convient de rappeler que les essais de compression et de flexion ont été réalisés après un an de conservation dans l'eau et ensuite à l'air de laboratoire. Globalement, quelles que soient les proportions de laitier, une amélioration de la résistance mécanique est observée par rapport à celle de la formulation sans laitier. Néanmoins, la résistance mécanique initiale obtenue est inférieure à celle du composite à base de ciment seul. Cela est dû à l'hydratation initiale lente du LHF, notamment aux jeunes âges. Cette constatation est plus significative en augmentant le pourcentage de LHF. En effet, la présence de LHF retarde la prise du ciment. Des études menées par les chercheurs ont montré que l'activité hydraulique du laitier d'El Hadjar a été faible voire moyenne [61, 291]. La résistance à la compression maximale est de 3,52 MPa à 180 jours pour un taux de 30% de LHF, montrant une amélioration de la matrice (ciment-laitier) et de l'interface entre les granulats et la matrice. Après un an de cure, ce composite donne une résistance à la compression de 2,92 MPa pour une masse volumique de 845 kg/m³. En effet, la substitution de 30% de ciment Portland par du laitier de hauts fourneaux (LHF30) ne permet pas de conserver une résistance mécanique après 180 jours de cure. Les courbes de compression et de flexion à 180 jours présentent un pic notable, Dans tous les cas, une évolution dans le temps est observable, mais pas au-delà. La variation de la résistance à la compression ne dépasse pas les 8.56% pour le composite avec 50% de laitier après un an de cure. Par contre, la diminution de la résistance à la flexion reste très faible, de l'ordre de 2% à long terme. Par conséquent, cette addition minérale permet de ralentir la dégradation jusqu'à 180 jours.

La cure prolongée a, en effet, une influence sur l'interaction à long terme entre le liant (moins alcalin) et les granulats de liège. Cela peut refléter la dégradation de l'adhérence entre granulats/matrice. Une chute de 17% de la résistance à la compression est observée, alors que la résistance à la flexion enregistre une chute de 6%, ce qui nous permet de confirmer que l'utilisation des granulats de liège recyclés diminue beaucoup plus la résistance à la compression. L'addition de LHF est bénéfique pour la flexion (Figure 5.18). En effet, on voit clairement que l'ajout de LHF augmente considérablement la flexion par rapport à la compression. Ces résultats nous permettent, là encore, de constater que la résistance à la flexion est plus importante que la résistance à la compression. Ce résultat plaide pour une utilisation de ce matériau en traction et en compression.

Le résultat trouvé n'est pas totalement ultime puisque la durée de vie des ouvrages dépasse un an. Par conséquent, la durée des essais doit être plus longue que l'échéance étudiée. On peut conclure que le LHF ne semble pas être un liant de substitution au ciment suffisamment efficace pour empêcher la dégradation des granulats de liège et augmenter la durabilité des composites. D'autres travaux de recherches ont abouti aux mêmes conclusions concernant le remplacement du ciment par du laitier de hauts fourneaux dans les composites cimentaires [173, 174, 292]. Dans ce cas précis, le comportement de ces matériaux doit être amélioré par un traitement préalable des granulats de liège. Après traitement, l'utilisation de LHF plaide en sa faveur pour le développement des composites de matrice ciments-laitier. En effet, les formulations avec l'ajout de laitier présentent des avantages, comme on l'a montré précédemment, la légèreté et la résistance mécanique.

5.4.3 Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en flexion

La figure 5.19 illustre la relation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression des différents composites ciment-liège à un an de conservation. L'utilisation d'une équation de régression linéaire nous permet d'estimer les résistances en flexion d'une manière précise. Par conséquent, ces équations donnent une estimation plus facile de la résistance à la flexion. Des équations linéaires et des coefficients de corrélation (R) sont proposés pour les trois modes de cure. Le plus grand coefficient de corrélation (R) est obtenu avec les composites conservés dans l'eau et le reste au laboratoire. Le coefficient de corrélation déterminé est de l'ordre de 0,97 (équation 5.3).

$$\text{Cure humide :} \quad R_f = -0.72 + 0.83R_c \text{ (MPa)} \quad (5.1)$$

$$\text{Cure à l'air de laboratoire :} \quad R_f = -0.63 + 0.88R_c \text{ (MPa)} \quad (5.2)$$

Cure humide suivie de cure à l'air de laboratoire :

$$R_f = 0.89 + 1.19R_c \text{ (MPa)} \quad (5.3)$$

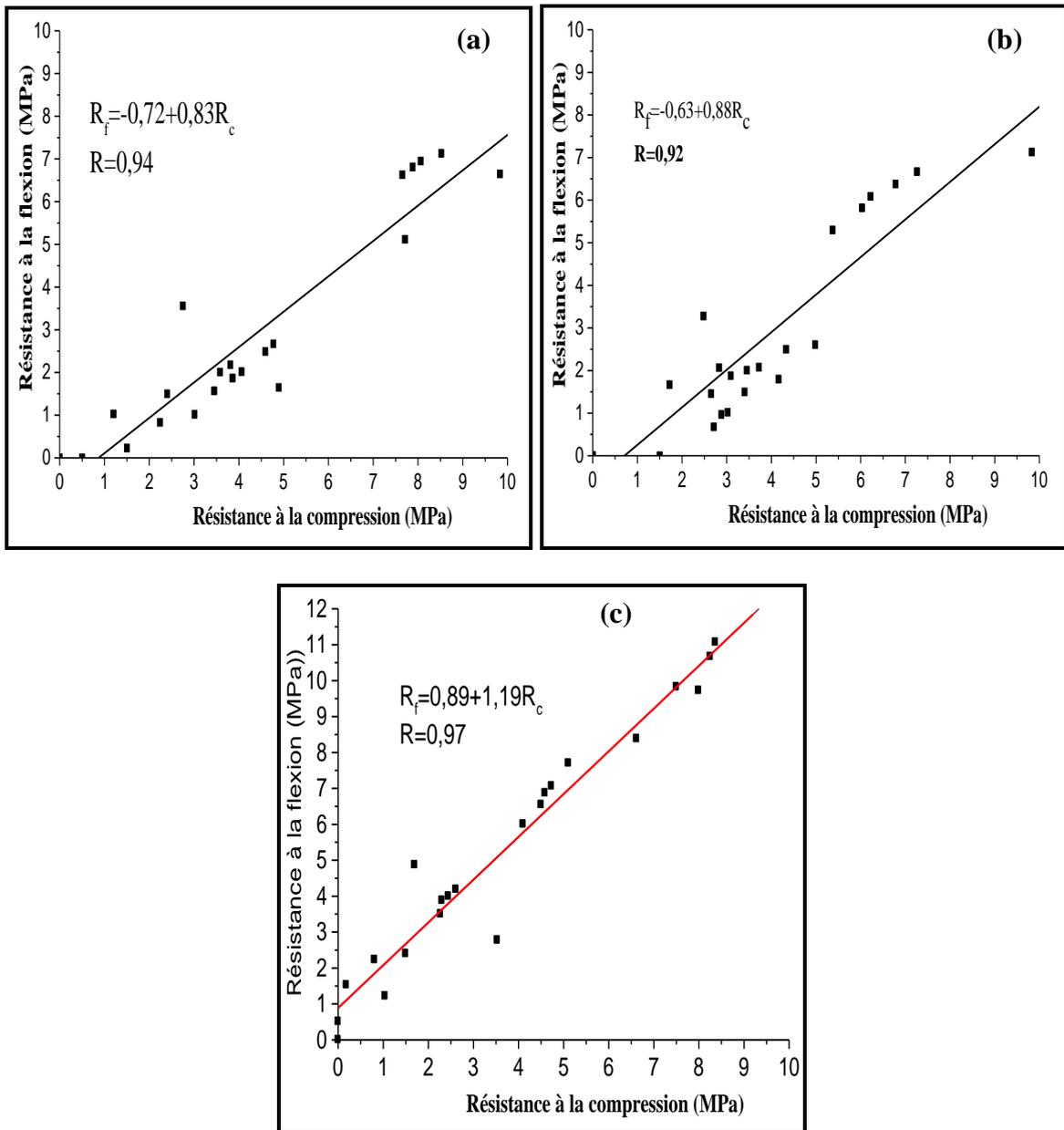


Figure .5.19 Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression : (a) cure humide, (b) cure à l'air du laboratoire, (c) cure humide suivie de cure à l'air de laboratoire.

Une relation très significative entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression des composites avec du LHF est dégagée (équation 5.4 et Figure 5.20). En effet, on peut retenir une relation linéaire et le coefficient de corrélation entre deux variables affiche un $R=0.98$.

$$R_f = 0.49 + 1.57R_c \text{ (MPa)} \quad (5.4)$$

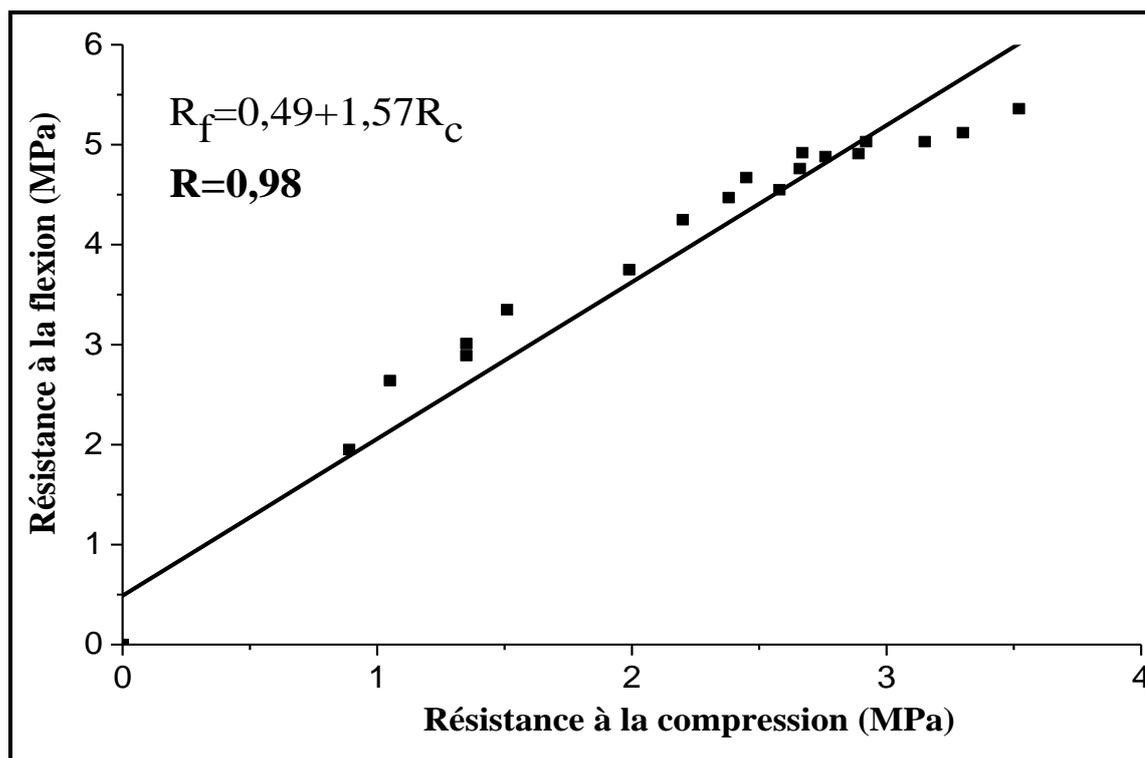


Figure.5.20: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion des composites contenant du laitier de haut fourneau.

La figure 5.21 permet d'observer l'intensité de la relation entre la résistance à la flexion et la compression avec $R = 0,88$ pour le composite ciment-liège-sable de rivière conservé dans l'eau (Figure 5.21.a). La même allure de progression a également été observée pour le composite conservé à l'air libre et conservé dans l'eau et ensuite à l'air de laboratoire avec, respectivement, $R = 0,91$ et $R = 0,81$ (Figure 5.21.b et c).

Les équations linaires ci-dessous donnent la corrélation entre les résistances en flexion et en compression.

$$R_f = 0,72 + 2,66R_c \quad (5.5)$$

$$R_f = 0,78 + 2,01R_c \quad (5.6)$$

$$R_f = 1,32 + 1,21R_c \quad (5.7)$$

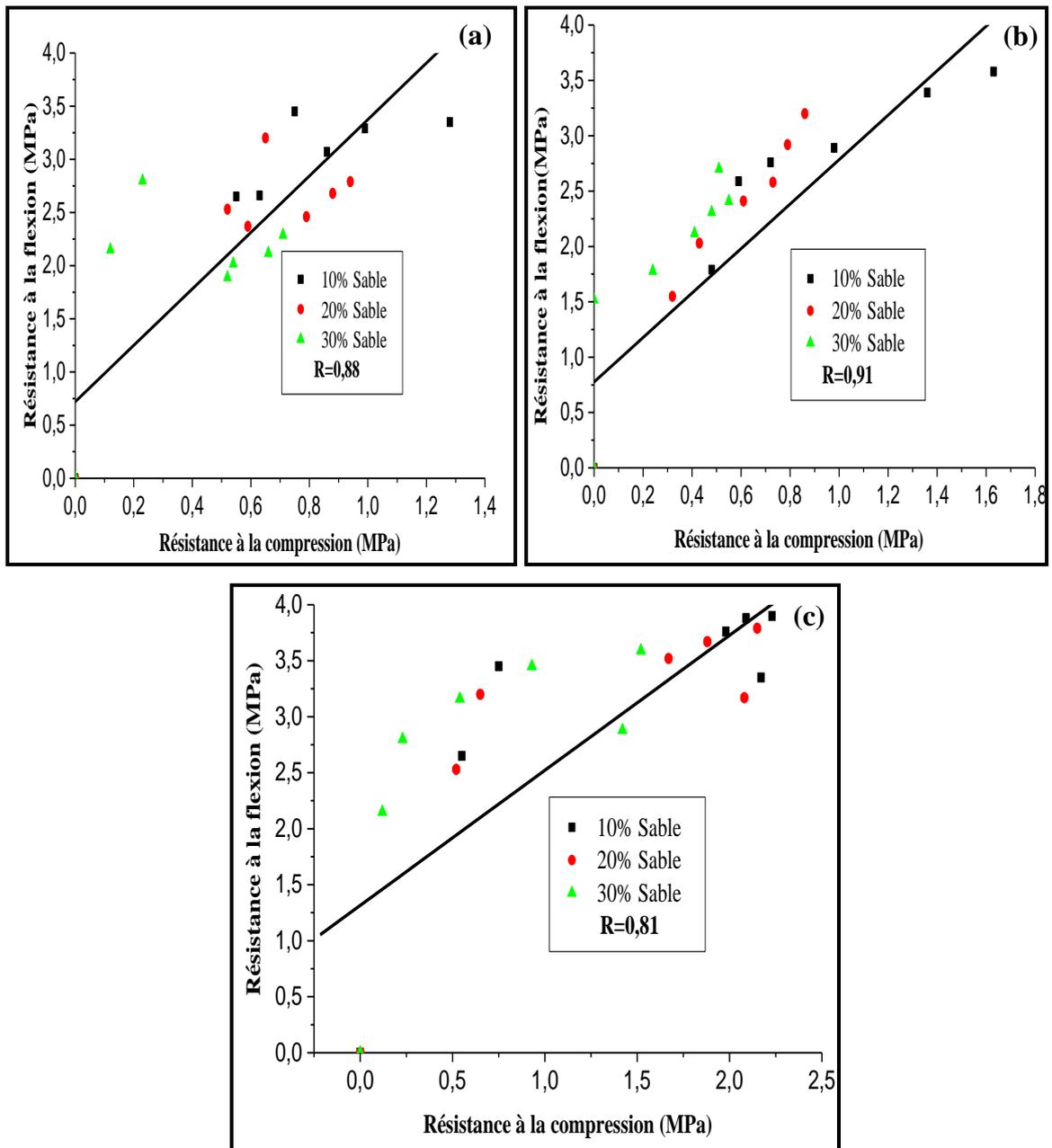


Figure.5.21: Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression des composites ciment-liège-sable: (a) cure humide, (b) cure à l'air de laboratoire, (c) cure humide pendant 14 jours suivie d'une cure à l'air de laboratoire.

Des formules linéaires et non linéaires ont été proposées dans la littérature, pour les bétons légers, reliant la résistance à la compression et la résistance à la flexion. En comparant notre modèle à ceux proposés par d'autres auteurs [218, 53]; on constate que pour le même niveau de résistance à la compression, toutes les résistances à la flexion déterminées suivant les autres modèles sont inférieures à celles estimées par notre modèle. Cela veut dire que la résistance à la flexion de ces composites est très élevée. Par conséquent, il est

nécessaire de proposer des modèles reliant ces deux grandeurs aux composites à base de bois. Au regard de ces résultats, nous pouvons affirmer que la résistance à la flexion est plus élevée que la compression, et cela malgré la modification de la matrice des composites. En effet, ces nouveaux composites donnent, également, des résistances à la flexion plus élevées que celles proposées par les relations des bétons légers.

5.5 Variations dimensionnelles des composites

À l'heure actuelle, peu d'études se sont intéressées aux variations dimensionnelles des composites cimentaires à base de liège. Comme nous l'avons déjà signalé précédemment, le problème majeur des composites à base de bois est le phénomène de déformation libre (retrait/gonflement). Ce phénomène agit, en effet, négativement sur la résistance mécanique en affectant, bien évidemment, la durabilité de ces composites. Par conséquent, une attention particulière a été consacrée à ce phénomène. L'objectif de cette partie est d'évaluer ce phénomène différé des composites à base de liège, et de voir la pertinence d'ajout de sable et de laitier c'est-à-dire s'ils sont capables de réduire les variations dimensionnelles.

5.5.1 Effet de l'addition de liège

Les figures 5.22 et 5.23 présentent respectivement le retrait et le gonflement du composite ciment-liège. Dans ce genre de composite, les granulats d'origine végétale gonflent avec l'augmentation de l'humidité et rétrécissent par l'évaporation d'eau [262]. En effet, une déshydratation rapide des granulats de liège expansé est constatée. Par contre, dans le cas du gonflement, les particules de liège continuent d'absorber l'eau provoquant ainsi une augmentation du gonflement. Par conséquent, le composite à base de liège est sensible au phénomène de sorption/désorption qui va s'accompagner, par la suite, de variations dimensionnelles importantes. En outre, il se trouve que le squelette granulaire du liège ne s'oppose pas aux forces comme les granulats du mortier. Dans ce cas, la pâte de ciment joue un rôle dans le retrait/gonflement.

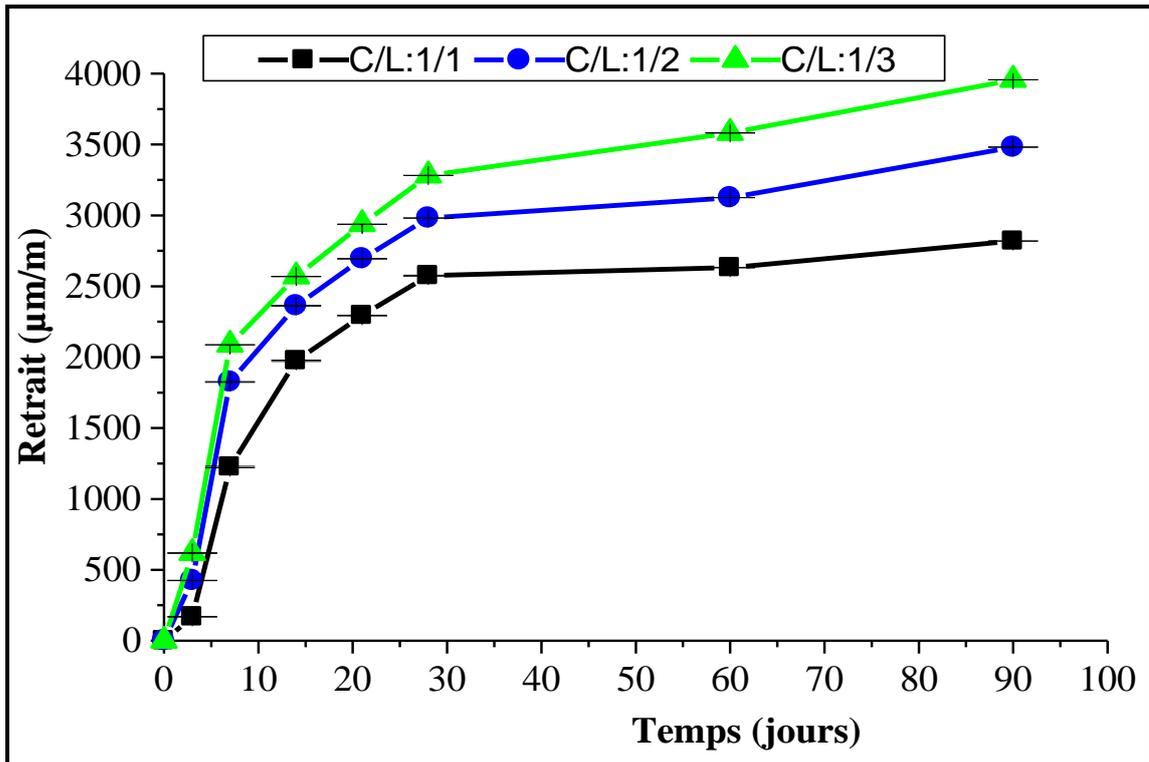


Figure.5.22: Variation du retrait libre en fonction du volume de liège.

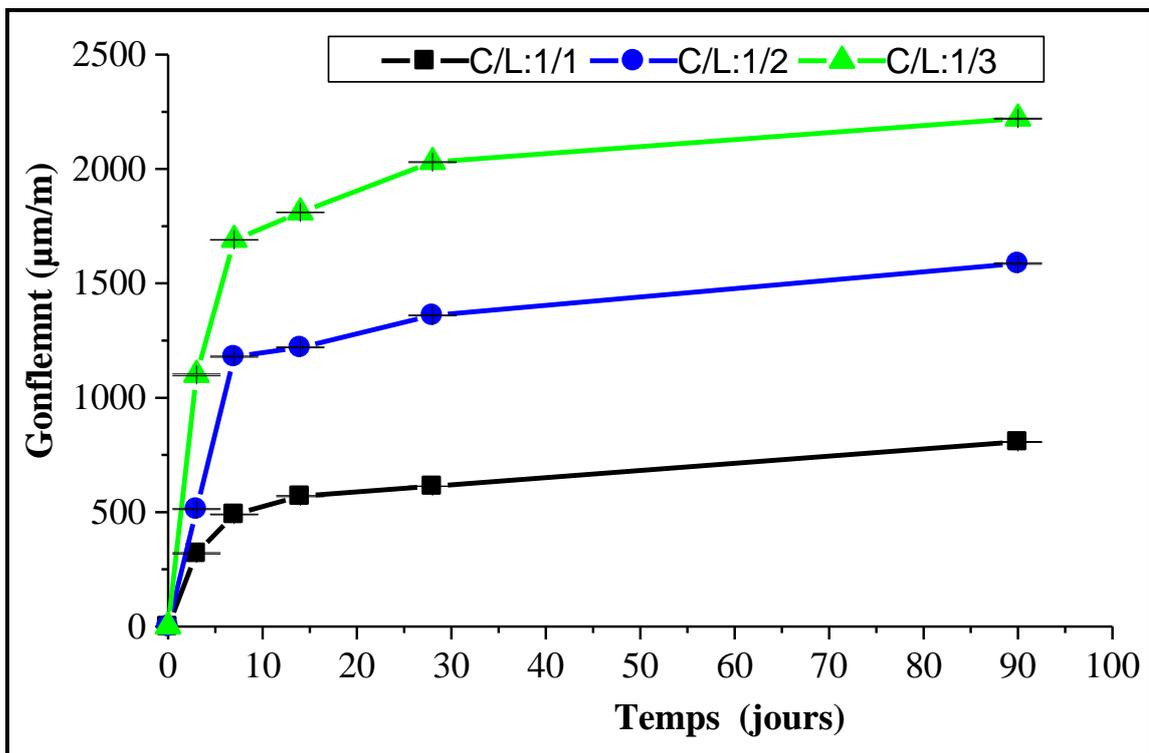


Figure.5.23 : Variation du gonflement fonction du volume de liège.

La plus grande partie des variations dimensionnelles a été effectuée dans les premiers jours. En effet, environ 53% du retrait et plus de 82% du gonflement du composite C/L:1/3 sont effectués au jeune âge (7 jours). Ce dernier peut atteindre plus de 89% à 14 jours. La saturation des éprouvettes et l'évaporation d'eau semble se réaliser au jeune âge. Le plus important gonflement est celui de la composition C/L:1/3 qui est de 1,69 mm/m au jeune âge (7 jours) et d'environ 2,22 mm/m à 90 jours. Les déformations continuent avec le temps. En effet, la capacité d'absorption et d'évaporation provoque des changements dimensionnels dans les composites.

Le retrait maximum est enregistré pour le composite C/L:1/3 qui est de 3,95 mm/m à 90 jours. On constate que les variations dimensionnelles augmentent avec le pourcentage d'ajout de liège. D'une manière générale, cette augmentation est attribuée à l'augmentation de l'air occlus présent dans les composites. Cette variation dimensionnelle est nettement supérieure à celle préconisée pour une utilisation en génie civil qui est de 0.45 mm/m [53]. Par contre, elle est inférieure à celles des composites à base de granulats hydrophiles qui peuvent atteindre 10 mm/m [183].

En comparant le gonflement au retrait, on constate que les valeurs du retrait sont plus importantes que celles du gonflement. Ce constat peut être expliqué par la saturation complète des granulats de liège, justifiant ainsi le peu de variation du gonflement à long terme. La même constatation a été trouvée par Benchikou [170]. À titre d'exemple, la composition C/L:1/1 donne des valeurs de retrait plus importantes de l'ordre de 72% par rapport à celles du gonflement. Au regard de ces résultats, nous avons donc choisi de réduire ces déformations en modifiant la matrice cimentaire.

Les résultats expérimentaux du retrait et du gonflement peuvent être donnés dans des équations linéaires en fonction de la masse volumique apparente (tableau 5.3). En effet, des équations empiriques ont été proposées pour prédire les variations dimensionnelles. Une bonne corrélation linéaire peut être observée entre ces deux grandeurs. Le retrait des composites augmente lorsque la masse volumique diminue. À l'inverse, le gonflement augmente avec l'augmentation de la masse volumique. Les variations dimensionnelles (y) sont données en (mm/m) et la masse volumique (x) est donnée en (kg/m^3).

Tableau 5.3 : Corrélation entre le retrait et le gonflement en fonction de la masse volumique apparente.

Compositions	Retrait (mm/m)		Gonflement (mm/m)	
	Equations linéaires	Coefficient (R ²)	Equations linéaires	Coefficient (R ²)
C/L:1/1	$y = -0,019x + 21,409$	0,931	$y = 0,003x - 3,825$	0,934
C/L:1/2	$y = -0,034x + 30,456$	0,768	$y = 0,008x - 6,529$	0,846
C/L:1/3	$y = -0,038x + 26,700$	0,999	$y = 0,011x - 7,587$	0,892

5.5.2 Effet de l'addition de sable

Comme l'indique les résultats précédents, les composites à base de liège ont des variations dimensionnelles importantes et ce pour un même volume de liège. Il paraît, donc, nécessaire de diminuer ces déformations pour permettre d'améliorer la durabilité de ces composites. Cette partie s'intéresse à l'influence de l'ajout de sable de rivière sur les variations dimensionnelles. Pour ce faire, on a pris le ratio C/L:1/3 constant et on a introduit le sable comme on l'a mentionné dans le chapitre précédent. Cette gamme de composite influe grandement sur les variations dimensionnelles. Aussi, est-il très important d'étudier ces variations dimensionnelles et de faire en sorte que ces dernières soient diminuées. Les figures 5.24 et 25 présentent l'évolution du retrait et du gonflement des composites étudiés.

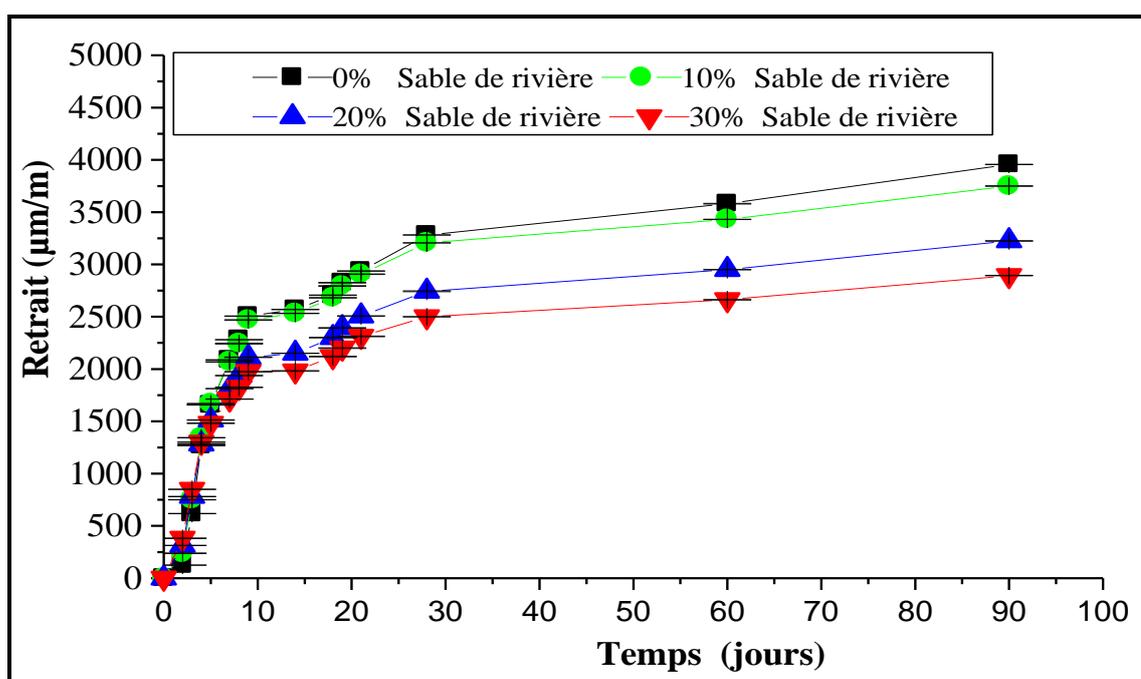


Figure.5.24 : Variation du retrait en fonction du temps de composites ciment-liège-sable de rivière (C/L:1/3).

On a observé que la première phase présente une forte évolution de retrait, croissante et rapide, elle correspond à la phase de dessiccation capillaire. En effet, durant le neuvième jour, on enregistre, pour la composition avec 30% de sable, un retrait de 1.975 mm/m qui corresponde à environ 68% du retrait total. La deuxième phase, qui se déroule du neuvième jour au vingt-huitième jour, correspond à une évolution de retrait croissante et lente (2.5mm/m). La dernière phase présente une évolution presque asymptotique du retrait à 90 jours (jusqu'à 2.893 mm/m). Des similitudes ont été observées dans le comportement du gonflement. On a également observé, une allure proche de celle du retrait mais plus faible. Cela peut être expliqué, comme évoqué précédemment, par la saturation des granulats de liège. Le retrait diminue avec l'ajout de sable. Les variations dimensionnelles obtenues induisent des contraintes de traction et de compression.

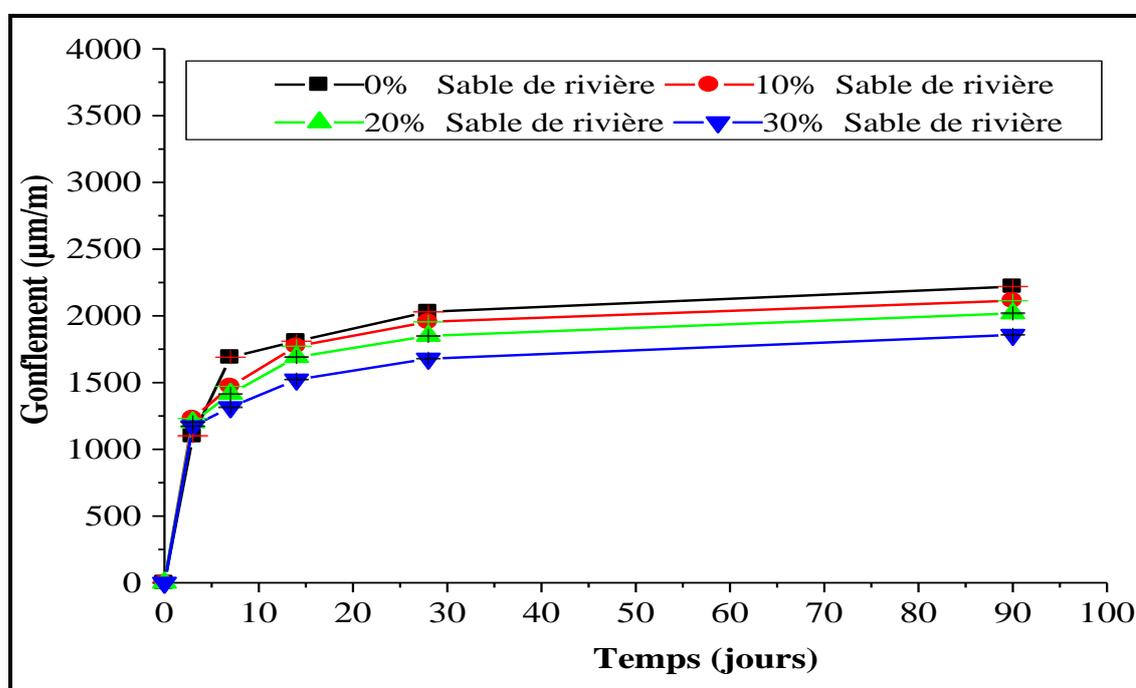


Figure.5.25: Variation du gonflement en fonction du temps de composites ciment-liège-sable de rivière (C/L :1/3).

Les variations dimensionnelles, au jeune âge, sont plus importantes avec l'ajout de sable. En effet, au bout de 3 jours d'essai, le retrait de la composition avec 30% de sable, est élevé de 27% par rapport à la composition sans sable. Cela est dû probablement à l'absorption de l'eau par la matrice cimentaire avec l'incorporation du sable de rivière. En effet, durant cette échéance, c'est l'augmentation importante de la quantité d'eau évaporée qui va engendrer une augmentation du retrait. À l'inverse, entre 3 et 90 jours, le retrait diminue avec l'augmentation du pourcentage de sable. Effectivement, l'ajout de 30% de

sable diminue le retrait de 27% à 90 jours pour une masse volumique apparente de 530 kg/m³. La modification des variations dimensionnelles de ces composites pourrait s'expliquer par l'amélioration de l'interface entre les granulats de liège et la matrice cimentaire qui se développe avec l'ajout de sable. D'après [155] l'addition de 30% de sable permet une bonne adhérence entre la pâte et les granulats de liège. De cette façon, selon les auteurs, on évite toutes les fissures des composites. Les composites étudiés contenant du sable de rivière donnent un retrait nettement inférieur à celui des panneaux en laine de bois et à celui du composite ciment-argile avec l'addition de copeaux de sapin [13, 72]. Comme on peut le constater, l'élimination complète des variations dimensionnelles dans les composites à base de liège expansé est pratiquement impossible, mais on peut les diminuer avec du sable de rivière. Néanmoins, les valeurs obtenues demeurent supérieures à celles recommandées en génie civil [53].

5.5.3 Effet de l'addition de laitier

Les observations sont similaires à celles des composites contenant du sable. En effet, les variations dimensionnelles connaissent une diminution avec la proportion en laitier de haut fourneau (LHF) (Figures 5.26 et 27).

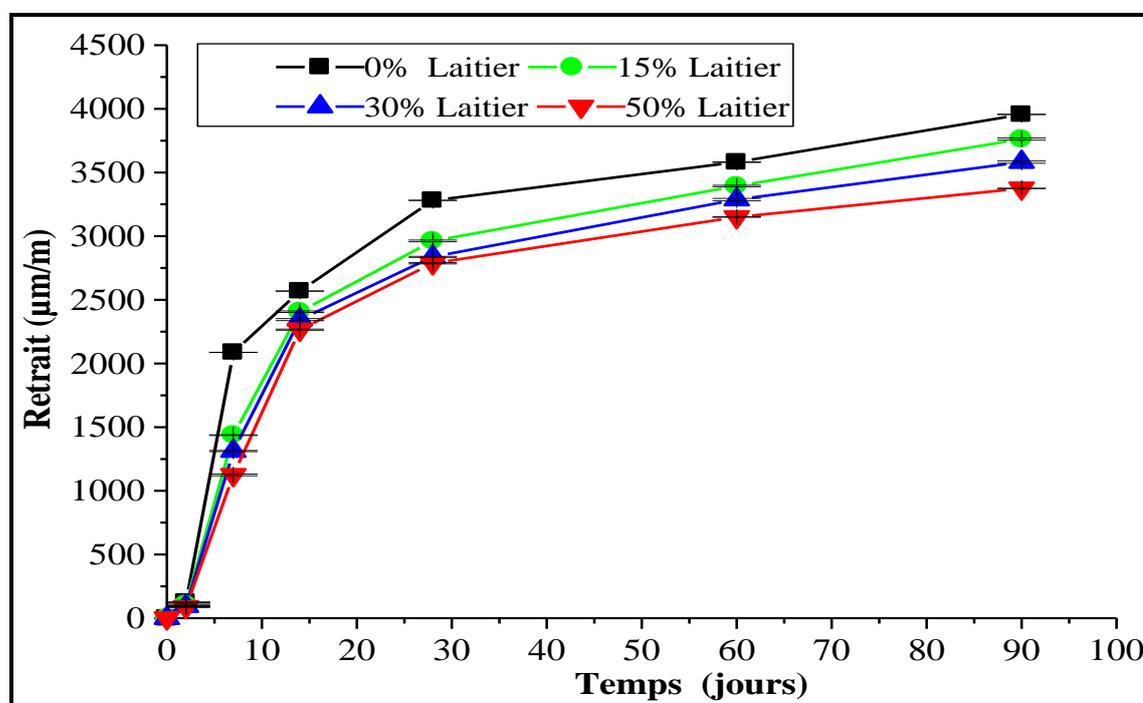


Figure.5.26 : Variation du retrait en fonction de l'ajout du laitier de haut fourneau des composites C/L:1/3.

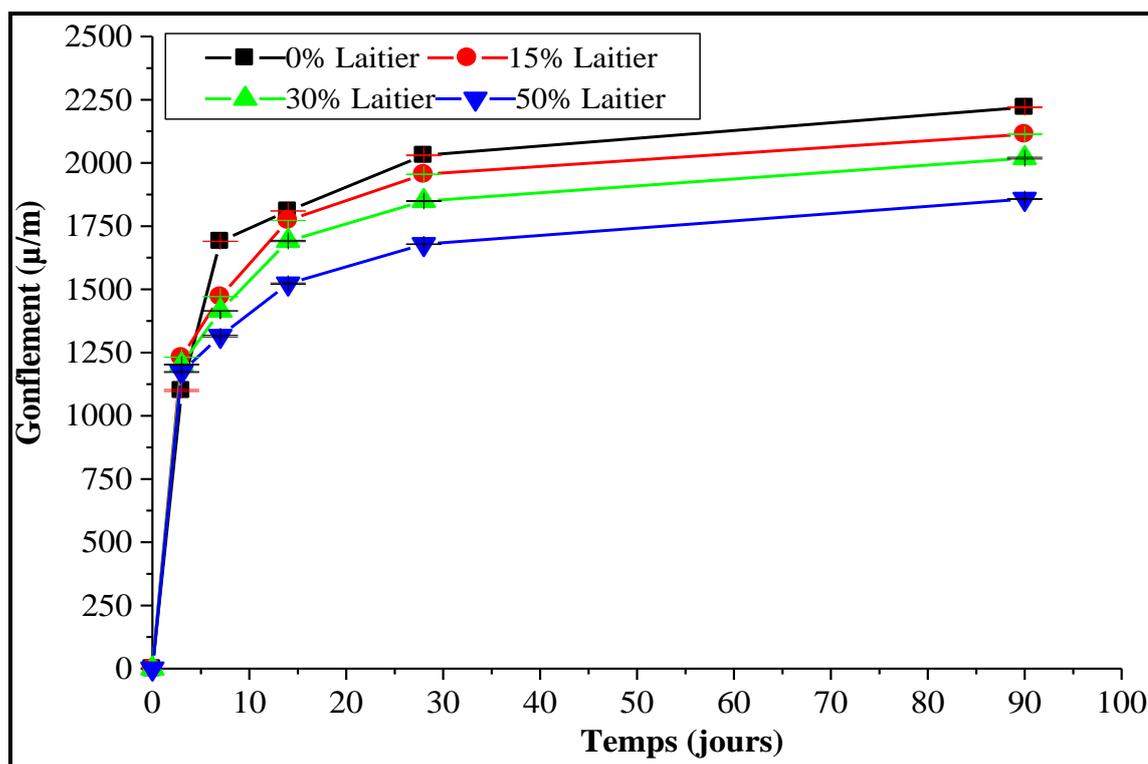


Figure.5.27 : Variation du gonflement en fonction de l'ajout du laitier de haut fourneau des composites C/L:1/3.

Le retrait et le gonflement diminuent avec la proportion de LHF. En effet, une réduction significative du retrait a été observée avec l'ajout de laitier. Cela pourrait s'expliquer par la légère réduction de la taille des pores des échantillons en présence de laitier qui engendre une diminution de l'absorption d'eau. En effet, l'introduction de LHF dans les ciments implique des modifications dans la composition et, donc, des modifications microstructurales du matériau. Selon Nicolas [293], l'introduction de laitier peut modifier la géométrie des pores et, par conséquent, modifier leur accès et, donc, leur connectivité au sein du matériau. Ainsi, ils peuvent influencer les rapports entre les volumes libres et piégés, ainsi que la tortuosité des chemins continus qui permettent de traverser le matériau. Cette porosité dépend à la fois de la cure et de la proportion ainsi que la finesse du LHF. Dans notre cas, il semble que l'interface entre la matrice et les granulats de liège est de bonne qualité. Pourtant, cette diminution reste faible sur le long terme. Le retrait le plus bas a été observé pour le mélange avec 50% de LHF avec une réduction de 18% à 90 jours d'âge. En comparaison avec l'échantillon contenant 30% de sable en substitution du ciment, le retrait diminue de 27% à 90 jours. Par conséquent, l'addition de sable de rivière est plus efficace pour limiter les variations dimensionnelles des composites à base de liège.

5.6. Performances thermiques

Dans la section suivante, l'effet de l'environnement de conservation, de l'incorporation des granulats de liège, de l'addition de sable (rivière et dune) et de l'addition du laitier de haut fourneau sur les propriétés thermiques ont été examinés.

5.6.1. Effet de conservation et d'addition de liège

Les mesures des propriétés thermiques ont été effectuées après quatre semaines de maturation. Les granulats de liège possèdent des propriétés thermiques excellentes qui affectent positivement les propriétés thermiques du composite qui les contient [175]. La conductivité de tous les composites est faible avec des conductivités thermiques de 0,46 et de 0,38 W/m.K, respectivement, pour les échantillons conservés dans d'eau et à l'air comme le montre la figure 5.28.

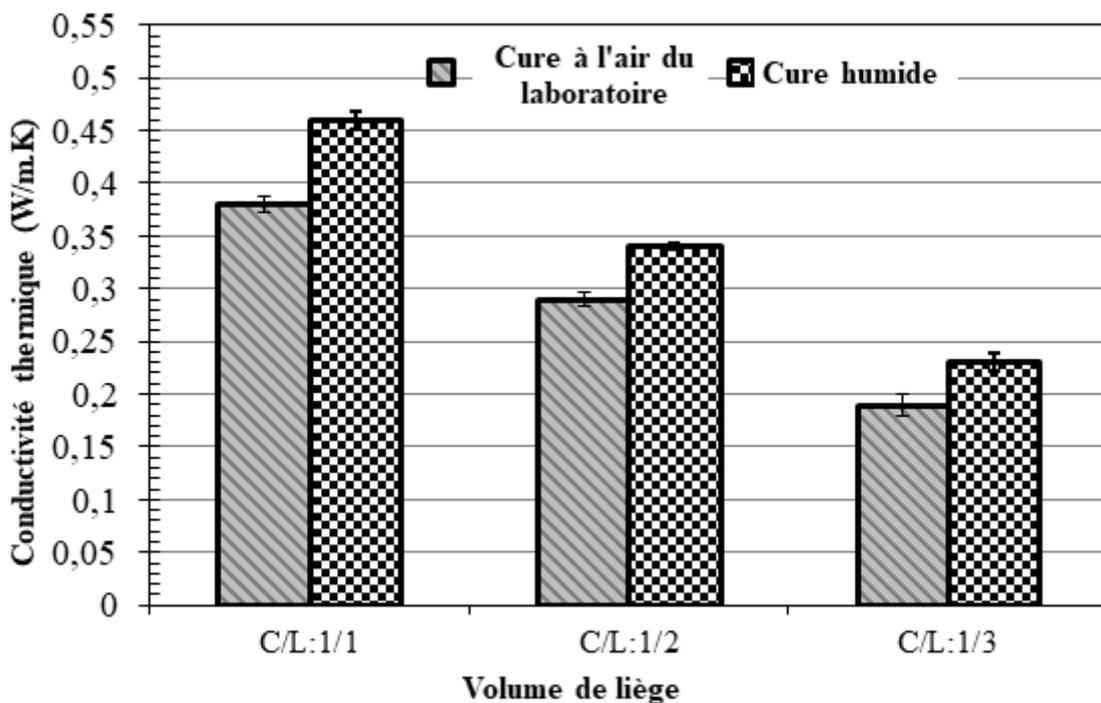


Figure. 5.28 : Conductivité thermique en fonction de contenu de liège dans une cure humide et à l'air de laboratoire.

L'effet de l'environnement de cure sur la conductivité thermique est significatif et le durcissement à l'air a donné la conductivité thermique la plus faible. En fait, la valeur de la conductivité thermique diminue avec la diminution de la teneur en eau du matériau. La valeur la plus basse est obtenue dans des conditions sèches (l'eau présente une valeur de conductivité thermique de 0,6 W/m.K alors que l'air de 0,025 W/m.K). Cette conductivité

thermique varie entre 0.19 et 0.38 W/m.k suivant le volume de liège. Ce résultat est comparable à celui des chapes réalisées avec du liège expansé mais avec une plus forte résistance à la compression (0.12 et 1.98 MPa à 28 jours) [198]. La diminution de la conductivité peut s'expliquer par l'hydratation du matériau qui est beaucoup plus lente à l'air que dans l'eau. Cela favorise la formation d'un matériau plus poreux et donc moins conducteur du fait de la faible conductivité thermique de l'air, qui est d'environ 0,025 W/m.K. En effet, le volume d'air dans le matériau composite ralentit la diffusion de la chaleur et augmente la résistance thermique, engendrant, ainsi, une faible conductivité thermique. Ces résultats confirment les travaux d'investigation réalisés par Benmalek et al. [175], c'est à dire que la conductivité thermique augmente avec l'humidité. Elbakkori et al. [294] et Limama et al. [295] ont également rapporté qu'il y a une augmentation de la capacité d'isolation avec l'humidité.

La conductivité thermique diminue considérablement en fonction de la fraction volumique du liège granulaire, de sorte que le matériau devient moins isolant comme le montre la figure.5.28. En effet, l'addition du liège dans la pâte cimentaire diminue significativement la conductivité thermique (la conductivité du liège est inférieure à celle du ciment). Les résultats du tableau 5.4 révèlent que la conductivité est réduite d'environ 26% et 50%, respectivement dans les mélanges contenant un volume de liège et un volume de ciment conservé dans l'eau. Comme pour les bétons légers, les propriétés thermiques sont liées à leurs masses volumiques, effectivement, l'augmentation de la proportion de la porosité introduite dans la matrice diminue sa conductivité thermique. Autrement dit, plus la masse volumique est faible plus les capacités d'isolation thermique sont meilleures (tableaux 5.4 et 5.5). Cette diminution est due à l'introduction de cellules d'air dans la matrice qui lui confère de bonnes propriétés d'isolation thermique. En effet, l'ajout de liège engendre, dans le composite, une porosité plus élevée. Des résultats similaires [115, 296, 297] ont montré que l'incorporation du liège dans le béton améliore la conductivité thermique mais réduit les propriétés mécaniques. Le tableau 5.3 affiche le comportement de nos composites. Castro et al. [298] ont constaté une réduction de la conductivité thermique de 45% dans les blocs sans liège. La comparaison de conductivité thermique de ces composites a fait l'objet de l'attention de nombreux chercheurs [198, 257]. En effet, des mortiers légers à base de liège et de polystyrène ont été examinés. Dans le cas de mortiers avec granulés de liège, l'augmentation de la quantité de liège entraîne une diminution plus importante de la conductivité thermique que dans le cas de mortiers sans le liège, et ceux

en polystyrène. Les mélanges à base de liège peuvent réduire le coefficient de conductivité thermique à 75%, alors que le polystyrène à 60% seulement [257]. Selon la classification de la RILEM [182], les composites C/L:1/3 durci dans l'eau, C/L:1/2 et C/L:1/3 durcis en laboratoire peuvent être classés comme "béton léger d'isolation" car ils présentent une masse volumique apparente inférieure à 2000 kg/m³, leur résistance à la compression est supérieure à 0.5 MPa et leur conductivité thermique est inférieure à 0,3 W/m.K.

Tableau 5.4 : Conductivité thermique des composites.

Composites	Cure humide		Cure à l'air du laboratoire	
	λ (w/m.k)	Résistance Compression (MPa)	λ (w/m.k)	Résistance Compression (MPa)
C/L:1/1	0,46	6,63	0,38	5,82
C/L:1/2	0,34	2,01	0,29	1,88
C/L:1/3	0,23	1,02	0,19	0,68

La relation entre les propriétés thermiques (conductivité thermique, capacité thermique et diffusivité thermique) et le liège contenu dans les différents composites, a été étudiée par Cherki et al. [10, 11]. Les résultats de la caractérisation thermique de chaque échantillon à partir de CT-Mètre sont résumés dans les tableaux 5.5 et 5.6. Globalement, la résistance thermique R est inversement proportionnelle à (λ). Par contre, la diffusivité thermique (a) est proportionnelle à (λ) et inversement proportionnelle à Cp. . En raison de sa structure en nid d'abeille, on remarque que le liège est un bon absorbeur de chaleur par rapport au bois [295]. Par conséquent, le liège noir algérien a de bonnes propriétés thermiques ($\lambda = 0,041$ W/m.K, Cp = 1900 J/kg.k. D'après les tableaux 5.4 et 5.5, nous avons remarqué que l'augmentation du volume de liège et la conservation à l'air de laboratoire réduisent la chaleur spécifique. Ainsi, la cure à l'air de la formulation C/L:1/1 conduit à une diminution de 19% de la chaleur spécifique et d'environ 33% avec l'augmentation du volume de liège (C/L:1/3). La chaleur spécifique des composites C/L:1/1 et C/L: 1/2 durcis en eau et C/L: 1/1 durci aussi à l'air est supérieure à celle des composites de plaques de plâtre [10]. D'autre part, la chaleur spécifique du composite C/L:1/3 est inférieure à celle des composites de plaques de plâtre alors qu'elle est comparable pour le composite C/L:1/2 durci en laboratoire [10, 11]. L'incorporation du liège dans la matrice cimentaire, en outre, augmente la porosité totale du matériau composite, du volume d'air à l'intérieur du matériau. Cela conduit à une diminution de la chaleur spécifique globale du matériau en raison de la faible capacité thermique de l'air qui est de l'ordre de 1004 J/kg.K. De plus, le

durcissement à l'air de laboratoire donne un matériau plus poreux que le durcissement à l'eau en raison de l'hydratation du matériau. Cela s'explique aussi par les faibles valeurs de la capacité thermique dans le cas de conservation à l'air de laboratoire. La dépendance de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique des bétons de granulats légers sur la teneur en humidité a été montré avec différents agrégats légers, grossiers et fins lorsqu'ils sont utilisés dans le béton sous une saturation sèche ou partielle ou en états saturés [299].

Tableau 5.5 : Caractéristiques thermiques de composites à l'état saturé.

Composites	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.k)	R (m ² .k/w)	Chaleur spécifique Cp (j/kg.k)	Diffusivité thermique a (m ² /s) 10 ⁻⁷
C/L:1/1	1326	0,46	0,087	1589,64	2,18
C/L:1/2	1056	0,34	0,118	1343,50	2,40
C/L:1/3	879	0,23	0,174	1018,74	2,57

Tableau 5.6 : Caractéristiques thermiques de composites à l'air de laboratoire.

Composites	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.k)	R (m ² .k/ w)	Chaleur spécifique Cp (j/kg.k)	Diffusivité thermique a (m ² /s) 10 ⁻⁷
C/L:1/1	1024	0,38	0,105	1337,52	2,77
C/L:1/2	789	0,29	0,138	1146,90	3,20
C/L:1/3	623	0,19	0,211	898,49	3,39

Les résultats montrent que le coefficient de diffusion thermique est plus élevé avec les composites contenant une teneur plus élevée en liège. Cet essai donne une nette différence du comportement de notre matériau dans un milieu humide et dans un milieu libre (air de laboratoire). Il permet de mettre en évidence le caractère des matériaux composites dans certaines conditions de conservation sur la diffusion thermique. En effet, la conservation en air de laboratoire augmente le coefficient de diffusion thermique. Pour le confort intérieur des bâtiments, un coefficient de diffusion plus faible est obligatoire pour être utilisé comme murs et toits. En fait, plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra de temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc plus le temps est long entre le moment où la chaleur est arrivée d'un côté d'un mur et le moment où elle atteint l'autre côté. C'est la mesure de l'inertie thermique. Les résultats obtenus montrent que le coefficient de diffusion thermique du composite ciment-liège est inférieur à celui de la brique ($7,4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$), du béton expansé ($5,2$ à $5,8 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$), ainsi que du béton ordinaire ($7,4$ à $7,8 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$), et il est comparable à celui du béton de bois

($1,2$ à $2,8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) [101, 183]. Il peut être également comparable à celui du composite plâtre-liège ($1,92$ à $3,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) [10]. Cette diffusion est inférieure à celle du plâtre et du gypse seul [10, 11]. Le séchage pendant 14 jours dans l'eau et le reste à l'air de laboratoire est une période de durcissement optimale du composite de liège de ciment. D'après ces résultats, on comprend mieux l'intérêt de prendre en compte le milieu de cure optimale afin de combiner entre les trois grandeurs étudiées. Ces composites sont à faible coût peuvent être utilisés pour assurer un confort thermique acceptable dans le bâtiment.

5.6.2. Effet de l'addition de sable

Les résultats expérimentaux de la conductivité thermique en fonction de l'ajout de sable sont présentés sur la figure 5.29.

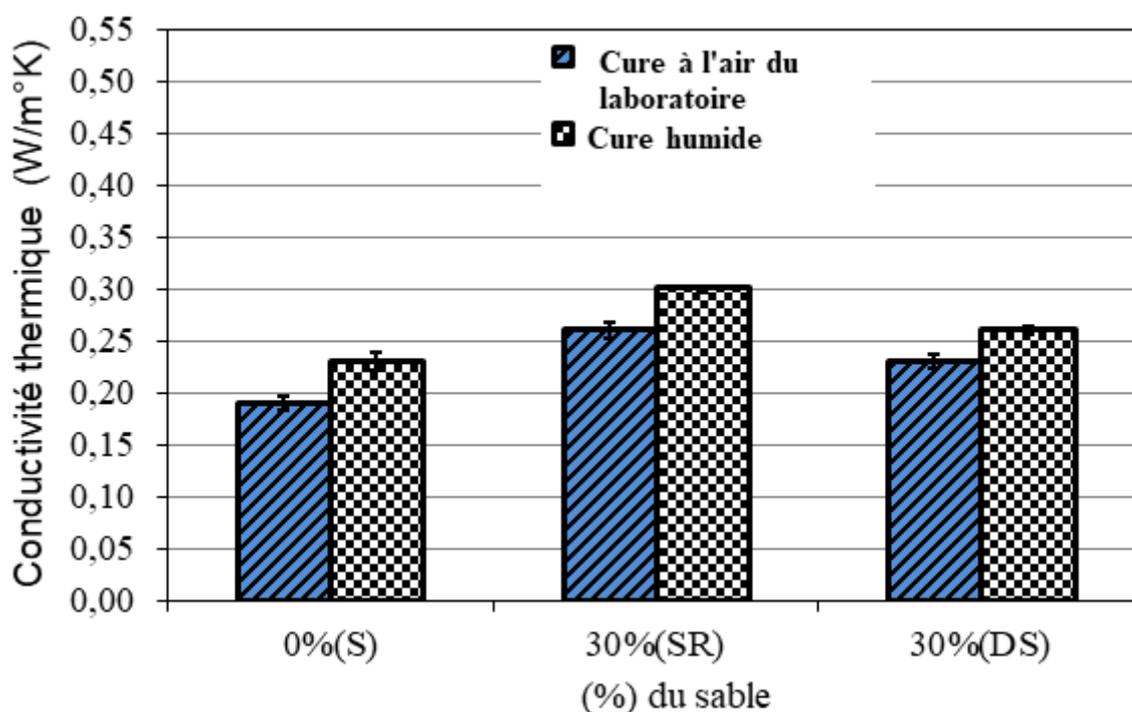


Figure.5.29. Variation de la conductivité thermique en fonction de la nature du sable des composites C/L :1/3.

Les mesures effectuées ont donné un coefficient variant entre $0,19$ et $0,30 \text{ W/m.K}$. Les composites obtenus sont plus isolants que le composite argile-bois et le béton cellulaire [101, 175]. L'influence de la taille du sable sur la conductivité thermique est étudiée. En effet, le composite contenant du sable fin exprime un coefficient légèrement inférieur à celui du composite contenant des granulats grossiers. Cela pourrait être dû au fait que les granulats fins sont distribués proportionnellement dans la matrice. Des résultats similaires

ont été rapportés pour l'addition de sable dans le béton avec des copeaux de bois [138]. L'ajout de sable fin diminue la conductivité thermique de 12% à l'air et de plus de 13% dans un milieu humide mais elle augmente par rapport au composite sans sable.

Les résultats expérimentaux montrent que la cure à l'air libre permet d'avoir des caractéristiques thermiques intéressantes. Néanmoins, on constate une diminution de la résistance à la compression de 53.85% par rapport à la même composition durcie dans un milieu saturé (tableau 5.7).

Tableau 5.7 : Conductivité thermique des composites.

Composites	(% sable)	Cure humide		Cure à l'air du laboratoire	
		λ (w/m.k)	Rc (MPa)	λ (w/m.k)	Rc (MPa)
C/L:1/3	0%	0,23	1,02	0,19	0.68
C/L:1/3	30% (R)	0,30	0.52	0,26	0.24
C/L:1/3	30% (D)	0,26	-	0,23	-

Dans les deux configurations étudiées, l'ajout de sable, par la substitution au ciment, diminue la densité ce qui va entraîner une réduction de la chaleur spécifique (tableaux 5.8 et 5.9). Un effet contraire est constaté avec la diffusion thermique. La chaleur spécifique est plus élevée pour les composites sans sable durcis dans l'eau. On constate que l'ajout de sable et les conditions de conservation pourraient avoir une grande influence sur la chaleur spécifique. En effet, ces deux paramètres vont entraîner une diminution de la chaleur spécifique de nos composites. Néanmoins, une forte diminution est observée avec du sable de dune. Par conséquent, ce résultat indique que le sable de rivière donne un léger avantage par rapport au sable de dune. Un effet inverse est observé pour la diffusion thermique. Une forte augmentation du processus de diffusion thermique est observée lorsque le sable est ajouté. Le sable de rivière entraîne une augmentation de la diffusion de la chaleur par rapport au sable de dune. Cela peut être dû à la taille, plus grossière, du sable de rivière. Concernant la résistance thermique, la conductivité thermique augmente avec l'ajout de sable alors que la résistance thermique diminue, cela est plus marqué avec le sable de rivière à l'état saturé.

Tableau 5.8 : Caractéristiques thermiques de composites à l'état saturé.

Composites	(%) du sable	MVA (kg/m ³)	λ (W/m.k)	R (m ² .k/ w)	Cp (j/kg.k)	(a) (m ² /s) 10 ⁻⁷
C/L:1/3	0%	879	0,23	0,174	1018,74	2,57
C/L:1/3	30% (R)	748	0,30	0,133	870,98	4,60
C/L:1/3	30% (D)	736	0,26	0,154	858,78	4,11

Tableau 5.9 : Caractéristiques thermiques de composites à l'air de laboratoire.

Composites	(%) du sable	MVA (kg/m ³)	λ (W/m.k)	R (m ² .k/ w)	Cp (j/kg.k)	(a) (m ² /s) 10 ⁻⁷
C/L:1/3	0%	623	0,19	0,211	898,49	3,39
C/L:1/3	30% (R)	555	0,26	0,154	806,98	5,81
C/L:1/3	30% (D)	532	0,23	0,174	770,89	5,61

5.6.3. Effet de l'addition de laitier

À première vue, on peut, déjà, voir que la substitution du ciment par le laitier de haut fourneau diminue le coefficient de la conductivité thermique des composites élaborés (Figure 5.30). De plus, la conservation à l'air libre permet de diminuer leurs conductivités thermiques. La plus faible valeur est celle de la composition contenant 50% de laitier dans une cure à l'air libre. Cela est dû à l'augmentation de la porosité. Cette dernière est plus importante avec la cure à l'air libre. Selon certains auteurs, la quantité de chaux, produite par l'hydratation du clinker est insuffisante pour activer le LHF. Par contre, la cure humide donne une porosité plus faible et une distribution globale de la taille des pores plus fine. Par conséquent, la conductivité thermique est liée à la qualité du ciment employé. Des résultats similaires sont rapportés par Kim et al. [194]. Cette étude montre clairement l'intérêt de recycler le laitier pour réduire la conductivité thermique.

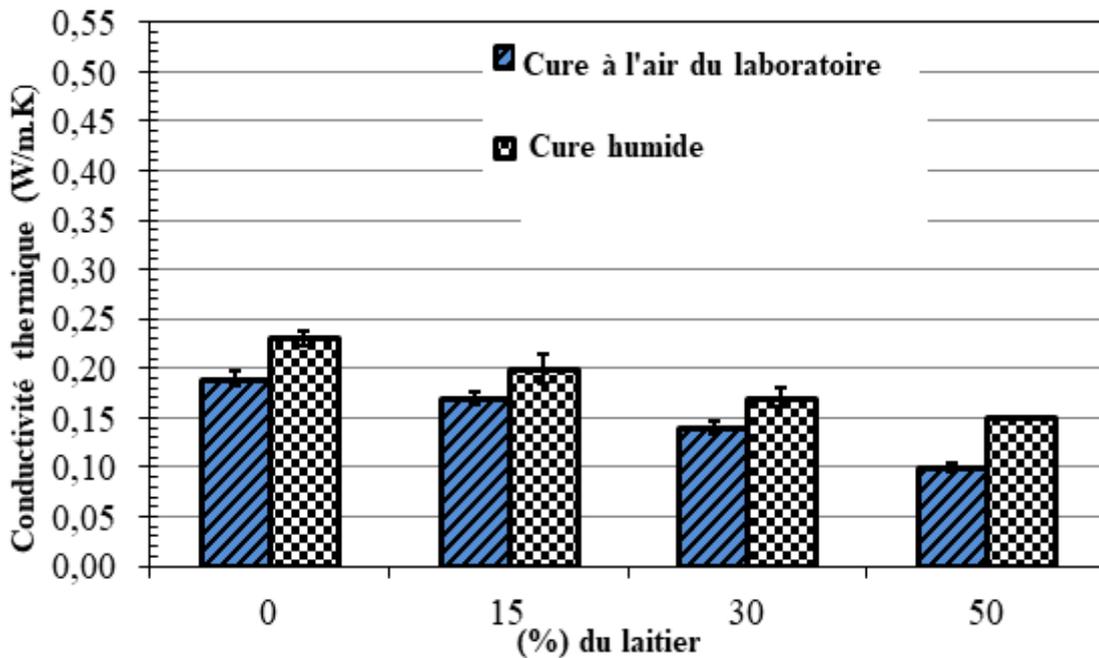


Figure.5.30: Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de laitier des composites C/L :1/3.

Notre nouveau composite développé peut être classé parmi les matériaux d'isolation. En comparaison avec d'autres matériaux de construction, la conductivité thermique obtenue est meilleure que celle de brique pleine ($\lambda = 1,15 \text{ W/m.K}$) [277], de la brique creuse ou perforée isolante ($\lambda = 0,3 \text{ W/m.K}$) [295], du plâtre d'enduit d'intérieur et des carreaux de plâtre pleins [145]. Par contre, elle est inférieure par rapport à certains matériaux isolants tels que la laine de roche ($\lambda = 0,046 \text{ W/m.K}$), la laine de chanvre ($\lambda = 0,06 \text{ W/m.K}$) et la laine de bois ($\lambda = 0,05 \text{ W/m.K}$) [295]. Pour ce groupe d'échantillons, il apparaît que la variation de la résistance thermique est fonction du mode de cure. En effet, on constate, d'une part, que la résistance thermique des composites constitués de laitier est plus élevée que celle des compositions constitués de ciment seul et, d'autre part, que la conservation à l'air libre diminue la résistance thermique comme indiqué précédemment (tableau 5.10).

Tableau 5.10: Conductivité thermique des composites contenant du laitier.

Composites	(% du LHF	Cure humide		Cure à l'air du laboratoire	
		λ (w/m.k)	R (m ² .k/w)	λ (w/m.k)	R (m ² .k/ w.)
C/L:1/3	0%	0,23	0,174	0,19	0,211
C/L:1/3	30%	0,17	0,235	0,14	0,286
C/L:1/3	50%	0,15	0,267	0,10	0,400

La forte diminution de la conductivité (LHF50 à l'air libre diminue d'environ 47%) est accompagnée d'une faible diminution de la chaleur spécifique (21%). Cette diminution est plus faible dans une cure humide. La chaleur spécifique des composites reflète la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique, pour une masse donnée, quand sa température augmente. Une grande capacité thermique signifie qu'une grande quantité d'énergie peut être stockée.

La chaleur spécifique et la diffusion thermique du laitier sont plus faibles que celles du ciment. En effet, ces valeurs diminuent en fonction de la fraction massique du laitier. La forte diminution de la conductivité est également accompagnée d'une faible diminution de la diffusivité thermique à travers les composites. En effet, la diffusivité thermique n'a pas de changement significatif avec l'ajout du laitier et du mode de cure des composites. Donc, plus le composite contient du laitier, moins il permet la transmission de la chaleur, c'est un résultat important dans l'isolation thermique: un matériau isolant ne doit pas seulement avoir une faible conductivité mais doit également permettre de retarder la transmission de la chaleur. Par conséquent, la présence du laitier, dans le matériau, le rend plus léger et améliore ses propriétés thermiques.

Tableau 5.11 : Caractéristiques thermiques de composites au laitier à l'état saturé.

Composites	(%) du laitier	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique Cp (j/kg.k)	Conductibilité thermique λ (W/m.k)	Diffusivité thermique a (cm ² /s) 10 ⁻⁷
C/L:1/3	0%	879	1018.74	0,23	2.75
C/L:1/3	30%	843	1010.22	0,17	2.00
C/L:1/3	50%	793	950.28	0,15	1.99

Tableau 5.12 : Caractéristiques thermiques de composites au laitier à l'air de laboratoire.

Composites	(%) du laitier	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique Cp (j/kg.k)	Conductibilité thermique λ (W/m.k)	Diffusivité thermique a (cm ² /s) 10 ⁻⁷
C/L:1/3	0	623	898.49	0.19	3.39
C/L:1/3	30%	589	775.86	0.14	3.06
C/L:1/3	50%	537	711.51	0.10	2.62

En comparaison avec les composites contenant du sable de rivière et dune, dans un environnement saturé, il est apparu que la chaleur spécifique est plus élevée dans les mélanges contenant du laitier. Cette tendance n'est pas observée dans les échantillons durcis à l'air.

5.6.4 Corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente

Nous avons effectué une régression linéaire, sur la base des résultats expérimentaux, entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente. Les équations et les coefficients de corrélation sont indiqués sur les figures 5.31 et 5.32, à partir desquels la conductivité thermique a été déterminée en fonction de la masse volumique apparente. Des régressions de même type ont été réalisées pour l'ensemble des composites quelle que soit la matrice. En effet, des expressions mathématiques de la régression linéaire ont été obtenues pour estimer l'effet du changement de la masse sur la conductivité thermique (λ) (figure 5.31 et 5.32). L'ensemble des résultats montre qu'il existe une bonne corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente. Les courbes expérimentales indiquent que les coefficients de corrélation R sont tout à fait raisonnables. Si on applique ces équations, on peut faire une évaluation précise de la conductivité thermique.

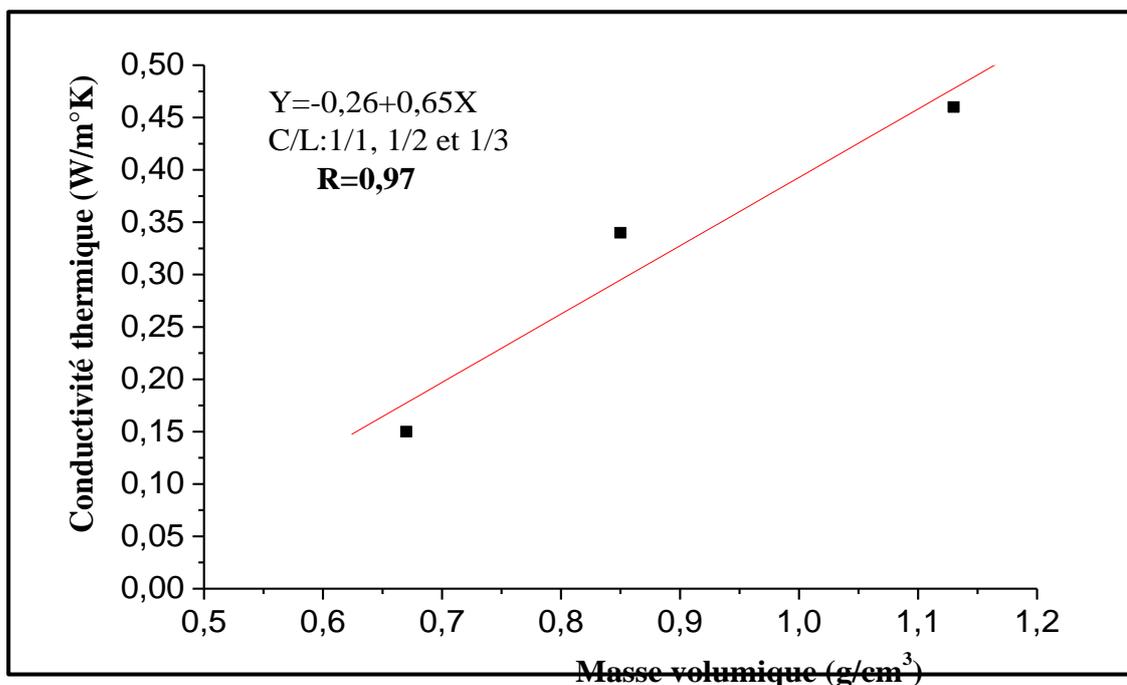


Figure.5.31: Conductivité thermique vs la masse volumique : Cure humide.

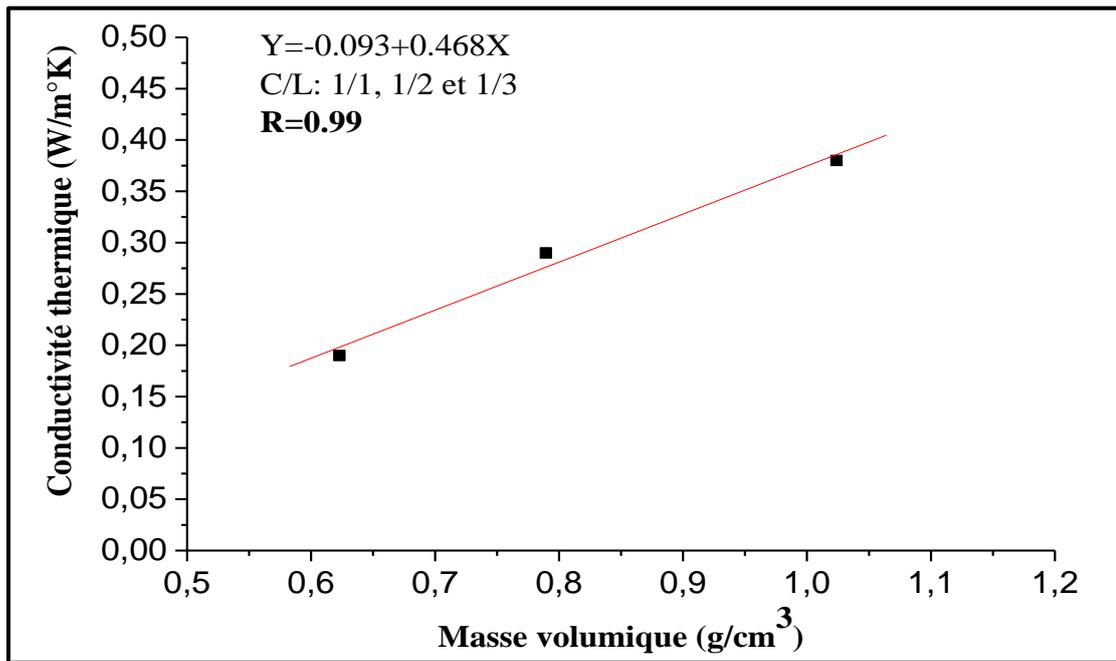


Figure.5.32: Conductivité thermique vs la masse volumique :
Cure à l'air libre de laboratoire.

Les courbes de corrélations représentant les conductivités thermiques en fonction des masses de composites avec du LHF dans les deux modes de cure sont linéaires. D'après les figures 5.33 et 5.34, les relations linéaires proposées donnent une bonne prévision de la conductivité thermique et les coefficients de corrélation (R) obtenus sont très satisfaisants.

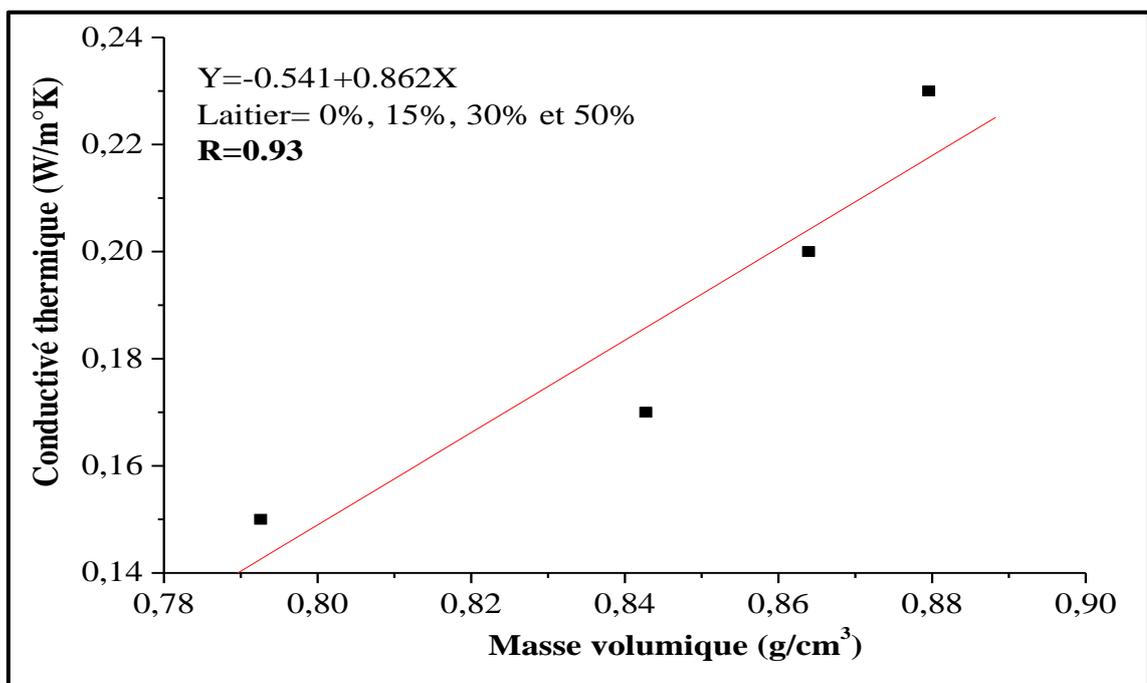


Figure 5.33 : Corrélation entre la conductivité thermique vs la masse volumique apparente dans une cure humide des composites avec du laitier de haut fourneau.

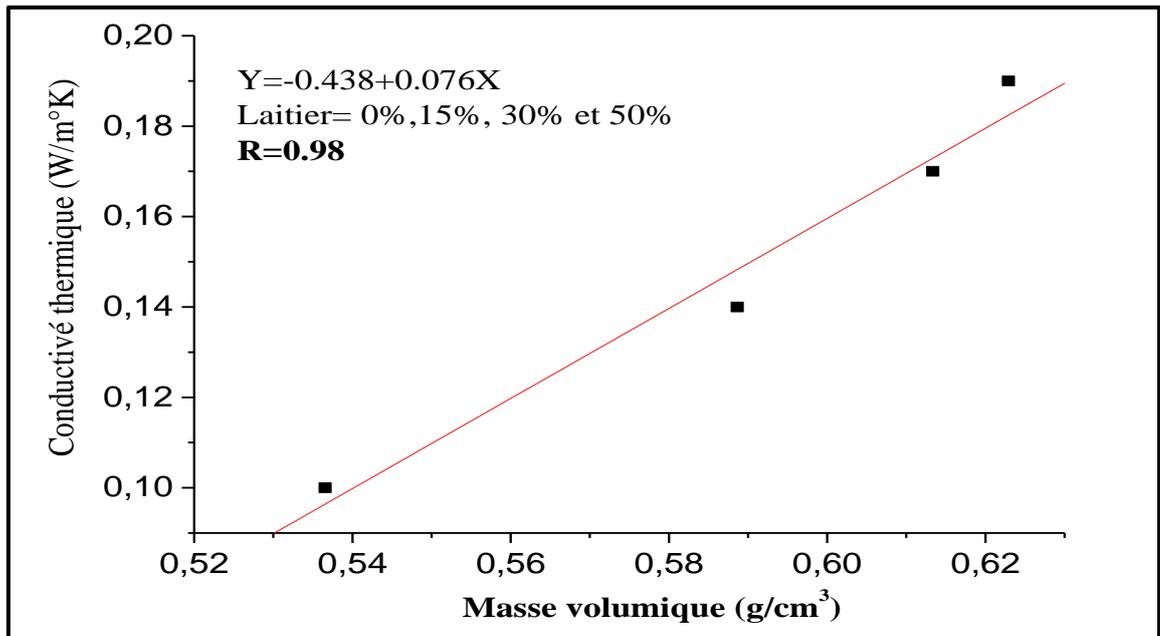


Figure 5.34: Corrélation entre la conductivité thermique vs la masse volumique dans une cure à l'air du laboratoire des composites avec du laitier de haut fourneau.

La corrélation des résultats expérimentaux des différentes compositions, avec et sans laitier, a été effectuée (Figure 5.35 et 5.36). En effet, une corrélation linéaire a été observée entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente.

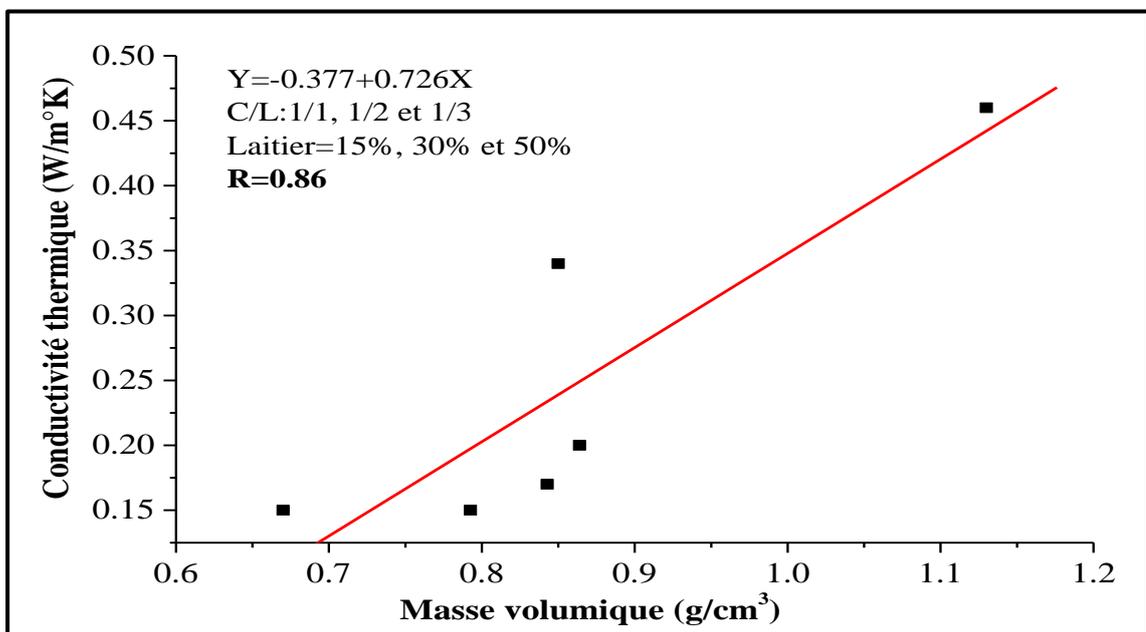


Figure 5.35: Corrélation entre la conductivité thermique vs la masse volumique des composites sans et avec du laitier de haut fourneau : conservé dans l'eau.

Les équations résultant de la régression linéaire sont obtenues avec un coefficient de corrélation (R) moins satisfaisant que les corrélations précédentes dans le milieu humide.

Par contre, la distribution des résultats obtenus à l'air de laboratoire donne une loi de régression linéaire presque parfaite avec un coefficient de corrélation $R=0,98$.

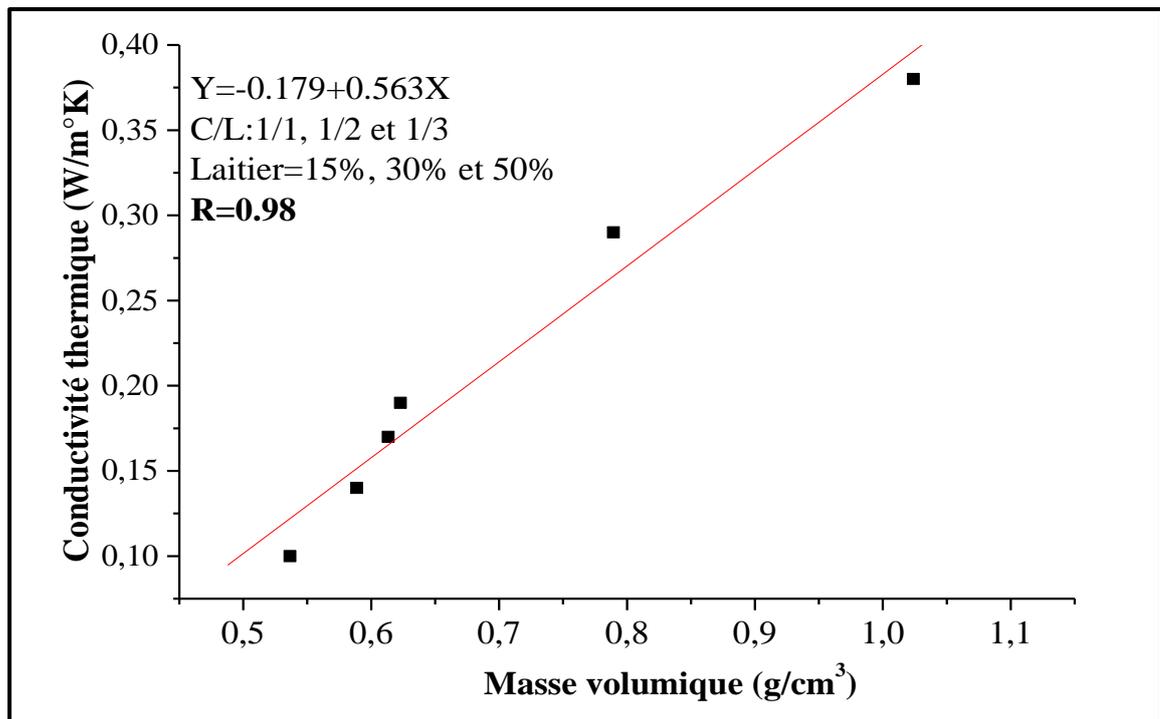


Figure 5.36 : Corrélation entre la conductivité thermique vs la masse volumique des composites sans et avec du laitier de haut fourneau : conservé à l'air du laboratoire.

Du fait de la présence d'une bonne corrélation des valeurs de masse volumique apparente avec celles de la conductivité thermique, nous pouvons avancer que la conductivité thermique diminue linéairement avec la masse volumique apparente. Une observation similaire a été rapportée par Khedari et al. [300].

5.7 Conclusion

Les résultats de cette partie d'étude a permis de tirer les enseignements suivants :

- Cette étude expérimentale a mis en évidence la possibilité d'utiliser les déchets de liège expansé comme substituant total au sable dans la fabrication des matériaux composites.
- Les matériaux composites à base de liège sont très sensibles à leur environnement de cure en raison du caractère d'absorption et déshydratation des granulats de liège. La cure humide pendant 14 jours et suivi de cure à l'air du laboratoire améliore les résistances mécaniques à court terme et au moyen terme.

- L'incorporation de liège expansé a eu un impact sur les propriétés des composites étudiés. En effet, l'augmentation du volume de liège modifie la structure des composites. Une réduction de la masse volumique de 40% a été observée avec trois volumes de liège.
- La résistance mécanique diminue avec l'ajout des granulats de liège et du sable de rivière. Néanmoins, la substitution du ciment par le laitier de haut fourneau conduit à une amélioration des propriétés mécaniques, particulièrement avec un taux de 30%.
- Les variations dimensionnelles augmentent avec l'ajout du volume de liège. Une légère diminution est toutefois observée pour les composites au laitier. Pour les composites avec du sable de rivière, ces variations dimensionnelles diminuent avec l'augmentation du taux de sable dans le composite.
- La conductivité thermique obtenue a été intéressante. Néanmoins, l'évolution de cette conductivité thermique est plus significative avec l'ajout de liège et l'environnement de cure des matériaux composites. Une grande amélioration est obtenue dans l'environnement à l'air de laboratoire.

CONCLUSION GENERALE

Les demandes en énergie ne cessent d'augmenter, particulièrement dans le secteur construction. De ce fait, il est nécessaire de concevoir de nouveaux matériaux avec une bonne performance sur le plan thermique. Le recyclage de déchets de sous-produits industriels comme le liège expansé améliore considérablement la qualité thermique des constructions. Ce choix se justifie du fait de sa disponibilité et sa bonne qualité thermique. Sur le plan écologique, la mise en décharge de ce déchet peut constituer une forte pollution. Alors que ce déchet de ressources renouvelables peut être recyclé avec succès comme remplacement des matériaux minéraux non renouvelables. En plus du liège, le déchet industriel faisant l'objet de cette étude est le laitier de haut fourneau.

Ce travail constitue une contribution à l'étude des propriétés physiques, mécaniques et thermiques en particulier des matériaux composites à base de déchets de liège expansé puisque ces matériaux sont destinés à l'isolation thermique.

Dans la première partie de l'étude expérimentale, une étude préliminaire a été effectuée. Elle a permis de tirer les enseignements suivants :

- Le remplacement total des granulats minéraux par les granulats de liège est effectué avec succès. En effet, les matériaux composites obtenus sont homogènes et facile à mettre en œuvre.
- La substitution d'une partie du ciment dans les matériaux composites (C/L:1/3) par le sable et le laitier de haut fourneau présente également une bonne ouvrabilité et la faisabilité obtenue est réalisable et cela même pour un dosage du sable et du laitier de l'ordre de 30 et 50% respectivement. Ce résultat nous permet de dégager de façon franche le dosage optimal des substituants. En plus, les résultats des différents essais expérimentaux de notre programme expérimental, à l'état durci, vont apporter quelques éléments de réponses par rapport à les substitutions optimales adéquates ;
- L'augmentation du volume de liège a permis d'avoir un composite plus poreux. Toutefois, il semble que l'ajout du sable de rivière contribue à l'amélioration de la compacité du composite et par conséquent l'adhérence de la pâte du ciment avec les granulats de liège expansé.

Dans la deuxième partie du travail, nous avons étudié le comportement physique et mécanique des matériaux composites dans trois milieux de cure. L'impact de la teneur du laitier de haut fourneau et de la teneur en sable sur les propriétés mécaniques des matériaux composites a été également étudié. Plusieurs éclaircissements ont été tirés :

- Le gain et la perte de la masse volumique apparente augmentent avec l'ajout de liège. En effet, les vides se remplissent ou se vident de l'eau facilement, ce qui indique que ces compositions sont poreuses, ils ne conviennent pas à une exposition extérieure ;
- La masse volumique diminue avec l'ajout du pourcentage de sable. En effet, la masse volumique de ces composites varie entre 493 et 803 kg/m³. Précisons que c'est un point positif pour ces composites. Les mêmes observations pour les composites contenant du laitier de haut fourneau. La masse volumique, après un an de cure, varie de 845 à 942 kg/m³ ;
- Le milieu idéal de cure est celui de l'eau pendant 14 jours suivi d'une cure à l'air de laboratoire. Il est bénéfique pour les résistances mécaniques ;
- La résistance à la compression diminue également avec l'ajout de sable. Cette résistance est meilleure dans l'eau pendant 14 jours et le reste à l'air de laboratoire. Cependant, on constate une diminution des caractéristiques mécaniques après 90 jours. Dans ce cas, le pré-mouillage des agrégats peut avoir un effet positif sur l'adhérence liège/ciment et par conséquent une augmentation des propriétés mécaniques. Cette diminution peut également s'expliquer par la présence d'hémicelluloses et de cellulose sur les agrégats de liège. Cela montre la nécessité d'un traitement des granulats tel qu'un traitement préalable avec de l'hydroxyde de sodium de liège pour améliorer l'interface ciment/liège et réduisent ainsi le vieillissement des composites ;
- Le pourcentage optimal du sable retenu est de 20%. Cette résistance dépasse 2 MPa après un an de cure. Cela nous laisse penser que ce composite peut trouver plusieurs applications. Ce qui est important de rappeler pour les essais mécaniques que la résistance à la traction par flexion est supérieure à celle de la résistance à la compression. Ceci est dû probablement à la nature élastique des granulats de liège expansé. On peut donc en conclure que ces composites peuvent trouver des applications horizontales comme les plafonds ;
- Le ciment au laitier employé dans la fabrication des composites ont une meilleure résistance. On observe une nette augmentation de résistance à la compression avec l'ajout de laitier au moyen et au long terme. Par contre, au jeune âge la résistance

diminue, elle commence à se faire sentir à partir de 7 jours. Les mêmes observations pour la résistance à la flexion ont été faites. La résistance à la compression mesurée sur une période de 180 jours, pour les composites contenant 50% de laitier, augmente de 22% par rapport à celle enregistrée à 28 jours. Par contre, le composite avec 30% de laitier, enregistre, quant à lui, une augmentation plus importante, qui est de 29%. Cette dernière diminue seulement de 5%, après un an de cure, Par contre, avec 50% de laitier cette diminution est de 7%. Par conséquent, il semble que 30% de laitier offre une meilleure activation du laitier ;

- L'addition du laitier de haut fourneau contribue à l'amélioration de la résistance à la compression et à la résistance à la traction par flexion dans l'intervalle allant de 90 à 180 jour ;
- On peut avancer que l'ajout de laitier dans la matrice cimentaire n'améliore pas la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion. Ces caractéristiques mécaniques ne sont pas affectées par la matrice élaborée mais par dégradations des granulats de liège expansé lorsque ils sont incorporés dans la matrice cimentaire. Par conséquent, le traitement des granulats de liège est plus que nécessaire. Cependant, des études complémentaires doivent être réalisées, notamment, sur la durabilité.

Dans la troisième partie, l'étude des variations dimensionnelle des matériaux composites contenant du laitier et du sable a été effectuée. Les conclusions suivantes ont été retenues :

- Les variations dimensionnelles sont importantes, une partie de l'eau de gâchage est absorbée par les granulats de liège, et peut s'évaporer avec le temps si le composite est durci sous un environnement sec, provoquant ainsi un retrait. D'autre part, dans le cas d'un durcissement à l'eau, un gonflement est observé lorsque les particules de liège continuent absorber l'eau. De plus, le squelette granulaire du liège ne résiste pas aux forces de traction comme le font les agrégats naturels. Il à noter que les valeurs de retrait sont bien supérieures à celles d'expansion. Par exemple, la formulation C/L: 1/1 présente des valeurs de retrait 72% plus élevé que le gonflement.
- La plupart des retraits et des gonflements surviennent au cours des premiers âges d'exposition. Le gonflement et le retrait les plus élevés sont observés pour la formulation C/L: 1/3. Il faut toutefois noter que ces variations dimensionnelles augmentent avec l'augmentation de la teneur en liège.
- Une réduction significative du retrait est observée avec de l'ajout de laitier. Cela pourrait s'expliquer par une légère réduction de la taille des pores des échantillons en

présence de laitier et par conséquent une diminution de l'absorption d'eau. Il semble que l'interface entre la matrice et les agrégats de liège sont de bonne qualité. Cependant, cette diminution reste faible sur le long terme. Le retrait le plus bas est observé pour le mélange à 50% de laitier avec une réduction de 18% à 90 jours d'âge. Cependant, le retrait est plus important avec l'ajout de sable. Une réduction de 27% à 90 jours lorsque 30% de sable de rivière est ajouté. En plus, la méthode de cure pendant 14 jours en milieu humide et suivie de cure à l'air de laboratoire peut avoir un effet positif sur les variations dimensionnelles.

Dans la quatrième partie, la variation des performances thermiques avec la teneur en liège et l'environnement de durcissement est présentée et des conclusions suivantes ont été tirées :

- La conductivité thermique du composite de ciment a été améliorée avec la teneur en des déchets de liège. Par contre, on remarque une diminution des propriétés mécaniques. Cependant, l'environnement de cure à l'air de laboratoire joue un rôle fondamental pour la réduction de la conductivité thermique ;
- La conductivité thermique est affectée par la densité apparente du matériau ciment-matrice. Les composites contenant du sable de dune est légèrement inférieure à celle du composite contenant du sable de rivière. Par conséquent, la diminution de diamètres des sables améliore la conductivité thermique du matériau composite du fait que les granulats fins sont distribués proportionnellement dans la matrice ;
- La substitution du ciment par le laitier de haut fourneau diminue le coefficient de la conductivité thermique. En effet, la conductivité thermique la plus faible est celle du composite contenant 50% de laitier, avec un coefficient de conductivité thermique de $0,10 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Par conséquent, la conductivité thermique est en fonction de la qualité du ciment employé. On peut conclure que la conductivité thermique a été considérablement influencée par le mode de cure, le pourcentage de liège et le type de ciment ;
- La tendance de la variation de chaleur spécifique est opposée à celle de conductivité thermique. L'augmentation du volume de liège et la conservation dans l'air du laboratoire réduit la valeur des chaleurs.
- Les résultats de diffusion thermique obtenus nous permettent de voir que le coefficient de diffusion thermique est plus élevé avec les composites contenant une teneur plus élevée en liège. La conservation dans le laboratoire de l'air augmente le coefficient de

diffusion thermique. Une forte augmentation de celle-ci est observée avec l'ajout du sable. Quant à la taille des sables, les matériaux composites élaborés avec du sable de la rivière donne une augmentation de la diffusion de la chaleur par rapport au sable fin..

- On peut noter que le mode de cure a une influence directe sur la résistance thermique, la chaleur spécifique et la diffusion de la chaleur. Par conséquent, la cure est un facteur déterminant dans le comportement des matériaux composites. En toute rigueur, l'effet de cure, défini précédemment, doit être pris en compte dans ce genre de matériau composite.

Recommandations et perspectives

Les matériaux composites à base des déchets de liège expansé semblent pouvoir assumer pleinement la fonction d'isolation et se distinguent des autres isolants par leur légèreté. Ces composites présentent un avantage, de qualité non négligeable, à savoir son coût de fabrication puisque ces constituants sont disponibles localement. Cependant, cette recherche peut être complétée par d'autres investigations. A cet effet nous recommandons pour de futurs travaux ce qui suit :

- Améliorer les performances mécaniques et de durabilité par l'utilisation d'un ciment de classe supérieure et par un traitement préalable des granulats de liège.
- Prévoir de protéger ces composites par un enduit pour diminuer leur perméabilité.
- Étudier l'effet d'autres ajouts (pouzzolane naturelle, cendres volantes) sur les propriétés des composites à base de liège.
- Faire des observations au MEB afin d'observer, d'analyser, d'expertiser les matériaux composites à base de liège.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] El Hassar S.M.K., Amirat M. (2004). Economie d'énergie dans l'habitat ancien en Algérie, *Physique du bâtiment et environnement du bâtiment- Annales du bâtiment et des travaux publics*, pp. 16-22.
- [2] Da Gloria M.Y.R., Toledo Filho R.D. (2021). Innovative sandwich panels made of wood bio-concrete and sisal fiber reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121923>.
- [3] Gama N., Ferreira A., Barros-Timmons A. (2019). 3D printed cork/polyurethane composite foams. *Materials & Design*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107905>.
- [4] Gomes M.G., Flores-Colen I., Melo H., Soares A. (2019). Physical performance of industrial and EPS and cork experimental thermal insulation renders. *Construction and Building Materials*, vol. 198, pp. 786–795.
- [5] Tedjditi A.K., Ghomari F., Taleb O., Belarbi R., Bouhraoua R.T. (2020). Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120734>.
- [6] Novais R.M., Carvalheiras J., Senff L., Lacasta A.M., Cantalapiedra, I.R. Giro- Paloma J., Seabra M.P., Labrincha J.A. (2020). Multifunctional cork – alkali-activated fly ash composites: A sustainable material to enhance buildings' energy and acoustic performance. *Energy and Buildings*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109739>.
- [7] Fan Wu., Qingliang Yu., Changwu Liu. (2020). Durability of thermal insulating bio-based lightweight concrete: Understanding of heat treatment on bio-aggregates. *Construction and Building Materials*, doi : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121800>.
- [8] Wu F., Liu C., Zhang L., Lu Y., Ma Y. (2018). Comparative study of carbonized peach shell and carbonized apricot shell to improve the performance of lightweight *Construction and Building Materials*. vol. 188, pp 758–771.
- [9] Chaohua J., Chen J., Yizhi W., Sheng Y., Da C. (2018). Effect of heat curing treatment on the drying shrinkage behavior and microstructure characteristics of mortar incorporating different content ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, vol 186, pp. 379-387.
- [10] Cherki A., Abdelhamid K., Benjamin R., Dominique B. (2013). Granular cork content dependence of thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity of the composite material /granular cork bound with plaster, *Energy. Procedia*, vol. 42, pp. 83–92.
- [11] Cherki A., Remy B., Khabbazi A., Jannot Y., Baillis D. (2014). Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite. *Construction and Building Materials*, vol. 54, pp 202–209.
- [12] Touati R., Santos S.A.O., Rocha S.M., Belhamel K. (2015). The potential of cork *Quercus suber L.* grown in Algeria as a source of bioactive lipophilic and phenolic compounds, *Industrial. Crops. Products*, vol. 76, pp. 936–945.

- [13] Astrand L., Bessadi E., Johansson S., Laid H., Teggour H., Toumi N. (1994). Thermal insulating materials-foam concrete and wooden wool panels (in French), national center Centre of studies and research on buildings (CNERIB) (Algeria) & Lund center for habitat studies (Sweden), Edition Lund ofset AB.
- [14] AL-Mohamadawi A.A.H. (2016). Contribution à l'étude de l'impact de l'environnement vis à vis d'éco-matériaux lignocellulosiques. Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, France.
- [15] Damien A. (2006). Guide du traitement des déchets, Réglementation et choix des procédés. 4^{ème} Edition, Paris, Dunod, pp. 3-4.
- [16] Gérard M. (1999). Recyclage et valorisation des déchets ménagers, Paris, pp. 86-99.
- [17] Do Thi Vi Vi. (2011). Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France.
- [18] Ramanaiah K., Ratna Prasad A.V. Hema Chandra Reddy K. (2012). Thermo physical properties of elephant grass fiber-reinforced polyester composites. *Materials Letters*, vol. 89, pp. 156-158.
- [19] Reddy, V.R and Behera B. (2006). Impact of water pollution on rural communities: an economic analysis. *Ecological Economics*, vol. 58, No.3, pp. 520-537.
- [20] Kuik, O.J., Helming, J.F.M., Dorland, C., Spaninks, F. (2000). The economic benefits to agriculture of low-level ozone pollution in The Netherlands. *European Review of Agricultural Economics*, vol. 27, No. 1, pp. 75-90.
- [21] Shankar, B and Neeliah H. (2005). Tropospheric ozone and winter wheat production in England and wales: a Note. *Journal of Agricultural Economics*, vol. 56, No. 1, pp. 145-151.
- [22] Ning, X., Qi, J., Wu, C., & Wang, W. (2019). Reducing noise pollution by planning construction site layout via a multi-objective optimization model. *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, pp. 218-230.
- [23] Cai, Y., Sam, C. Y., Chang, T. (2018). Nexus between clean energy consumption, economic growth and CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, vol. 182, pp. 1001-1011.
- [24] Kaish A.B.M.A. Odimegwu T.C., Zakaria I., Abood M.M. (2021). Effects of different industrial waste materials as partial replacement of fine aggregate on strength and microstructure properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102092>.
- [25] Ma C. (2010). Who bears the environmental burden in China an analysis of the distribution of industrial pollution sources?. *Ecological Economics*, vol. 69, No.9, pp. 1869-1876.
- [26] Xiaowei S. (2012). Analysis on causes of environmental pollution and its treatment of path chosen in rural industrialization. *Research of Agricultural Modernization*, vol. 33, No. 2, pp. 225-229.

- [27] Shi X., Yang K. (2018). Analysis on industrial factors of rural land pollution. *Industrial Safety and Environmental Protection* vol. 44, No. 8, pp.103-106.
- [28] Patel D., Shrivastava R., Tiwari RP., Yadav R.K. (2020). Properties of cement mortar in substitution with waste fine glass powder and environmental impact study, *Journal of Building Engineering*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100940>.
- [29] Navdeep Singh, Mithulraj M.,Shubham Arya. (2018). Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review. *Resources Conservation and Recycling*, vol. 138, pp. 257-271.
- [30] Kumar P and Singh N. (2020). Influence of recycled concrete aggregates and Coal Bottom Ash on various properties of high volume fly ash-self compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101491>.
- [31] Journal officiel de la république Algérienne et populaire. Loi du 15 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, No. 77, Algérie.
- [32] Gustavsson J., Cederberg C., Sonesson U., van Otterdijk R., Meybeck A. (2011). *Global Food Losses and Food Waste*. Swedish Institute for Food Biotechnology, Gothenburg, Sweden.
- [33] Cicatiello C. (2018). Measuring household food waste at national level: a systematic review on methods and results. *CAB Reviews*, vol. 13, No 056, pp. 1-8.
- [34] Abeliotis K., Lasaridi K., Chroni C. (2014). Attitudes and behaviour of Greek households regarding food waste prevention. *Waste Management Research*, vol. 32, No. 3, pp. 237-240.
- [35] Jean Bernard L. (1997). *Les déchets et leur traitement-les déchets solides industriels et ménagers*, 3 édition, pp. 6-7, Paris.
- [36] Claude F., Christaine F., Paul M., Jean D., Jean L.H. (2003). *Ecologie 'approche scientifique et pratique*, 5 Edition, TEC et DOC, 349 p.
- [37] Bigum M., Damgaard A., Scheutz C., Christensen T.H. (2017). Environmental impacts and resource losses of incinerating misplaced household special wastes (WEEE, batteries, ink cartridges and cables). *Resources, Conservation and Recycling*, vol.122, pp. 251-260.
- [38] Astrup T., Riber C., Pedersen A.J. (2011). Incinerator performance: effects of changes in waste input and furnace operation on air emissions and residues. *Waste Manag. Res.*, vol. 29, pp. 57-68.
- [39] Chauhan A., Jakhar S.K., Chauhan C. (2021). The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal, *Journal of Cleaner Production*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123854>.
- [40] Ivanov D. (2020). Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: a simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/ SARS-CoV-2) case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101922>.

- [41] Shen L.Y., Tam V.W., Tam C.M., Drew D. (2004). Mapping approach for examining waste management on construction sites. *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 130, No. 4, pp. 472-481.
- [42] Environment Agency. (2009). Environmental permitting regulations: inert waste guidance, standards and measures for the deposit of inert waste on land, 46 p.
- [43] Hendriks C.F and Pietersen H.S. (2000). Sustainable raw materials: construction and demolition waste-state-of-the-Art report of Rilem technical committee. Rilem publications, vol. 22, p165.
- [44] Kartam N., Al-Mutairi N., Al-Ghusain I., Al-Humoud J. (2004). Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Manag*, vol. 24, No. 10, pp.1049-1059.
- [45] Karak T., Bhagat R.M., Bhattacharyya P. (2012). Municipal solid waste generation, composition, and management: the world scenario. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 42, No. 15, pp. 1509-1630.
- [46] Sandler K., Swingle P. (2006). OSWER innovations pilot: building deconstruction and Reuse. Available from: <http://www.epa.gov/oswer/>.
- [47] Li Y., Zhou H., Su L., Hou H., Dang L. (2017). Investigation into the application of construction and demolition waste in urban roads. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 3, pp. 1-12.
- [48] Bossink B.A.G., Brouwers H.J.H. (1996). Construction waste: quantification and source evaluation. *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 122, No.1, pp. 55-60.
- [49] Sharma V., Giri A., Thakur S., Pant D. (2020). Chapter 13 - Resource recovery from inert municipal waste, *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, In book: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, doi: 10.1016/B978-0-444-64321-6.00013-6.
- [50] Jepsen M.T., Mathiesen D., Petersen C.M., Bager D. (2001). Durability of resource saving Green type concrete, *Proceeding of FIB-symposium on concrete and environment*, Berlin, Allemagne.
- [51] Senthamarai P., Devadas M., Gobinath D. (2011). Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties, *Construction and Building Materials*, *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2413-2419.
- [52] Louai N. (2009). Evaluation Energétique des déchets solides en Algérie, une solution climatique et un nouveau vecteur énergétique, Mémoire magister, Département de physique, Université Hadj Lakhder, Batna, Algérie.
- [53] Neville A.M.(2000). Propriétés des bétons, Edition Eyrolles, Paris.
- [54] Burteaux M. (1995). Laitier de haut fourneau, technique d'ingénieur, vol. 19, pp. 2-10.

- [55] Laitier de haut fourneau Cristallisé Bulletin du Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) (1998).
- [56] Scherif T.S., Sollards C.J. (1987). Montgomery D.M, and Perry R., Modified clays for organic waste disposal, Environmental technology letters, vol. 8, pp. 501-514.
- [57] Dahli M., Slimani A. (2014). Elaboration d'un matériau isolant thermique à base de déchets de liège et de papier, Université M. Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie. <https://docplayer.fr> > 69518518.
- [58] Frigione G. (1986). Manufacture and characteristics of Portland blast-furnace slag cements. Blended Cements, vol. 897, pp. 15-28.
- [59] ACI 226.1R-87. (1994). Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Material and general Properties of concrete, 16 pp.
- [60] Nigri G., Nemamcha A.R., et Guenfoud M. (2005). Etude de l'influence du laitier sur les propriétés du ciment. Séminaire national sur la rhéologie, Université de Béjaïa, Algérie.
- [61] Hadj sadok A. (2010). Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'Elhadjar dans les milieux agressifs, Thèse de Doctorat en génie civil, Université de Blida, Algérie.
- [62] Dubovoy V.S., Gebler S.H., Klieger P., Whiting DA. (1986). Effects of ground granulated blast-furnace slags on some properties of pastes, mortars, and concretes, Blended Cements, Ed. G. Frohnsdorff, ASTM Sp, Tech. Publ. N° 897, pp. 29-48.
- [63] ACI 318-95. (1992). Building code requirements for structural concrete. ACI Manual of concrete Practice, Part 3: Use of Concrete in Building-Design, Specifications and Related Topics, 345pp.
- [64] Sivasundaram V., Malhotra V.M. (1992). Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag, ACI Materials Journal, vol. 89, No. 6, pp. 544-63.
- [65] Bakker R.F.M. (1985). Diffusion within and into concrete. 13th Annual Convention of the institute of concrete Technology, University of Technology, Loughborough, Angleterre, 21pp.
- [66] Daube J., Bakker R. (1986). Portland blast-furnace slag cement: a review, in Blended Cement, Ed. G. Frohnsdorff, ASTM SP.Tech, Publ. N°. 897, pp. 5-14.
- [67] P-C. Aïtcin. (1983). Condensed Silica Fume. Faculté de Sciences Appliquée, Université de Sherbrooke, Canada, 52 pp.
- [68] Bentz D.P., Stutzaman P.E., Garboczi E.J. (1992). Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete. Cement and Concrete Research, vol. 22, N°. 5, pp. 891-902.

- [69] Cohen M.D., Goldman A., Chen W.F. (1992). The role of the silica gel in mortar Otransition zone versus bulk paste modification. *Cement and Concrete Research*, vol. 24, N°. 1, pp. 95-8.
- [70] Sandvik M., Gjvorv O.E. (1992). Prediction of strength development for silica fume concrete. *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*. Fourth International Conference, Vol.2, Ed.V.M Malhotra, ACI SP-132, pp. 987-96.
- [71] Cur report. (1991). Fly ask as addition to concrete. Centre for civil Engineering Research and Codes, Report 144, 99 pp.
- [72] Ledhem A., Dheilily R.M, Benmalek M.L., Queneudec M. (2000). Properties of wood based composites formulated with aggregate industry waste. *Construction and Building Materials*, vol. 14, pp. 341-350.
- [73] Al rim K., Ledhem A., Douzane O., Dheilily R.M., Queneudec M. (1999). Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *Cement and Concrete Composites*, vol. 21, pp. 269-275.
- [74] Shafigh P., Johnson Alengaram U., Mahmud H.B., Jumaat M.Z. (2013). Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash, *Materials & Design* , vol. 49, pp. 613-621.
- [75] Olanipekun E.A., Olusola K.O., Ata O. (2006). A comparative study of concrete properties using coconut shell and palm kernel shell as coarse aggregates, *Building and Environment*, vol. 41, No. 3, pp. 297-301.
- [76] Ghavami K. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements, *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, No. 6, pp. 637–649.
- [77] Khedari J., Charoenvai S., Hirunlabh J. (2002). New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. *Building and environment*, vol. 38, pp. 435-441.
- [78] Wu F., Liu C., Sun W., Zhang L., Ma Y. (2019). Mechanical and creep properties of concrete containing Apricot shell lightweight aggregate. *Journal of Civil Engineering*, vol. 23, No. 7, pp. 2948-2957.
- [79] Steduto P., Theodore C H., Fereres R., Raes D. (2012). *FAO Drainage Paper 66: Crop yield Response to Water*, 500 pp.
- [80] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT online data base, (2017).
- [81] Wennberg A., (2014). Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Encycl Toxicol*. Third Edition, pp. 628-630.
- [82] Fan Wu., Qingliang Yu., Changwu Liu. (2021). Durability of thermal insulating bio-based lightweight concrete:Understanding of heat treatment on bio-aggregates. *Construction and Building Materials*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121800>.
- [83] Orecchinia F., Boccib E. (2007). Biomass to hydrogen for the realization of closed cycles of energy resources. *Energy*, vol. 32, pp. 1006-1011.

- [84] Tawfik M. (2005). Etude de matériaux renforcés par des fibres organiques en vue de renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France.
- [85] Mbagou J.B. (2017). Variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques et chimiques du *Tessmania Africana* en provenance du Gabon., Thèse de Doctorat , Université de Laval.
- [86] Chaouch M. (2011). Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du bois traité thermiquement : développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes. Thèse de doctorat, Nancy-Université.
- [87] Henrique P., Pereira F., Rosa M.D.F., Odila M., Cioffi H., Cristina K. (2015). Vegetal fibers in polymeric composites : A review, *Polimeros*, vol. 25, pp. 9-22.
- [88] Woodcock, D.W., Santos G., Reynel C. (2000). Wood characteristics of Amazon forest types. *Iawa Journal*, vol.21, No. 3, pp. 277-292.
- [89] Zobel B.J., Jett J.B. (1995). Genetics of wood production. Springer-Verlag, New York, USA.
- [90] Khazma M, Goullieux A, Dheilily RM, Quéneudec M. (2012). Coating of a lignocellulosic aggregate with pectin/polyethylenimin mixtures: Effects on flax shive and cement-shive composite properties. *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, pp. 223-230.
- [91] Ledhem A, Dheilily RM, Queneudec M. (2000). Reuse of waste oils in the treatment of wood aggregates. *Waste Management*, vol. 20, pp.321-326.
- [92] Nozahic V. (2012). Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal – Cermont II.
- [93] Normand L. (2016). Caractérisation multicritères des pailles de lin. Amiens : Rapport de Stage, Laboratoire EPROAD.
- [94] Tedjditi A.K., Ghomari F., Taleb O., Belarbi R., Bouhraoua R.T. (2020). Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete?. *Construction and Building Materials*, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120734>.
- [95] Menor M.C.P., Ros P.S., García A., Caballero M.J.A. (2019). Granulated cork with bark characterized as environment-friendly lightweight aggregate for cement based materials, *Journal of Cleaner Production*, vol. 229, pp. 358-373.
- [96] Kollmann F., Schneider A. (1963). On the sorption behaviour of heat stabilized wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 21, No. 3, pp. 77-85.
- [97] Nikolov S., Enceev E. (1967). Effect of heat treatment on the sorption dynamics of Beech wood. *Nauc. Trud. Lesoteh. Inst., Sofija (Ser. meh. Tehn. Darv.)*, vol. 14, No. 3, pp. 71-77.
- [98] Coatanlem PA, Jauberthie RB, Rendell F. (2006). Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, vol. 20, No.9, pp.776-781.

- [99] Jonathan P. (2017). Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée, Thèse de Doctorat, université de Normandie, France.
- [100] Agopyan V., Savastano Jr.H., John VM., Cincotto M.A. (2005). Developments of vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brésil: an overview, *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, pp. 527–536.
- [101] Paul R., Blankenhorn, M.R., Silsbee B.D., Blankenhorn, M.D., Kevin K. (1999). Temperature and moisture effects on deleted properties of wood fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 737-741.
- [102] Tsoumis G. (1991). Science and technology of wood: structure, properties, utilizations. Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- [103] Jodin, P. (1994). Le bois matériau d'ingénierie. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine. École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Nancy, France.
- [104] Burmester A. (1973) . Investigation on the dimensional stabilization of wood, Bundesanstalt für Materialprüfung. Berlin-Dahlem, pp. 50-56.
- [105] Giebeler E. (1983). Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung. *Holz als Roh und Werkstoff*, vol. 41, pp. 87-94.
- [106] Dirol D and Guyonnet R. (1993). The Improvement of Wood Durability by Retification Process. Document No. IRG/WP 98–40015. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- [107] Tjeerdsma B.F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H. (1998). Characterisation of the thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz Roh-Werkstoff*, vol. 56, pp. 149-153.
- [108] Monreal P. (2007). Etude de faisabilité de bétons lignocellulosiques à base de pulpe de betterave, traitements physico-chimique des granulats et évaluation de l'influence sur les performances mécaniques, hydriques et thermiques. Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne.
- [109] Khazma M, Goullieux A, Dheilily RM, Rougier A, Quéneudec M. (2014). Optimization of flax shive-cementitious composites: Impact of different aggregate treatments using linseed oil. *Industrial Crops and Products*, vol. 61, pp. 442-452.
- [110] Boustinguorry P. (2002) .Etude d'un matériau composite à matrice gypse et renfort de bois fragmenté, Thèse SPIN, Saint-Etienne : Ecole Nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne, 186 p. France.
- [111] Brahimi S. (2001). Situation des énergies renouvelables en Algérie, Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marché, Algérie.
- [112] Bouregbi I. (2014). Causes et conséquences des feux de forêts sur la production du liège dans les subéraies du Nord -Essai de valorisation et réhabilitation, Mémoire de Magister, Université de Constantine « 1 »,.

- [113] Arnaudies J. (2016). Guide de sylviculture du chêne liège dans les Pyrénées- Orientales. Institut méditerranéen du Liège, Institut Méditerranéen du Liège (IML), Vives, France, 68pp.
- [114] Lequin S. (2010). Etude de l'adsorption et de la diffusion, en phase gazeuse, de petites molécules actives du vin dans le liège, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Ecole Doctorale Environnements, Santé, STIC, Dijon, France.
- [115] Silva S.P., Sabino M.A., Fernandes E.M., Correlo V.M., Boesel L.F., Reis R.L. (2005). Cork: properties, capabilities and application. International Materials Reviews, vol. 50, pp. 345-365.
- [116] Pereira H. Rosa ME, Fortes MA.(1987). The cellular structure of cork from *Quercus suber* L. Iawa Journal, vol. 8, pp.213-217.
- [117] Groh B and Hubner C. (2002). Lenzian KJ. Water and oxygen permeance of phellem isolated from trees: the role of waxes and lenticels. Planta, vol.215, No.5, pp. 794-801.
- [118] Fernandes E.M., Pires R.A., Reis R.L. (2017). Cork biomass biocomposites: Lightweight and sustainable Materials., Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials. Processing, Properties and Applications, Chapter 17, pp. 365-385.
- [119] Anjos O., Pereira H., Rosa M.E. (2008). Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork, European Journal of Wood and Wood Products, vol. 66, pp. 295-301.
- [120] Pereira H. (1988). Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. Wood Sci Technol, vol.22, pp. 211-8.
- [121] Caritat A., Gutiérrez E., Molinas M. (2000). Influence of weather on cork-ring width. Tree Physiol, vol. 20, pp. 893-900.
- [122] Gibson L.J., Easterling K.E., Ashby M.F. (1981). The structure and mechanics of cork. Proceeding of the Royal Society of London A, vol. 377, pp. 99-117.
- [123] Rosa M., Fortes M. (1989). Effects of water vapour heating on structure and properties of cork. Wood Science and Technology, vol. 23, pp. 27-34.
- [124] Karbowski T., Gougeon RD, Alinc JB., Brachais L., Debeaufort F., Voilley A., Chassagne D. (2010). Wine oxidation and the role of cork. Critical Reviews Food Science Nutrition, vol. 50, No.1, pp. 2.-52.
- [125] Costa A, Oliveira AC. Variation in cork production of the cork oak between two consecutive cork harvests. Forestry 2001;74:337-46.
- [126] Fernandes EM., Correlo VM., Chagas JAM., Mano JF., Reis RL. (2010). Cork based composites using polyolefin's as matrix: morphology and mechanical performance. Composites Science and Technology, vol. 70, No.16, pp. 2310-2318.
- [127] Journal officiel de la république Algérienne et populaire. (1983). Loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement, No.6, Algérie.

- [128] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. (2003). La loi relative à la protection dans le cadre du développement durable, Alger, Algérie.
- [129] Journal officiel de la république Algérienne et populaire. (2000). Décret exécutif portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs, Alger, Algérie
- [130] Journal officiel de la république Algérienne et populaire. (2004). Loi n°04-20 relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, Alger, Algérie.
- [131] Journal officielle de la république Algérienne. (1999). Loi n° 99-09 relative à la maîtrise de l'énergie, n°51, Alger, Algérie.
- [132] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. (2003). Projet de loi relative à la protection dans le cadre du développement durable, Alger, Algérie.
- [133] Ministère de l'habitat et de l'urbanisme. (1997). Commission Technique Permanente Réglementation thermique des bâtiments d'habitation et Règles de calcul des pertitions calorifiques- Document Technique Réglementaire, CNERIB, Alger, Algérie,
- [134] Ministère de l'habitat et de l'urbanisme. (1998). Commission Technique Permanente Règles de calcul des apports calorifiques-Documents Technique Réglementaire, CNERIB, Alger, Algérie.
- [135] Chen Y., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. (2017) Acoustic performance and microstructural analysis of bio-based lightweight concrete containing miscanthus. *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 839-851.
- [136] F Wu., Liu C., Sun W., Ma Y., Zhang L. (2020). Effect of peach shell as lightweight aggregate on mechanics and creep properties of concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 24, No. 14, pp. 2534–2552.
- [137] Dupré B.(2005). Contribution à la valorisation des coproduits du lin : étude de l'impact du vécu et de la variabilité génétique sur les propriétés des composites élaborés. Thèse de Doctorat, Université de Picardie Jules Verne, France.
- [138] Negro C., Sanchez L.M., Fuente H, Blanco A. (2005). Effects of flocculants and sizing agents on bending strength of fiber cement composites. *Cement and Concrete Research*, vol.35, pp. 2104-2109.
- [139] Uysal T., Duman D., Onal Y., Yasa I., Yanik J. (2014). Production of activated carbon and fungicidal oil from peach stone by two-stage process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. vol 108, pp. 47-55.
- [140] Arvelakis S., Gehrman H.J., Beckmann M., Koukios E.(2005). Preliminary results on the ash behavior of peach stones during fluidized bed gasification: evaluation of fractionation and leaching as pre-treatments. *Biomass Bioenergy*, vol. 28, No. 3, pp. 331-338.
- [141] Appa Rao G and Raghu Prasad BK. (2002). Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength. *Cement and Concrete Research*, vol, 32, pp. 253-257.

- [142] Sukhdeo R., Irle M., Maher K. (2006). Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. *Holz als Roh und Werkstoff*, vol. 64, pp. 281–286.
- [143] Popovics S. (1987). Attempts to improve the bond between cement paste and aggregate. *Materials and Structures*, vol.20, pp. 32-38.
- [144] Hachmi M and Campbell A. (1988). Wood cement cement chemical relationships. *Proceedings of the International Conference on Filter and particle boards bonded with inorganic binders*. University of Idaho, pp. 24-26.
- [145] Hachmi M and Moslemi AA. (1989). Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest Products Journal*, vol. 39, No. 6, pp. 55-58.
- [146] Pimienta P., Chandellier J., Rubaud M., Dutruel F., Nicole H. (1994). Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. *cahiers du CSTB (2703)*.
- [147] Kochova K., Schollbach K., Gauvin F., Brouwers H.J.H. (2017). Effect of saccharides on the hydration of ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 268-275.
- [148] Gori M., Bergfeldt B., Pfrang-Stotz G., Reichelt J., Sirini P. (2011). Effect of short-term natural weathering on MSWI and wood waste bottom ash leaching behaviour. *Journal of Hazard Materials*, vol. 189, pp. 435-443.
- [149] Blankenhorn P. R., Silsbee M. R., Blankenhorn B. D. and Dicola M. (1999). Temperature and moisture effects on deleted properties of wood fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 737-741.
- [150] Moslemi A.A., Zhengtian L. (1985). Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement-water Mixtures. *Forest Products Journal*, vol. 35, No.7, pp. 37-43.
- [151] Kupaei R.H., Alengaram U.J., Jumaat M.Z. (2014). The effect of different parameters on the development of compressive strength of oil palm shell geopolymer concrete. *The Scientific World Journal* vol. 2014, pp. 1-16.
- [152] Jerlin Regin J., Vincent P., Ganapathy C. (2017). Effect of mineral admixtures on mechanical properties and chemical resistance of lightweight coconut shell concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, No. 3, pp. 957-971.
- [153] Bederina M., Marmoret L., Mezreb K., Khenfer M.M., Bali A., Queneudec M. (2007). Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp 662-668,
- [154] Polat R., Demirbog R., Karakoç M.B., Türkmen I. (2010) The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 60, No. 1, pp. 51-56.
- [155] Barnat-Hunek D., Siddique R., Lagod G. (2017). Properties of hydrophobised lightweight mortars with expanded cork. *Construction and Building Materials*, vol 155, pp. 15-25.

- [156] Wu F., Yu Q., Liu C., Brouwers, H.J.H. Wang L. (2019). Effect of surface treatment of apricot shell on the performance of lightweight bio-concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116859>.
- [157] Yew M.K., Mahmud H.B., Ang B.C., Yew M.C. (2014). Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete. *Materials & Design* (1980-2015), vol. 54, pp. 702-707.
- [158] Bekhta P., Niemz P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, vol.57, No. 5, pp. 539-546.
- [159] Gupta S., Kua H.W., Low C.Y. (2018). Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, vol. 87, pp. 110-129.
- [160] Gupta S and Kua H.W. (2018). Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar. *Construction and Building Materials*, vol. 159, pp. 107-125.
- [161] Yuan J., Y Liu., Li X. (2009). Effect of high temperature heat treatment on XRD properties of Chinese fir wood, *For. Mach. Woodwork. Equip.* 12.
- [162] Han L., Ro K.S., Wang Y.u., Sun K.e., Sun H., Libra J.A., Xing B. (2018). Oxidation resistance of biochars as a function of feedstock and pyrolysis condition. *Science of the Total Environment*, vol. 616-617, pp. 335–344.
- [163] E. Mancinelli E., Baltre' naite., P. Baltre' nas, Grubliauskas R., Marciulaitiene E., Passerini G., Pranskevicius M. (2018). Influence of biochar from slow pyrolysis on dissolved organic carbon and total dissolved nitrogen levels of urban storm water runoff, *Water Air and Soil Pollution*, vol.64, pp. 229-245.
- [164] Lian F and Xing B. (2017). Black carbon (Biochar) in water/soil environments: Molecular structure, sorption, stability, and potential risk. *Environmental Science & Technology*, vol.51, No.23, pp. 13517–13532.
- [165] Nakanishi E.Y., Dos Santos V., Cabral M.R., Santos S.F., Rodrigues M.S., Frías M., Savastano Junior H. (2018). Hot water treatment effect in the elephant grass ashes calcinated at different temperatures. *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 23, No.3.
- [166] Luo Y., Zhao L., Meng H., Xiang X., Zhao X., Li G., Lin Q. (2013). Physio-chemical characterization of biochars pyrolyzed from miscanthus under two different temperatures. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 29, pp 208-217.
- [167] Assis M.R., Brancheriau L., Napoli A., Trugilho P.F. (2016). Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. *Wood Science and Technology*, vol. 50, No. 3, pp. 519-536.
- [168] Fu J.Q., Huang X.F., Pan X.J., Ma L.P., Liu H.P., Ding X.Y. (2013). Research progress on preparation of ceramisite from sediment, *Bulletin of the Chinese Ceramiste. Soc.* 32.
- [169] Benavente V., Calabuig E., Fullana A.(2015). Upgrading of moist agro-industrial wastes by hydrothermal carbonization, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 113, pp. 89-98.

- [170] Benchikou M. (2000). Elaboration et étude de matériau composite à base des fibres cellulosiques- application à l'isolation thermique, Thèse de Magister, université de Médéa, Algérie,
- [171] Khedari J., Suttisonk B., Naris P., Hirunlabh J. (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, pp. 65-70.
- [172] Khedari J., Watsanasathaporn P., Hirunlabh J. (2005). Development of fibre-based soil-cement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 1-12.
- [173] Comité Français de l'Isolation (CFI). (1977). Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments, Commission technique du COMAPI. Edition Eyrolles, Paris.
- [174] Moslemi A.A and Lim Y.T. (1985). Compatibility of southern hardwoods with Portland cement [Particleboards, hydration]. *Forest Products Journals*, vol. 34, pp.22-26.
- [175] Benmalek M.L., Houari H., Bali A., Queneudec M. (2000). Queneudec M., Comportement d'un composite fine minérale-ciment-bois élaboré à l'aide de déchets industriels solides, *Sciences & Technologie*, n°13, pp. 65-72.
- [176] RILEM. (1970). Commission des bétons légers. Terminologie et définitions. *Matériaux de Construction*. vol. 3, pp. 60-9.
- [177] Bouguerra A., Ledhem A., De Barquin F., Dheilily R.M., Queneudec M. (1998). Effet of the microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement and wood aggregates, *Cement and Concrete Research*, vol. 28, pp. 1179-1190.
- [178] Elbakkori A., Ezbakhe H., Ajzoul T., Elbouarbi A. (2005). Etude thermomécanique du béton allégé avec du liège et du allégé avec des grignons d'olive, 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tétouan, Maroc.
- [179] Borges A., Flores-Colen I., de Brito J. (2018). Physical and mechanical performance of cement-based renders with different contents of fly ash, expanded cork granules and expanded clay, *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 535-543.
- [180] Matos A.M., Nunes S., Sousa-Coutinho J.(2015). Cork waste in cement based materials. *Materials & Design*, vol. 85, pp.230-239.
- [181] Hernandez-Olivares F., Bollati M.R., del Rio M., Parga-Landa B. (1999). Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, vol. 13, No.4, pp 179-186.
- [182] RILEM Committee. (1978). Functional Classification of Lightweight Concrete. Recommendation LC 2 11. pp. 281-283.
- [183] Cerezo V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France.

- [184] Fan M.Z., Bonfield P.W., Dinwoodie J.M., Boxall J., Breese M.C. (2004). Dimensional instability of cement-bonded particleboard: The effect of surface coating, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, No. 7, pp .1189-1197.
- [185] Collet F., Chamoin J., Pretot S., Lanos C. (2003). Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes, *Energy and Buildings*, vol, 62, pp. 294-303.
- [186] Rahim M., Douzane O., Tran Le AD., Promis G., Laidoudi B., Crigny A., Dupre B., Langlet T. (2015). Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Buildings*, vol. 88, pp.91-99.
- [187] Umuragirwa BS., Maalouf C., Ali H., Ton Hoang M. (2014). Etude numérique et expérimentale du comportement hygrothermique d'un agro-composite à base de fibres de chanvre et d'amidon de blé. Conférence IBPSA France-Arras.
- [188] Vrána T. (2007) .Impact of moisture on long term performance of insulating products based on stone wool. KTH-The Royal Institute of Technology School of Architecture and the Built Environment Div. Of Building Technology, Licentiate Thesis, Stockholm.
- [189] Al-Mohamadawi A., Benhabib K., Dheilly R., Goullieux A. (2016). Influence of lignocellulosic aggregate coating with paraffin wax on flax shive and cement-shive composite properties. *Construction and Building Materials*, vol.102, pp.94-104.
- [190] Mboumba M.B. (2004). Analyse des facteurs de risques liés à l'incorporation des pulpes de betterave dans des matrices cimentaires. Thèse de Doctorat, Université de Picardie Jules verne, Amiens, France.
- [191] Gouala M.S., de Barquinb F., Benmaleka M.L., Balic A., Queneudeca M. (2000). Estimation of the capillary transport coefficient of Clayey Aerated Concrete using a gravimetric technique. *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp.1559-1563.
- [192] Da Cunha N.B.J.A. (1992). Transport d'humidité en matériau poreux en présence d'un gradient de température: Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble I, France.
- [193] Bouguerra A. (1997). Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux: Comportement hygrothermique des matériaux élaborés. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France.
- [194] Kim K.H., Sang E., Kim J.K., Yang S. (2003). An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement Concrete Research*, vol. 33, pp. 363-371.
- [195] Mounir S., Abdelhamid K., Maaloufa Y. (2015). Thermal inertia for composite materials white cement-cork, cement mortar-cork, and plaster-cork. *Energy. Procedia*, vol 74, pp. 991-999.
- [196] Mafalda Matos A., Nunes S., Sousa-Coutinho J. (2015). Cork waste in cement based materials. *Materials & Design*, vol. 85, pp. 230-239.

- [197] Dias S., Tadeu A., António J., Almeida J., Pedro F., Martis S. , Serra C. (2018). Experimental study of expanded cork agglomerate blocks-Compressive creep behavior and dynamic performance. *Construction and Building Materials*, vol. 181, pp. 551-564.
- [198] Moreira A., António J., Tadeu A. (2014). Lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hydrothermal characterization. *Cement Concrete Composite*, vol. 49, pp. 1-8.
- [199] Panesar D.K., Shindman B. (2012). The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 982-992.
- [200] Castro I., Simoes N., Tadeu A., Branco F.G. (2011). Acoustic and thermal behavior of concrete building blocks with cork. In: 6th Dubrovnik conference on sustainable development of energy water and environment systems, Dubrovnik, Croatia.
- [201] Khabbazi A., Garoum A., Terahmina O. (2005). Experimental study of thermal and mechanical properties of new insulating material based on cork and cement mortar, *AMSE Journal Advanced of Modelling and Simulation*, vol. 74, No.7, pp. 73-74.
- [202] Tedjiti A.K., Ghomari F., Taleb O., Belarbi R., Bouhraoua R.T. (2020). Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete', *Construction and Building Materials*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120734>.
- [203] Bouchair A. (2008). Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation, *Building and Environment*, vol. 43, No.10, pp. 1603-1618.
- [204] Moghaddam, M.K., Safi, S., Hassanzadeh S., Mortazavi, S.M. (2015). Sound absorption characteristics of needle-punched sustainable Typha /polypropylene nonwoven. *The Journal of the Textile Institute*, vol. 107, No.7, pp. 1-19.
- [205] Bentz D.P., Snyder K.A. (1999). Protected paste volume in concrete; Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp.1863-1867.
- [206] Narayanan N., Ramamurthy K. (2000). Structure and properties of aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 22, pp. 321-329.
- [207] Dreux G and Festa J. (1998). *Le nouveau guide du béton et ses constituants*. 8 édition, pp. 332-343, Paris.
- [208] Gagne R. (2004). *Durabilité et réparation du béton*. Cours Maîtrise de Génie civile Sherbrooke, Université de Sherbrooke, Canada, 34 pp.
- [209] Shink M. (2003). *Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation de bétons de granulats légers*. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec.
- [210] Kazmierczak C.S. (2000). Permeability evaluation of lightweight concrete, proceeding of the International Conference held in João Pessoa. Brazil, pp. 552-558.

- [211] Ismail M. (2006). Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires). Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, France.
- [212] Swamy R.N and Lambert G.H. (1981). The microstructure of lytag aggregate. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol, 3, No. 4, pp. 273-282.
- [213] Zhang M.-H and Gjvorv O.E. (1990). Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete». *ACI Materials Journal*, vol. 88, pp.150-158.
- [214] Kunhanandan Nambiar E.K and Ramamurthy K. (2007). Sorption characteristics of foam concrete. *Cement And concrete Research*, vol. 17, pp. 1341-1347.
- [215] Zhang M.-H and Gjvorv O.E. (1990). Microstructure of interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste. *Cement and Concrete Research*, vol. 204, No. 4, pp. 610-618.
- [216] Bentur A., Igarashi S.-i, Kovler K. (2001). Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 1587-1591.
- [217] Kohno K., Okamoto T., Isikawa Y., Sibata T., Mori H. (1999). Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 611-614.
- [218] Chi J. M., Huang R., Yang CC., Chang JJ. (2003). Effect of shear properties on the strength and stiffness of lightweight concrete”. *Cement and Concrete composite*, vol. 25, pp. 197-205.
- [219] Mamillan M., Bouineau A. (1983). Recherche sur les matériaux isolés et porteurs pour maisons individuelles. Centre de Recherches et l’Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris.
- [220] Zhang M.H and Gjvorv O.E. (1991). Mechanical properties of high-strength lightweight Concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 88, pp. 150-158.
- [221] Müller-Rochholz. (1979). Determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement. *The International journal of lightweight concrete*, vol.1, pp. 87-90.
- [222] Wilson H.S and Malhotra V.M. (1988). Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 10, pp. 79-90.
- [223] Zhang M.-H and Gjvorv O.E. (1990). Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, vol. 20, pp. 884-890.
- [224] Rossignolo J., Agnesini M, Morais J. (2001). Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight concrete. *Cement and Concrete Composite*, vol.25, pp. 77-82.
- [225] Tamba S, Jauberthie R, Lanos C and Rendell F. (2001). Lightweight wood fibre concrete. *Concrete Science and Engineering*, vol 3, pp. 53-57.

- [226] Kayali O., Haque M.N., Zhu B. (2002). Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp. 207-213.
- [227] Wasserman R and Bentur A. (1996). Interfacial interactions in lightweight concrete for structural applications. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol.10, pp.79-90.
- [228] Zhang M.H and Gjvovr O.E. (1992). Penetration of cement paste into lightweight aggregate. *Cement and Concrete Research*, vol. 22, pp. 47-55.
- [229] Sugiyama T., Bremner T.W., Holm T.A. (1996). Effect of stress on gas permeability in concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 93, pp. 443-450.
- [230] Zhang M.-H and Gjvovr O.E. (1991). Permeability of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 88, No. 5, pp. 463-469.
- [231] Osborne G.J. (1985). The durability of lightweight concrete made with pelletized slag as aggregate. *Durability of Building Materials*, vol. 2, pp. 249-263.
- [232] Al-Khaiat H and Haque M. (1998). Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete. *Cement and concrete research*, vol. 28, No. 6, pp. 859-866.
- [233] Al-Jabri K.S., Hago A.W., Al-Nuaimi A.S., Al-Saidy A. (2005). Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, No. 8, pp. 1472-1479.
- [234] Uysal H., Demirboğa R., Sahin R., Gül R. (2004). The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, No.5, pp. 845-848.
- [235] Bilodeau A., Kodur V., Hoff G. (2004). Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, No. 2, pp. 163-174.
- [236] Hwang C.L., Hung M.F. (2005). Durability design and performance of selfconsolidating lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 19, No. 8, pp. 619-626.
- [237] Thanon D.E and Hamad A.J. (2013). High performance lightweight concrete reinforced with glass fibers. *AL-Mansour Journal*, vol.20, pp. 73-87.
- [238] Zeyad A.M., Khan A.H., Tayeh B.A. (2020). Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, No.1, pp.806-818.
- [239] Agwa I.S., Omar O.M., Tayeh B.A., Abdelsalam B.A. (2020). Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117541>.

- [240] Wang H.Y. (2009). Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt. *Construction and Building Materials*, vol. 23, No. 6, pp. 2332-2337.
- [241] Zarnaghi V.N., Fouroghi-Asl A., Nourani V., Ma H. (2018). On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume., *Construction and Building Materials*., vol 193, pp. 557-564.
- [242] NF P15-471. (1990). Méthode d'essai des ciments - Détermination des résistances mécaniques. AFNOR, Paris.
- [243] Karade SR. (2011). Developments in Cement-Bonded Composite Material Te. Proc. National Seminar on Modern Trends in Architectural and Civil Engineering. Practices, Roorkee, pp. 57-64.
- [244] NF B57-0.12. (1973). Liège-Granulés cru de liège-Détermination de la masse volumique. AFNOR, Paris.
- [245] NF B57- 014.Liège-Granulés cru de liège-Echantillonnage, AFNOR, Paris, 1973.
- [246] NF B 57-013. (1973). Liège-Granulés cru de liège-Détermination de l'humidité. AFNOR, Paris.
- [247] NF B 51-002. (1973). Bois-caractéristiques physiques et mécaniques des bois, AFNOR, Paris.
- [248] Tedjditi A.K., Ghomari F., Taleb O., Belarbi R., Bouhraoua R.T. (2020). Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120734>.
- [249] NF B57-011. (1973). Liège-Granulés cru de liège-Analyse granulométrique. AFNOR, Paris.
- [250] NF B 57-010. (1973). Liège-Granulés cru et poudre-Spécifications. AFNOR, Paris.
- [251] NF EN 1097-6. (2014). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. Afnor, Paris.
- [252] EN 933-1. (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. Afnor, Paris.
- [253] NF EN 933-8. (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable. AFNOR, Paris.
- [254] EN 480-5. (2006). Méthode des essai-- Partie 5 : Détermination de l'absorption capillaire. AFNOR, Paris.
- [255] EN 196-1. (1999). Détermination des résistances mécaniques. AFNOR, Paris.
- [256] NF P15-433. (1963). Technique des essais-Essai de retrait et de gonflement. AFNOR, Paris.

- [257] Brás A., Leal M., Faria P. (2013). Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 315-327.
- [258] Sedan D., Pagnoux C., Smith A., Chotard T. (2008). Mechanical properties of hemp fibres reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, n 28, pp. 183-192.
- [259] Simatupang, M. H., U. Schmitt, et A. Kasim. (1994). Wood extractives of rubberwood (*Hevea Brasiliensis*) and their influences on the setting of the inorganic binder in gypsum-bonded particleboards. *Journal of Tropical Forest Science*, vol 6, pp. 269-285.
- [260] Reading, T. J. (1985). Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces. *Concrete International* vol 7, pp. 57-62.
- [261] Karade, S.R., Calidiera, F., Irie, M., Maher, K. (2002). Cork granules as lightweight aggregate, *Proceedings of the int. conf. on sustainable concrete construction*, Scotland, Editors: Dhir, R., Dyer, J.D. and Holliday, J.E., Thomas Telford.
- [262] Aavik, J and Chandra, S. (1995). Influence of organic admixtures and testing method on freeze–thaw resistance of concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 92, pp.10-14.
- [263] Ioannou I., Hamilton A., Hall C. (2008). Capillary absorption of water and n-decane by autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp.766-771.
- [264] Nguyen, T.T (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, thèse de Doctorat, Université de Bretagne-sud, France.
- [265] Lukowski P. (2016). Polymer-cement composites containing waste perlite powder, *Materials*, vol. 9, No. 10, pp. 839.
- [266] Nael-Redolfi J. (2016). Absorption d'eau des granulats poreux : mesure et conséquences sur la formulation des mortiers et des bétons, thèse de Doctorat, Université Paris-Est, France.
- [267] Arnaud L and Gourlay E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 50-56.
- [268] Elfordy S., F Lucas., Tancret F., Scudeller Y., Goudet L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 2116-2123.
- [269] Ziregue A., Khenfer M.M., Quéneudec-T'Kint M., Montrelay N. (2016). Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 30, pp. 934-946.
- [270] Prusty J.K and Patro S.K. (2015). Properties of fresh and hardened concrete using agrowaste as partial replacement of coarse aggregate-A review. *Construction and Building Materials*, vol. 82, pp. 101-113.

- [271] Document Technique Unifié (D.T.U). (1987). Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction, Paris,
- [272] ACI 213R-87. (1994). Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete. Detroit, Michigan.
- [273] Jiang SP and Grandet J. (1989). Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland. *Cement and Concrete Research*, vol.19, pp. 487-495.
- [274] Bouikni A., Swamy R.N., Bali A. (2009). Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag. *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2836-2845.
- [275] Malami Ch and Kaloidas V. (1994). Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures. *Cement and Concrete Research*, vol. 24, pp. 1444-1454.
- [276] Choi J., Nguyễn H.H., Cha S.L., Li M., Lee B.Y. (2021). Composite properties of calcium-based alkali-activated slag composites reinforced by different types of polyethylene fibers and micromechanical analysis. *Construction and Building Materials*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121760>.
- [277] Lucien A. (1987). Matériaux de terre cuite, in, technique de l'ingénieur. C905, pp. 5-20.
- [278] Parameswaran N., Broker F.W., Simatupang M.H. (1977). Microtechnological studies on mineral-bonded wood composites, Interactions between binders and wood. *Holzforschung*, vol. 31, No. 6, pp. 173-178.
- [279] Aziz MA., Murphy C K., Ramaswamy S D. (1979). Lightweight concrete using cork granules. *The International Journal of Lightweight Concrete*, vol 1, No. 1, pp. 29-33.
- [280] Toledo Filho, R. D., Silva F. D.A., Fairbairn E.D.M.R., Filho J. D.A.M. (2009). Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials*, vol 23, pp. 2409-2420.
- [281] Pospisil F., Jambor J., Belko J. (1992). Unit weight reduction of fly ash aerated concrete. In: Wittmann FH, editor. *Advances in Autoclaved Aerated Concrete*. A.A. Balkema, pp. 43-52.
- [282] Schober G. (1992). Effect of size distribution of air pores in AAC on compressive strength. In: Whittmann, editor. *Proceedings Advances in Autoclaved Aerated Concrete*. A.A. Balkema, pp. 77-81.
- [283] Karade SR., Irle M., Maher K. (2006). Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol.64, pp.281-286.
- [284] Soroushian P and Marikunte S. (1992). Moisture effects on flexural performance of wood fiber-cement composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 4, No. 3, pp. 275-291.

- [285] Brouard Y., Belayachi N., Hoxha D., Ranganathan N., Méo S. (2018). Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation. *Construction and Building Materials*, vol.161, pp. 196-207.
- [286] Hussain A., Calabria-Holley, J., Lawrence M., Jiang Y. (2019). Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. *Construction and Building Materials*, vol.212, pp. 561–568,
- [287] Qu Z.Y., Yu Q.L. (2018). Synthesizing super-hydrophobic ground granulated blast furnace slag to enhance the transport property of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 176–186.
- [288] Jaya prithika A., Sekar S.K. (2016) Mechanical and fracture characteristics of Ecofriendly concrete produced using coconut shell, ground granulated blast furnace slag and manufactured sand. *Construction and Building Materials*, vol.103, pp. 1-7.
- [289] Traore Y.B., Messan A., Hannawi K., Gerard J., Prince W., F Tsobnang. (2018). Effect of oil palm shell treatment on the physical and mechanical properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 452-460.
- [290] Toledo Filho R. D., Scrivener K., England G.L., Ghavami K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, vol 22, pp. 127-143.
- [291] Behim M., Cyr M., Habita MF., Clastres P. (2003). Hauts-Fourneaux d'El Hadjar : Réactivité du laitier granulé, *Revue, Ciments, Bétons, Plâtres, chaux* n°860, Algérie.
- [292] Toledo Filho, R.D., Ghavami K., England G.L., Scrivener K. (2003). Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, vol 25, pp. 185-196.
- [293] Nicolas B. (2012). Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, France.
- [294] Elbakkori A., Ezbakhe H., Ajzoul T., Elbouarbi A. (2005). Thermo-mechanical study of concrete with cork and olive waste: in 12th Thermal international days. Tétouan, Morocco.
- [295] Limama A., Zerizer A., Quenard D., Sallee H. (2016). Abdelkrim Chenak. Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation. *Energy and Buildings*, vol. 116 pp. 89-95.
- [296] Branco FG., Tadeq A., Reis C. (2007). Can cork be used as a concrete aggregate? *International Journal for Housing Science and Its Applications*, vol. 31, No 1, pp.1-11.
- [297] Simoes N., Moreira A., Branco FG. (2007). Effect of natural and expanded granulated cork on strength and thermal behaviour of concrete. XXXV IAHS World Congress on Housing Science- Melbourne.

- [298] Castro I., Simoes N., Tadeu A., Branco, FG. (2011). Acoustic and thermal behaviour of concrete building blocks with cork. In: 6th Dubrovnik conference on sustainable development of energy water and environment systems. Dubrovnik Croatia, 8pp.
- [299] Nguyen L.H., Beaucour A.L., Ortola S., Noumowé A. (2017). Experimental study on the thermal properties of lightweight aggregate concretes at different moisture contents and ambient temperatures. *Construction and Building Materials*, vol. 151, pp.720-731.
- [300] Khedari. J., Nankongnab N., Hirunlabh J., Teekasap S. (2004). New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and Environment*, vol 39, pp. 59-65.

ANNEXE A

Matériaux et essais

A.1. Finesse du laitier de haut fourneau.

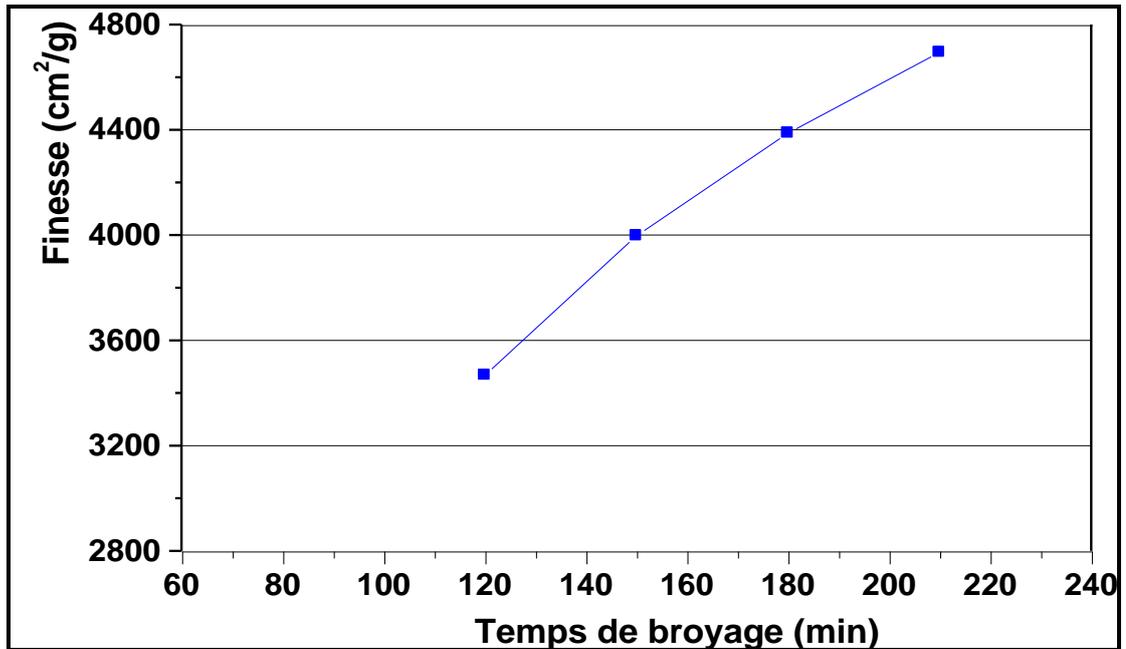


Figure A.2 : Finesse du laitier en fonction du temps de broyage.

A.2. Bécher en verre de laboratoire

Trois formulations de liège ont été utilisées : Ciment/Liège : 1/1. C/L:1/2 et C/L:1/3.

- Pour C/L:1/1. on prend un volume de liège et un volume de ciment (Bécher a)
- Pour C/L:1/2. on prend deux volumes de liège et un volume de ciment (Bécher b)
- Pour C/L:1/3. on prend trois volumes de liège et un volume de ciment (Bécher c)

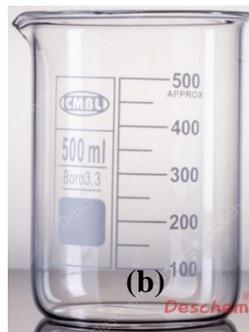


Figure A.2 : Béchiers utilisés pour les essais des composites à base de liège.

ANNEXE B

Résultats et analyses

B.1 Résistances mécaniques des composites ciment-liège expansé

Tableau B.1 : Résistance en compression (MPa) des composites à base de liège expansé.

		Résistances à la compression en cure dans l'eau						
Composites		2 Jours	7 Jours	14 Jours	28 Jours	90 Jours	180 jours	365 jours
C/L :1/1		3.56	5.12	6.65	7.13	6.95	6.81	6.63
Ecart type		0.25	0.09	0.21	0.12	0.39	0.18	0.21
C/L :1/2		1.03	1.5	1.65	2.67	2.49	2.18	2.01
Ecart type		0.17	0.23	0.09	0.12	0.09	0.08	0.11
C/L :1/3		0	0.23	0.83	2.02	1.87	1.57	1.02
Ecart type		0	0.04	0.10	0.12	0.12	0.07	0.12
		Résistances à la compression en cure à l'air du laboratoire						
C/L :1/1		3.28	5.3	7.13	6.67	6.38	6.09	5.82
Ecart type		0.06	0.10	0.15	0.17	0.13	0.12	0.06
C/L :1/2		1.67	2.07	2.61	2.5	2.08	2.01	1.88
Ecart type		0.05	0.17	0.15	0.14	0.13	0.06	0.11
C/L :1/3		0	1.46	1.8	1.5	1.02	0.97	0.68
Ecart type		0	0.06	0.05	0.06	0.10	0.10	0.05
		Résistances à la compression en cure humide et suivi à l'air du labo						
Composites		2 Jours	7 Jours	14 Jours	28 Jours	90 Jours	180 jours	365 jours
C/L :1/1		3.56	5.12	6.65	7.85	8.42	8.21	8.01
Ecart type		0.09	0.07	0.10	0.11	0.11	0.19	0.09
C/L :1/2		1.03	1.5	1.65	4.1	4.75	4.56	4.43
Ecart type		0.17	0.08	0.13	0.22	0.23	0.10	0.05
C/L :1/3		0	0.23	0.83	2.3	2.65	2.42	2.29
Ecart type		0	0.07	0.07	0.08	0.17	0.09	0.08

Tableau B.2 : Résistance en flexion (MPa) des composites à base de liège expansé

		Résistances à la flexion en cure dans l'eau						
Composites		2 Jours	7 Jours	14 Jours	28 Jours	90 Jours	180 jours	365 jours
C/L :1/1		2.75	7.71	9.83	8.52	8.06	7.88	7.65
Ecart type		0.15	0.24	0.10	0.19	0.10	0.17	0.1
C/L :1/2		1.2	2.4	4.89	4.77	4.59	3.8	3.58
Ecart type		0.19	0.11	0.10	0.06	0.06	0.1	0.03
C/L :1/3		0.50	1.5	2.24	4.06	3.86	3.45	3.01
Ecart type		0.06	0.08	0.06	0.11	0.05	0.06	0.10
		Résistances à la flexion en cure à l'air du laboratoire						
C/L :1/1		2.48	5.37	9.83	7.26	6.78	6.22	6.03
Ecart type		0.01	0.03	0.04	0.10	0.02	0.03	0.07
C/L :1/2		1.72	2.83	4.98	4.33	3.72	3.45	3.09
Ecart type		0.04	0.06	0.08	0.02	0.15	0.17	0.12
C/L :1/3		1.5	2.65	4.16	3.4	3.02	2.88	2.71
Ecart type		0.22	0.07	0.10	0.03	0.22	0.14	0.17
		Résistances à la flexion en cure humide et suivi à l'air du labo						
C/L :1/1		2.75	7.71	8.35	9.83	11.03	10.58	9.73
Ecart type		0.10	0.15	0.04	0.14	0.08	0.11	0.25
C/L :1/2		1.20	2.40	4.89	5.99	7.07	6.87	6.53
Ecart type		0.25	0.09	0.02	0.19	0.03	0.13	0.06
C/L :1/3		0.50	1.50	2.24	3.83	4.16	3.97	3.4
Ecart type		0.12	0.19	0.10	0.17	0.12	0.13	0.08

B.3 Résistances mécaniques des composites ciment-liège- laitier

Résistances à la compression en cure dans l'eau et suivi à l'air du labo							
Composites C/L :1/3	2 Jours	7 Jours	14 Jours	28 Jours	90 Jours	180 jours	365 jours
15% laitier	0.10	0.89	1.35	2.20	2.38	2.66	2.58
Ecart type	0.01	0.05	0.13	0.15	0.15	0.19	0.13
30% laitier	0.00	1.35	1.99	2.89	3.30	3.52	2.92
Ecart type	0.00	0.02	0.05	0.15	0.12	0.15	0.09
50% laitier	0.00	1.05	1.51	2.45	2.76	3.15	2.67
Ecart type	0.00	0.05	0.12	0.16	0.19	0.15	0.02
Résistances à la flexion en cure dans l'eau et suivi à l'air du labo							
15% laitier	0.27	1.95	2.89	4.25	4.47	4.76	4.55
Ecart type	0.13	0.15	0.09	0.15	0.21	0.06	0.13
30% laitier	0.10	3.01	3.75	4.91	5.12	5.36	5.03
Ecart type	0.03	0.17	0.13	0.13	0.25	0.24	0.25
50% laitier	0.25	2.64	3.35	4.67	4.88	5.03	4.92
Ecart type	0.03	0.12	0.17	0.25	0.21	0.16	0.15